



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

OPTIMIZACIÓN PARAMÉTRICA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN PROTOTIPO DE SECADOR POR ASPERSIÓN PARA ZUMO DE NARANJA DISEÑADO MEDIANTE CFD.

Jackson Camilo Tovar Gonzalez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Bogotá D.C., Colombia

2022

OPTIMIZACIÓN PARAMÉTRICA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN PROTOTIPO DE SECADOR POR ASPERSIÓN PARA ZUMO DE NARANJA DISEÑADO MEDIANTE CFD.

Jackson Camilo Tovar Gonzalez

Trabajo Final de Grado presentado como requisito para optar al título de:

Magister en Ingeniería Mecánica

Director (a):

PhD., MSc. Carolina María Sánchez Sáenz

Línea de Investigación:

Deshidratación y Secado

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Bogotá D.C., Colombia

2022

DEDICATORIA

Quiero agradecer a Dios por permitirme culminar con éxito esta maestría, la dedico a mis padres que desde el cielo deben estar orgullosos por este logro alcanzado, a mi familia y amigos que me ayudaron en cada paso y fueron un pilar de apoyo en esos momentos de flaqueza. También quiero agradecer a mi tutora que estuvo en cada proceso de este reto y fue un apoyo incondicional para lograr culminar con éxito.

“La educación es el pasaporte hacia el futuro, el mañana pertenece a aquellos que se preparan para él en el día de hoy”.

Malcom X

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la Universidad.



Jackson Camilo Tovar Gonzalez

Fecha 15/11/2022

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por culminar este logro, por darme las fuerzas necesarias y el conocimiento para escalar cada peldaño que me llevo a obtener este triunfo.

A mi familia y amigos que fueron un apoyo motivacional en esos momentos donde las cargas académicas se unían con las laborales y surgía esa idea de desistir, muchas gracias por darme ese apoyo y esa fuerza que me motivo a seguir y lograr este triunfo.

A la empresa ingeniería Symaa S.A. y sobre todo a su propietario el ingeniero Fabio Castro, gracias a los espacios que me brindaron en horas laborales para asistir a las clases y el apoyo económico para pagar los semestres, sin su ayuda este logro no se hubiera podido cumplir.

A mi tutora Carolina María Sánchez Sáenz, gracias profe por no desistir por buscar siempre las alternativas a los problemas que surgieron, por lograr conseguir los recursos económicos que se necesitaban en las diferentes etapas de la ejecución del trabajo final que me permiten lograr el título de Magister en Ingeniería Mecánica. Así mismo agradecer a Hermes por el financiamiento del proyecto (código Hermes:43061) “Diseño y construcción de un prototipo de secador por aspersion para zumos frutales regionales”.

Al ingeniero Luis Carlos Gonzalez encargado del laboratorio de postcosecha de Ingeniería Agrícola, donde se desarrollaron las diferentes pruebas, gracias por la colaboración ajustando los tiempos y horarios atípicos para que se lograran ejecutar las actividades necesarias.

A mi compañero de batallas el ingeniero Pavel Ramírez, gracias por todo el apoyo en las diferentes sesiones que se desarrollaron y por las noches de trabajo en el laboratorio realizando las adecuaciones necesarias para lograr la operación del equipo.

Por último, agradezco a los Ingenieros químicos Andres Ramos y Ricardo Cogua, quienes participaron en el proyecto Hermes y apoyaron con la simulación en CFD para el diseño del secador por aspersión usado en el trabajo final de maestría.

Resumen

Existe una gran variedad de técnicas de deshidratación que se utilizan para disminuir el contenido de agua en alimentos, sin embargo, muchas de estas técnicas requieren de tiempos prolongados y altas temperaturas que pueden degradar parcialmente las propiedades nutricionales y características organolépticas de los productos. El secado por aspersión o *Spray Dryer*, es una técnica altamente utilizada para obtener productos en polvo. La ventaja de esta técnica es el poco tiempo de residencia y las bajas temperaturas de operación a las que se puede realizar el proceso de secado. El objetivo de este proyecto fue optimizar los parámetros de operación y validar experimentalmente un prototipo de secado por aspersión para zumo de naranja diseñado mediante CFD (Dinámica de fluidos computacional). La ejecución del proyecto permitió concluir que los parámetros adecuados del secador para secar zumo de naranja valencia son: presión de aire 1,8 bar; caudal de líquido 1,1 l/h; temperaturas de entrada-salida 200/80 °C y encapsulante maltodextrina con una concentración de 10 % (p/p). Se logró determinar que la maltodextrina es un encapsulante adecuado para el secado de zumo de naranja, permitió que el producto no alcanzara la temperatura de transición vítrea y las partículas tuvieron un tamaño homogéneo. Finalmente, la validación experimental comprobó que el modelo CFD utilizado para diseñar y dimensionar el secador por aspersión describe adecuadamente el proceso, las soluciones fueron estables para los casos de estudio y el equipo funcionó de acuerdo con los rangos que el modelo predijo.

Palabras clave: Secado por aspersión, Encapsulante, Deshidratación.

Abstract

PARAMETRIC OPTIMIZATION AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF A SPRAY DRYER PROTOTYPE FOR ORANGE JUICE DESIGNED BY CFD.

There is a wide variety of dehydration techniques that are used to reduce the moisture content in foods; however, many of these techniques require long times and high temperatures that can partially degrade the nutritional properties and organoleptic characteristics of the products. Spray drying is a highly used technique to obtain powdered products. The advantage of this technique is the short residence time and low operating temperatures at which the drying process can be carried out. The main of this project is to optimize the operating parameters and experimentally validate a prototype spray dryer for orange juice designed using CFD (computational fluid dynamics). The execution of the project concluded that the adequate parameters of the dryer to dry Valencia orange juice are: air pressure 1.8 bar; liquid flow rate 1.1 l/h; inlet-outlet temperatures 200/80 °C and maltodextrin encapsulant with a concentration of 10% (p/p). It was possible to determine that maltodextrin is a suitable encapsulant for drying orange juice, it allowed the product not to reach the glass transition temperature and the particles had a homogeneous size. Finally, the experimental validation verified that the CFD model used to design and size the spray dryer adequately describes the process, the solutions were stable for the study cases and the equipment worked according to the ranges that the model predicted.

Keywords: Spray Dryer, Encapsulant, Dehydration.

Contenido

Resumen	IX
Lista de figuras.....	13
Lista de tablas	15
1. Introducción	16
2. Justificación	18
3. Antecedentes.....	20
3.1 Cámara de secado	21
3.1.1 Cámaras co-corriente o flujo paralelo	22
3.1.2 Cámaras contra corriente	22
3.2 Atomizador	23
3.2.1 Atomizadores rotativos	23
3.2.2 Boquillas hidráulicas	24
3.2.3 Boquillas neumáticas.....	25
3.2.4 Boquillas ultrasónicas	25
3.3 Sistema de recolección de sólidos	26
3.4 Proceso de optimización	27
3.5 Dinámica de fluidos computacional	27
4. Objetivos.....	29
4.1 Objetivo General	29
4.2 Objetivo Específicos.....	29
5. Desarrollo de paquetes trabajados	31
5.1 Optimizar los rangos de operación de los parámetros del secado por aspersión de zumo de naranja.	31
5.1.1 Sistema de calentamiento de aire	33
5.1.2 Selección del ventilador	36
5.1.3 Modificación Tapa.....	39
5.1.4 Definición de parámetros y rangos óptimos de trabajo.....	41
5.2 Realizar la validación experimental del modelo computacional con el cual se diseñó el prototipo de secador por aspersión.....	47
5.2.1 Procedimiento Experimental Usado	47
5.2.2 Descripción modelo computacional.....	52
5.2.3 Simulación de turbulencia	53
5.2.4 Optimización del enmallado de la simulación.....	57
5.2.5 Simulación multifase.....	62

5.3	Implementar un manual de usuario para el uso adecuado del prototipo de secador por aspersión.	64
6.	Conclusiones y recomendaciones	66
6.1	Conclusiones	66
6.2	Recomendaciones	67
A.	Anexo: Manual de operación secador por aspersión.....	69
	Bibliografía	90

Lista de figuras

Figura 1 : Diagrama esquemático del secado por pulverización y los factores que afectan la calidad del producto.....	21
Figura 2: Esquema cámaras de secado co-corriente, (a) Aspersor rotativo inclinado, (b) línea de corriente inclinada.....	22
Figura 3: Esquema cámara de secado a contracorriente.....	23
Figura 4: Atomizador rotativo.....	24
Figura 5: Boquilla hidráulica.....	24
Figura 6: Boquilla neumática.....	25
Figura 7:Boquilla ultrasónica.....	25
Figura 8: Esquema ciclón.....	26
Figura 9: Esquema principal del análisis del CFD.....	28
Figura 10: Diseño inicial del <i>spray dryer</i>	32
Figura 11: Selección ventilador.....	38
Figura 12: Montaje del sistema de calentamiento.....	39
Figura 13: Modelado perfiles de velocidad para dimensionamiento tapa de la cámara de mezcla.....	40
Figura 14: Modelado perfiles de velocidad para dimensionamiento tapa de la cámara de mezcla. (a) diámetro de 20 mm Alto y ancho del acople 30 mm. (b) diámetro de 25 mm, Alto y ancho del acople 30 mm, c) diámetro 30mm, Alto y ancho del acople 30 mm, d) diámetro 40 mm, Alto y ancho del acople 30 mm.....	41
Figura 15: Amortiguador de pulsos bomba dosificadora.....	42
Figura 16: Montaje experimental para optimizar el caudal de alimentación.....	42
Figura 17: Obtención del zumo de naranja valencia, (a) lavado y secado, (b) pesado de las naranjas, (c) extracción del zumo mecánicamente y colado.....	48
Figura 18: Cálculo de maltodextrina y pesaje para incorporar al zumo de naranja.....	49

Figura 19: Resultados aspersión de zumo de naranja, con presión de aire en 1,5 bar; caudal de líquido en 0,1 l/h; temperaturas de entrada y salida en 200/80 °C y maltodextrina en 10 % (p/p).	50
Figura 20: Resultados aspersión de zumo de naranja, con presión de aire en 1,8 bar; caudal de líquido en 0,1 l/h; temperaturas de entrada y salida en 200/80 °C y maltodextrina en 10 % (p/p)	51
Figura 21: Producto obtenido con las siguientes condiciones: presión de aire en 1,8 bar; caudal de líquido en 0,1 l/h; temperaturas de entrada y salida en 200/80 °C y maltodextrina en 10 % (p/p).	52
Figura 22: Esquema del método RANS flujo medio en el tiempo	54
Figura 23: Geometría y malla iniciales para la simulación de un Spray Dryer[11]	56
Figura 23: Geometría y malla iniciales para la simulación de un Spray Dryer	57
Figura 24: Perfiles de velocidad para el Aire y el Líquido a 0.75 s de simulación	58
Figura 25: Geometría y enmallado inicial para la simulación.....	58
Figura 26: Perfiles de velocidad obtenidos para la primera simulación	59
Figura 27: Vista superior de la geometría y el enmallado, se aprecia claramente la diferencia entre el refinamiento y el tamaño de los volúmenes.	61
Figura 28: Vista superior de la geometría y el enmallado, se aprecia claramente la diferencia entre el refinamiento y el tamaño de los volúmenes	61
Figura 29: Perfiles de velocidad iniciales para el modelo multifase.	63

Lista de tablas

Tabla 1: Propiedades térmicas del aire a temperatura y presión dadas. [Autores].....	33
Tabla 2: Áreas y velocidades del aire. [Autores].....	34
Tabla 3: Cálculo caída de presión del ventilador. [Autores]	36
Tabla 4: Especificaciones de operación de la boquilla seleccionada [Fabricante].....	43
Tabla 5: Combinaciones de presión de aire y caudal de líquido seleccionadas [Autores]43	
Tabla 6: Resultados ensayos para determinar presión de aire y flujo de líquido óptimos del <i>spray dryer</i> [Autores]	44
Tabla 7: Resultados ensayos para presiones de aire de 1,5 y 1,8 bares con caudal de líquido de 0,3 l/h [Autores].....	45
Tabla 8: Resultados ensayos para presiones de aire de 1,5 y 1,8 bares con caudal de líquido de 0,1; 0,15; 0,2 l/h con temperatura del aire de 120 °C [Autores].	46
Tabla 9: Composición nutricional de la naranja valencia expresado en g/100g de muestra [28].	47
Tabla 10: Cálculo cantidad de maltodextrina para 100 gr de zumo de naranja [Autores].49	
Tabla 11: Condiciones de frontera y parámetros principales para la simulación inicial [Autores].....	59
Tabla 12: Comparación entre los resultados obtenidos para la malla inicial y la malla optimizada [Autores].....	60
Tabla 13: Parámetros modelo multifase [Autores].	63

1. Introducción

La comercialización y almacenamiento de una gran cantidad de productos agrícolas puede limitarse por la velocidad de degradación de estos, debido a la actividad de agua y el contenido de azúcares. Lo anterior aumenta los costos operacionales de embalaje y transporte de estos productos. Una de las alternativas más utilizadas, por el valor agregado a los productos, por la facilidad de embalaje y transporte, es la deshidratación de productos agrícolas especialmente de frutas [1].

Existe una gran variedad de técnicas de deshidratación/secado que se utilizan para disminuir el contenido de agua en alimentos, sin embargo, muchas de estas técnicas requieren de tiempos prolongados y altas temperaturas que pueden degradar parcialmente las propiedades nutricionales y características organolépticas de los productos. Una de las técnicas que mejor conserva las propiedades y características del producto original, es el secado por aspersión o *spray drying*, método que se utiliza comercialmente para producir productos en polvo. La ventaja de esta técnica es el poco tiempo de residencia a la que se puede realizar el proceso de secado. La reducción del tiempo de residencia permite que se mantenga el color, el sabor y un alto valor nutricional en el producto al final del proceso debido a que el tiempo de contacto con el aire a alta temperatura es mínimo (por lo general menor a 3 segundos) [1].

Existen tres parámetros de calidad que permiten evaluar la calidad de un producto obtenido por secado por aspersión; la densidad aparente del polvo, la humedad y su valor nutricional (contenido de vitaminas). La densidad aparente alta reduce los costos de transporte y empaque y le da mayor fluidez al polvo, mientras que un contenido bajo de humedad (<5%) mejora la estabilidad del producto frente a reacciones de degradación durante el almacenamiento. Estas variables están estrechamente relacionadas con las condiciones del proceso de secado. Las variables de operación que tienen una mayor influencia sobre las propiedades finales del producto son la concentración del flujo de alimentación, la

temperatura del aire de secado, el caudal del flujo de alimentación, el caudal del aire de secado, el tipo de atomizador, la velocidad del atomizador, la cantidad de encapsulante y el tipo de encapsulante, entre otras [1].

La principal limitación relacionada a la pulverización de zumos frutales se debe a que estos son ricos en azúcares, adquiriendo un comportamiento adherente cuándo su temperatura supera la temperatura de transición vítrea (40°C aproximadamente); durante el proceso las paredes de la cámara de secado se calientan debido al contacto con el aire de secado, superando la temperatura de transición vítrea de los azúcares y generando una acumulación del producto en las paredes de la cámara. La utilización de encapsulantes durante el secado ayuda a disminuir este fenómeno, sin embargo, siempre hay algún grado de acumulación del producto en la cámara. Los encapsulantes más usados para el secado de zumos de frutas y verduras son la goma arábica y la maltodextrina [1].

El objetivo de esta investigación es fijar los rangos de operación del secador por aspersion permitiendo así la parametrización de los mismos. Por otro lado, se corrobora el modelo CFD y se ajusta de acuerdo con los datos experimentales, mejorando la predicción del modelo y permitiendo una mejor exactitud.

2. Justificación

Colombia es un país reconocido por la producción de frutas y hortalizas; en términos de valor en el 2020, las exportaciones de fruta y hortalizas tanto frescas como procesadas sumaron US\$ 860 millones de dólares [2]. En el país se producen alrededor de unas 500.000 toneladas de naranja [3], pero la geografía del país dificulta la extracción y transporte de estas materias en natura por lo que se requiere de ciertos procesos para extender la durabilidad de estas después de la cosecha. Uno de los métodos más utilizados es el secado, pues reduce la actividad de agua, permitiendo una disminución en la proliferación de microorganismos y bacterias [4]; así mismo, disminuye los costos de transporte.

