

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SECADOR TIPO *SPRAY-DRYER* PARA
LA PULVERIZACIÓN DE HIDROLIZADOS DE MALTODEXTRINAS Y
GLUCOSA PRODUCIDOS A PARTIR DE ALMIDÓN DE YUCA.**

**JOHN FREDY ANTURY DEVIA
ANDREA CAROLINA CUBILLOS OÑATE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2016

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SECADOR TIPO *SPRAY-DRYER* PARA
LA PULVERIZACIÓN DE HIDROLIZADOS DE MALTODEXTRINAS Y
GLUCOSA PRODUCIDOS A PARTIR DE ALMIDÓN DE YUCA.**

**JOHN FREDY ANTURY DEVIA
ANDREA CAROLINA CUBILLOS OÑATE**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Químico**

**Director:
Prof. CARLOS JESÚS MUVDI NOVA
Ingeniero químico, M.Sc., Ph. D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2016

*Quiero agradecer primero a Dios por llenarnos de sabiduría,
perseverancia e inteligencia para alcanzar esta meta.*

A mi familia Nancy Devía, Leidy Montoya, Temilde Quitian y Paola Santos por brindarme apoyo incondicional, amor y fuerza durante toda mi formación académica.

A mis amigos más cercanos Carlos Cacerez, Harold Cuello, Juan Beltran, Jefferson Ruiz, Juan Bonilla y Harold Valbuena por la convicción que tuvieron en mí durante todo este proceso.

A mi amigo Cristian Barrios estudiante de ingeniería mecánica que durante este proceso nos colaboró en el diseño y modificaciones del equipo.

A mi compañera de tesis Andrea Cubillos con quien realicé este proyecto y me brindó apoyo y motivación.

John Fredy Antury Devía

A Dios, por su respaldo, por darme la sabiduría y la fuerza necesaria para culminar este proyecto.

A mi abuela por sus dulces palabras, su apoyo y su amor incondicional, a mi papá por su paciencia y soporte, a mi hermana por sus palabras de aliento y graciosos comentarios.

A mi familia en general quienes me vieron crecer durante esta etapa de mi vida, brindándome ánimos, fuerza y buenos deseos.

A todos mis amigos quienes recorrieron este camino conmigo, especialmente a Juan y a John quienes siempre estuvieron a mi lado.

Andrea Cubillos Oñate

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento a:

Dios, por bendecirnos día a día en esta experiencia.

La familia y amigos por su acompañamiento incondicional.

Al profesor Carlos Muvdi por sus enseñanzas y formación integral.

A la Universidad Industrial de Santander que fue clave durante nuestro proceso de formación.

A la empresa Promitec Santander y Colciencias por su cooperación.

Al laboratorio CICTA por aceptarnos y su colaboración durante este proceso.

A las empresas externas que durante el desarrollo del proyecto nos brindaron su ayuda.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. METODOLOGÍA	23
1.1 ETAPA 1. DISEÑO CONCEPTUAL DEL SECADOR	23
1.2 ETAPA 2. DISEÑO DEL SECADOR A PARTIR DE LOS REQUERIMIENTOS ESTABLECIDOS	24
1.3 ETAPA 3. IMPLEMENTACIÓN Y USO DEL PILOTO <i>SPRAY-DRYER</i>	24
2. ANÁLISIS Y RESULTADOS	26
2.1 PRESENTACIÓN DEL DISEÑO CONCEPTUAL DEL SECADOR	26
2.2 DISEÑO DEL PILOTO A PARTIR DE LOS REQUERIMIENTOS ESTABLECIDOS	27
2.2.1 Presentación de resultados obtenidos en las pruebas iniciales	27
2.2.2 Diseño del piloto	29
2.3 IMPLEMENTACIÓN DEL PILOTO	38
3. CONCLUSIONES	43
4. RECOMENDACIONES	45
BIBLIOGRAFÍA	46
ANEXOS	51

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Condiciones de operación para los hidrolizados de glucosa y maltodextrina.	25
Tabla 2. Viscosidades en [cP] en función de °Brix y de la temperatura.	28
Tabla 3. Ecuaciones para el dimensionamiento del piloto.	29
Tabla 4. Especificaciones para las variables de proceso obtenidas del diseño del <i>Spray-Dryer</i> .	36
Tabla 5. Dimensiones de la cámara de secado y pulverizador según las ecuaciones de diseño.	37
Tabla 6. Variables de proceso obtenidas según condiciones establecidas en la Tabla 1.	39
Tabla 7. Valores de valores de Temperatura de bulbo seco, % HR, humedad absoluta y Entalpía para los puntos 1, 2 y 3.	53

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Representación del funcionamiento de diferentes tipos de pulverizador.	16
Figura 2. Esquema general de un equipo <i>Spray-Dryer</i> .	18
Figura 3. Diagrama metodológico.	23
Figura 4. Zonas del secador <i>Spray-Dryer</i> .	26
Figura 5. a) Representación gráfica del esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación para los hidrolizados 20°Brix. b) Variación de la viscosidad en función de °Brix.	28
Figura 6. Parámetros adimensionales de diseño para un ciclón tipo <i>Stairmand</i> (alta eficiencia).	32
Figura 7. Diagrama de la secuencia del diseño del piloto.	33
Figura 8. Disco de paletas planas.	34
Figura 9. Cámara de secado y sistema de pulverización del secador <i>Spray-Dryer</i> .	35
Figura 10 a) Piloto de Secado tipo <i>Spray Dryer</i> . 10 b) Sistema de alimentación.	38
Figura 11. a) Glucosa pulverizada. b) comparación entre el reconstituido en agua a 40°Brix realizado con la glucosa en polvo obtenida y una solución a 40°Brix preparada a partir de jarabe no clarificado suministrado por la empresa Promitec Santander S.A.S.	41

- Figura 12. a) Maltodextrina pulverizada. b) Maltodextrina comercial. c) 41
comparación entre el reconstituido en agua a 40°Brix realizado con la
maltodextrina en polvo obtenida y una solución a 40°Brix preparada a
partir de jarabe no clarificado suministrado por la empresa Promitec
Santander S.A.S.
- Figura 13. Carta psicométrica de Bucaramanga con la ubicación de los 53
puntos 1, 2 y 3 para el primer experimento.

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Materiales y métodos	52
Anexo B. Protocolo de encendido y apagado	53
Anexo C. Ejemplo del método utilizado en la determinación de las pérdidas de energía	54

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SECADOR TIPO *SPRAY-DRYER* PARA LA PULVERIZACIÓN DE MALTODEXTRINAS Y GLUCOSA PRODUCIDAS A PARTIR DE ALMIDÓN DE YUCA*.

AUTORES: John Fredy Antury Devia; Andrea Carolina Cubillos Oñate**

PALABRAS CLAVE: *Spray-Dryer*, diseño, dimensionamiento, escala laboratorio, maltodextrinas, glucosa.

DESCRIPCIÓN:

El trabajo actual propone el diseño, dimensionamiento e implementación de un secador tipo *Spray –Dryer* escala laboratorio, para la pulverización de soluciones de glucosa y maltodextrina.

Las dimensiones obtenidas de la cámara de secado fueron de 0,6 m de diámetro y 0,9 m de altura, con sistema de pulverización centrífugo, compuesto por un motor de 33 000 rpm, disco rotatorio de paletas planas de 0,14 m de diámetro y un ciclón como sistema de recuperación de polvo de 0,09 m de diámetro y 0,386 m de altura.

Para el secado exitoso de las soluciones mencionadas, se encontraron los siguientes intervalos en las variables de entrada donde los polvos presentaron humedades de 3 a 5 % y solubilidad de 96 a 99 %: temperatura de aire de entrada: 125 a 135 °C; temperatura de entrada de las soluciones: 7 a 60 °C (7 °C para glucosa y entre 7 a 60 °C para maltodextrinas); flujo de alimentación de aire: $54 \frac{m^3}{h}$; flujo de alimentación de las soluciones: 15 a $25 \frac{mL}{min}$ ($18 \frac{mL}{min}$ para glucosa y $15-25 \frac{mL}{min}$ para maltodextrinas). Finalmente se encontró que se puede secar glucosa bajo ciertas condiciones sin utilizar ayudantes de secado (debido a su dificultad para secar en este tipo de equipos) y los polvos de maltodextrinas no presentaron diferencias significativas en comparación con la comercial.

* Trabajo de grado

**Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Director: Carlos Jesús Muvdi Nova. Ingeniero Químico, M. Sc., Ph. D.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A *SPRAY-DRYER* FOR SPRAYING MALTODEXTRINS AND GLUCOSE PRODUCED FROM CASSAVA STARCH*.

AUTHORS: John Fredy Antury Devia; Andrea Carolina Cubillos Oñate**.

KEYWORDS: *Spray-Dryer*, design, sizing, laboratory scale, maltodextrin, glucose.

DESCRIPTION:

The present work proposes the design, sizing and implementation of the laboratory scale *Spray Dryer* for the atomizing fluids (glucose and maltodextrin) produced from cassava starch.

The dimensions obtained of the drying chamber were 0,6 m of diameter and 0,9 m of height, with rotary atomizing system of 33 000 rpm, wheel atomizer (flat paddles) of 0,14 m of diameter and a cyclone like efficient recovery system of 0,09 m of diameter and 0,386 of height.

For the successful drying of the fluids previously mentioned we found the following intervals in the input variables where powders displayed a moisture from 3 to 5 % and solubility from 96 to 99 %: feeding temperature of air: 125 to 135 °C; feeding temperature of fluids: 7 to 60 °C (7 °C for glucose and 7 to 60 °C for maltodextrin); feeding flux of air: $54 \frac{m^3}{h}$; feeding flux of fluids: 15 to 25 $\frac{mL}{min}$ (18 $\frac{mL}{min}$ for glucose and 15 to 25 $\frac{mL}{min}$ for maltodextrin). Finally, we found that glucose can get dry under specific conditions without use drying assistant (because glucose is difficult to dry in these type of machines) and the physical characteristics of maltodextrin powders were not significantly different compared to the commercial ones.

* Bachelor Thesis

**Physical and Chemical Engineering's Faculty. School of Chemical Engineering. Food Science and Technology Research Center. Advisor: Carlos Jesús Muvdi Nova, Chemical Engineering, M. Sc., Ph. D.

INTRODUCCIÓN

A partir de la hidrólisis parcial del almidón de yuca es posible obtener maltodextrinas (oligosacáridos que pueden contener hasta 9 unidades de glucosa) y glucosa (Bettín *et al.*, 2010), los cuales son ampliamente utilizados en la industria alimenticia (Madene *et al.*, 2006). Las maltodextrinas se usan en la reducción del contenido de grasa de algunos alimentos, ya que simulan la viscosidad y sensación bucal de los aceites (Vaclavik, 2002), además se emplean para retener y proteger compuestos volátiles, como portadores en la encapsulación de aromas y como estabilizantes de emulsiones (Madene *et al.*, 2006) y la glucosa se utiliza en la elaboración de bebidas refrescantes, conservas de frutas, repostería, etc. (Rebollar, 1991).

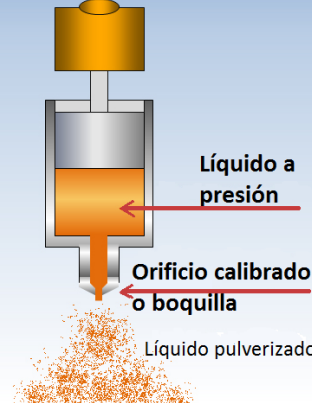
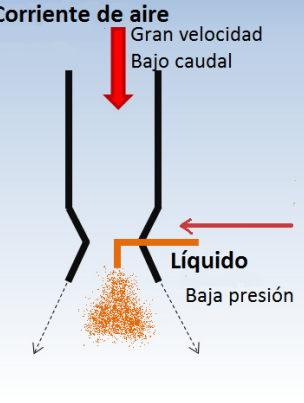
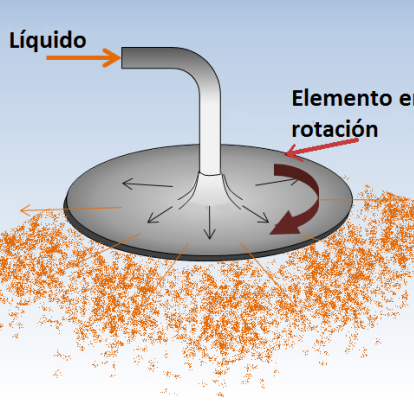
Debido a su gran importancia a nivel industrial, es necesario emplear técnicas que conserven estos hidrolizados, así como también técnicas que faciliten su transporte y disolución al momento de ser agregados a los alimentos. Uno de estos métodos de conservación consiste en disminuir su actividad acuosa mediante procesos de secado. Actualmente, se emplean tres técnicas en la obtención del producto en polvo a partir de disoluciones y suspensiones, las cuales son: liofilización, secador de rodillos o de tambor y el *Spray-Dryer* (Yanza, 2003).

El *Spray-Dryer* presenta varias ventajas sobre las técnicas de secado de rodillos y la liofilización. Con relación al primero, se pueden mencionar que los tiempos de exposición del producto a altas temperaturas son menores, lo que disminuye la degradación térmica del producto (oscilan entre 5-30 s para el *Spray-Dryer* y para el secador de rodillos estos tiempos pueden ser de hasta 5 min según Jiménez (2011)). Otra ventaja tiene que ver con la característica porosa del producto pulverizado, que asegura su rápida disolución en agua (López, 2010). En relación a la liofilización, presenta mayor productividad y menores costos de producción (Caez *et al.*, 2012). El *Spray-Drying* es un método de evaporación en el cual se

retira todo el líquido de una mezcla (sólido no volátil más líquido, en general agua) (López *et al.*, 2006). Esta técnica se puede dividir en tres etapas:

- La primera consiste en la pulverización en finas gotas de la solución que se va a secar. La cual se puede realizar de forma hidráulica, neumática o centrífuga. En la Figura 1 se muestra la representación del funcionamiento de cada uno de los tipos de pulverización mencionados anteriormente.

Figura 1. Representación del funcionamiento de diferentes tipos de pulverizadores.

Pulverizador Hidráulico	Pulverizador Neumático	Pulverizador Centrífugo
 <p>Líquido a presión</p> <p>Orificio calibrado o boquilla</p> <p>Líquido pulverizado</p>	 <p>Corriente de aire</p> <p>Gran velocidad</p> <p>Bajo caudal</p> <p>Líquido</p> <p>Baja presión</p>	 <p>Líquido</p> <p>Elemento en rotación</p>
<p>El líquido es sometido a presión, haciéndolo salir por un orificio calibrado o boquilla</p>	<p>El líquido el cual fluye por una tubería a baja presión, choca con una corriente de aire a gran velocidad.</p>	<p>El líquido es sometido a las fuerzas de reacción generadas por un elemento en rotación.</p>

Fuente: Adaptado de (<http://www.argeninta.org.ar/pdf/Pulverizacion%20-%20Equipos%20manuales%20Lujan%20.pdf>).

En la pulverización hidráulica, el líquido puede ser impulsado por una bomba manual o mecánica y el tamaño de las gotas depende de la presión (a la que es sometida el líquido) y al tipo de boquilla utilizada; entre mayor presión menor será el tamaño de la gota. En la pulverización neumática, el líquido es impulsado por una bomba de baja presión o por gravedad y el aire es impulsado por una turbina. Esta pulverización permite producir una gota muy fina y el tamaño de las gotas depende de la relación entre el flujo de aire y líquido (Fundación Argentina). En la pulverización centrífuga, el tamaño de partícula depende de la velocidad del disco,

el número y la altura de las paletas; el tamaño de las gotas es inversamente proporcional al número de paletas y a la velocidad del disco y es directamente proporcional a la altura de las paletas, es decir que a menor altura de paletas el tamaño de partículas será menor (Masters, 1991).

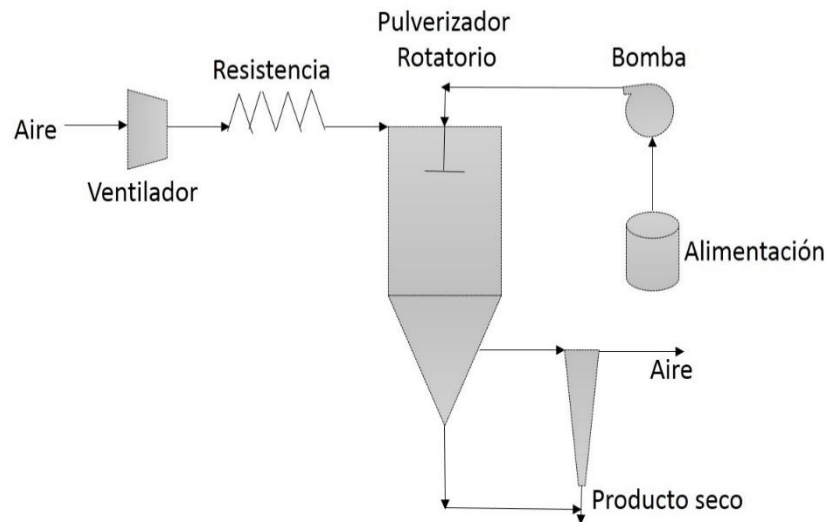
La elección del tipo de pulverización depende de la calidad de gota que se quiera obtener y del tipo de líquido que se desee pulverizar. Los pulverizadores centrífugos, son usados para obtener un producto con un tamaño de partícula fino a medio-grueso, de aproximadamente 20-150 μm . Para la obtención de un producto grueso a nivel industrial (150-300 μm), generalmente se utilizan pulverizadores hidráulicos (Masters, 1991). Las ventajas de los pulverizadores centrífugos sobre los hidráulicos, es que éstos son muy flexibles, permiten tener un fácil control del tamaño de partícula, trabaja con sistemas de baja presión, se requiere de un solo atomizador para altas y bajas capacidades y el tamaño de partícula es independiente de la velocidad de alimentación. Las desventajas que presenta, es que el líquido tiene una mayor tendencia a depositarse en las paredes y necesita una mayor área de flujo; de ahí que para obtener partículas secas grandes, se requiere de una cámara de secado de gran diámetro para que estas partículas entren en contacto con el aire el tiempo suficiente para que se sequen y no se depositen sobre las paredes de la cámara (Masters, 1991).

- La segunda etapa del *Spray-Dryer* radica en calentar las gotas por medio de la inyección de un gas caliente (generalmente aire), con el fin de formar partículas sólidas porosas. La temperatura del gas oscila normalmente entre 100 y 200 °C y el tiempo de exposición de cada gota se encuentra entre 5 y 30 s (López, 2010). El sistema puede ser co-corriente o contra corriente, dependiendo de la entrada del gas y de la alimentación.
- Finalmente, la tercera etapa en el secador *Spray-Dryer*, consiste en la recuperación del producto seco. Para esto se puede utilizar un ciclón o secuencia de ciclones, filtro bolsa, precipitador electrostático o filtro húmedo. Además, el

secador puede ser de ciclo abierto o ciclo cerrado, esto depende de si se re-utiliza el aire usado inicialmente (ciclo cerrado) o no (ciclo abierto) (Master, 1991).

En la Figura 2 se muestra el esquema general de un equipo *Spray-Dryer* propuesto por Shabde (2006).

Figura 2. Esquema general de un equipo *Spray-Dryer*



Fuente: Shabde (2006)

Según Shabde (2006), un equipo *Spray-Dryer* consta de:

- Una cámara de pulverización de geometría cilindro-cono: La alimentación del fluido se ubica en la parte superior donde se encuentra el sistema pulverizador (hidráulico, centrífugo o neumático). En esta parte también se sitúa la entrada de aire cerca a la boquilla de alimentación de líquido. El aire debe tener una temperatura superior a la del líquido y baja humedad relativa para poder secar las finas gotas de líquido. La sección inferior (la parte cónica) tiene una salida para remover aire y partículas pulverizadas.
- Una resistencia eléctrica encargada de calentar el aire requerido para el secado.
- Un ventilador o soplador para impulsar el aire a través del sistema.

- Una bomba para alimentar el líquido al pulverizador.
- Un ciclón, para separar el aire húmedo de las partículas sólidas obtenidas, las cuales serán recogidas en un colector en la parte inferior del ciclón.

Las características de un producto secado por un equipo *Spray-Dryer* (humedad, temperatura, tamaño de partícula y eficiencia) se ven influenciadas por las variables de proceso como el caudal de entrada, caudal de aire caliente, contenido de sólidos, tipo de solución a pulverizar, temperatura y humedad de aire de entrada.

En la actualidad, la mayoría de investigaciones relacionadas con *Spray-Drying* se enfocan en el estudio del efecto de estas variables sobre las características del pulverizado obtenido. También existen varios trabajos enfocados en la optimización e innovación del proceso de *Spray-Drying*, ya sea generando nuevos productos de consumo o configuraciones diferentes en el secado (Cortes *et al.*, 2015) (Ferrari *et al.*, 2012) (Diazaji *et al.*, 2015) (Adzahan *et al.*, 2015) (Erbay *et al.*, 2015) (Jayasundera *et al.*, 2014). Los trabajos encontrados en la literatura enfocados al diseño de un secador tipo *Spray-Dryer* fueron reportados entre los años 2003-2009 (Martínez, 2009) (Álvarez *et al.*, 2006) (Álvarez, 2005) (Yanza, 2003); lo que indica que en la actualidad, el estudio de las variables sobre el producto prima sobre el diseño del equipo.

Sandoval *et al.* (2014) estudiaron la influencia de las condiciones de almacenamiento del polvo de uchuva obtenido mediante *Spray-Drying*, con el fin de aumentar el aprovechamiento de esta fruta en Colombia a nivel industrial. Obtuvieron como resultado que el producto puede almacenarse a una temperatura de 20°C (sin vacío) durante 6 meses. Souza *et al.* (2015) estudiaron el efecto de dos variables, la temperatura de entrada del aire y la concentración en maltodextrina (agente que mejora el proceso de secado), en la obtención de pigmentos en polvo a partir de subproductos de la vinificación de la uva borbo. Ellos obtuvieron que el contenido de humedad y la retención de antiocianina se

ven influenciados por las dos variables, pero la concentración de maltodextrina influye en mayor proporción en la higroscopicidad y en el color del producto, de esta forma las muestras que contenían maltodextrina presentaban bajo contenido de humedad, baja higroscopicidad, alta solubilidad y un color estable. Jayasundera & Kalatunga (2014) estudiaron el efecto de la concentración de una solución agua/melaza de coco/maltodextrina en 3 diferentes formulaciones (30%:20%:50%, 35%:15%:50% y 40%:10%:50%), obteniendo como resultado que la formulación 35%:15%:50% produjo la mejor recuperación del polvo. Dizaji *et al.* (2015) utilizaron una configuración diferente a la tradicional para la obtención de té en polvo. En ese trabajo se analizaron la temperatura de los lechos (130, 140 y 150°C), la velocidad del flujo de alimentación (10, 20 y 30 L/h) y la velocidad de rotación del pulverizador (7 000, 12 000 y 16 000 rpm) como variables independientes, concluyendo que el polvo obtenido a 150°C presentaba las mejores propiedades en comparación al obtenido a las otras temperaturas.