Las frutas son fuentes importantes de vitaminas, minerales y carbohidratos, estos compuestos son esenciales y deben consumirse constantemente en la dieta alimenticia [5]. Por lo anterior, es necesario que los procesos postcosecha que se realicen a los alimentos no degraden sus propiedades alimenticias; para esto el secado por aspersion es una técnica bien establecida y ampliamente utilizada para convertir zumos de fruta en polvo. Los polvos producidos se pueden conservar de meses a años dependiendo del empaque [6]; adicional, la producción de polvos de frutas y hortalizas altamente estructurados y regularmente microestructurados pueden cumplir con los requisitos de las industrias farmacéutica y cosmética, lo que abre nuevos mercados [5].

La demanda de polvos frutales ha tenido un aumento considerable, debido a los múltiples beneficios de la aplicación de estos en variedad de productos alimenticios [5], por lo cual es importante evidenciar como los parámetros de la técnica de secado por aspersion influyen en la calidad final del producto y se hace necesario optimizar esos rangos de operación para lograr un producto de calidad; por otra parte en la actualidad se utiliza la simulación de procesos industriales con técnicas computacionales como el caso de la mecánica de fluidos computacional (CFD), como una alternativa para diseñar equipos

reduciendo costos de inversión, pero siempre es necesario la validación experimental que permita mejorar el modelo computacional para el desarrollo de nuevas investigaciones [5].

3. Antecedentes

El secado por aspersión o *spray dry*, es una operación unitaria en la cual se transforma una materia en su forma líquida, a su forma sólida y seca, mediante la dispersión de pequeñas gotas con diámetros que oscilan de 10 a 200 μm , las cuales se someten a una corriente de aire caliente con temperaturas entre 150 a 300 $^{\circ}\text{C}$, obteniéndose un polvo, granulo o aglomerado [7]. Particularmente es utilizado en la industria farmacéutica y alimentaria debido a los cortos tiempos de residencia a los que se somete al material, lo cual es una ventaja importante en el caso de materiales sensibles a la temperatura [8].

El secado por aspersión consta de tres pasos, primero la atomización de la muestra de alimentación, el secado de las gotas de líquido producidas por la atomización y por último la recuperación del polvo seco como se observa en la Figura 1. La atomización maximiza el área de contacto para un secado eficiente y efectivo [9]. Entre los atomizadores más usados se encuentran los rotativos, boquillas de presión y boquillas de fluido doble, estas últimas crean gotas con una distribución de volumen mayor que las rotativas, por lo cual se prefieren para aplicaciones con un tamaño de partícula pequeño [9]. Las gotas atomizadas se mezclan con el aire caliente en la cámara de secado, como la temperatura del aire es mayor provoca la evaporación del agua en las pequeñas gotas. Dependiendo la dirección de la corriente de aire los secadores pueden ser co-correinte, contra corriente o mixto. Una vez finalizado el secado las partículas secas se separan de la corriente de aire utilizando un ciclón [9].

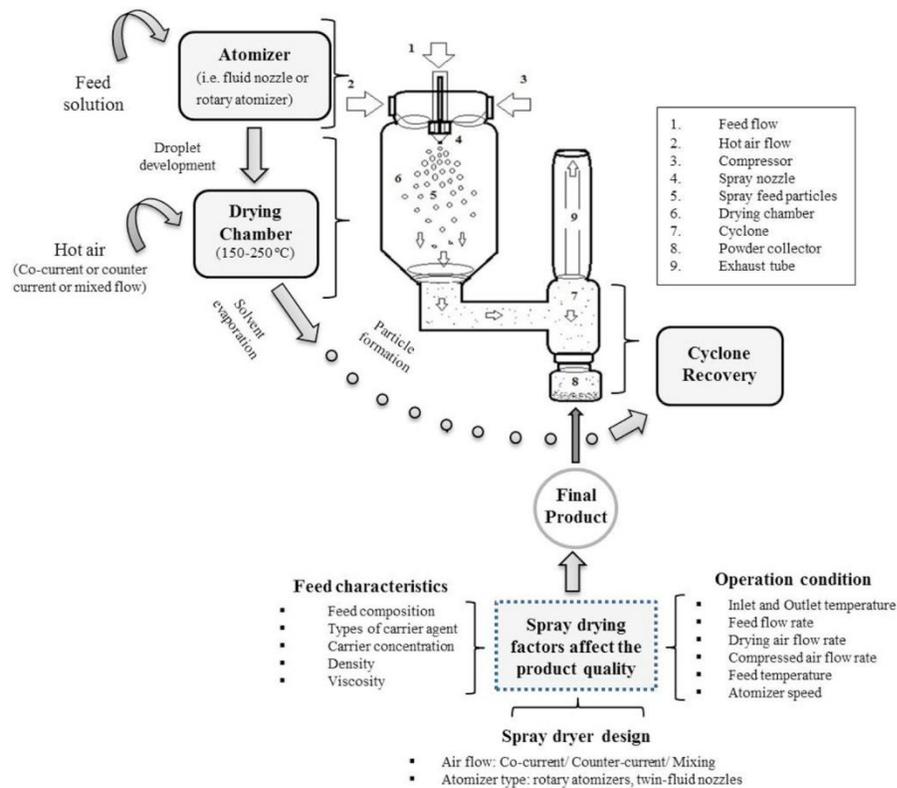


Figura 1 : Diagrama esquemático del secado por pulverización y los factores que afectan la calidad del producto. (Bibliografía [9])

3.1 Cámara de secado

Su función principal es encerrar el *spray* producido durante la atomización y asegurar que las gotas sean secadas mediante el contacto con el aire caliente, esto se logra permitiendo un tiempo de residencia suficiente para que las gotas evaporen la humedad requerida [10]. Las cámaras son diseñadas para descargar la mayoría de los productos en la base, o para transportar todo el producto con el aire de salida y recuperarlo posteriormente en otra unidad [11]. Es de vital importancia asegurar que las temperaturas de la cámara de secado no excedan las temperaturas de transición vítrea de los zumos a secar pues se generaran acumulaciones de producto en la cámara de secado.

3.1.1 Cámaras co-corriente o flujo paralelo

En este tipo de cámaras tanto la atomización del producto como el aire de secado se suministran por el mismo lado, generalmente en la parte superior de la cámara (Figura 2), permitiendo que ambas viajen en la misma dirección durante el recorrido por el secador. El aire caliente contacta inicialmente a las gotas atomizadas. Esto favorece a los materiales termo sensibles, ya que éstos son protegidos de las altas temperaturas por enfriamiento evaporativo. El gas de secado se va enfriando al pasar a través de la cámara y las partículas secas se encuentran con aire más frío a la salida del equipo [12].

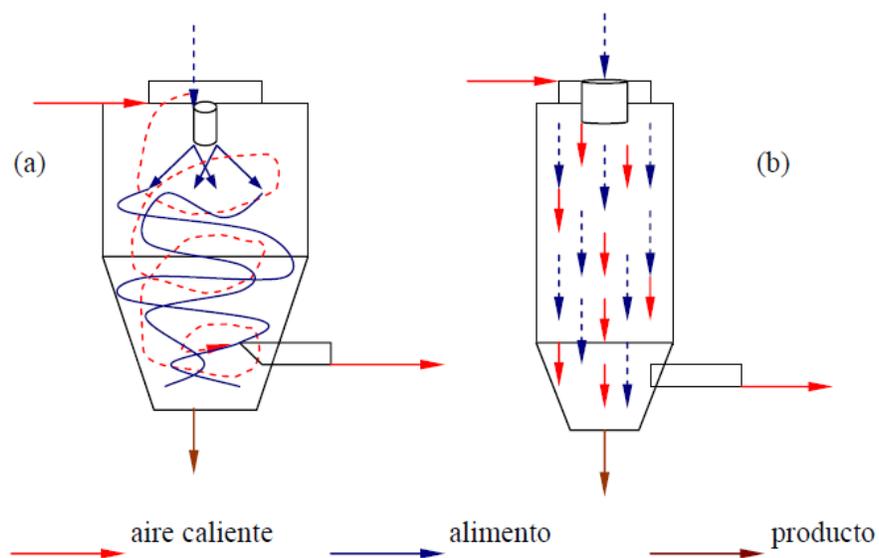


Figura 2: Esquema cámaras de secado co-corriente, (a) Espersor rotativo inclinado, (b) línea de corriente inclinada. (Bibliografía [10]).

3.1.2 Cámaras contra corriente

Estas cámaras tienen un arreglo inverso, la aspersion generalmente se hace por la parte superior de la cámara (Figura 3) mientras que el suministro del aire caliente se hace por la parte inferior, esto genera que los flujos tengan direcciones opuestas, el aire crea varias rotaciones en la entrada, pero debido a la altura de esta, no es posible generar rotaciones en regiones superiores de la cámara. Este diseño puede ser usado únicamente para materiales no sensibles al calor. Es menos común que el arreglo en paralelo, los secadores

por pulverización a contracorriente se utilizan principalmente en la producción de detergentes y fertilizantes químicos. En términos de dinámica de flujo, el proceso es más complejo que la co-corriente debido a la mezcla intensiva de las fases [13].

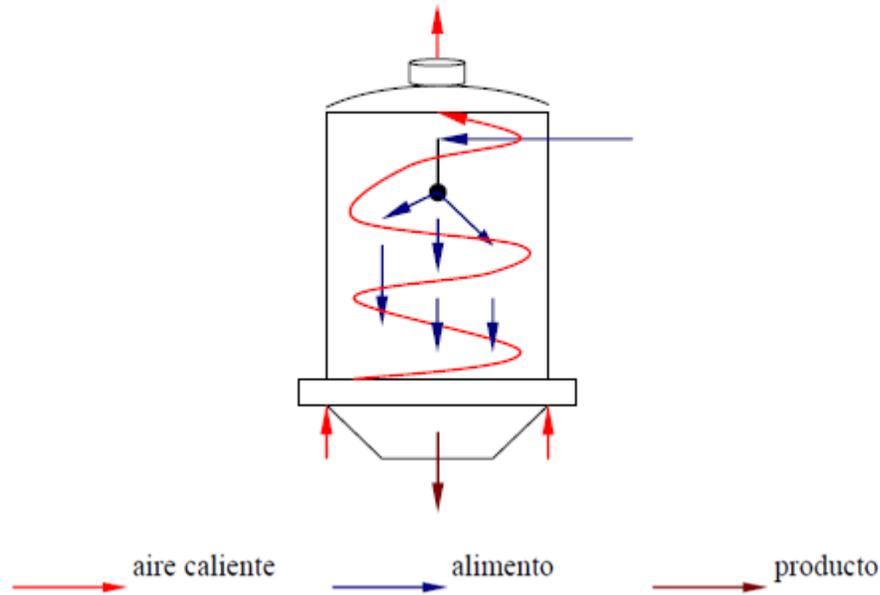


Figura 3: Esquema cámara de secado a contracorriente. (Bibliografía [10])

3.2 Atomizador

La atomización es la característica principal de un secador por aspersion. Se considera que el atomizador es el corazón de un secador por atomización, y elegir el atomizador correcto es la clave para lograr una producción económica y un secado exitoso. La función básica del atomizador es maximizar el área del volumen de superficie de la alimentación líquida para un secado efectivo y eficiente. Las propiedades del producto final dependen del diseño del atomizador y su rendimiento. La presión de atomización tiene una gran influencia en las propiedades físicas del producto secado por pulverización [9].

3.2.1 Atomizadores rotativos

Los atomizadores rotativos (Figura 4) son ruedas o discos colocados horizontalmente que tienen ranuras en los perímetros. La alimentación se suministra al centro del disco giratorio y la alimentación se empuja a las ranuras debido a la fuerza centrífuga de la rotación. Estos surcos generan gotas de forma y tamaño homogéneos [14]. El rendimiento del producto

es menor en atomizadores rotativos en comparación con otros tipos de atomización. Por lo cual, no es adecuado para alimentos costosos [10].



Figura 4: Atomizador rotativo. (Bibliografía [10])

3.2.2 Boquillas hidráulicas

Este tipo de boquillas, se caracteriza porque la alimentación fluye bajo presión a través de una boquilla con diámetro decreciente (Figura 5). Las boquillas hidráulicas no son adecuadas para los alimentos con viscosidades muy altas. El único parámetro que se puede ajustar con este tipo de boquillas es la velocidad de alimentación [15].



Figura 5: Boquilla hidráulica. (Bibliografía [16])

3.2.3 Boquillas neumáticas

En las boquillas neumáticas (Figura 6), la atomización de la alimentación se logra por la presión del gas portador comprimido. La creación de altas fuerzas de fricción sobre la alimentación provoca la desintegración de la solución en las gotas. La forma y el tamaño de las gotas formadas dependen de las propiedades de alimentación (tensión superficial, densidad y viscosidad) y de la velocidad del gas comprimido [15].



Figura 6: Boquilla neumática. (Bibliografía [17])

3.2.4 Boquillas ultrasónicas

Las boquillas ultrasónicas (Figura 7) son una tecnología relativamente nueva en atomización. Las ondas ultrasónicas crean vibraciones y causan la atomización de la alimentación. La ventaja de estas boquillas es la capacidad de autolimpieza y distribución de tamaño de partícula más estrecha. Las gotas formadas dependen de la frecuencia de trabajo. Además, las gotas formadas se mueven con una velocidad baja que aumenta el rendimiento del producto [15].



Figura 7: Boquilla ultrasónica. (Bibliografía [18])

3.3 Sistema de recolección de sólidos

El sistema comúnmente utilizado para la recolección de los sólidos secos en el secado por aspersión es el ciclón (Figura 8), la operación del ciclón está basada en un movimiento en remolino "vortex", donde la fuerza centrífuga actúa sobre cada partícula forzándola a dejar el eje del ciclón y dirigirse hacia la pared interna del ciclón. Sin embargo, el movimiento en dirección radial es el resultado de dos fuerzas opuestas: la fuerza centrífuga que actúa moviendo la partícula hacia la pared, mientras que la fuerza de arrastre del aire actúa llevando las partículas hacia el eje. La fuerza centrífuga predomina y por lo tanto se produce la separación [19].

El polvo y el aire entran tangencialmente en el ciclón a velocidades iguales. Ambos descenden girando en forma espiral hacia la base del ciclón separando el polvo hacia la pared del mismo. El polvo sale por la base del ciclón mediante un dispositivo de cierre. El aire limpio asciende en forma de espiral a lo largo del eje central del ciclón y sale por la parte superior [19].

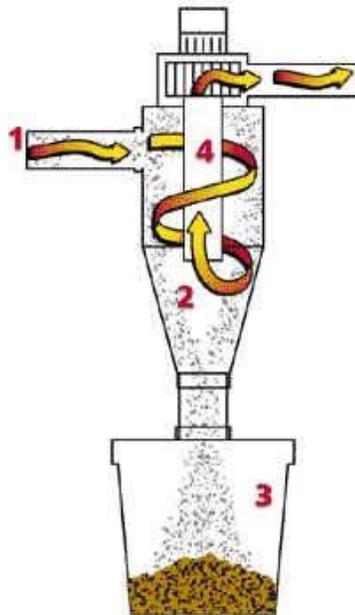


Figura 8: Esquema ciclón. (Bibliografía [20])

3.4 Proceso de optimización

El objetivo de la optimización es mejorar el rendimiento de un proceso ajustando sus parámetros. En el pasado, la optimización se realizaba observando el efecto de la alteración de un solo factor en una respuesta experimental, mientras que todos los demás factores permanecían fijos, lo que se conoce como optimización de una variable a la vez. El inconveniente de este método era que se requería una gran cantidad de pruebas; los efectos interactivos entre los parámetros no se estudiaron y los efectos de los parámetros sobre la respuesta no se describieron completamente. Para superar estas limitaciones, la optimización puede llevarse a cabo mediante el uso de técnicas estadísticas multivariadas, como diseño factorial completo, diseño D-óptimo, metodología de superficie de respuesta y diseño combinado. La metodología de superficie de respuesta (RSM) es una técnica multivariada, que se utiliza principalmente en el proceso de optimización que involucra dos o más variables para la observación y el análisis estadístico [9].

3.5 Dinámica de fluidos computacional

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es un conjunto de técnicas numéricas para la solución de ecuaciones de flujo de fluidos que representan la solución de modelos que describen el comportamiento de procesos dinámicos de transferencia de calor y masa; el avance en el desarrollo de equipos computacionales ha convertido esta técnica en una herramienta versátil y con cada vez más potencialidad para ser usada en el modelado y análisis de procesos en Ingeniería, tanto para el diseño como para la optimización [21].

En el modelamiento y simulación por CFD se requiere de tres etapas (Figura 9), la primera es la definición del problema, para esto es necesario definir las ecuaciones de transporte, cada problema conforma un conjunto específico de ecuaciones que gobiernan el fenómeno, acompañado con sus respectivas condiciones iniciales y de frontera; la segunda etapa comprende la solución de las ecuaciones que conforman el fenómeno haciendo uso de herramientas matemáticas como el método de las diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos, que permiten discretizar las ecuaciones diferenciales del fenómeno en expresiones algebraicas que se solucionan a través de métodos numéricos. Estas soluciones se programan en diferentes softwares como Open Foam, Matlab, Ansys CFX, entre otros. La última fase comprende el análisis de resultados [21].