En la literatura consultada, se encuentra reportado el diseño de un *Spray-Dryer* con pulverizador centrífugo para hidrolizados al 40% de maltodextrina (Martínez, 2009), pero no se encontraron estudios relacionados con el efecto de variables independientes, tales como: flujo y temperatura de la alimentación, temperatura de entrada del aire, entre otros, sobre el producto obtenido; igualmente, no se presentan las variables de mayor influencia en la pulverización de hidrolizados de glucosa y maltodextrina. Por esta razón, Promitec Santander S.A.S, empresa especializada en la transformación y comercialización de productos derivados del almidón de yuca, se encuentra interesada en la construcción del piloto *Spray-Dryer*, esto con el fin de evaluar su efectividad y a su vez obtener datos preliminares acerca de la funcionalidad del equipo en la pulverización de hidrolizados de maltodextrina y glucosa.

A partir de lo mencionado anteriormente, el objetivo de este trabajo fue diseñar e implementar un secador tipo *Spray-Dryer* para trabajar a escala de laboratorio, con el fin de determinar condiciones de operación para el secado de hidrolizados de

glucosa y maltodextrina. Para alcanzar este Objetivo general se diseñó conceptualmente un secador tipo *Spray-Dryer* a partir de características reportadas en la literatura, luego se determinaron matemáticamente las especificaciones del secador a partir de los requerimientos establecidos para su uso a escala laboratorio y por último se implementó el piloto construido para la pulverización de hidrolizados de glucosa y maltodextrina a 20 y 40 °Brix, producidos por la empresa Promitec Santander S.A.S.

El estudio realizado en este trabajo se encuentra enmarcado dentro del proyecto de Colciencias titulado " Aumento de la productividad de concentrados de jarabes de glucosa obtenidos a partir de hidrolizados de almidón de yuca por métodos no convencionales de concentración" financiado por Colciencias, la Universidad Industrial de Santander y la empresa PROMITEC SANTANDER S.A.S.

Para la secuencia de los cálculos es necesario introducir las siguientes variables y constantes para dimensionar el equipo.

G_3 –Flujo másico de aire.

X_{H1} -Humedad en base seca de entrada de sólidos.

X_{H2} -Humedad en base seca de salida de sólidos.

X_{H3} -Humedad en base seca de entrada de aire.

X_{H4} -Humedad en base seca de salida de aire.

S_1 -Flujo másico de sólidos.

ΔT –Delta de temperaturas.

ΔT_{log} –Delta logarítmico de temperaturas.

T_1 -Temperatura de entrada solución alimentada.

T_2 -Temperatura de salida de polvo.

T_3 -Temperatura de salida de aire.

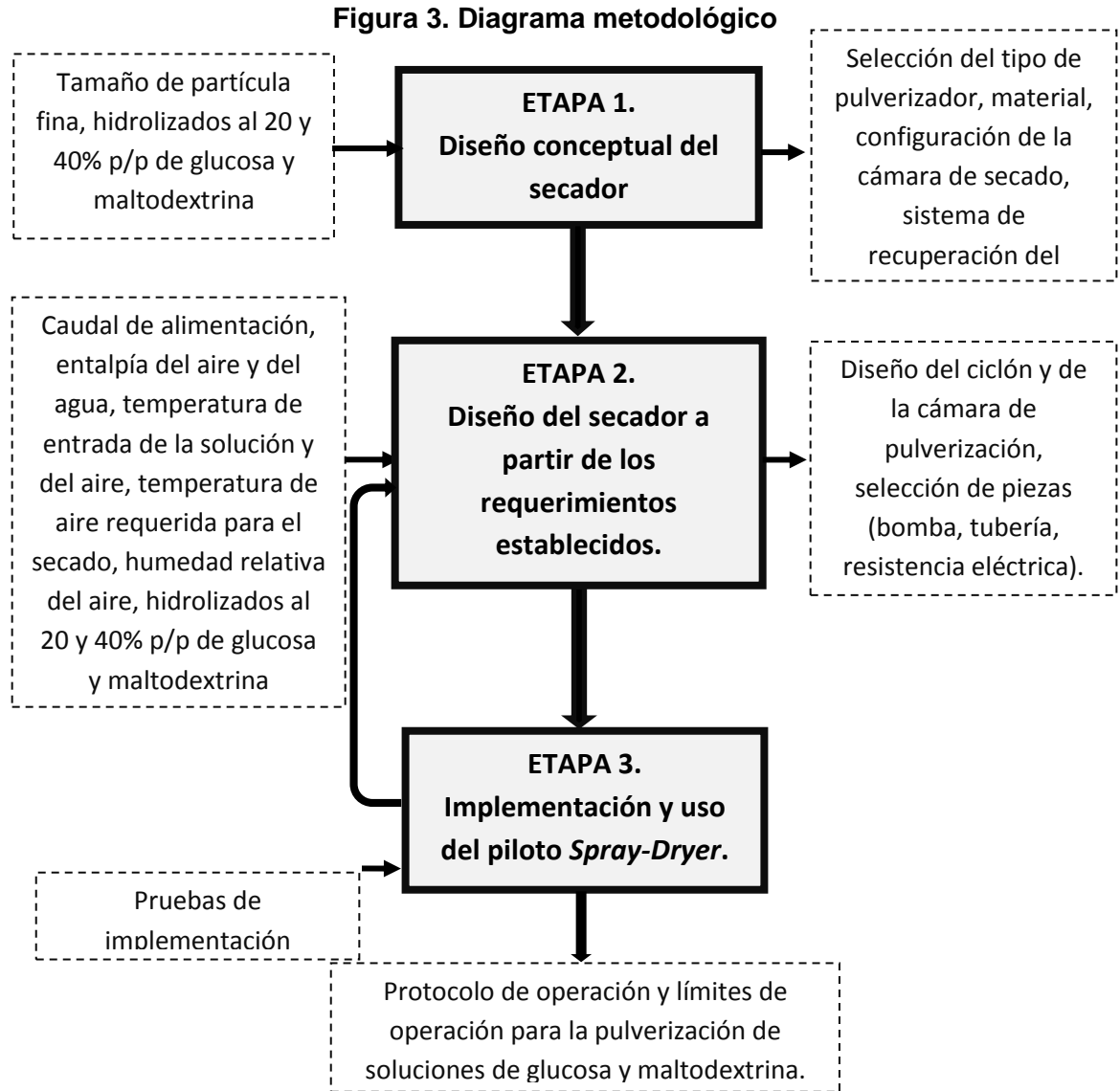
T_4 -Temperatura de entrada de aire desgastado.

T_{ac} -Temperatura crítica del aire.

T_{sc} -Temperatura crítica de la solución

1. METODOLOGÍA

A continuación, en la Figura 3 se presenta el diagrama metodológico propuesto para cumplir con dichos objetivos.



1.1 ETAPA 1. DISEÑO CONCEPTUAL DEL SECADOR

A partir de la revisión bibliográfica realizada, se definió el principio de funcionamiento de cada una de las zonas que componen un secador tipo *Spray-*

Dryer, es decir, sistema de pulverización, cámara de secado y recuperación del sólido pulverizado (disposición final)

1.2 ETAPA 2. DISEÑO DEL SECADOR A PARTIR DE LOS REQUERIMIENTOS ESTABLECIDOS

Primeramente, se definió la reología de los hidrolizados a 20, 30, 40, 50 y 60% p/p de glucosa y maltodextrina, a diferentes temperaturas entre 23 y 60°C, con el fin de saber qué clase de fluido es (newtoniano o no newtoniano). Para esto se empleó el equipo *Brookfield* que se encuentra en el Laboratorio de la Escuela de Ingeniería Química-UIS. Así mismo, se determinó la humedad y contenido de sólidos presentes en cada una de las muestras. Para el dimensionamiento de cada zona del secador, se utilizaron las ecuaciones y relaciones reportadas en la literatura. Con ellas se creó un programa en Matlab®2011a, con el fin de agilizar y minimizar los errores en las operaciones matemáticas. A partir de los datos obtenidos, se realizó en la herramienta gráfica SolidWorks®2014, el diseño de las piezas principales del piloto *Spray-Dryer*: Cámara de secado, sistema de pulverización y sistema de recuperación de sólido. Además, se llevó a cabo la escogencia de las diferentes piezas auxiliares tales como: tuberías y sistema de alimentación de los hidrolizados. Los planos que surgieron del diseño en SolidWorks®2014 fueron utilizados por una empresa externa, para la elaboración de las piezas requeridas para el equipo.

Para el sistema de calentamiento se utilizó una turbina de flujo radial, motor monofásico de 1/3 HP, se escogió la temperatura mínima requerida a la salida del ducto (100°C) y una empresa externa especializada en resistencias y equipos eléctricos se encargó de la construcción.

1.3 ETAPA 3. IMPLEMENTACIÓN Y USO DEL PILOTO *SPRAY-DRYER*

En esta etapa se realizaron pruebas de funcionamiento, en las cuales se ajustó el equipo en un intervalo de trabajo. Además, se creó un protocolo de uso y

mantenimiento del equipo, en donde se especifica la forma adecuada de operarlo. El desarrollo experimental no se pudo realizar utilizando un diseño de experimentos debido a la necesidad de modificar más de una variable para asegurar la obtención de producto seco, especialmente cuando se secaban las soluciones de glucosa. Por esta razón se establecieron condiciones de operación en las cuales el proceso fuera eficaz para el secado del producto, las cuales son presentadas en la Tabla 1. Se eligió la concentración de 20 °Brix debido a las condiciones establecidas para el proyecto de Colciencias y 40 °Brix por las pruebas de caracterización realizadas.

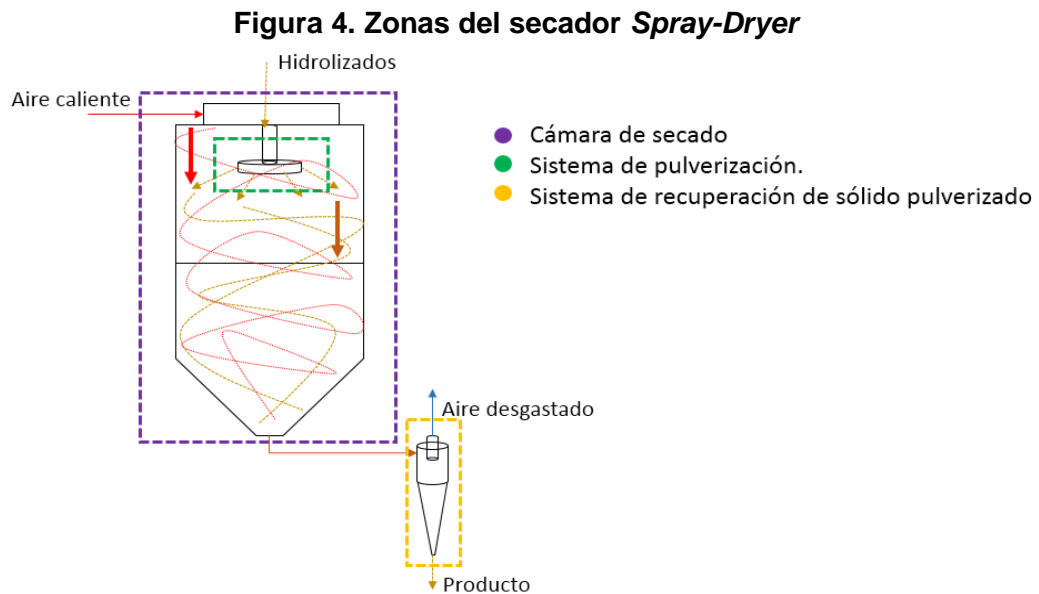
Tabla 1. Condiciones de operación para los hidrolizados de glucosa y maltodextrina.

Variables de entrada	Glucosa				Maltodextrina			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Concentración de alimentación [°Brix]	20	20	40	40	40	40	40	40
Temperatura aire, set point [°C]	130	140	130	125	130	135	130	130
Temperatura de la solución [°C]	7	7	7	7	7	7	26	53
Caudal alimentación $\frac{mL}{min}$	18	18	18	18	15	15	15	25
Duración de la prueba [min]	6,5	7,1	6,6	6,03	6,8	7,17	7,43	6,55

2. ANÁLISIS Y RESULTADOS

2.1 PRESENTACIÓN DEL DISEÑO CONCEPTUAL DEL SECADOR

En la Figura 4 se representan las zonas del secador tipo *Spray-Dryer*. La disposición del secador fue de ciclo abierto (sin recirculación de aire), ya que al ser un piloto escala laboratorio las pruebas son cortas (5-10 min) y el flujo de aire y de alimento son bajos ($62,27 \frac{kg}{h}$ y $1 \frac{kg}{h}$, respectivamente).



Fuente: (Martínez, 2009), (Master, 1991)

Cada una de las zonas establecidas se explica a continuación:

Cámara de secado: A partir de la revisión bibliográfica realizada se escogió para la cámara de secado un arreglo co-corriente, flujo rotatorio descendente con pulverizador centrífugo y un solo punto de descarga, como el mostrado en la Figura 4, ya que es uno de los más utilizados a nivel industrial (Yanza, 2003), además de ser el recomendado por Master (1991) para la obtención de un producto de partículas finas (20-80 μm) a escala laboratorio. En adición, con la

configuración en co-corriente las propiedades del producto se conservan más, ya que el producto con mayor humedad es el que está en contacto con el aire que entra a mayor temperatura. Además, se definió que solo hubiera un punto de descarga en la cámara, esto debido al tamaño de partícula manejado (25 μm).

Sistema de recuperación de sólido: Se escogió el ciclón como disposición final, debido a que es el más económico de las tres disposiciones posibles (filtro bolsa, ciclón y precipitador electrostático) (Master, 1991) y presenta eficiencias hasta del 90% (ciclón tipo *Stairmand*) en la remoción de partículas de 5 μm (Echeverri, 2006).

Sistema de pulverización: Se eligió un pulverizador centrífugo, ya que este es ideal para obtener partículas finas a pequeña escala (Master, 1991), también porque son muy flexibles, permiten tener un fácil control del tamaño de partícula, trabaja con sistemas de baja presión y se requiere de un solo pulverizador para altas y bajas capacidades (Master, 1991).

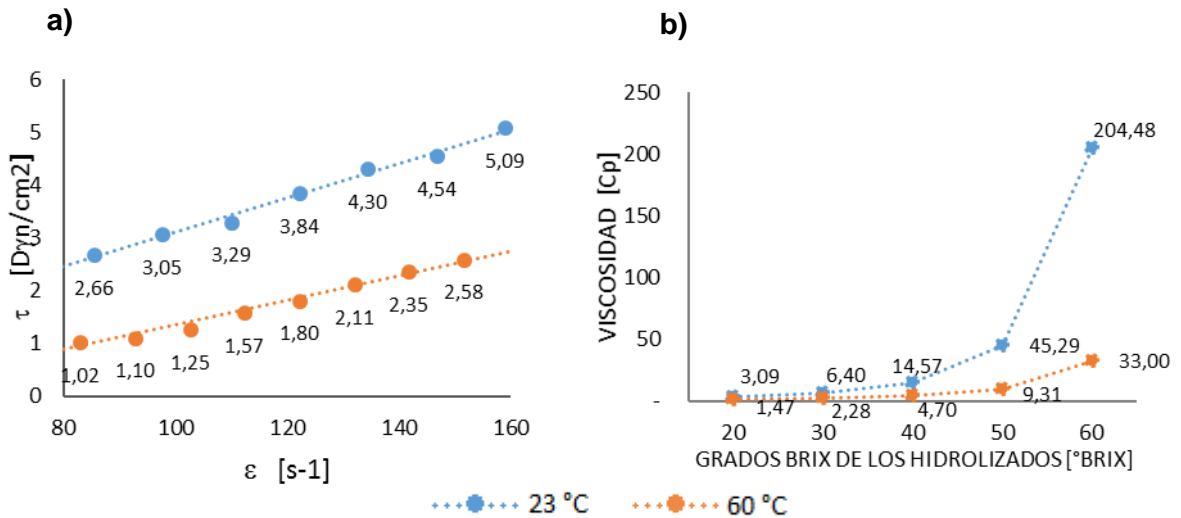
2.2 DISEÑO DEL PILOTO A PARTIR DE LOS REQUERIMIENTOS ESTABLECIDOS

2.2.1 Presentación de resultados obtenidos en las pruebas iniciales.

Humedad: Para los hidrolizados de 20 y 40°Brix se obtuvo una humedad promedio de $79 \pm 0,02\%$ y $59,3 \pm 0,01\%$ respectivamente, lo cual indica que la glucosa y la maltodextrina representan casi en su totalidad los sólidos presentes en las soluciones evaluadas.

Reología: En la Figura 5a) se observan la gráfica del esfuerzo cortante (τ) Vs Velocidad de deformación ($\dot{\epsilon}$) para los hidrolizados de 20°Brix. La Figura 5b) representa la variación de la viscosidad en función de °Brix. Los puntos azules simbolizan los datos obtenidos a 23°C (temperatura ambiente) y en naranja aquellos obtenidos a 60°C.

Figura 5. a) Representación gráfica del esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación para los hidrolizados 20°Brix. b) Variación de la viscosidad en función de °Brix.



Como se puede observar, la viscosidad de la muestra a las dos temperaturas es directamente proporcional a °Brix de cada una. En este caso a mayor °Brix mayor contenido de sólidos, lo que conlleva a una mayor viscosidad. Soluciones con una alta viscosidad dificultan el bombeo hacia el pulverizador, lo cual afecta la velocidad de secado y aunque en la literatura no existe una cantidad de sólidos claramente definida, se encuentran cantidades reportadas en algunos trabajos, siendo 60% la más alta (Fernandes *et al.*, 2008) (Gómez-Cruz *et al.*, 2014). En la Tabla 2 se muestra la viscosidad de las soluciones en función de °Brix y temperatura.

Tabla 2. Viscosidades en [cP] en función de °Brix y de la temperatura.

°BRUX \ Temperatura [°C]	Temperatura [°C]	
	23	60
20	3	1,5
30	6	2,3
40	15	4,7
50	45,3-69	9,3
60	204-224	33-48

A partir de los resultados obtenidos y presentados en la Tabla 2, se puede concluir que las muestras a 20, 30, 40°Brix se comportan como fluidos newtonianos a

temperatura ambiente, pues presentan viscosidad constante; esto no se cumple para las muestras de 50 y 60°Brix, las cuales presentan viscosidad variable. Al aumentar la temperatura a 60°C, la muestra de 50°Brix figura como fluido newtoniano (viscosidad constante), pero la muestra de 60°Brix sigue mostrando un comportamiento no newtoniano a 60°C (viscosidad variable).

Dado que las ecuaciones reportadas en la literatura para el diseño del secador están definidas para fluidos newtonianos, del análisis realizado en el párrafo anterior se concluyó que es posible trabajar con hidrolizados desde 20 a 40 °Brix a temperatura ambiente y hasta 50°Brix a 60°C.

2.2.2. Diseño del piloto. En el diseño de cada una de las partes del piloto se tuvieron en cuenta los balances de masa, energía, ecuaciones de diseño para un pulverizador centrífugo y ciclón de alta eficiencia. Estas ecuaciones son presentadas a continuación en la Tabla 3 y Figura 6 (Masters, 1991; Martínez, 2009; Yanza, 2003 & Echeverri, 2006).

La Figura 7 muestra la metodología para el diseño de la cámara de secado y del pulverizador utilizada durante el desarrollo de este trabajo de grado. La siguiente información se divide en: dimensionamiento del pulverizador, cálculo del recorrido de la gota y dimensionamiento de la cámara de secado siguiendo la secuencia planteada por Martínez (2009) y gracias a un algoritmo programado durante la realización de este proyecto en Matlab®2009a para facilitar los cálculos.

Tabla 3. Ecuaciones para el dimensionamiento del piloto. Fuente: Masters, 1991; Martínez, 2009.

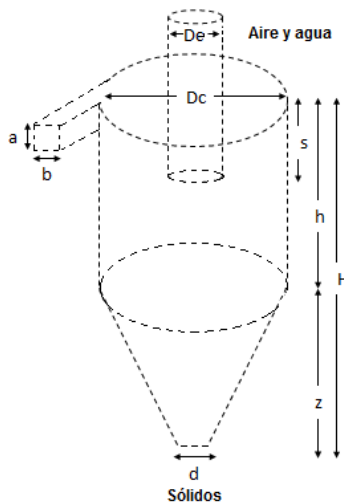
Nombre	Ecuación
Balance de masa (1)	$G_2(X_{H3} - X_{H4}) = S_1(X_{H2} - X_{H1})$
Balance de energía (2)	$S_1(Cp_{sólidos1} + X_{H1} Cp_{H_2O(l)1})\Delta T + G_2(Cp_{aire3} + X_{H3} Cp_{H_2O(v)3})\Delta T + G_2 X_{H3} \lambda = S_1(Cp_{sólidos2} + X_{H2} Cp_{H_2O(l)2})\Delta T + G_2(Cp_{aire4} + X_{H4} Cp_{H_2O(v)4})\Delta T + G_2 X_{H4} \lambda + Q_L$; λ - lamda vaporización
Presión de vapor (Pv) (3)	$P_v = \text{Presión de vapor de saturacion (pvs)} * \text{humedad relativa (fi)}$