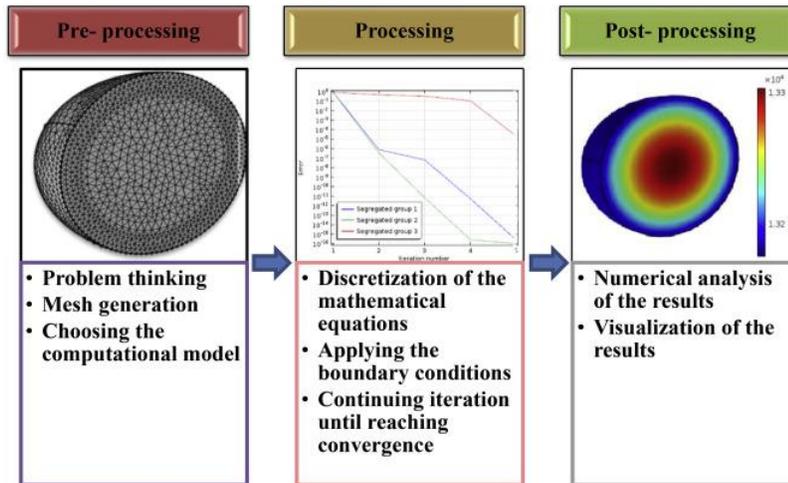


Figura 9: Esquema principal del análisis del CFD. (Bibliografía [22])

Una de las operaciones que más atención ha recibido por parte de los investigadores en CFD es el secado por aspersión [23]. La naturaleza 3D de los secadores por pulverización hace que sea imposible utilizar modelos empíricos para su descripción. Entonces, CFD es una herramienta útil para modelar este tipo de secadores. El enfoque euleriano-lagrangiano se ha utilizado en el modelado CFD de los secadores por pulverización en la mayoría de los casos, lo que puede predecir la trayectoria de movimiento de las partículas y la transferencia de calor y masa entre las partículas y el aire de secado [22].

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Definir los parámetros de operación y probar experimentalmente un prototipo de secador por aspersion para zumo de naranja diseñado mediante CFD.

4.2 Objetivo Específicos

- Definir los rangos de operación de los parámetros del secado por aspersion de zumo de naranja.
- Probar experimentalmente el modelo computacional con el cual se diseñó el prototipo de secador por aspersion.
- Diseñar e implementar un manual de usuario para el uso adecuado del prototipo de secador por aspersion.

5.Desarrollo de paquetes trabajados

En este capítulo se presenta el desarrollo de los diferentes paquetes de trabajo, describiendo de manera lógica y ordenada los procesos y recursos utilizados.

5.1 Optimizar los rangos de operación de los parámetros del secado por aspersion de zumo de naranja.

Está demostrado que la humedad y otras propiedades de los alimentos secados por aspersion depende significativamente de los parámetros operativos del mismo [24], entre los que se incluyen, la concentración de alimentación, la temperatura del aire de entrada y de salida, la tasa de flujo de alimentación, la tasa de flujo de aire comprimido, la tasa de flujo de aire de secado, el tipo de atomizador y la velocidad del atomizador [25]. Aunque el tiempo de residencia del secado por aspersion es corto, requiere de temperaturas altas, entre 150-200°C, lo que puede alterar compuestos sensibles como la vitamina C. Adicional, los zumos de fruta son ricos en azucares, lo que los hace difíciles de secar sin un agente portador debido a su comportamiento pegajoso y baja temperatura de transición vítrea lo que se traduce como acumulación de producto en las paredes del secador [9].

El prototipo de secador a utilizar fue diseñado previamente en CFD como parte de un proyecto HERMES. A partir de la modelación se logró determinar las características requeridas para un secador por aspersion versátil con el fin de permitir la experimentación con varios zumos de frutas. Como parte de la validación del modelo fue necesario realizar pruebas experimentales. Inicialmente el diseño del secador tenía la configuración que indica la figura 10, donde el aire requerido era suministrado por una bala de aire seco, se ajustaba su presión con los manómetros provistos en la bala, el caudal de aire se regulaba a partir de un flujómetro; el aire se calentaba de acuerdo con el requerimiento de temperatura e ingresaba a la boquilla que producía la aspersion. Una vez producida la

aspersión la temperatura del aire se reducía debido a la expansión del mismo en la boquilla, lo cual no permitía que se llegara a las temperaturas deseadas en el proceso.



Figura 10: Diseño inicial del *spray dryer*. (Autores)

De las pruebas realizadas se identificaron tres fallas en el diseño inicial necesitando entonces realizar algunas modificaciones; la primera, hace referencia al aire que realiza la aspersión (aire a alta presión), el cual debe separarse del aire que proporciona el calentamiento (aire a alta temperatura), ya que por la naturaleza del proceso, al expandir el fluido en la boquilla de aspersión el mismo va a perder su temperatura; la segunda falla tiene que ver con el uso de aire comprimido en balas como suministro del aire a alta presión, ésta eleva los costos de operación por los tiempos de experimentación requeridos en cada prueba, por lo que se implementó el suministro de aire con un compresor; por último, como se van a separar los aires de alta presión y de calentamiento se hace necesario modificar la tapa del equipo.

5.1.1 Sistema de calentamiento de aire

Para realizar el proceso de secado por aspersión fue necesario aumentar la temperatura del aire de 20 °C a 200 °C. Para esto se introdujo un flujo de calor sensible a través de resistencias eléctricas ubicadas en el interior del tubo por donde fluye el aire. También fue necesario seleccionar un ventilador para impulsar el aire a través del sistema.

Primero se evaluaron las propiedades térmicas del aire a las condiciones de temperatura media y presión de trabajo las cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades térmicas del aire a la temperatura y la presión dadas. [Autores].

P=1 bar T=383 K	
Densidad (kg/m ³)	0,9724
Cp (kJ/kg*K)	1,01
k (W/m*K)	0,03058
μ Pa*s	2,12E-05

En la Tabla 2 se muestran los valores de área y velocidades desarrolladas por el aire en la tubería:

Tabla 2: Áreas y velocidades del aire. [Autores]

Diámetro (m)	0,1
área (m ²)	7,85E-03
Caudal (m ³ /sg)	4,72E-02
Velocidad (m/sg)	6

Para realizar el cálculo se comenzó formulando la cantidad de calor requerido para hacer el calentamiento sensible del aire:

$$\dot{\phi} = \dot{m} * Cp * (T_f - T_i) [1]$$

$$\dot{\phi} = \rho * Q * Cp * (T_f - T_i)$$

Reemplazando los valores con los datos ya descritos en las tablas 1 y 2 se obtuvo el siguiente valor de calor donde FS es un factor de seguridad.

$$\dot{\phi} = 6.2 \text{ kW} * FS$$

Dado que las eficiencias de transferencia de calor por los distintos mecanismos no tienen una efectividad del 100 % se toma un factor de seguridad (FS) del 20% por lo cual el valor de calor requerido fue de:

$$\dot{\phi} = 7.2 \text{ kW}$$

Ya calculado el calor requerido por la resistencia fue necesario calcular la longitud durante la cual se debe aplicar este calor, para realizar el cálculo se igualó el calor sensible con el calor que realiza el proceso de calentamiento por convección que sufre el aire durante la tubería.

$$\dot{\phi} = h * A_s * \Delta T [2]$$

Donde:

$$A_s = \pi * \phi * L [3]$$

Como se aprecia en las ecuaciones [2] y [3] se tienen dos incógnitas la primera es el coeficiente de transferencia por convección y el segundo es la longitud; para encontrar el coeficiente de convección se utilizarán las correlaciones de Dittus Boelter y Gnielinski.

Correlación de Dittus Boelter:

$$Nu_D = 0.023 Re^{4/5} * Pr^{0.4} \quad [4]$$

Correlación de Gnielinski:

$$Nu_D = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re_D - 1000) * Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \quad [5]$$

Donde:

$$Re = \frac{\rho * Vel * \phi}{\mu} \quad [6] \quad Pr = \frac{\mu * Cp}{K} \quad [7] \quad f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad [8]$$

Realizando las operaciones correspondientes se obtiene que:

$$Re=275.204,20$$

$$Pr=0,701$$

$$Nu_D = 448,52 \quad (Dittus)$$

$$Nu_D = 624,14 \quad (Gnielinski)$$

Utilizando la siguiente expresión del número adimensional de Nusselt, se logró encontrar el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección para el caso de estudio.

$$Nu_D = \frac{h\phi}{K} \quad [9]$$

$$h = 1371,59 \frac{W}{m^2K} \quad (Dittus)$$

$$h = 1908,62 \frac{W}{m^2K} \quad (Gnielinski)$$

Reemplazando la ecuación [3] en la ecuación [2] y despejando la longitud se obtuvo la siguiente expresión y las siguientes longitudes donde ΔT es la diferencia de temperatura

entre la entrada y la salida de aire en la tubería, se considera que el flujo de calor es constante e igual en toda la longitud del tubo.

$$L = \frac{\dot{\phi}}{h\pi\phi\Delta T} [10]$$

$$L = 1,3 \text{ m (Dittus)} \quad L = 0,93 \text{ m (Gnielinski)}$$

Se definió una resistencia de 7,5 kW y una longitud de 1 m como requerimientos para realizar el proceso de calentamiento.

5.1.2 Selección del ventilador

Para generar el movimiento del aire caliente fue necesario seleccionar una unidad de ventilación que venza las pérdidas de presión producidas por los diferentes accesorios del sistema. Para una adecuada selección del ventilador se necesita el caudal y la caída de presión, el caudal se determinó a partir de los perfiles de velocidad que se requerían para generar el vórtice de secado, se tomaron de acuerdo con la simulación en CFD; el cálculo de la caída de presión se encuentra en la Tabla 3.

Tabla 3: Cálculo caída de presión del ventilador. [Autores]

1. CRITERIO DETERMINACIÓN CAUDAL

POR PUNTO:

MODELAMIENTO EN CFD

TEMPERATURA AIRE (°C)	20	ALTITUD (m.s.n.m)	2600	PRESIÓN ATMOSFERICA (mm. C. Hg)	560,01
DENSIDAD AIRE (kg/m ³):	0,88	FACTOR ALTURA	0,74	DISTANCIA VERTICAL (Metros en contra de la gravedad)	1,00

2. DIMENSIONAMIENTO DE CONDUCTOS

Método dimensionamiento de conductos:

Igual fricción por unidad de longitud, dimensiones obtenidas mediante uso de "ductulator"

TRAMO	DIMENSIONES (pulg)		ÁREA (pies 2)	CAUDAL (pies 3 / min)	VELOCIDAD (V) (pies/ min)	PRESIÓN DINÁMICA (Pv) (pulg. C.A)	OBSERVACIÓN
	Ancho	Alto					
1	4	4	0,11	100,00	900,00	0,04	

Nota: se relaciona dimensiones de trayecto más largo

3. CÁLCULO CAIDA DE PRESIÓN EN CONDUCTOS

Pérdidas por fricción por cada 100 pies:

0,100

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	LONGITUD EQUIVALENTE (pies)	LONGITUD TOTAL (pies)	CAIDA DE PRESIÓN (Pulg. C.A)
1	PÉRDIDA PRIMARIA				
1,1	Distancia total desde rejilla de extracción más alejada, hasta persiana de descarga	1	5	5	0,004
2	PÉRDIDA SECUNDARIA				
2,1	Codo	1	10	10	0,01
2,2	Banco de Resistencias	1	50	50	0,04
2,3	Acoples	2	15	30	0,02
CAIDA DE PRESIÓN POR CONDUCTOS					0,07
PÉRDIDA POR GRAVEDAD					0,03
PÉRDIDA EN PERSIANAS Y/O COMPUERTAS					0,00
PÉRDIDAS EN FILTROS DE AIRE					0,00
CAIDA DE PRESIÓN TOTAL					0,10

Ya definidos los valores de caudal y caída de presión necesario se realiza la selección. La Figura 11 muestra la ficha técnica del equipo seleccionado el cual entrega 100 CFM a una caída de presión de 0,1 InWg.



SPECIFICATIONS

BFQ110

EXHAUST FANS



100 CFM/3.5 Sones @ 0.10" SP.



Acceptable for use over tub or shower when installed in a GFCI protected branch circuit.

- Grill**
White, polymeric grill secured in place with torsion springs; easily removed if necessary, dimensions - 10 1/4" x 11 1/4".
- Blower Wheel**
One piece polymeric wheel 5 1/4" diameter, 2 3/4" wide, with 48 fins.
- Motor**
Heavy duty, permanently split capacitor, plug-in, 4 pole motor, life time lubrication, thermally protected, suitable for continuous operation. Rated 120 volts, 60 hz.
- Fan Housing**
PC/ABS polymeric, dimensions 8 1/2" x 9 1/4" x 4 1/4".
- Duct Collar**
Plastic collar for 4" duct connection, comes complete with built in non-metallic back draft damper for quiet operation.
- Ventilating Area**
For bathrooms up to 100 sq. ft. For other rooms up to 125 sq. ft.
- Single Pack Shipping Info**
Box Dim: 11 1/4" x 12" x 6 1/2"
UPC: 0-8316290316-7
Shipping Weight: 5 1/2 lbs.
- Unit Mounting**
Designed to mount in ceilings with at least 6" of clearance. The unit is mounted directly to the joist using a separate lock-in bracket (included with unit). The housing will mount through drywall thickness up to 3/4", with a rough-in opening of 8 7/8" x 9 1/4".

EXPANDED PERFORMANCE

	Static Pressure (inches of w.g.)							Sones @ .1 SP	Fan Speed RPM	Maximum Fan Watts	Amps
	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3				
<i>Air Flow - CFM</i>	107	104	100	97	92	87	82	3.5	1625	72.5	0.7

PROJECT	ARCHITECT
LOCATION	ENGINEER
CONTRACTOR	SUBMITTED BY
	DATE

FAN NUMBER	MODEL NUMBER	CFM	IN W.C.	RPM	WATTS	AMPS	SONES	QTY	OPTIONAL EQUIPMENT & REMARKS



U.S.: 820 Lincoln Avenue
West Chester, Pennsylvania 19380-4466
Tel: (610) 692-7400 • 877-304-3785
Fax: (610) 698-8048

Canada:
Brampton, Ontario
Tel: 905-456-2033
Fax: (905) 456-1015

Figura 11: Ficha técnica del ventilador seleccionado (Reporte del Fabricante)

Una vez seleccionados los elementos se procedió al montaje del sistema de calentamiento del aire, compuesto por el ventilador que se encarga de mover el aire y la resistencia eléctrica que realiza el calentamiento, en la Figura 12 se puede apreciar el resultado final.



Figura 12: Montaje del sistema de calentamiento. (Autores)

5.1.3 Modificación Tapa

El secador por aspersión requiere aire a alta presión que llegue a la boquilla y aire que conduzca el calor al *spray dryer*, debido a ese ajuste para separar el aire de alta presión del que suministra el calor, se debió realizar una modificación en la tapa para permitir que el aire caliente ingrese a la cámara de mezcla y logre generar el vórtice de aire caliente alrededor de la aspersión de zumo a secar. Para definir la modificación se realizaron los cambios en el modelo CFD de donde se obtuvo las dimensiones necesarias de la tapa, la Figura 13 muestra el modelamiento realizado, se modelaron los perfiles de velocidad producidos por un caudal de 100 CFM, variando el diámetro de la apertura de ingreso del aire a la cámara de mezcla, mientras las dimensiones del acople al ventilador (alto y ancho) se mantenían constantes en 30 mm, se buscaba que el perfil de velocidades fuera del tipo ciclón que permitieran el arrastre de las partículas, sin turbulencias altas que impulsara la

aspersión hacia las paredes de la cámara de mezcla, debido a la temperatura de las paredes, se podrían superar las temperaturas de transición vítrea y reducir la producción y calidad del producto, el mejor resultado fue cuando el diámetro de la apertura, el alto y ancho del acoplé midieron 30 mm, en la Figura 14 muestra el diseño final de la tapa.

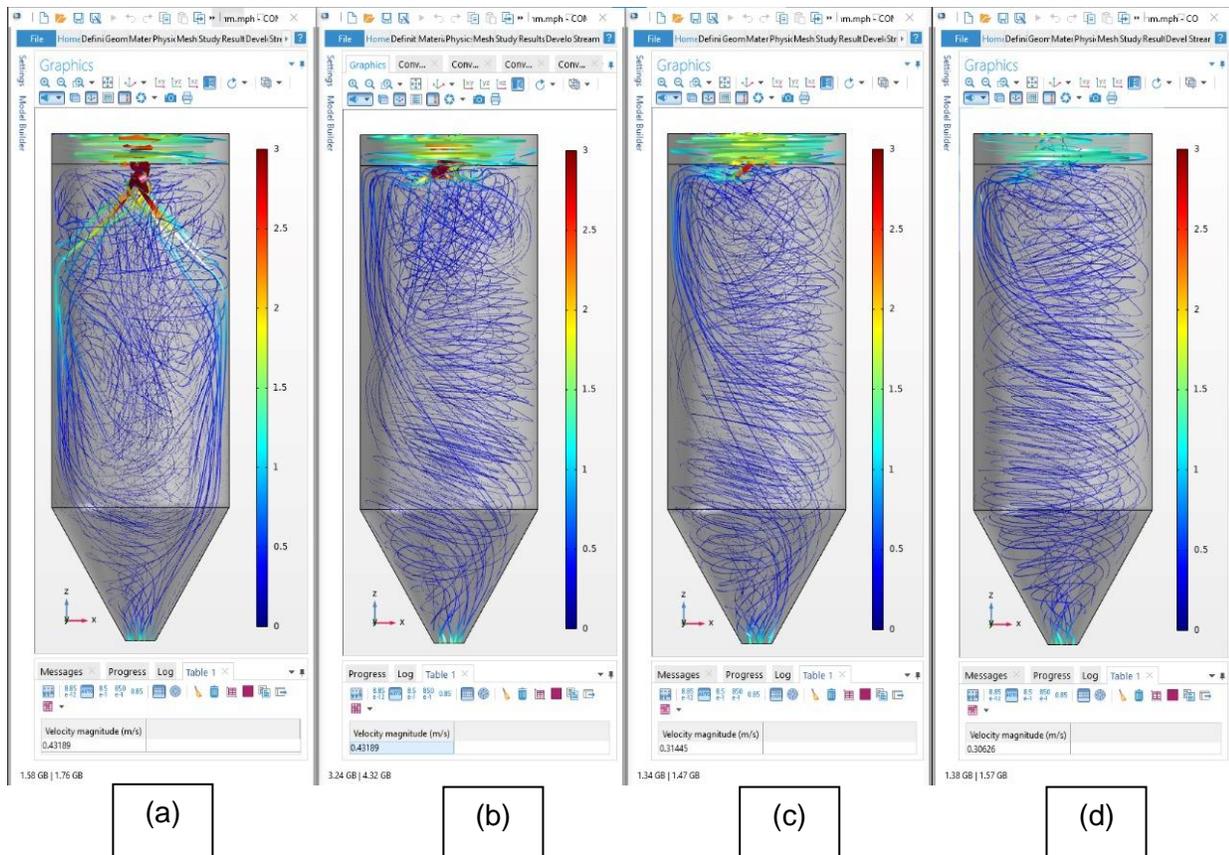


Figura 13: Modelado de perfiles de velocidad para dimensionamiento tapa de la cámara de mezcla. (a) diámetro de 20 mm Alto y ancho del acople 30 mm. (b) diámetro de 25 mm, Alto y ancho del acople 30 mm, c) diámetro 30mm, Alto y ancho del acople 30 mm, d) diámetro 40 mm, Alto y ancho del acople 30 mm (Autores)

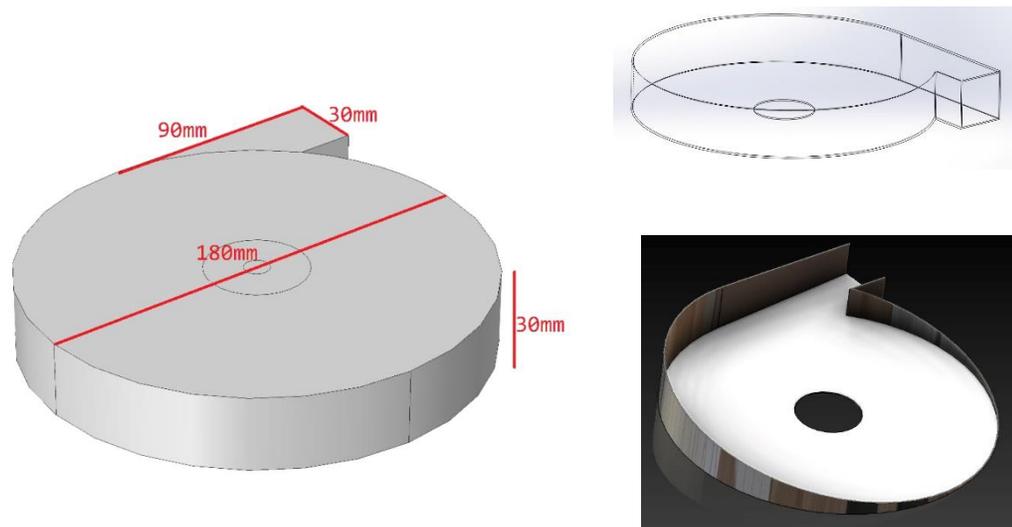


Figura 14: Diseño final de la tapa. (Autores)

5.1.4 Definición de parámetros y rangos de operación del equipo

Durante las pruebas se identificó que la bomba dosificadora generaba pulsos que no eran constantes y provocaban intermitencia en la aspersion. Para garantizar que la aspersion fuera constante se instaló un amortiguador de pulsos, el cual se puede observar en la Figura 15, el cual consta de un tanque acumulador compuesto por un cilindro de acero inoxidable, una válvula de aguja que permite controlar presión junto el manómetro.

Los factores más significativos en el secado por aspersion son la temperatura de entrada y el agente portador [9], para el caso de estudio se tomó la temperatura como variable y el agente portador se manejó constante, utilizando maltodextrina que es un agente encapsulante que para el caso del jugo de naranja permite mejorar la productividad en rangos del 18 al 35 % [26]. Otro aspecto que tiene un impacto significativo en el secado de jugo de naranja es el caudal de alimentación [26], la optimización se va a enfocar en el caudal de alimentación que depende tanto del caudal de aire comprimido, como del caudal de zumo de naranja. Para comprobar la mejor opción y así optimizar el suministro de zumo se hizo el montaje que muestra la Figura 16.



Figura 15: Amortiguador de pulsos bomba dosificadora (Autores)



Figura 16: Montaje experimental para optimizar el caudal de alimentación. (Autores)

El montaje experimental desarrollado cuenta con un cilindro del mismo diámetro de la cámara de mezcla, fabricado en acrílico, que permitió visualizar tanto el desarrollo de la aspersión como el tamaño de las partículas generadas. Por otra parte, se colocaron

balanzas en el recipiente de suministro de producto y en la cámara de mezcla, para apreciar la tasa de evaporación que producían las diferentes pruebas.

En la Tabla 4 se pueden observar las presiones desarrolladas por la boquilla seleccionada. Para el caso de estudio debido a las presiones del compresor se trabajó con el rango de 0,6 a 1,8 bar.

Tabla 4: Especificaciones de operación de la boquilla seleccionada [Sparying Systems, referencia SU16]

Spray Set-up No.	Spray Set-up Consists of Fluid and Air Cap Combination	LIQUID CAPACITY l/h and AIR CAPACITY l/min															SPRAY DIMENSIONS					
		WATER PRESSURE bar																				
		0.7 bar			1.5 bar			2 bar			3 bar			4 bar			Air bar	Water bar	A cm	B cm	C cm	D m
Air Press. bar	Water l/h	Air l/min	Air Press. bar	Water l/h	Air l/min	Air Press. bar	Water l/h	Air l/min	Air Press. bar	Water l/h	Air l/min	Air Press. bar	Water l/h	Air l/min	Air bar	Water bar	A cm	B cm	C cm	D m		
SU16	Fluid Cap 2050 + Air Cap 67-6-20-70°	0.6	5.3	10.2	1.1	8.1	13.3	1.5	8.1	16.4	2.4	8.9	22	3.1	10.5	24	0.7	0.7	14	18	23	1.5
		0.7	4.3	12.2	1.3	7.0	15.0	1.8	6.6	21	2.7	8.1	26	3.4	9.7	28	1.4	1.5	15	19	24	1.8
		0.85	3.0	14.2	1.4	6.4	17.0	2.1	4.9	25	3.0	6.4	30	3.9	7.8	36	1.8	2.0	16	20	25	2.1
		1.0	1.7	17.0	1.5	5.5	19.0	2.4	3.2	29	3.2	4.9	34	4.2	6.1	42	3.0	3.0	16	20	26	2.7
					1.7	4.5	22				3.4	4.2	37	4.6	4.4	47	3.9	4.0	19	23	30	4.0
			1.8	3.5	24				3.5	3.4	40	4.9	2.8	54								

Las pruebas se realizaron inicialmente con agua, se seleccionaron presiones de aire en 0,6; 1,1; 1,5 y 1,8 bares, mientras que los caudales de líquido se tomaron en 0,1; 0,15 y 0,2 l/h. La Tabla 5, muestra las combinaciones que se seleccionaron, así mismo se realizaron tres repeticiones por ensayo, la duración de cada ensayo fue de cinco minutos. La tabla 6 muestra los resultados de los ensayos realizados.

Tabla 5: Combinaciones de presión de aire y caudal de líquido seleccionadas [Autores]

P _{AIRE} [bar]	Q _{LIQ} BOMBA [L/h]
0,6	0,1
1,1	0,1
1,5	0,1
1,8	0,1
0,6	0,15
1,1	0,15
1,5	0,15
1,8	0,15
0,6	0,2
1,1	0,2
1,5	0,2
1,8	0,2

Tabla 6: Resultados ensayos para determinar presión de aire y flujo de líquido óptimos del *spray dryer* [Autores]

Ensayo	P _{AIRE} [bar]	P _{LIQUIDO} [bar]	T _{aire} [°C]	Q _{LIQ} BOMBA [L/h]	V _{entrada} TEORICO	V _{entrada} REAL			Tasa de Evaporación [l/h]	Q _{AIRE} [l/min]
						M _{inicial} [g]	M _{final} [g]	V [ml]		
1	0,6	0,65	104	0,1	8,3	1545	1537,5	7,5	0,1	10 a 15
2	0,6	0,65	104	0,1	8,3	1537,5	1530,5	7	0,1	10 a 15
3	0,6	0,65	104	0,1	8,3	1530,5	1524,5	6	0,1	10 a 15
4	1,1	1,175	103	0,1	8,3	1499,5	1492	7,5	0,1	14
5	1,1	1,175	103	0,1	8,3	1492	1485,5	6,5	0,1	14
6	1,1	1,175	103	0,1	8,3	1485,5	1476	9,5	0,1	14
7	1,5	1,6	104	0,1	8,3	1444,5	1435	9,5	0,1	15
8	1,5	1,6	104	0,1	8,3	1435	1427,5	7,5	0,1	15
9	1,5	1,6	104	0,1	8,3	1427,5	1419	8,5	0,1	15
10	1,8	1,9	104	0,1	8,3	1384,5	1376,5	8	0,1	15-20
11	1,8	1,9	104	0,1	8,3	1376,5	1368,5	8	0,1	15-20
12	1,8	1,9	104	0,1	8,3	1368,5	1362	6,5	0,1	15-20
13	0,6	0,65	104	0,15	12,5	1801,5	1787	14,5	0,2	10 a 15
14	0,6	0,65	104	0,15	12,5	1787	1775,5	11,5	0,1	10 a 15
15	0,6	0,65	104	0,15	12,5	1775,5	1763	12,5	0,2	10 a 15
16	1,1	1,2	103	0,15	12,5	1348,5	1335,5	13	0,2	15
17	1,1	1,2	103	0,15	12,5	1335,5	1324,5	11	0,1	15
18	1,1	1,2	103	0,15	12,5	1324,5	1313,5	11	0,1	15
19	1,5	1,55	104	0,15	12,5	1447,5	1435,5	12	0,1	15-20
20	1,5	1,55	104	0,15	12,5	1435,5	1424	11,5	0,1	15-20
21	1,5	1,55	104	0,15	12,5	1424	1412,6	11,4	0,1	15-20
22	1,8	1,85	103	0,15	12,5	1359,5	1347,5	12	0,1	15-20
23	1,8	1,85	103	0,15	12,5	1347,5	1336	11,5	0,1	15-20
24	1,8	1,85	103	0,15	12,5	1336	1325,5	10,5	0,1	15-20
25	0,6	0,65	103	0,2	16,7	1652,5	1637	15,5	0,2	10 a 15
26	0,6	0,65	104	0,2	16,7	1637	1620,5	16,5	0,2	10 a 15
27	0,6	0,65	104	0,2	16,7	1620,5	1605	15,5	0,2	10 a 15
28	1,1	1,2	104	0,2	16,7	1259	1243,5	15,5	0,2	14-15
29	1,1	1,2	104	0,2	16,7	1243,5	1228,5	15	0,2	14-15
30	1,1	1,2	104	0,2	16,7	1228,5	1212,5	16	0,2	14-15
31	1,5	1,55	104	0,2	16,7	1139,5	1124,5	15	0,2	15
32	1,5	1,55	104	0,2	16,7	1124,5	1108,5	16	0,2	15
33	1,5	1,55	104	0,2	16,7	1108,5	1094	14,5	0,2	15
34	1,8	1,85	104	0,2	16,7	1027	1012,5	14,5	0,2	15-20
35	1,8	1,85	104	0,2	16,7	1012,5	998	14,5	0,2	15-20
36	1,8	1,85	104	0,2	16,7	998	982,5	15,5	0,2	15-20

De las pruebas realizadas se observó que trabajando las presiones de aire de 0,6 bares y cualquier combinación de caudal de líquido, se presentó una aspersion con un tamaño de partícula grande, la aspersion golpeaba las paredes de la cámara de mezcla y debido al tamaño alcanzaban a llegar algunas gotas de líquido al fondo de la cámara de mezcla. Para la presión de aire de 1,1 bar se encontró que el tamaño de las partículas disminuyó

para todos los caudales pero se presentaron otras fallas, en el caso del caudal de líquido de 0,1 l/h las partículas chocaban contra las paredes; mientras que en el caudal de líquido de 0,15 l/h la aspersion no fue continua y presentó golpe de partículas en las paredes pero en menor cantidad comparado con el caudal anterior, por último para el caudal de 0,2 l/h las partículas golpeaban las paredes y la base de la cámara de mezcla.

Las presiones de aire de 1,5 y 1,8 bares presentaron las mejores aspersiones, el tamaño de partícula era fino, no se presentó goteo en la base y chocaron pocas partículas contra las paredes del secador. Como conclusión de las primeras pruebas se descartaron las presiones de aire de 0,6 y 1,1 bares y se realizó una prueba con las presiones de 1,5 y 1,8 bares aumentando el caudal de líquido a 0,3 l/h, los resultados se encuentran en la Tabla 7.

Tabla 7: Resultados ensayos para presiones de aire de 1,5 y 1,8 bares con caudal de líquido de 0,3 l/h [Autores]

Ensayo	P _{AIRE} [bar]	P _{LIQUIDO} [bar]	T _{aire} [°C]	Q _{LIQ} BOMBA [L/h]	V _{entrada} TEORICO	V _{entrada} REAL			Tasa de Evaporación [l/h]	Q _{AIRE} [l/min]
						M _{inicial} [g]	M _{final} [g]	V [ml]		
37	1,5	1,55	103	0,3	25	1186,5	1166,5	20	0,2	15-20
38	1,5	1,55	103	0,3	25	1166,5	1143,5	23	0,3	15-20
39	1,5	1,55	103	0,3	25	1143,5	1121	22,5	0,3	15-20
40	1,8	1,9	104	0,3	25	1028,5	1005,5	23	0,3	15-20
41	1,8	1,9	104	0,3	25	1005,5	982,5	23	0,3	15-20
42	1,8	1,9	103	0,3	25	982,5	964,5	18	0,2	15-20

Las pruebas a estas condiciones mostraron partículas de tamaño medio que chocaban con las paredes y caían algunas gotas a la base de la cámara de mezcla, por lo cual se descartó seguir aumentando los caudales de líquido. Debido a que la temperatura del acrílico no debe exceder de 130 °C se realizó una prueba a una temperatura de 120 °C con las presiones de aire de 1,5 y 1,8 bar, combinado con los caudales de líquido ya establecidos, mientras que la temperatura del aire se cambió a 120 °C, los resultados de estas pruebas se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Resultados ensayos para presiones de aire de 1,5 y 1,8 bares con caudal de líquido de 0,1; 0,15; 0,2 l/h con temperatura del aire de 120 °C [Autores].