Continuación Tabla 3.	
Presión de vapor de saturación (pvs)(4)	$pvs = e^{19.016 - \frac{4064.95}{T+236.5}}$
Humedad de aire(5)	$X_H = 0.62 \left(\frac{P_v}{P_a - P_v} \right); P_a - \text{Presión atmosférica}$
Calor específico agua líquida (6)	$Cp_{agua(l)} = 18.2964 + 47.212 * 10^{-2}T - 133.88 * 10^{-5}T^2 + 1314.2 * 10^{-9}T^3$
Calor específico vapor de agua (7)	$Cp_{agua(v)} = 33.46 + 0.688 * 10^{-2}T + 0.7604 * 10^{-5}T^2 + 3.593 * 10^{-9}T^3$
Calor específico sólidos (8)	$Cp_{ss} = 1.5488 + 1.9625 * 10^{-3}T - 5.9399 * 10^{-6}T^2$
Calor específico aire (9)	$Cp_{aire} = 28.09 + 0.1965 * 10^{-2}T + 0.4799 * 10^{-5}T^2 - 1.965 * 10^{-9}T^3$
Diámetro partícula(D_{vs}) (10)	$D_{vs} = \frac{KM_1^a}{N^b D^c (nh)^d}; M_1 - \text{flujo alimentación } \frac{kg}{h}; N - \text{rpm atomizador}; D - \text{diámetro de disco}; n - \text{\# paletas}; h - \text{altura de las paletas}; K, a, b, c, d \text{ constantes}$
Tiempo de secado (tsec)(11)	$tsec = tc + td$
Conductividad térmica de la película de aire(K_d)(12)	$K_d = 3 * 10^{-8}T_4^2 + 8 * 10^{-5}T_4 + 0.0241$
Tiempo de secado constante(tc) (13)	$tc = \frac{\lambda * \rho_{H_2O} (D_{95}^2 - D_{cri}^2)}{8\Delta T_{log} K_d}; \rho_{H_2O} - \text{densidad agua}$
Tiempo de secado decreciente(td)(14)	$td = \frac{\lambda * \rho_{ss} * D_{95}^2 (X_c - X_{H2})}{12\Delta T_{log2} K_d}; \rho_{ss} - \text{densidad de los sólidos}$
Diámetro crítico(D_{cri})(15)	$D_{cri} = D_{95} * \left(\frac{1161.35}{1038} * \frac{1 + X_{H2}}{1 + X_{H1}} \right)^{\frac{1}{3}}$
(16) Delta de temperaturas logarítmicas (ΔT_{log})	$\Delta T_{log} = \frac{(T_4 - T_2) - (T_{ac} - T_{sc})}{\log \left(\frac{T_4 - T_2}{T_{ac} - T_{sc}} \right)}$

Continuación Tabla 3	
Temperatura del aire en el punto crítico (T_{ac}) (17)	$T_{ac} = \frac{H_{ac} - \lambda * Y_c}{1.005 + 1.884 * Y_c} + 273$
Entalpía de aire en el punto crítico (H_{ac}) (18)	$H_{ac} = \frac{S_1(Cp_{ss} + X_{H1} * Cp_{H_2O(l)}) + G_3(X_{H3} * Cp_{H_2O(v)} + Cp_{aire}) + \lambda G_3 X_{H3} - H_{pc}}{G_3};$
Entalpía de la solución en el punto crítico (H_{pc}) (19)	$H_{pc} = S_1(Cp_{ssc} + X_c * Cp_{H_2O(l)c}); Cp_{ssc} - Cp \text{ sólidos en el punto crítico}; Cp_{H_2O(l)c} - Cp \text{ agua líquida en el punto crítico}$
Humedad de aire en el punto crítico (Y_c) (20)	$Y_c = X_{H3} + \frac{S_1 * (X_{H1} - X_c)}{G_3}$
Humedad en el punto crítico (X_c) (21)	$X_c = \frac{a_p}{\pi * \frac{D_{95}^3}{6} * 1161 * x_{s1}}$
Diámetro de partícula porosa (a_p) (22)	$a_p = \frac{\pi * D_{95}^3 * (1 - x_{s1}) * 1161.15}{6} - a_r$
Diámetro de los poros (a_r) (23)	$a_r = \frac{\pi * (D_{95}^3 - D_{cri}^3) * 1050}{6}$
Delta de temperaturas logarítmicas para el td (ΔT_{log2}) (24)	$\Delta T_{log2} = \frac{(T_{ac} - T_{sc}) - (T_3 - (T_3 - 10))}{\log\left(\frac{T_{ac} - T_{sc}}{T_3 - (T_3 - 10)}\right)}$
Base seca (25)	$Base \text{ seca } (X_H) = \frac{1 - Base \text{ húmeda } (x_s)}{Base \text{ húmeda } (x_s)}$
Diámetro total (D_c) (26)	$D_c = 2 * t_{sec} * \vartheta_{aire}; \vartheta_{aire} - \text{velocidad del aire}$
Diámetro salida de la cámara (D_{con}) (27)	$D_{con} = \frac{D_c}{10}$
Diámetro partícula promedio (D_{95}) (28)	$D_{95} = 1.4 D_{vs}$

Continuación Tabla 3.	
Altura total (H_{total}) (29)	$H_{total} = 1.5 D_c$
Altura cilindro (H_{cil}) (30)	$H_{cil} = H_{total} - H_{cono}$
Altura del cono (H_{cono}) (31)	$H_{cono} = \left(\frac{D_c - D_{con}}{2 * \tan \frac{\pi}{3}} \right)$
Pérdidas de calor (32)	$Q_L = 2A_T \Delta T$
Área total (A_T) (33)	$A_T = A_{cil} + A_{con}$
Área cilindro (A_{cil}) (34)	$A_{cil} = 2\pi \left(\frac{D_c}{2} \right) H_{cil}$
Área cono (A_{con}) (35)	$A_{con} = \pi * \left(\frac{D_c}{2} + \frac{D_{con}}{2} \right) * g$
Generatriz (g) (36)	$g = \sqrt{H_{cono}^2 + \left(\frac{D_c}{2} - \frac{D_{con}}{2} \right)^2}$

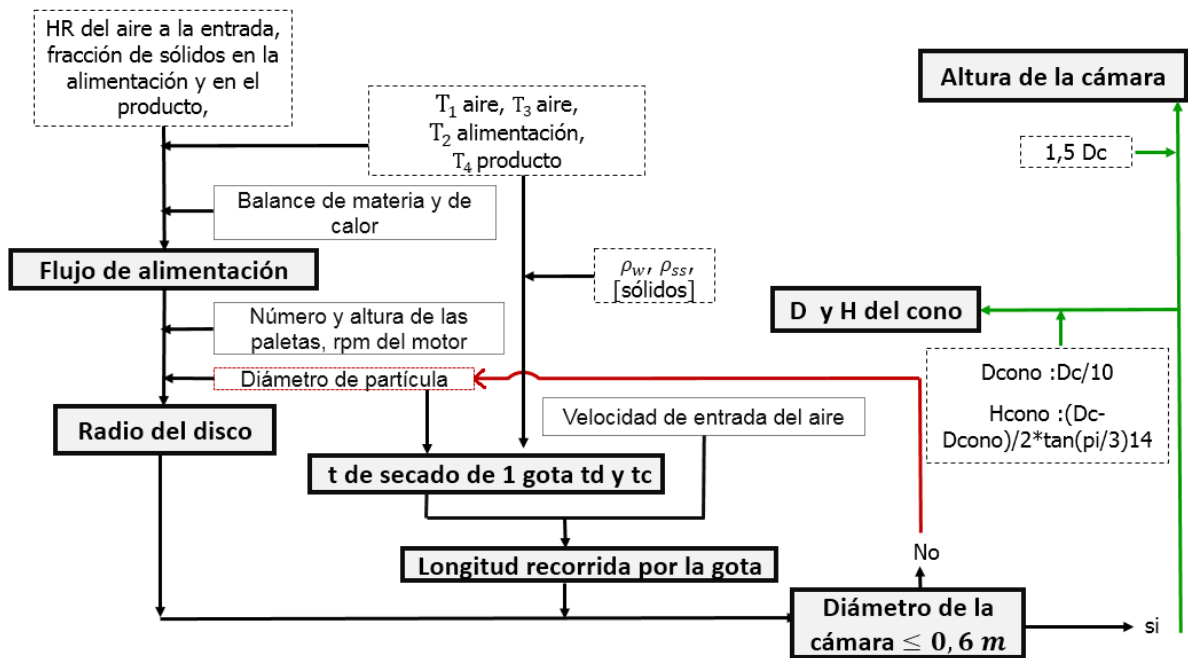
Figura 6. Parámetros adimensionales de diseño para un ciclón tipo *Stairmand* (alta eficiencia).



Dimensión	Relación adimensional	Valor sugerido para un <i>Stairmand</i>
Diámetro de ciclón (D_c)	D_c/D_c	1,0
Altura de entrada (a)	a/D_c	0,5
Ancho de entrada (b)	b/D_c	0,2
Altura de salida (s)	s/D_c	0,5
Diámetro de salida (D_e)	D_e/D_c	0,5
Altura parte cilíndrica (h)	h/D_c	1,5
Altura parte cónica (z)	z/D_c	2,5
Altura total del ciclón (H)	H/D_c	4,0
Diámetro de salida partículas (d)	d/D_c	0,375

Fuente: Echeverri, (2006).

Figura 7. Diagrama secuencia del diseño del piloto.

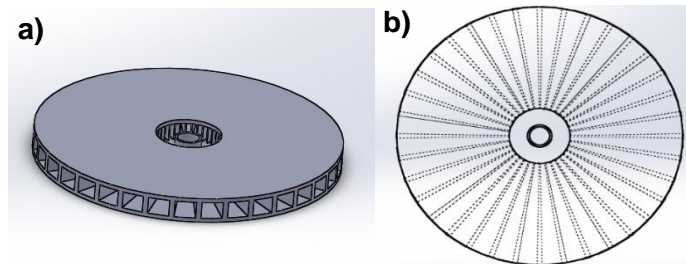


✓ Dimensionamiento del pulverizador: Las variables de entrada fueron las características generales del aire y líquido de alimentación, como: la temperatura de entrada (130°C) y salida (80°C) (Yanza, 2003), humedad relativa (Bucaramanga, HR 80%) y caudal de alimentación (62,27 kg/h) del aire, mientras que para el líquido de alimentación se necesitó el porcentaje de sólidos (20 y 40%) y temperatura de entrada-salida (25°C - 80°C, respectivamente (Yanza, 2003)). Teniendo estos datos se obtuvo el flujo de líquido a alimentar (1,2 kg/h para 20% y 1,96 kg/h para 40%). Esto se realizó con el fin de establecer el flujo máximo que se podría alimentar para el flujo de aire establecido.

Siguiendo con la metodología planteada se procedió al diseño del pulverizador; para encontrar el diámetro del disco, se utilizaron ecuaciones reportadas en la literatura, las cuales no dependen del porcentaje de sólidos sino que rigen a todo fluido newtoniano. Se definió un número y altura de paletas de 36 y 8mm, respectivamente (estos son los valores límites encontrados en la literatura (Masters, 1991)). Las revoluciones por minuto (rpm) del motor y el diámetro de

partícula se definieron con el fin de que el diámetro de la cámara fuera menor o igual a 0,6 m, obteniendo como resultado un diámetro de partícula de 25 μ m y 30 000 (rpm) para el motor. En la Figura 8, se puede observar el diseño del disco escogido para el pulverizador; este es un disco tradicional de paletas planas, en la Figura 8 b) se puede observar como luce el disco internamente.

Figura 8. Disco de paletas planas.