Ensayo	P _{AIRE} [bar]	P _{LIQUIDO} [bar]	T _{aire} [°C]	Q _{LIQ} BOMBA [L/h]	V _{entrada} TEORICO	V _{entrada} REAL			Tasa de Evaporación [l/h]	Q _{AIRE} [l/min]
						M _{inicial} [g]	M _{final} [g]	V [ml]		
43	1,5	1,55	123	0,1	8,3	1120,5	1107	13,5	0,2	15-20
44	1,5	1,55	123	0,1	8,3	1107	1100,5	6,5	0,1	15-20
45	1,5	1,55	123	0,1	8,3	1100,5	1092,5	8	0,1	15-20
46	1,5	1,5	123	0,15	12,5	988	974,5	13,5	0,2	15-20
47	1,5	1,5	123	0,15	12,5	974,5	964	10,5	0,1	15-20
48	1,5	1,5	123	0,15	12,5	964	956	8	0,1	15-20
49	1,5	1,5	123	0,2	16,7	1107	1088,5	18,5	0,2	15-20
50	1,5	1,5	120	0,2	16,7	1088,5	1070,5	18	0,2	15-20
51	1,5	1,5	120	0,2	16,7	1070,5	1056	14,5	0,2	15-20
52	1,8	1,8	123	0,1	8,3	1183	1173	10	0,1	15-20
53	1,8	1,8	123	0,1	8,3	1173	1167,5	5,5	0,1	15-20
54	1,8	1,8	123	0,1	8,3	1167,5	1160	7,5	0,1	15-20
55	1,8	1,85	123	0,15	12,5	1244,5	1233	11,5	0,1	15-20
56	1,8	1,85	123	0,15	12,5	1233	1223,5	9,5	0,1	15-20
57	1,8	1,85	123	0,15	12,5	1223,5	1212,5	11	0,1	15-20
58	1,8	1,8	123	0,2	16,7	1348,5	1333,5	15	0,2	15-20
59	1,8	1,8	123	0,2	16,7	1333,5	1319	14,5	0,2	15-20
60	1,8	1,8	123	0,2	16,7	1319	1305	14	0,2	15-20

Los tamaños de partícula se mantuvieron finos, el choque de las partículas contra las paredes se redujo en comparación con las pruebas a una temperatura del aire de 100 °C. De las pruebas realizadas se logró establecer que los rangos óptimos para el caudal de alimentación se obtienen en las presiones de aire de 1,5 y 1,8 bares, los caudales de alimentación deben estar entre 0,1 y 0,2 l/h y la temperatura del aire de secado se debe definir de acuerdo con la bibliografía para cada producto a secar.

5.2 Realizar la validación experimental del modelo computacional con el cual se diseñó el prototipo de secador por aspersion

En el capítulo anterior se definieron las variables y rangos a controlar en el experimento. En esta sección se procede a realizar las pruebas con zumo de naranja, con estas pruebas se espera validar que los perfiles de velocidad, balances de energía, balances de masa y dimensionamiento del equipo realizados por CFD para el diseño del secador, permitan el correcto secado del zumo de naranja.

5.2.1 Procedimiento Experimental Usado

En primera medida se describe el proceso para preparar el zumo de naranja que se define como el líquido no diluido, no concentrado ni fermentado, que se obtiene por medios mecánicos luego de someter a las naranjas a compresiones [27].

Para el zumo se usaron naranjas del tipo valencia (*Citrus sinensis*), el cual presenta las siguientes características fisicoquímicas: densidad 1,053 g/cm³, 9,5 °Brix, pH 3,4; índice de madurez 21,59 y % de acidez expresado en ácido cítrico 0,44 [27], así mismo la tabla 9 muestra la composición nutricional del zumo de naranja valencia.

Tabla 9: Composición nutricional de la naranja valencia expresado en g/100g de muestra [28].

	Cáscaras	Porción comestible	Jugo o zumo
Grasa	0,23	0,30	0,29
Humedad	72,52	85,23	87,11
Proteínas	1,53	1,13	1,00
Sacarosa	1,99	4,41	4,73
Total	7,55	9,10	9,72
SST	1,69	13,06	12,59

Para obtener el zumo se lavaron las naranjas, luego se secaron y pesaron, luego las naranjas se cortaron simétricamente en dos partes y con el uso de un exprimidor manual

se extrajo el zumo que luego se pasó por un colador para retener semillas, conchas y bagazos, la Figura 17 muestra el proceso mencionado.

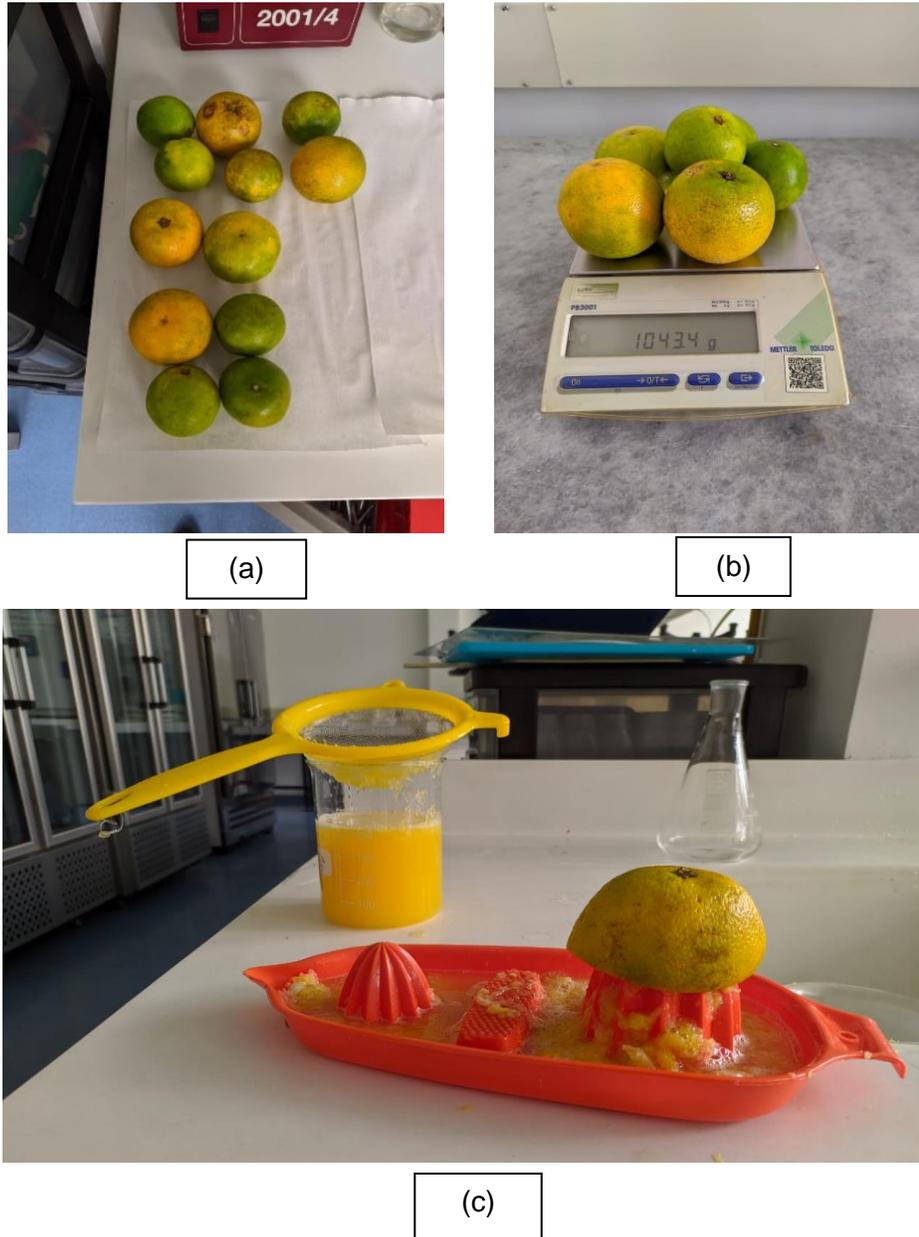


Figura 17: Obtención del zumo de naranja valencia, (a) lavado y secado, (b) pesado de las naranjas, (c) extracción del zumo mecánicamente y colado. (Autores)

Luego de obtener el zumo se calculó la cantidad de maltodextrina para una concentración del 10% (p/p). Para calcular la cantidad de maltodextrina se utilizó la siguiente expresión:

$$C_j M_j + C_m M_m = C_{sol} M_{sol} \quad [1]$$

Se hizo la medición de la humedad inicial de la maltodextrina, obteniendo 7% en base seca. La Tabla 10 consigna el cálculo para obtener 100 gr de zumo de naranja con la concentración de maltodextrina requerida:

Tabla 10: Cálculo cantidad de maltodextrina para 100 gr de zumo de naranja [Autores].

VARIABLE	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
Msol	100	Masa de la solución deseada [g]
Cj	0,07	Concentración de sólidos del jugo/pulpa [gST/g de jugo]
Cm	0,97	Concentración de sólidos del encapsulante [gST/g de encapsulante]
%encap	0,10	Porcentaje de encapsulante en relación con ST del jugo/pulpa [decimal]
Csol	0,077	Concentración de sólidos de la solución [gST/g de solución]
Mj	99,2222	Masa de jugo/pulpa [g]
Mm	0,7778	Masa de encapsulante [g]
MSTsol	7,7000	Masa de sólidos totales en la solución [g]
MSTjugo	6,9456	Masa de sólidos totales en el encapsulante [g]
MSTencap	0,7544	Masa de sólidos totales en el jugo/pulpa [g]

ST: Sólidos totales

La cantidad de maltodextrina fue pesada en una balanza de precisión y mezclada con el zumo de naranja de manera gradual, manteniendo una agitación constante para evitar la formación de grumos. En la Figura 18 se puede apreciar el proceso de pesaje.



Figura 18: Pesaje maltodextrina para incorporar al zumo de naranja (Autores)

La temperatura del aire de entrada se estableció en 200 °C. Se registró la temperatura del aire de salida en 80 °C. Para las pruebas se utilizaron presiones de aire 1,5 y 1,8 bares, el caudal de líquido se dejó en 0,1 l/h para las dos presiones de aire indicadas. Para hacer las pruebas primero se estabilizaron las temperaturas de entrada y salida; luego se inició la aspersion con los parámetros de presión de aire y caudal de líquido indicados. En la Figura 19 se observa el polvo seco generado en el interior de la cámara de secado como resultado de la prueba.



Figura 19: Resultados aspersion de zumo de naranja, con presión de aire en 1,5 bar; caudal de líquido en 0,1 l/h; temperaturas de entrada y salida en 200/80 °C y maltodextrina en 10 % (p/p). (Autores)

La aspersion producida para este caso se pegó en las paredes de la cámara de secado, algunas partículas bajaron a través de la cámara y se depositaron en el colector de partículas secas, generando una mezcla untuosa que no permitió pruebas de calidad, también se observa que parte del particulado fino se quedó adherido a la cámara de secado.

La segunda prueba (presión de aire de 1,8 bares y caudal de líquido en 0,1 l/h) se puede observar en la Figura 20, para este caso la aspersión fue ideal ya que no se observaron chorros de líquido golpeando la cámara de mezcla, se observan partículas de mayor tamaño adheridas a la cámara, pero totalmente secas, la temperatura de transición vítrea no fue alcanzada lo que indica que el medio encapsulante fue óptimo para la operación.



Figura 20: Resultados aspersión de zumo de naranja, con presión de aire en 1,8 bar; caudal de líquido en 0,1 l/h; temperaturas de entrada y salida en 200/80 °C y maltodextrina en 10 % (p/p). (Autores).

En la Figura 21 se observa el producto obtenido, el tamaño de las partículas es homogéneo y fino, la actividad de agua final de la muestra fue de 0,57, un poco alta para productos en polvo, pero la higroscopía de la muestra fue óptima lo cual corrobora nuevamente que el medio encapsulante es óptimo para el tipo de uso.

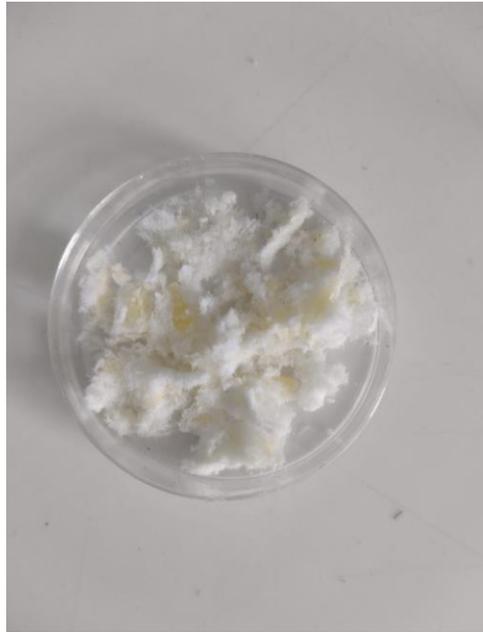


Figura 21: Producto obtenido con las siguientes condiciones: presión de aire en 1,8 bar; caudal de líquido en 0,1 l/h; temperaturas de entrada y salida en 200/80 °C y maltodextrina en 10 % (p/p). (Autores).

La validación experimental define que los parámetros adecuados del secador para secar zumo de naranja valencia son: presión de aire 1,8 bar; caudal de líquido 1,1 l/h; temperaturas de entrada y salida 200/80 °C y encapsulante maltodextrina con una concentración de 10 % (p/p). Las pruebas experimentales validaron que el modelo CFD describe adecuadamente el proceso, las soluciones fueron estables para los casos de estudio y las pruebas experimentales mostraron que el equipo funcionó de acuerdo con los rangos que el modelo predijo.

5.2.2 Descripción modelo computacional

A continuación, se describe el desarrollo del modelo computacional que permitió el diseño del equipo. Para empezar, el CFD es lo que se considera como programación científica, ya que su aplicación y “modus operandi” se desarrollan bajo los parámetros del método científico, planteamiento de hipótesis, ensayo, error y confirmación de hipótesis. El estudio de un fenómeno y/o sistema a través del CFD esta seccionado en tres partes: 1) Preprocesamiento, 2) procesamiento y 3) post procesamiento [29].

Preprocesamiento: Esta fase involucra la definición del espacio de estudio, sus límites y sus parámetros iniciales. Se parte de la definición del modelo matemático que describe el fenómeno a modelar, esto es, determinar las ecuaciones de continuidad que plenamente abarcan y describen el sistema. Seguido a la definición del modelo, sigue la discretización del dominio, procedimiento por el cual se divide y limita el espacio de estudio en elementos o volúmenes finitos donde las ecuaciones de continuidad se resuelven; por último, se realiza la discretización del modelo matemático, lo que consiste en convertir las ecuaciones de continuidad en un sistema de ecuaciones donde cada ecuación del sistema se resuelve para cada uno de los elementos y los volúmenes previamente definidos. Estudios de independencia de malla son requeridos para determinar la confiabilidad del modelo; la independencia de malla se refiere a que los resultados del modelo no dependen del tamaño de la malla [29].

Procesamiento: En esta etapa del proceso se seleccionan los métodos numéricos para la solución y se especifican las condiciones de frontera e iniciales. Para resolver el sistema de ecuaciones se aplican algoritmos de acuerdo al método numérico seleccionado, los cuales dependen del régimen de flujo, los fenómenos implicados y el paso de tiempo. Las condiciones de frontera y las condiciones iniciales son las restricciones y valores de arranque de la simulación [29].

Post procesamiento: La etapa final corresponde al análisis de datos, los cuales pueden ser tanto cualitativos como cuantitativos, y generalmente se hacen con herramientas computacionales adicionales a las utilizadas en las etapas anteriores [29].

5.2.3 Simulación de turbulencia

La turbulencia generalmente se desarrolla como una inestabilidad de flujos laminares que empiezan a aparecer a partir de un número de Reynolds crítico. Estas inestabilidades son generadas por la amplificación de la perturbación en el sistema debido a la no linealidad de los términos de inercia (tensor de esfuerzos cortantes). La teoría de turbulencia más aceptada es la desarrollada por Kolmogorov, esta teoría afirma que la turbulencia está compuesta por vórtices que contienen diferentes cantidades de energía dependiendo de su tamaño. Los vórtices más grandes se deshacen transfiriendo su energía a vórtices más pequeños y estos a la vez en otros más pequeños hasta dispersar la energía a escala

molecular. Estos últimos vórtices son tan pequeños que la viscosidad molecular es capaz de disipar la energía cinética turbulenta en forma de calor [29].