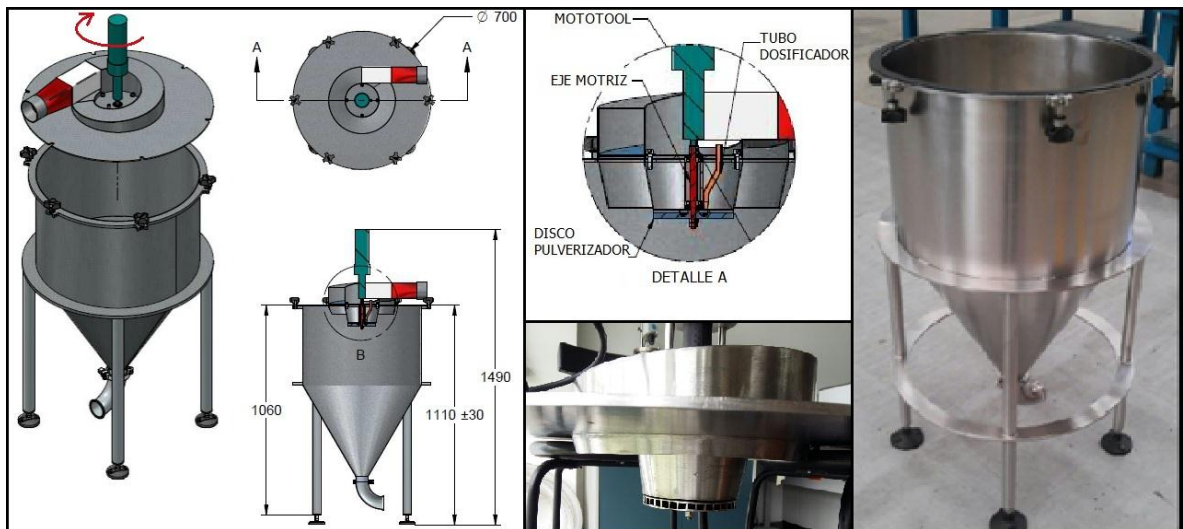


✓ Dimensionamiento de la cámara de secado: Como condición inicial se estableció que la gota generada por el pulverizador debe secarse en un tiempo menor o igual al tiempo de recorrido horizontal desde el pulverizador a la pared de la cámara; ya que la gota debe estar seca antes de que ésta toque la pared para evitar que se adhiera sobre ésta (Martinez, 2009; Mendoza *et al.*, 2003); la ecuación (26) se utilizó para la determinación del diámetro de la cámara, ya que ésta depende del tiempo de secado total y la velocidad del aire ($3 \frac{m}{s}$ (Martinez, 2009)), si dicho diámetro no excedía 0,6 m (límite que dependió del espacio en el laboratorio y recursos económicos del proyecto) se calculaba la altura total mediante la relación $1,5 \cdot D = H$ y se obtenían las dimensiones finales. En caso contrario, se tomaría un diámetro de partícula menor manteniendo el flujo de alimentación constante, resultando un pulverizador con diámetro menor. Dicho de otra manera, se debió redimensionar el pulverizador ya que a menor diámetro de disco, menor diámetro de la cámara (variables directamente proporcionales, ecuaciones (10), (26) y (28)).

El tiempo de secado total se definió como la suma entre el tiempo de secado constante, ecuación (13), y tiempo de secado decreciente, ecuación (14), obteniendo un estimado de 0,087s y 0,049s para los hidrolizados de 20 y 40% de sólidos, respectivamente.

Las dimensiones de la parte cilíndrica y cónica de la cámara se obtuvieron gracias a las ecuaciones (30) y (31), respectivamente. Según la revisión bibliográfica, el equipo presenta pérdidas de calor, las cuales se calcularon con la ecuación (32), el área de transferencia considerada fue la superficie de la cámara, ecuación (36), con un coeficiente de transferencia para el acero de 2 (Masters, 1991). Las pérdidas calculadas fueron de $788,5052 \frac{Kj}{h}$, haciendo que se considere un sistema de aislamiento para las partes de mayor superficie (cilindro y cono de la cámara de secado) con el fin de mitigarlas. En la Figura 9, se presenta el plano de la cámara de secado y el sistema de pulverización según diseños proporcionados en el marco del presente trabajo; también se muestra la cámara secado construida.

Figura 9. Cámara de secado y sistema de pulverización del secador *Spray-Dryer*.



La Tabla 4 muestra el resumen de los valores numéricos de las variables de entrada empleadas en el dimensionamiento de la cámara de secado. Los valores obtenidos para el dimensionamiento de la cámara de secado y del sistema de pulverización se encuentran resumidos en la Tabla 5. Las dimensiones de la

cámara de secado se determinaron a partir del hidrolizado a 20% p/p de sólidos, pues estos requieren un tiempo de secado mayor y por ende un diámetro de cámara más grande; esto en comparación a las dimensiones obtenidas con el hidrolizado a 40% de sólidos.

Se utilizó un *mototool* industrial marca BOSCH, el cual alcanza 33 000 rpm, ya que no se encontró ninguno que alcanzara exactamente 30 000 rpm. El diámetro final de la cámara fue de 0,7 m, ya que de esta forma el tiempo de contacto gota-aire aumenta y se asegura que la gota llegue completamente seca a la pared de la cámara. El diámetro final del disco fue de 14 cm ya que en la fabricación se requirieron medidas estándar comerciales.

Tabla 4. Especificaciones para las variables de proceso obtenidas del diseño del *Spray-Dryer*.

Variables del proceso	Valor numérico
Caudal de aire de alimentación (G_3) $\left[\frac{kg}{h}\right]$	62,27
Humedad de sólidos a la entrada (X_{H1}) $\left[\frac{kg\ agua}{kg\ aire\ seco}\right]$	4
Humedad de sólidos a la salida (X_{H2}) $\left[\frac{kg\ agua}{kg\ aire\ seco}\right]$	0,0526
Humedad de aire a la entrada (X_{H3}) $\left[\frac{kg\ agua}{kg\ aire\ seco}\right]$	0,0181
Humedad relativa del aire en Bucaramanga (HR)	0,8
Altura de Bucaramanga [m]	959
Temperatura de entrada del líquido (T_2) [$^{\circ}C$]	25
Temperatura de entrada del aire (T_4) [$^{\circ}C$]	130
Temperatura de salida del aire y sólidos (T_3) [$^{\circ}C$]	80
Calor de vaporización (λ) $\left[\frac{Kj}{kg}\right]$	2502,5
Velocidad radial del motor (rpm)	30 000
Flujo de sólidos (S_1) $\left[\frac{kg}{h}\right]$	0,2652
Humedad de salida de aire (X_{H4}) $\left[\frac{kg\ agua}{kg\ aire\ seco}\right]$	0,0349
Conductividad térmica (KD) $\left(\frac{Kj}{m*s*K}\right)$	$5,1468 \times 10^{-5}$

Tabla 5. Dimensiones de la cámara de secado y pulverizador según las ecuaciones de diseño.

Variable	Valor
Flujo líquido de alimentación $\left[\frac{kg}{h}\right]$	1,2
Velocidad radial del motor (rpm)	30 000
Diámetro de partícula [μm]	25
Diámetro de disco [m]	0,1431
Altura cámara de secado [m]	0,89
Diámetro cámara de secado [m]	0,593
Altura de las paletas del disco [m]	0,008
N° de Paletas	36

✓ Diseño del sistema de separación: Un ciclón de alta eficiencia se diseñó mediante las relaciones adimensionales mostradas en la Figura 6. El único dato que se requiere conocer es D_c (diámetro del ciclón), ya que todas las relaciones dependen de él; para esto, primero se debió conocer la velocidad y flujo volumétrico de entrada. La velocidad de aire de entrada para un ciclón de este tipo oscila entre 15,2-27,4 $\frac{m}{s}$ según Echeverri (2006). El flujo volumétrico de aire se calculó mediante la ecuación (37), que depende del flujo de aire de entrada al proceso, la temperatura y humedad de salida del secador. Después de conocer el caudal y la velocidad de aire, se procedió a calcular el área de entrada al ciclón y esta a su vez se relacionó con las ecuaciones (38) y (39) donde al despejar se obtuvo el D_c de la siguiente manera:

$$Caudal = flujo\ mássico_{entrada} * Volúmen\ humedo\ de\ salida; (37)$$

$$Caudal = 65,4425 \frac{m^3}{h}$$

$$Área = \frac{Caudal}{Velocidad} = 8,263 cm^2 = 0,0008263 m^2$$

$$a = 0,5 * D_c \quad a * b = Área (38)$$

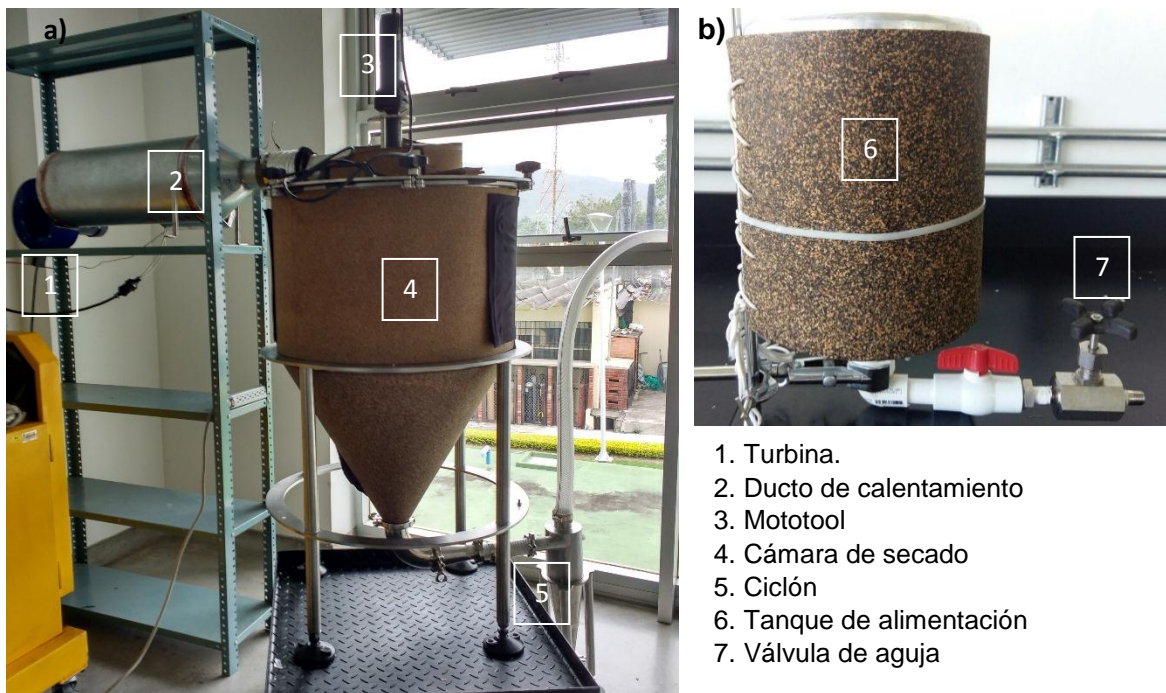
$$b^m = 0,2 * D_c \quad 0,5 * D_c * 0,2 * D_c = 0,0008263 m^2 (39)$$

$$D_c = 0.0909 m \text{---} \text{Diámetro del ciclón}$$

$$H = 0,3636 m \text{---} \text{Altura del ciclón}$$

En la Figura 10 a) se presenta el equipo completo, en donde se observa el sistema de calentamiento, la cámara de secado, el motor y el ciclón. La Figura 10 b) muestra el sistema de alimentación utilizado, el cual se compone de un tanque elevado de 5L, una válvula de aguja como variador de flujo y un rotámetro como indicador. La cámara y el tanque de alimentación se encuentran aislados térmicamente con una chaqueta elaborada en corcho y caucho.

Figura 10 a) Piloto de Secado tipo *Spray-Dryer*. 10 b) Sistema de alimentación.



2.3 IMPLEMENTACIÓN DEL PILOTO

Durante la implementación del piloto *Spray-Dryer* se realizaron algunos ajustes sobre el diseño original, con el fin de solucionar los problemas técnicos presentados (esencialmente de construcción). Los ajustes más relevantes se hicieron en el sistema de calentamiento, como: aumento en la potencia de las resistencias y la disminución de las pérdidas de carga del aire. Luego de comprobar el correcto funcionamiento del piloto, se procedió a establecer mínimo dos condiciones de operación para cada solución alimentada (glucosa y

maltodextrina) las cuales fueron previamente presentadas en la Tabla 1 (pág. 19). En la Tabla 6 se muestran las variables del proceso para cada uno de los experimentos, en donde se tomaron datos de humedad y temperatura dos veces por prueba.

Durante las pruebas se evidenciaron rendimientos entre el 17-40%, lo cual es normal para este tipo de secado debido a las pérdidas de calor y adherencia de polvo a las paredes que presenta este tipo de equipos (Muzaffar K *et al.*, 2015). Las pérdidas de energía se calcularon con respecto a la diferencia en la entalpía del proceso ideal y teórico utilizando una carta psicométrica de Bucaramanga (en el anexo D pág. 50 podrá ver un ejemplo).

Durante la implementación se realizaron pruebas con soluciones de glucosa a otras temperaturas de alimentación (16, 30 y 38°C), pero ninguna fue satisfactoria. Esto se debe a que las soluciones ricas en azúcares de bajo peso molecular (glucosa, fructosa), presentan bajas temperaturas de transición vítrea (Tg) (62°C para la glucosa, Cedeño *et al.*, 2009); cuando la temperatura de la solución es mayor a (Tg+20°C), se presenta un fenómeno de pegajosidad en las paredes del equipo (Muzaffar K *et al.*, 2015). Este fenómeno no aplica para las soluciones de maltodextrina, ya que esta presenta una Tg de 137°C para Equivalente dextrosa (ED) de 20 y 165°C para ED de 10 (Gordon *et al.*, 1952). Por esta razón fue posible secar las soluciones de maltodextrina a temperaturas superiores de 7°C, lo que no ocurrió con las de glucosa.

Tabla 6. Variables de proceso obtenidas según condiciones establecidas en la Tabla 1. Humedad relativa (HR), Índice de solubilidad en agua (ISA)

N° de prueba		1	2	3	4
Aire de entrada	% HR	51,10±2,97	57,39±4,23	43,10±6,93	59,34±5,84
	Tb seco [°C]	30,53±2,16	30,51±1,76	26,88±2,75	30,10±1,79
Aire desgastado	% HR	30,00±2,83	32,05±2,76	33,33±0,88	53,96±1,08
	Tb seco [°C]	52,17±3,07	55,61±0,57	51,03±2,08	53,74±0,39

	Caudal [m ³ /s]	29,46±0,04	26,11±1,05	29,74±1,82	24,71±1,66
Producto seco	Peso [g]	4,54±4,05	7,79±5,13	20,04±1,14	13,93±1,51
	Humedad [%]	4,36±0,03	4,25±0,29	4,27±0,14	4,41±0,22
	ISA [%]	97,89±1,54	97,64±1,15	96,18±0,02	98,88±0,08
Proceso	% Rendimiento	10,09±5,00	27,91±18,39	35,31±2,01	26,86±2,92
	Pérdidas $\left[\frac{kJ}{h}\right]$	1390±245,8	743,7±503,6	639,1±626,5	728,7±602,3
N° de prueba		5	6	7	8
Aire de entrada	% HR	59,77±3,47	57,74±3,84	61,82±2,62	48,11±0,74
	Tb seco [°C]	28,89±1,01	26,46±1,12	29,44±0,97	29,72±0,11
Aire desgastado	% HR	37,70±2,39	47,00±6	43,62±0,71	55,81±8,94
	Tb seco [°C]	53,21±2,53	51,58±3,68	54,23±0,81	49,75±0,84
	Caudal [m ³ /s]	23,27±1,25	22,79±1,94	25,74±5,06	24,82±5,46
Producto seco	Peso [g]	12,47±0,76	13,36±1,64	20,78±9,76	15,77±2,29
	Humedad [%]	4,27±0,43	4,33±0,52	4,10±0,31	4,36±0,38
	ISA [%]	98,14±1,11	98,02±0,19	97,96±0,08	95,29±0,32
Proceso	% Rendimiento	25,76±1,56	26,19±3,21	39,28±18,50	20,14±2,94
	Pérdidas $\left[\frac{kJ}{h}\right]$	402,1±66,3	297,1±288,8	207,5±282,3	226,1±63,6

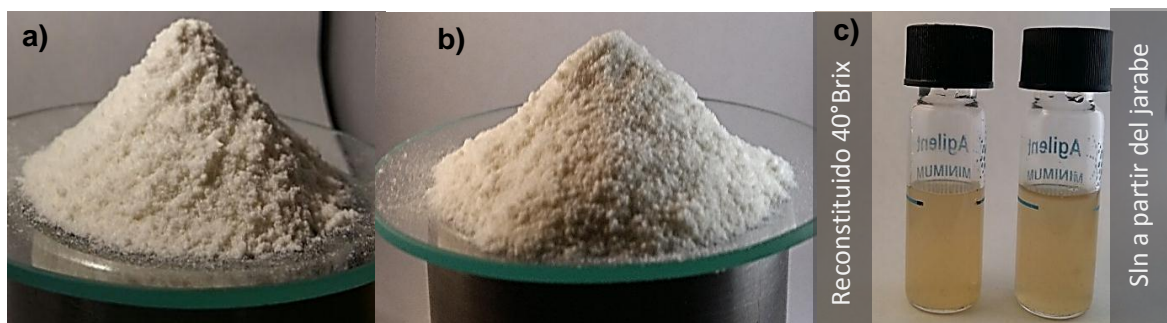
Todos los productos de glucosa obtenidos en los experimentos realizados tuvieron una apariencia similar (como el presentado en Figura 11a). Como se muestra en la Figura 11b), no se observa diferencia entre la glucosa pulverizada y reconstituida en agua y la solución preparada a partir del jarabe suministrado.

La maltodextrina en polvo obtenida en cada experimento presenta un aspecto similar al mostrado en la Figura 12a), el producto obtenido se comparó con una muestra comercial, y como se observa en la Figura 12, no se distinguen diferencias significativas entre las dos.

Figura 11. a) Glucosa pulverizada. b) comparación entre el reconstituido en agua a 40°Brix realizado con la glucosa en polvo obtenida y una solución a 40°Brix preparada a partir de jarabe no clarificado suministrado por la empresa Promitec Santander S.A.S.



Figura 12. a) Maltodextrina pulverizada. b) Maltodextrina comercial. c) comparación entre el reconstituido en agua a 40°Brix realizado con la maltodextrina en polvo obtenida y una solución a 40°Brix preparada a partir de jarabe no clarificado suministrado por la empresa Promitec Santander S.A.S.



Todos los experimentos dieron como resultado humedad menor al 5% en el producto obtenido. Este valor se encuentra por debajo del máximo permitido para los productos en polvo como: cacao y leche en polvo (7 y 5%, respectivamente) según el Codex Alimentarius.

Ninguno de los productos presentó un índice de solubilidad en agua (ISA) del 100%, debido a que los jarabes suministrados por la empresa Promitec Santander S.A.S no son clarificados. Sin embargo, todos presentaron alto ISA, entre 96,19 y 98,98% para glucosa, y entre 95,06 y 98,93% para maltodextrina. En la literatura se encuentran reportados valores de ISA para diferentes matrices, los cuales varían dependiendo de la solución secada, estos se encuentran entre 80,9 y 95,57 (90% para pulverizado de mango usando maltodextrina como aditivo, Cano-

Chauca *et al.*, 2005; 95,57% para pigmentos en polvo de productos de vinificación, Souza *et al.*, 2015; y 80,9% para queso en polvo, (Erbay *et al.*, 2015).

El producto obtenido a partir de la solución de maltodextrina se comparó con uno comercial suministrado por la empresa Promitec Santander S.A.S, este último presentó ISA del 100% y humedad del 8,72%; el alto valor del ISA se debe a que la solución secada fue previamente clarificada. La maltodextrina en polvo obtenida en este trabajo presentó una humedad promedio de 4,1%, casi 2,2 veces menor a la humedad del producto comercial y aunque el ISA promedio fue menor, es posible filtrar la solución antes de alimentar para igualar su valor al comercial. Considerando las propiedades analizadas en este trabajo (ISA y humedad) se puede afirmar que la maltodextrina en polvo obtenida es de buena calidad.

3. CONCLUSIONES

- Se realizó el diseño conceptual del secador a partir de la información encontrada en la literatura. El piloto que es de ciclo abierto, cuenta con una cámara de secado cilíndrica y base cónica con un solo punto de descarga y flujo en co-corriente, el pulverizador es de tipo centrífugo y cuenta con un ciclón de alta eficiencia como sistema de recuperación de polvo. La realización del diseño conceptual como primer paso incidió positivamente en el diseño final del mismo, ya que de esta forma se pudo delimitar la búsqueda de información con respecto al dimensionamiento de cada una de las zonas.
- Se determinó matemáticamente las especificaciones del secador utilizando programación en Matlab®2009a, el cual usa las ecuaciones y relaciones reportadas en la literatura. El equipo posee una cámara de secado de 0,6 m de diámetro interno y 0,9 m de altura, el sistema de pulverizador se compone de un *mototool* industrial marca BOSCH, el cual alcanza 33 000 rpm, un anclaje motor-disco y un disco de 0,14 m de diámetro, de 36 paletas planas, cada una de 8 mm de altura; el ciclón tiene una altura total de 0,386 m y un diámetro de 0,09 m.
- Fue posible la pulverización de soluciones de glucosa y maltodextrina utilizando el piloto diseñado; los productos obtenidos en los experimentos presentaron humedades inferiores al 5% (valor inferior al máximo permitido para la leche y el cacao en polvo según el Codex Alimentarius) e índices de solubilidades en agua superiores al 95%, por lo que se consideran de buena calidad (humedad inferior al 10% e ISA superior al 90% según la Codex Alimentarius). Para la glucosa se encontró condiciones de operación apropiadas sin utilizar ayudantes de secado y para la maltodextrina, el polvo obtenido no presentó diferencias significativas en comparación con la comercial. Los rendimientos, aunque fueron bajos (inferiores al 40%), es un comportamiento normal para este tipo de equipos debido a las

pérdidas de calor y de producto adherido en las paredes, lo que se corrobora en la literatura.

4. RECOMENDACIONES

- Se recomienda adquirir un motor que pueda operar durante mayor tiempo en continuo y cambiar los rodamientos utilizados en el adaptador del eje, para lograr realizar pruebas de mayor duración, con el fin de analizar el proceso durante un mayor tiempo, procesando más alimento, y de esta manera, obtener más producto.
- Ajustar el funcionamiento del controlador del sistema de calentamiento, para un control fino de la temperatura de entrada del aire a la cámara de secado.
- Incluir en la caracterización del producto el tamaño de partícula, ya que para este trabajo no se pudo realizar debido a problemas técnicos que se presentaron con el microscopio electrónico de barrido. Con esta prueba habría sido posible indagar sobre el tamaño, porosidad y morfología del producto.

BIBLIOGRAFÍA

ARGENTINA, F. (n.d.). Tecnología de aplicación de fitosanitarios equipos manuales – buenas prácticas. Retrieved February 7, 2015, available from internet: <http://www.argeninta.org.ar/pdf/pulverizacion - equipos manuales lujan .pdf>

ÁVILA, E., CORTES, M., and GIRO, H. Influence of Maltodextrin and Spray Drying Process Conditions on Sugarcane Juice Powder Quality. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 2015 Vol. 68, no 1, p. 7509–7520.