La dificultad de modelar este tipo de flujo radica en solucionar los campos de velocidad lo que a su vez implica resolver el balance de movimiento, esta dificultad se da por la dependencia que existe entre la presión y la velocidad y no existe una ecuación donde aparezca la presión explícitamente como una variable primaria, esta variable se encuentra implícita dentro de la ecuación de conservación del movimiento; debido a esto se imposibilita la solución analítica y se recurre a la implementación de métodos numéricos [29].

La idea principal de los algoritmos numéricos para modelar estos sistemas es resolver la ecuación de Navier-Stokes a través de pequeños pasos en el espacio y de pequeños pasos en el tiempo, esto con el fin de llegar tener en cuenta los vórtices más pequeños en el modelo. El costo computacional asociado a resolver el problema de esta manera es bastante alto y por esta razón no es el método más usado para la solución de sistemas turbulentos, en la literatura esta solución es llamada DNS (“Direct Numerical Simulation”) [29].

Uno de los métodos más usados a nivel industrial por su relativo bajo costo computacional para resolver problemas de flujo turbulento es denominado RANS (“Reynolds Averaged Navier Stokes”), en este se descomponen las variables de flujo (temperatura, velocidad, presión, entre otras) en dos componentes, la primera es el valor medio de la variable en el tiempo y la segunda es su variación, como se representa en la Figura 22 [29].

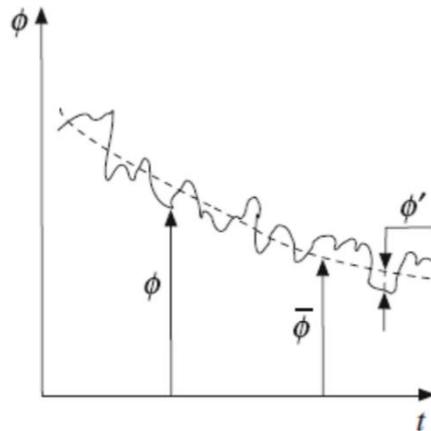


Figura 22: Esquema del método RANS flujo medio en el tiempo.
(Bibliografía [30])

$$\phi(x, t) = \bar{\phi}(x, t) + \acute{\phi} \quad [1]$$

dónde $\bar{\phi}(x, t)$ es el valor de la variable de flujo medio en el tiempo y $\acute{\phi}$ es la desviación. El valor de $\bar{\phi}(x, t)$ se calcula de la siguiente manera:

$$\bar{\phi}(x, t) = \lim_{\beta \rightarrow \infty} \frac{1}{\beta} \int_t^{t+\beta} \phi(x, t) \quad [2]$$

dónde β es el intervalo de tiempo en el cual se está calculando el promedio. Teniendo en cuenta lo anterior se obtienen las siguientes ecuaciones para la velocidad y la temperatura en un sistema de flujo turbulento:

$$U(x, t) = \bar{U}(x, t) + \acute{U} \quad [3]$$

$$T(x, t) = \bar{T}(x, t) + \acute{T} \quad [4]$$

Reemplazando la forma descompuesta de las ecuaciones [3] y [4] en las ecuaciones de momento y energía, se obtiene que:

$$\frac{\partial \rho \bar{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V} \bar{V}) = -\nabla \bar{P} + \nabla \cdot (\bar{\tau} - \rho \overline{\acute{V} \acute{V}}) \quad [5]$$

$$\frac{\partial \rho C_p \bar{T}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_p \bar{V} \bar{T}) = \nabla \cdot (k \nabla \bar{T} - \rho C_p \overline{\acute{V} \acute{T}}) \quad [6]$$

Las ecuaciones medias de Reynolds [5] Y [6] obtenidas anteriormente son bastante similares a las ecuaciones originales de momento y de energía, sin embargo, estas poseen nuevas incógnitas, en el caso de la ecuación de momento se tiene el término $\bar{\tau} - \rho \overline{\acute{V} \acute{V}}$ conocido como el tensor de esfuerzos constantes de Reynolds, y en el caso de la ecuación de energía se tiene que $\rho C_p \overline{\acute{V} \acute{T}}$ son los fluxes de calor turbulento. El sistema de esta

manera queda subespecificado, y cuenta con más incógnitas que ecuaciones lo que significa que no se puede resolver. Para solucionar este problema se deben expresar τ^R y q^R en términos de los gradientes de velocidad y temperatura usando la correlación de Boussinesq para flujo incompresible [29]:

$$\tau^R = \mu_t \left(\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T \right) - \frac{2}{3} \rho \quad [7]$$

$$q^R = k_t \nabla T \quad [8]$$

dónde k es la energía cinética turbulenta, k_t es la difusividad térmica turbulenta, y ∇T es la viscosidad turbulenta. Existen varios modelos para calcular la viscosidad turbulenta, entre ellos se destacan los modelos turbulentos de dos ecuaciones, en los cuales es necesario solucionar dos ecuaciones de transporte para hallar ∇T . Entre los modelos de dos ecuaciones se encuentra el modelo estándar $k - \epsilon$ desarrollado por Jones y Launder, que está basado en la correlación de Boussinesq y dice que [29]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad [9]$$

$$k_t = \frac{C_p \mu_t}{Pr_t} \quad [10]$$

Dónde ϵ es la tasa de disipación de energía cinética turbulenta por unidad de masa debido a los esfuerzos viscosos y es:

$$\epsilon = \frac{\mu}{2\rho} \overline{\left(\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T \right) : \left(\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T \right)^T} \quad [11]$$

En este modelo se asume que el flujo es completamente turbulento y que los efectos de la viscosidad molecular son despreciables.

5.2.4 Optimización del enmallado de la simulación

Inicialmente para abordar el problema de la simulación de un secador por aspersión se hizo un diseño basado en un equipo real, el secador Labplant Spray Dryer SD-06, con una tasa de evaporación de 1500-2000ml/h y un rango de temperatura de 50°C-250°C. La geometría inicial contaba con algunas simplificaciones con respecto al modelo real, sin embargo, es una buena representación que permite conocer la dinámica de los fluidos en su interior. La Figura 23 muestra la geometría y el enmallado que se le hizo a la cámara de secado [29].

Esta geometría contaba con 550000 elementos de volumen y se evaluó usando el solver de Open Foam PimpleFoam. Para esta fase, la simulación solo contempla el transporte de momento lineal, el cual da una clara idea sobre la distribución de las velocidades de los flujos en el equipo. Se decidió optar por esta aproximación debido a que de esta manera es posible validar el enmallado, en cuanto a que la distribución de flujos, la magnitud de flujos y la cantidad y tipo de volúmenes usados permiten llevar el modelo a la convergencia [29].

La Figura 24 muestra los resultados obtenidos para la distribución de velocidades en la geometría, demostrando que el modelo seleccionado funciona para el problema a resolver, y que las condiciones de frontera seleccionadas aseguran la convergencia. Sin embargo, se puede evidenciar que la geometría no presenta una distribución óptima de las entradas de masa al equipo, generando una acumulación de fluidos en una de las paredes del equipo que se verá reflejado en puntos calientes y un aumento significativo de la adhesión del producto a las paredes internas debido a que los azúcares presentes en el zumo de naranja alcanzan su temperatura de transición vítrea [29].

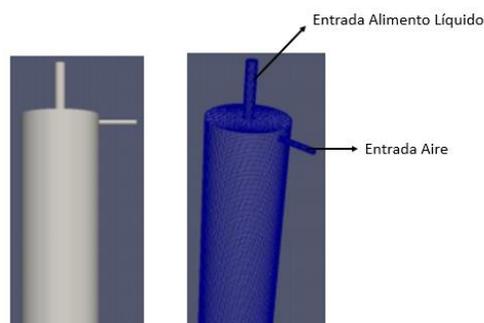


Figura 23: Geometría y malla iniciales para la simulación de un Spray Dryer.
(Autores)

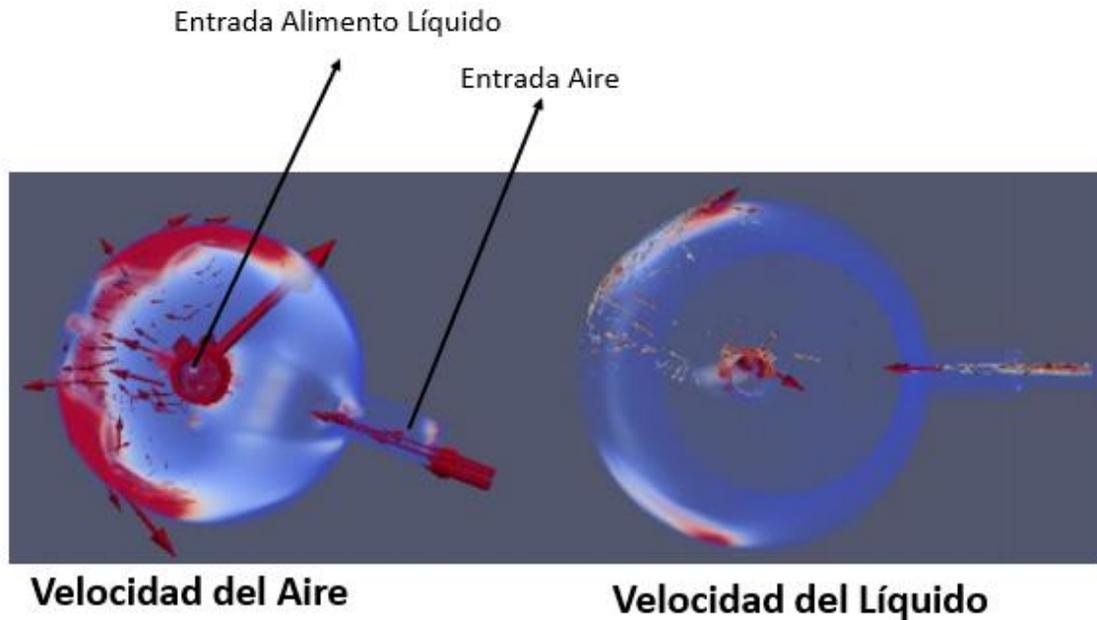


Figura 24: Perfiles de velocidad para el Aire y el Líquido a 0.75 s de simulación. (Autores)

Basados en estos resultados se decidió evaluar una mejor distribución de los flujos en el equipo, para esto se hizo una revisión bibliográfica y se seleccionó la geometría que se muestra a continuación (Figura 25) con un diámetro de 180 mm una longitud total de 540 mm, la inclinación tiene un ángulo de 60° y un cateto opuesto de 130 mm [29]:

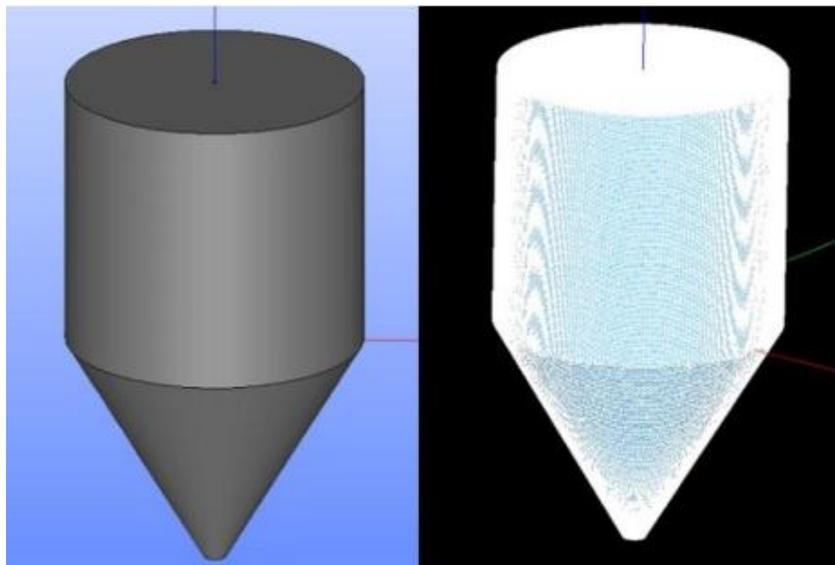


Figura 25: Geometría y enmallado inicial para la simulación. (Autores)

El nuevo modelo propuesto se basa en la premisa de que para productos como el jugo de naranja, que tienen una alta sensibilidad térmica, la mejor configuración es el flujo co-corriente [30], de esta manera se planteó una geometría inicial usando dimensiones y relaciones geométricas encontradas en la literatura. Los tipos de condiciones de frontera usados fueron similares a los del modelo evaluado inicialmente pues de esta manera se logró la convergencia. La Tabla 11 muestra el tipo de condición de frontera y su valor para cada uno de los parámetros de la simulación [29].

Tabla 11: Condiciones de frontera y parámetros principales para la simulación inicial [Autores].

Condición o Parámetro	Valor
Solver	pimpleFoam
Paso de tiempo (Δt)	0.00001 s
Velocidad del Líquido 1	1 m s^{-1}
Velocidad del Líquido 2	2 m s^{-1}
Modelo de Turbulencia	$k - \epsilon$ Dinámico
$\alpha_{WATER} - Inicial$	1

El primer modelo de enmallado permitió obtener una solución, sin embargo, fue necesario hacer un refinamiento muy grande de la malla, con el objetivo de que los elementos de volumen evaluados tuvieran dimensiones menores al diámetro de la boquilla, para poder apreciar eficientemente el fenómeno de aspersion del líquido. El tiempo simulado fue de 60 segundos, los cuales se obtuvieron después de 27 horas de simulación. En la Figura 26 se pueden ver los resultados de los perfiles de velocidad obtenidos en este caso, la distribución de las velocidades concuerda con lo esperado para este tipo de fenómenos físicos, adicionalmente, los vectores de velocidad indican la formación de vórtices debido a la turbulencia generada por los flujos de entrada [29].

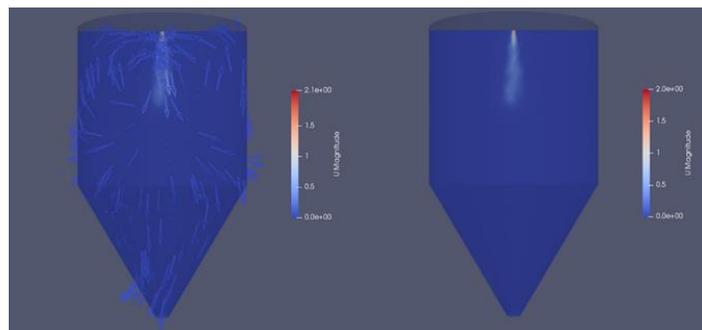


Figura 26: Perfiles de velocidad obtenidos para la primera simulación. (Autores).

Con el objetivo de optimizar la simulación y reducir significativamente el costo computacional se efectuó una optimización de la malla con el objetivo de refinar solo aquellas secciones que tuvieran elementos muy pequeños como la boquilla y la salida del aire, y dejar con un enmallado grueso aquellas secciones que no necesitaran tanto refinamiento. De esta manera se obtuvo un nuevo modelo de enmallado mediante el cual fue posible llegar al mismo tiempo simulado que con la primera simulación, pero en un tiempo significativamente menor, la Tabla 12 muestra el número de elementos, el tiempo simulado y el tiempo de la simulación para los dos modelos diferentes de enmallado seleccionados [29].

Tabla 12: Comparación entre los resultados obtenidos para la malla inicial y la malla optimizada [Autores].

	Malla Inicial	Malla Optimizada
Número de Elementos	1'500.000	500.000
Tiempo Simulado	60 segundos	60 segundos
Duración	27 horas	12 horas

La Figura 27 muestra una vista de la parte superior de la geometría (por donde entra el alimento y el aire), se puede ver una diferencia significativa en el tamaño de los elementos para cada caso, el modelo inicial contaba con elementos del mismo tamaño distribuidos en todo el volumen, mientras que el modelo optimizado cuenta con un amplio rango de tamaños en sus volúmenes dependiendo del nivel de refinamiento que requiere cada sección de la geometría. El refinamiento hacia el centro se debe a que allí está ubicada la boquilla, por donde entran el aire y el alimento, y donde ocurre todo el proceso de aspersion [29].

Los resultados para los perfiles de velocidad obtenidos con el nuevo modelo (Figura 28) son muy similares a los obtenidos con el modelo inicial, indicando independencia de malla [31], es decir que se logró llegar a resultados similares partiendo de diferentes modelos de enmallado. Se puede ver claramente como se generan vórtices turbulentos en la parte superior de la geometría, efecto de la transferencia de momentum desde el fluido entrante hacia el fluido que se encontraba estático dentro de la cámara de secado. Estos resultados validan que el modelo matemático planteado para la simulación es el correcto, de esta manera es posible ir agregando brevemente complejidad a la simulación para abordar cada vez de una manera más precisa el fenómeno real del secado por aspersion [29].

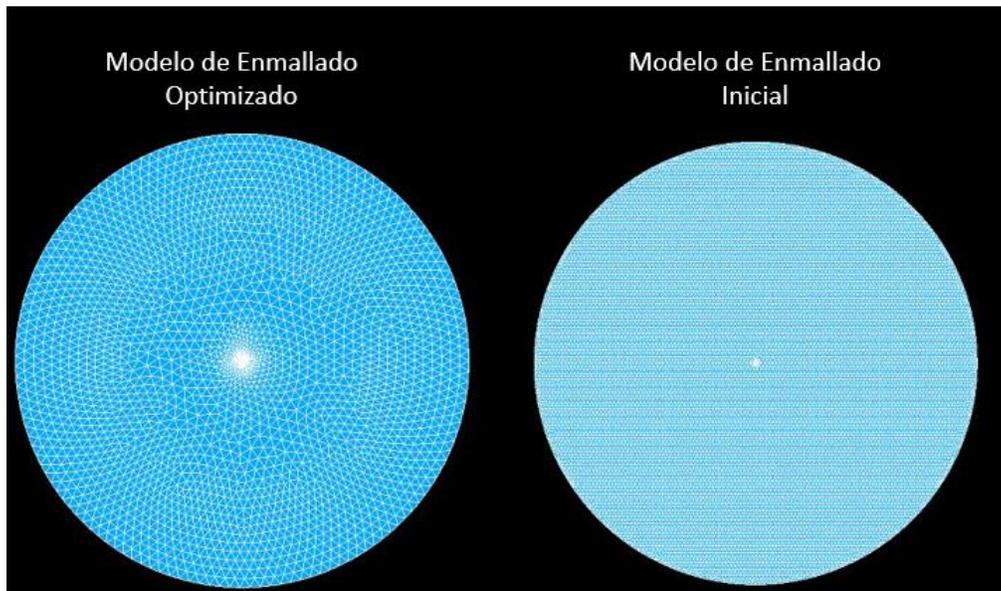


Figura 27: Vista superior de la geometría y el enmallado, se aprecia claramente la diferencia entre el refinamiento y el tamaño de los volúmenes. (Autores)

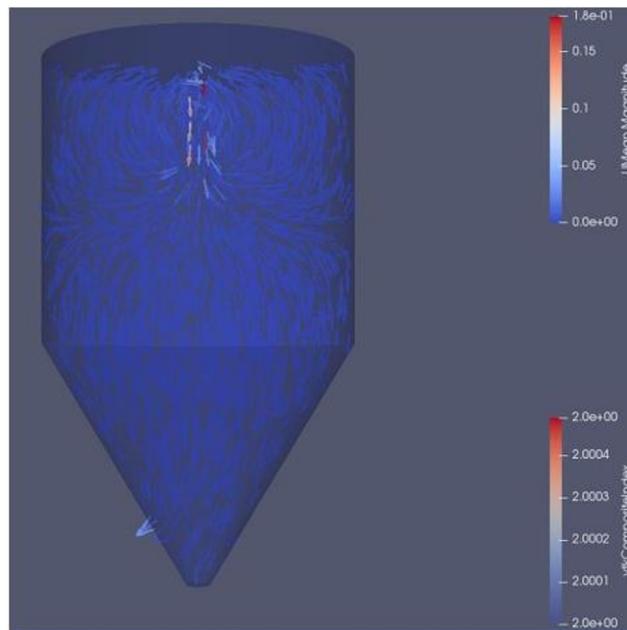


Figura 28: Vista superior de la geometría y el enmallado, se aprecia claramente la diferencia entre el refinamiento y el tamaño de los volúmenes. (Autores).

Adicionalmente, se puede ver cómo hay un vector de una magnitud significativamente mayor a los demás en la salida del equipo (parte inferior izquierda) indicando que efectivamente hay una salida de fluido por el orificio [29].

5.2.5 Simulación multifase

Las simulaciones mencionadas anteriormente permitieron validar el enmallado y el modelo matemático, sin embargo, las simulaciones estaban en una sola fase, es decir que se estaba asumiendo que un flujo de agua entraba a una geometría llena de agua. El siguiente paso fue aumentar la complejidad del modelo y para esto se decidió implementar el modelo multifase, en el cuál entran una corriente gaseosa y una líquida a la geometría [29].

Una simulación multifase se puede abordar de varias maneras diferentes, simulación numérica directa (DNS), seguimiento de partículas Lagrangiano o modelación multifase. Para hacer esta implementación se utilizó el modelo TwoPhaseEulerFoam el cuál usa la modelación multifase. En este las dos fases son tratadas como continuas y por consiguiente comparten las mismas ecuaciones de momentum y continuidad [29]:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\delta}{\delta t} \alpha_k \rho_k + \frac{\delta}{\delta x_i} \alpha_k \rho_k U_{k,i} = 0 \quad [1]$$

Ecuación de momentum:

$$\alpha_k \rho_k \left(\frac{\delta}{\delta t} U_{k,i} + U_{k,j} \frac{\delta}{\delta x_j} U_{k,i} \right) = \alpha_k \rho_k g_i - \alpha_k \frac{P_l}{\delta x_i} - \frac{\delta \tau_{k,ij}}{\delta x_j} + I_{k,i} \quad [2]$$

dónde α_k es la fracción volumétrica ρ_k es la densidad y el subíndice k hace referencia a cada una de las fases en el problema, en este caso la fase líquida y la fase gaseosa. La suma de estas fracciones volumétricas siempre debe dar 1 como resultado. $\tau_{k,ij}$ representa el tensor de esfuerzos y $I_{k,j}$ representa la transferencia de momentum lineal entre las dos fases como las fuerzas de arrastre, de empuje y la dispersión turbulenta entre otras [29].

Las condiciones de frontera y parámetros más relevantes para este modelo se encuentran en la Tabla13 a continuación:

Tabla 13: Parámetros modelo multifase [Autores].

Condición o Parámetro	Valor
Solver	TwoPhaseEulerFoam
Paso de tiempo (Δt)	0.00001 s
Velocidad del Líquido	1 m s^{-1}
Velocidad del Gas	100 m s^{-1}
Modelo de Turbulencia	LES continuos $k - \epsilon -$ Smagorinsky
$\alpha_{AIR} - Inicial$	1
$\alpha_{FEED} - Inicial$	0

La Figura 29 muestra los primeros resultados obtenidos para la simulación multifase. Se puede ver una distribución de las velocidades mucho más caótica a las presentadas anteriormente, y esto se debe a la rápida expansión del gas y el líquido dentro del equipo. La principal diferencia se debe a que en los modelos de una sola fase se asumía que la geometría estaba llena de agua, la cual generaba una resistencia mucho mayor al movimiento. Sin embargo, en este caso el escenario es mucho más cercano a la realidad del fenómeno, y el equipo se encuentra lleno de aire, el cual no genera mucha resistencia y permite una rápida aspersion de los fluidos de entrada [29].

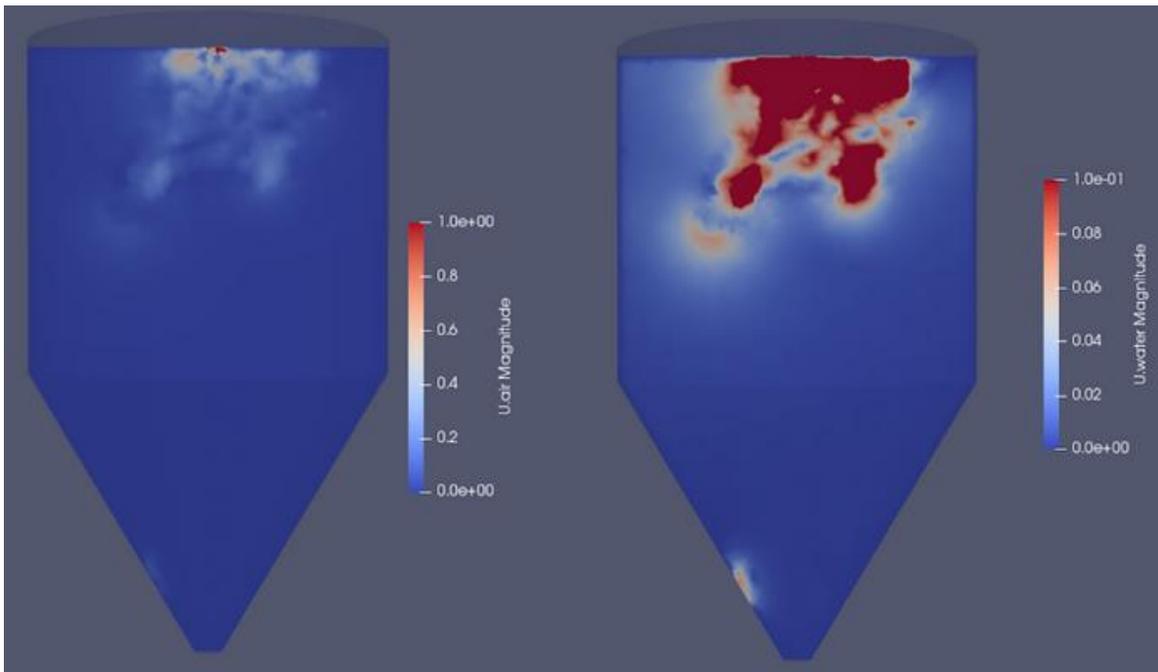


Figura 29: Perfiles de velocidad iniciales para el modelo multifase. (Autores)

5.3 Implementar un manual de usuario para el uso adecuado del prototipo de secador por aspersión.

El presente capítulo se definió y creó un manual de usuario del secador por aspersión, en él se proporciona toda la información necesaria para el manejo seguro y mantenerlo en buenas condiciones de operación. Está dirigido al personal de laboratorio y los operadores. Es necesario leer atentamente el manual antes de poner en funcionamiento el equipo, en el ANEXO A se encuentra el manual de operación desarrollado.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Se demostró que separar el sistema de aire de alta presión requerido para la aspersión, del sistema de aire caliente necesario para hacer el secado, fue una decisión acertada, el nuevo sistema de calentamiento diseñado cumplió con los requerimientos energéticos que necesitaba el proceso de secado por aspersión para el secado de zumo de naranja.

La selección del ventilador, el diseño y modificación de tapa, cumplieron con las necesidades del proceso de secado por aspersión de zumo de naranja, las velocidades requeridas para generar el vórtice de aire caliente fueron alcanzadas por el nuevo sistema logrando la operación deseada.

Se concluye que el uso de la maltodextrina como medio portador y encapsulante del secado de zumo de naranja fue exitoso. La concentración de 10% (P/P) permitió que las partículas no alcanzaran la temperatura de transición vítrea, logrando que las partículas que llegaron a las paredes de la cámara de mezcla se mantuvieran secas, así mismo permitió que las partículas tuvieran tamaños homogéneos y tamaños finos adecuados para este tipo de aplicaciones.

El plan experimental desarrollado permite definir que los parámetros adecuados del secador para secar zumo de naranja valencia son: presión de aire 1,8 bar; caudal de líquido 1,1 l/h; temperaturas de entrada-salida 200/80 °C y encapsulante maltodextrina con una concentración de 10 % (p/p).

Se demostró experimentalmente que el modelo CFD que desarrolló el proyecto HERMES 43061, utilizado para diseñar y dimensionar el secador por aspersión describe

adecuadamente el proceso, luego de la realización de las adecuaciones de malla, las soluciones fueron estables para los casos de estudio y las pruebas experimentales mostraron que el equipo funcionó de acuerdo con los rangos que el modelo predijo. Aunque la actividad de agua de las muestras obtenidas es alta para el tipo de producto, es importante que la temperatura de transición vítrea no se alcanzara logrando la obtención de partículas secas.

6.2 Recomendaciones

De acuerdo con la ejecución de este proyecto y en miras de mejorar, se encontraron las siguientes recomendaciones que se le pueden aplicar al secador y al proceso para obtener mejores resultados.

- Hacer una concentración del zumo, para retirar parte del contenido de agua y tener más sólidos solubles que mejoran los resultados del proceso.
- Ajustar la tapa del secador para permitir el cambio de boquillas para que el secador pueda ser usado con diferentes fluidos que por las propiedades requieran de otro tipo de aspersor.
- Realizar precalentamiento en el zumo de naranja antes de realizar la aspersión para que se obtenga una mejor homogenización en la aspersión y tamaños más finos en la aspersión ya que las partículas tendrán un mayor secado y se mejoraría la calidad del producto.
- Realizar pruebas con diferentes concentraciones de material encapsulante para determinar el rendimiento del proceso de secado y analizar la calidad del producto final – análisis fisicoquímico y propiedades nutricionales del producto.
- Mantener una escalera que permita alcanzar fácilmente la boquilla y los tornillos de fijación de la tapa a la cámara de secado, así mismo las labores de limpieza requieren de estar a una altura de 1.2 m por lo cual se requiere de esta escalera o banco que facilite esa labor.

- Aislar la cámara de secado para evitar pérdidas de calor y hacer el proceso más eficiente, pues las temperaturas en el interior de la cámara serían mayores mejorando la calidad y productividad del producto.

- Calcular la potencia de un ventilador de extracción de aire que debe ir instalado en la salida del ciclón lo cual mejora la calidad del proceso, pues se reducen los tiempos de residencia, así también se refuerza el vórtice y arrastre de partículas mejorando también el rendimiento.

A. Anexo: Manual de operación secador por aspersión

Manual de Uso Secador por Aspersión



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	Pg. 1
2. Seguridad	Pg. 1
2.1. Uso adecuado	Pg. 2
2.2. Usos inadecuados	Pg. 2
3. Características técnicas	Pg. 3
4. Principios de funcionamiento	Pg. 3
5. Funcionamiento	Pg. 4
6. Limpieza	Pg. 10
7. Aspersor	Pg. 11
8. Sistema de calentamiento	Pg. 15
9. Posibles fallas	Pg. 16
10. Recomendaciones	Pg. 16

1. Introducción

Este manual describe el uso del secador por aspersion diseñado por CFD, el cual proporciona toda la información necesaria para el manejo seguro del equipo y su operador, así mismo se indican las buenas prácticas de funcionamiento. El presente manual está dirigido al personal de laboratorio y a la comunidad académica que operen el mismo.

Lea cuidadosamente este manual antes de poner en funcionamiento el equipo y tenga en cuenta las condiciones de seguridad. Mantenga el manual cerca del equipo para que pueda ser consultado en cualquier momento.

2. Seguridad

En este capítulo se detalla la seguridad del equipo y contiene las normas generales de manejo y advertencia al momento de hacer uso del secador, para la seguridad de los usuarios de deben seguir estrictamente todas las instrucciones y mensajes de seguridad del capítulo. Los riesgos principales al hacer uso del secador se encuentran en la tabla 1.

Tabla 1: Lista de símbolos de seguridad

SIMBOLO	DEFINICIÓN
	Peligro eléctrico
	Altas temperaturas
	Riesgo mecánico
	Inhalación de sustancias

2.1. Uso adecuado

El secador por aspersión ha sido diseñado y construido como un equipo de laboratorio y para uso educativo. Sirve para secar por pulverización soluciones o suspensiones acuosas en un proceso operativo.

- Para operar el equipo se debe hacer uso de los elementos de protección personal básicos, de los cuales se incluyen bata, tapa bocas, gafas y gorro. Como se trabaja a altas temperaturas es obligatorio el uso de guantes para evitar quemaduras.
- Mantener despejada la mesa de trabajo del equipo, solo se deben colocar los recipientes con el producto a secar.
- No realizar movimientos bruscos al operar las partes del equipo.
- Operar el equipo en áreas ventiladas, la salida del aire del ciclón debe estar cerca una ventana o elemento que sirva de descarga hacia otra área.
- El equipo se diseñó para trabajar con productos alimenticios, no utilizar productos tóxicos ni corrosivos ya que los elementos no se diseñaron con ese fin.

2.2. Usos inadecuados

Los usos descritos a continuación pueden causar daños al equipo o al operador:

- Secado por pulverización de sustancias que puedan explotar o inflamarse debido al proceso.
- Secado por pulverización de sustancias tóxicas.
- Utilización de muestras que puedan producir oxígeno durante el proceso.
- Utilización descuidada.
- Operar el equipo sin elementos de protección.

3. Características técnicas

En este capítulo se describen las principales características técnicas del secador y se proporcionan las capacidades de este.

Tabla 2: Especificaciones técnicas.