BETTÍN, L., and QUINTERO, J. Estudio de la producción de jarabes glucosados a Partir De Maltodextrinas. *Vitae, Revista de La Facultad de Química Farmacéutica*, 2010. Vol. 17, no 2, p.165–172.

CAEZ, K., and NATIVIDAD, J. Microencapsulación del jugo de mango (mangifera indica l.) Para la obtención de un concentrado con la utilización de maltodextrina como material pared. Trabajo de grado Ingeniero de Alimentos. Cartagena de Indias D. T. Universidad de Cartagena. Facultad de ingeniería. Programa de Ingeniería de Alimentos, 2012. 85 p.

CALISKAN, G. The effects of the different drying conditions and the amounts of maltodextrin addition during spray drying of sumac extract. *ELSEVIER*, 2013. Vol. 9, no. 1, p. 539–548.

CORTES, M., CIRO, H. J., RODRÍGUEZ, E., and LARGO, E. (2012). Secado por aspersión de concentrado de caña panelera: una tecnología apropiada para mejorar la competitividad de la cadena. *Vitae*, 2012. Vol. 19, no. 1, p 51–53.

DIZAJI, M., HAMIDISEPEHR, A., CHEGINI, G., KHAZAEI, J., and MANSURI, A. (2015). Influence of hot bed spray dryer parameters on physical properties of

peppermint (*Mentha piperita* L.) Tea powder. *International Journal of Food Engineering*, 2015. Vol. 11, no. 1, p. 115–125.

ECHEVERRI, C. Diseño óptimo de ciclones. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 2006. Vol. 5, no. 9, p. 123–139.

EXPÓSITO, I., GUTIÉRREZ, S., MONTELONGO, I., and BOCOURT, G. Desarrollo de un aroma de almendra en polvo mediante secado por atomización, 2009. Vol.19, no. 2, p. 56–63.

FAZAEI, M., EMAM-DJOMEH, Z., ASHTARI, A. K., and OMID, M. Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder. *Icheme*, 2012. Vol. 90, no. 4, p. 667–675.

FERNANDESA, L. P., TURATTIA, I. C. C., LOPESA, N. P., FERREIRAA, J. C., CANDIDO, R. C., and OLIVEIRA, W. P. Volatile Retention and Antifungal Properties of Spray-Dried Microparticles of *Lippia sidoides* Essential Oil. *Drying Technology*, 2008. Vol. 26, no. 12, p. 1534–1542.

FERRARI, C. C., GERMER, S. P. M., and aguirre, J. M. (2012). Effects of Spray-Drying Conditions on the Physicochemical Properties of Blackberry Powder. *International Food Research Journal*, Julio, 2013. Vol. 22, no. 6, p. 154–163.

GARZÓN, M. A., TAMAYO, L. M. A., SÁNCHEZ-CAMARGO, A. D. P., and CARDONA, L. D. J. M. Secado por aspersion: Una alternativa para la conservación de los compuestos bioactivos y aromáticos del extracto de ajo (*Allium sativum* L.). *Revista Lasallista de Investigacion*, 2011. Vol. 8, no. 2, p. 40–52.

GUZMÁN, M., TORRES, J. M., ESQUIVEL, M. G. A., LÓPEZ, M. S. H. H. Xii congreso nacional de ciencia y tecnología de alimentos. evaluación de los efectos del secado por aspersion sobre los compuestos fitoquímicos-funcionales y

características fisicoquímicas en encapsulados de zarzamora (*rubus spp*), 2010. p. 23.

GUZMÁN, S., and CASTAÑO, J. Secado por atomización del jugo de la caña de azúcar. *Cenicafé*, 2002. Vol. 53, no. 4, p 327–333.

HEE, Y. Y., TAN, C. P., ABDUL RAHMAN, R., MOHD ADZAHAN, N., Lai, W. T., and CHONG, G. H. Influence of different wall materials on the microencapsulation of virgin coconut oil by spray drying. *International Journal of Food Engineering*, 2002. Vol.11, no. 1, p. 61–69.

HERNÁNDEZ, O., CARNADA, A., CARMONA, R., TORRES, L., and LIDIA, G. M. Influencia del uso de aditivos sobre el rendimiento del proceso de secado por aspersion de extracto acuoso de *Calendula officinalis* L. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 2006. Vol. 11, no. 1, 8 p.

JAYASUNDERA, J. M. M. A., and KULATUNGA, A. R. Spray-drying of coconut treacle into an amorphous powder. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 2014. Vol. 26, no. 8, p. 672–678.

JIMÉNEZ ALVAREZ, E. Laboratorio de operaciones de separación iv. Trabajo de laboratorio. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería química. Departamento de Ingeniería Química Industrial. México, 2002. 10 p.

JIMÉNEZ-MUNGUÍA, M. T., and GÓMEZ-CRUZ, N. I. Métodos de secado de emulsiones alimentarias. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 2014. Vol. 8, no. 2, p 23–33.

KOÇ, B., and KAYMAK-ETERKIN, F. The Effect of Spray Drying Processing Conditions on physical properties of spray dried maltodextrin. *FOODBALT*, 2014. p. 243–247.

LÓPEZ HERNÁNDEZ, O. D. Microencapsulación de sustancias oleosas mediante secado por aspersión. *Revista Cubana de Farmacia*, 2010. Vol. 44, no. 3, p. 381–389.

MADENE, A., JACQUOT, M., SCHER, J., and DESOBRY, S. Flavour encapsulation and controlled release - A review. *International Journal of Food Science and Technology*. 2006. Vol. 41, no. 1, p. 1–21.

MARTÍNEZ, L. Á. (2009). Dimensionamiento y simulación de un secador por aspersión de nivel piloto. México D.F, Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional., 2009. 152 p.

MASTERS, K. *Spray Drying Handbook*. United States. Longman Scientific and Technical, 1991. 722 p.

MUZAFFAR, K., NAYIK, G., and KUMAR, P. Stickiness Problem Associated with Spray Drying of Sugar and Acid Rich Foods : *Nutrition and Food Science*, 2015. Vol. 12, no. 3, p 11–13.

REBOLLAR, C. *Aditivos alimentarios : propiedades, aplicaciones y efectos sobre la salud*. España. Mira, 1991. 152 p.

SANDOVAL, G., RODRÍGUEZ, M., and CIRO, H. Effect of Storage Conditions on Quality of a Functional Powder of Cape Gooseberry Obtained By Spray Drying. *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, 2014. Vol. 17, no. 1, p 139–150.

SHABDE, V. Optimal design and control of a spray drying process that manufactures hollow micro-particles. Tesis de Doctorado. Estados Unidos: Texas Tech University, 2006. 221 p.

SHARIFI, A., NIAKOUSARI, M., MASKOOKI, A., and MORTAZAVI, S. A. Effect of spray drying conditions on the physicochemical properties of barberry (*Berberis vulgaris*) extract powder. *International Food Research Journal*, 2015. Vol. 22, no. 6, p. 2364–2370.

SOUZA, D. B., THOMAZINI, M., BALIEIRO, J. C. D. C., and FÁVARO-TRINDADE, C. S. Effect of spray drying on the physicochemical properties and color stability of the powdered pigment obtained from vinification byproducts of the Bordo grape (*Vitis labrusca*). *Food and Bioproducts Processing*, octubre, 2015. Vol. 93, p. 39–50.

YANZA HURTADO, E. G. Diseño de un secador por atomización a nivel piloto para jugo concentrado de tomate de arbol. Trabajo de grado Ingeniero químico. Manizales: Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Química, 2003. 153 p.

ZAFER, E., NURCAN, K., FIGEN, K.-E., and MUSTAFA, U. Optimization of Spray drying process in cheese powder production. *ELSEVIER*, 2015. Vol 93, p. 156–165.

ANEXOS

Anexo A. Materiales y métodos

Contenido de humedad: se pesaron 2g de cada muestra, luego se secaron en un horno a 105 °C durante 4h. Este proceso se realizó en el laboratorio del Grupo de investigación CICTA; la humedad en cada caso se determinó con la pérdida de peso en cada una.

Contenido de Sólidos: Se calculó como la diferencia entre el peso de la muestra y el contenido inicial de humedad previamente determinado.

Viscosidad y reología: se utilizó el viscosímetro *BROKFIEL* programable que se encuentra en el laboratorio de la escuela de ingeniería química de la UIS.

Índice de solubilidad en agua (ISA): Se realizó de acuerdo al procedimiento utilizado por Gómez *et al.* (1984) con algunas modificaciones. Se agregó 1.25g de polvo obtenido a 15ml de agua destilada a temperatura ambiente y se mezcló durante 30 min, luego se centrifugó a 4000 rpm durante 1 hora. Se tomó 1 ml del sobrenadante se pasó a una caja de Petri y se secó en un horno a 105°C durante 4 horas, finalmente se enfrió en un desecador durante 50 minutos y se pesó. El índice de solubilidad en agua se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$ISA = \frac{W_{\text{sólido}} (g_{\text{sobrenadante}})}{g_{\text{sólido seco total}}}$$

Donde:

ISA: índice de solubilidad en agua [%].

W Sólidos: Fracción de los sólidos en el sobrenadante.

g Sobrenadante: Peso del sobrenadante [g].

g Sólido seco total: Peso de la muestra seca [g]

Anexo B. Protocolo de encendido y apago.

Encendido

1. Encender la turbina.
2. Fijar el set point en la caja de control del sistema de calentamiento.
3. Encender las resistencias y esperar mínimo 20 minutos
4. Encender el motor.
5. Abrir la válvula de aguja y ubicar el flotador del rotámetro en el nivel deseado.

Apagado

1. Cerrar la válvula de aguja.
2. Apagar el motor
3. Apagar las resistencias y esperar a que se enfríen
4. Apagar la turbina.

Anexo C. Ejemplo del método utilizado en la determinación de las pérdidas de energía.

Para la determinación de las pérdidas de energía de cada experimento, se utilizó la carta psicrométrica de Bucaramanga, en la cual se ubicaron tres puntos: el primero corresponde al aire que es succionado por la turbina, el segundo al aire después de ser calentado a la temperatura deseada y el tercero al aire desgastado que sale del ciclón, para la ubicación de cada uno se tomaron medidas de Temperatura de bulbo seco y % de humedad relativa (HR) por medio de un termo higrómetro, luego se determinó la humedad absoluta [g agua/kg aire seco] y entalpía, en los puntos 2 y 3. La diferencia de entalpía entre ambos corresponde a las pérdidas de energía [Kj/kg aire seco]. En la Tabla 7 se presentan los valores de Temperatura de bulbo seco, % HR, humedad absoluta y Entalpía para cada punto.

Tabla 7. Valores de valores de Temperatura de bulbo seco, % HR, humedad absoluta y Entalpía de los puntos 1, 2 y 3 para el primer experimento.

Variable	Punto 1 (inicial)	Punto 2	Punto 3 (final)
T prom bulbo seco [°C]	30,53	130	52,17
% promedio HR	51,10	---	30
Humedad absoluta [g agua/kg aire seco]	15,3767	15,3767	30,5955
Entalpía (H) [Kj/kg aire seco]	70	130,464	172

Como el valor obtenido está por Kg de aire seco, para cada experimento se calcularon los kilogramos de aire seco totales que se utilizaban en cada prueba.

En la Figura 13, se puede observar la carta psicrométrica y la ubicación de los puntos 1, 2 y 3 del primer experimento.

Figura 13. Carta psicométrica de Bucaramanga con la ubicación de los puntos 1, 2 y 3 para el primer experimento.