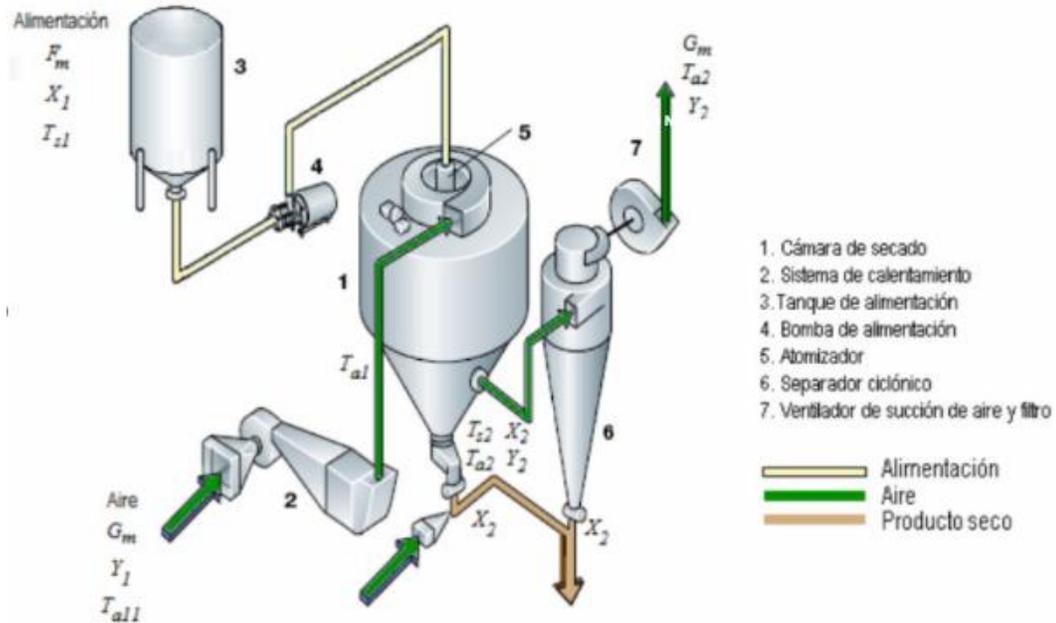
CARACTERISTICA	RANGO
Potencia eléctrica	8 KW
Voltaje	110 V/1Ph/60Hz.
Flujo de aire caliente	100 CFM
Flujo de liquido	0-5 l/h
Potencia de calefacción	7,5 KW
Temperaturas	0-300 °C
Presiones de aspersión	0-3 Bares

4. Principio de funcionamiento

El secador para su funcionamiento describe el ciclo de la figura 1, así mismo el proceso tienen las etapas definidas a continuación:

- Entrada de aire y calentamiento.
- Entrada de líquido y aire de presión para producir la aspersión.
- Cámara de secado donde se unen la aspersión con el aire caliente que realiza el secado.
- Ciclón que separa las partículas del aire
- Deposito del producto fino
- Descarga del aire sobrante del proceso

Figura 1: Esquema secador por aspersión



5. Funcionamiento

En este capítulo se describe como colocar en funcionamiento el equipo y las diferentes configuraciones que se deben realizar a los componentes de este.

Antes de iniciar el equipo es necesario leer por completo el manual de uso, tomar las precauciones de seguridad necesarias y hacer el uso de los elementos de protección necesarios.

Primero seleccione el producto a secar, valide que los rangos de temperatura, presiones y caudales de aire sean acordes con la capacidad del secador (rangos mencionados en el capítulo 3).

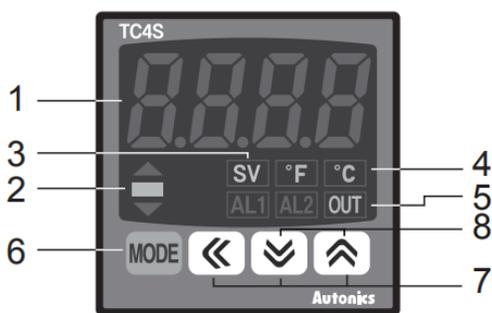
Una vez definidos los parámetros, conecte el cable de alimentación del equipo a un tomacorriente que le brinde una alimentación eléctrica de 110V/1Ph/60Hz.

En la Figura 2 se observa el panel de control del equipo, compuesto por el controlador de temperatura de entrada, el sensor de temperatura de salida y la perilla de accionamiento.

Figura 2: Descripción tablero de control

1. Sensor de temperatura de salida
2. Controlador temperatura de entrada.
3. Perilla accionadora

Para encender el equipo accione la perilla hacia la derecha, esta acción enciende el ventilador que suministra el aire caliente y a su vez enciende el sensor de temperatura de salida y el controlador de temperatura de entrada, ya encendido el controlador de temperatura se procede a configurar la temperatura de entrada de aire. En la Figura 3 se observa el tablero principal del controlador.

Figura 3: Descripción Control de temperatura

1. Display de temperatura
2. muestra la temperatura actual.
3. Indicador de desviación
4. Indicador de temperatura de ajuste SV.
5. Indicador de unidad de temperatura.
6. Tecla MODE
7. Ajuste
8. Tecla de entrada digital

Una vez encendido presione cualquier tecla de ajuste frontal, para revisar o cambiar SV es decir la temperatura que desea operar, una vez oprima la tecla de ajuste el indicador de temperatura SV mostrado en la figura 3 se encenderá y el valor de ajuste preestablecido

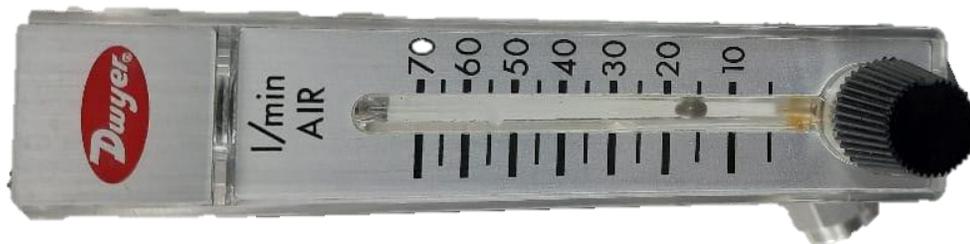
parpadeará, si desea subir o reducir la temperatura preestablecida use las teclas de ajuste de arriba y abajo  . Ya establecida la temperatura espere 5 segundos y la señal de temperatura SV se apagará y el *display* mostrará de nuevo la temperatura actual.

Una vez configurada la temperatura en el controlador es necesario esperar que la temperatura de salida se estabilice; este proceso toma alrededor de 15 minutos y es recomendable establecer la temperatura de salida en tres etapas, es decir por ejemplo si su temperatura es de 150 °C primero configure el controlador a 50°C, luego a 100 °C y por último la temperatura de 150 °C, esto con el fin de que el control de temperatura sea más continuo y estable.

Mientras la temperatura se regula y estabiliza, encienda el compresor, es necesario asegurarse que esté debidamente conectado y energizado, al ser un equipo mecánico valide que no existen obstrucciones en los elementos mecánicos que puedan generar accidentes, luego de esto enciéndalo y espere unos minutos mientras el mismo gana presión. A continuación, establezca la presión de aire de aspersión requerida, para esto utilice el manómetro ubicado en la salida del compresor.

El siguiente paso es regular el flujo de aire requerido para la compresión, recuerde que el mismo es uno de los parámetros que debe definir de acuerdo con su producto, en la Figura 4 se muestra el flujómetro donde se realiza esta regulación.

Figura 4: Flujómetro de aire



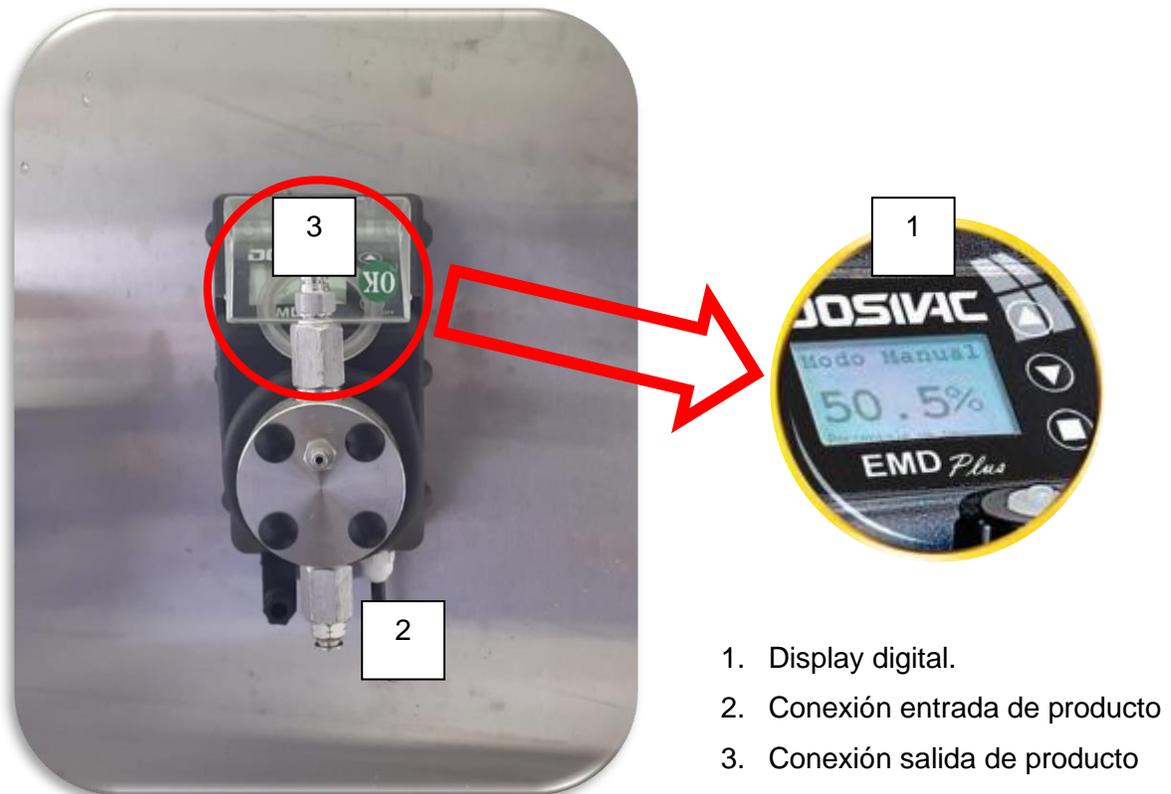
Para ajustar la cantidad de aire solo accione la perilla negra y observe que el indicador este en el punto necesario, así mismo luego de calibrar el caudal de aire compruebe que la presión de aspersion se mantenga; para esto el secador cuenta con un manómetro (Figura 5) donde puede observar el valor y hacer los ajustes necesarios.

Figura 5: Manómetro indicador de presión de aire de aspersion.



Una vez el aire de aspersion cumpla con el requerimiento de presión y caudal y la temperatura de entrada este estable en el valor necesario de operación se procede a encender la bomba de suministro del producto (Figura 6). Es necesario validar que la bomba se encuentre energizada, para esto dirijase a la parte posterior del equipo y en el tablero de alimentación se observa la tomacorriente y el cable de conexión de la bomba, asegúrese de que este conectada, también es necesario validar las conexiones de las mangueras que conducen el líquido y asegurarse de que la maguera que está en el depósito tenga un nivel de líquido superior a la parte más baja de la maguera; debido al accionamiento de la bomba es necesario que se asegure la manguera al contenedor del líquido de lo contrario se puede salir y la bomba quedaría trabajando en vacío lo que reduce su tiempo de vida útil.

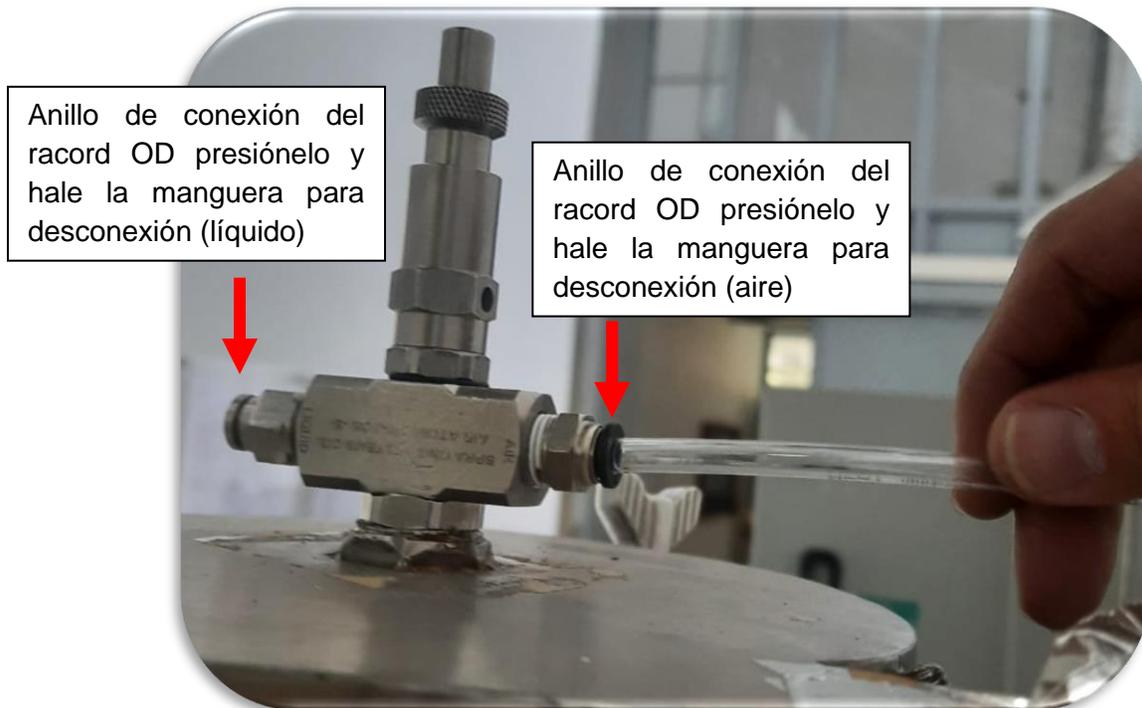
Figura 6: Descripción bomba de suministro de producto.



Ya energizada y asegurada la manguera de suministro de líquido se procede a configurar el caudal de la bomba para esto dirijase al *display* digital en el encontrará un botón con un rectángulo, presione y en la opción de modo presiónelo nuevamente, con los botones subir y bajar asegure que el modo quede en manual, luego de esto presione nuevamente el cuadrado y ya quedará asignado el modo. Proceda a desconectar el ingreso de la manguera de suministro de la boquilla de aspersión (Figura 7), la conexión de la manguera a la boquilla es mediante racores OD para realizar la desconexión oprima el anillo del racord y luego mientras mantienen la presión hale la manguera, ya desconectada la manguera dirija la misma al tanque de almacenamiento y sostenga fuertemente, a continuación con las flechas de arriba y abajo del *display* comience a aumentar el caudal de líquido, presionando la tecla del *display* que tiene la flecha hacia arriba, aumente el

mismo hasta que salga el líquido por la manguera o se alcance el caudal máximo al que puede trabajar la bomba, este paso es necesario para llenar de líquido la manguera de suministro. Cuando este saliendo líquido y la manguera se encuentre llena, reduzca el caudal nuevamente hasta que llegue al caudal cero, proceda a conectar nuevamente la manguera a la boquilla, para esto solo es necesario que introduzca la manguera en el racord y hacer una pequeña presión con la manguera.

Figura 7: Descripción conexión de racores a la boquilla de aspersión.



A continuación, proceda a colocar el caudal de líquido que requiere para el proceso de secado, este se ajusta con las flechas de arriba abajo del *display*, una vez realizado este paso el secador comienza el proceso de secado.

Opere el equipo durante el tiempo necesario, luego de terminar el uso proceda al apagado del equipo, para esto primero baje el caudal de la bomba hasta llegar a cero, terminado este proceso cierre el paso de aire de aspersión y apague el compresor, por último diríjase al controlador al temperatura de entrada y modifique el SV a la temperatura ambiente (en el caso de Bogotá puede usar 13 °C) para que siga circulando aire y se haga un

enfriamiento de las resistencias y el equipo, cuando la temperatura baje al SV asignado, puede apagar el equipo accionando la perilla del tablero de control.

6. Limpieza

Para limpiar el equipo luego de realizar las pruebas, primero verifiqué el equipo este totalmente apagado, que la temperatura del sistema de calentamiento y las demás partes del secador no superen los 20°C, de lo contrario debe esperar que se enfríe el equipo para evitar quemaduras.

Ya validado que el equipo esta apagado y las temperaturas de sus elementos frías, proceda hacer la desconexión de las mangueras de líquido y aire, en la sección 5 se indicó como hacer la desconexión, luego de desconectar las mismas, proceda a retirar la tapa de la cámara de mezcla, para esto es necesario aflojar los tornillos que la sujetan (Figura 8) y cortar la cinta *foil* que une el sistema de ventilación.

Figura 8: Descripción conexionado de racores a la boquilla de aspersion.



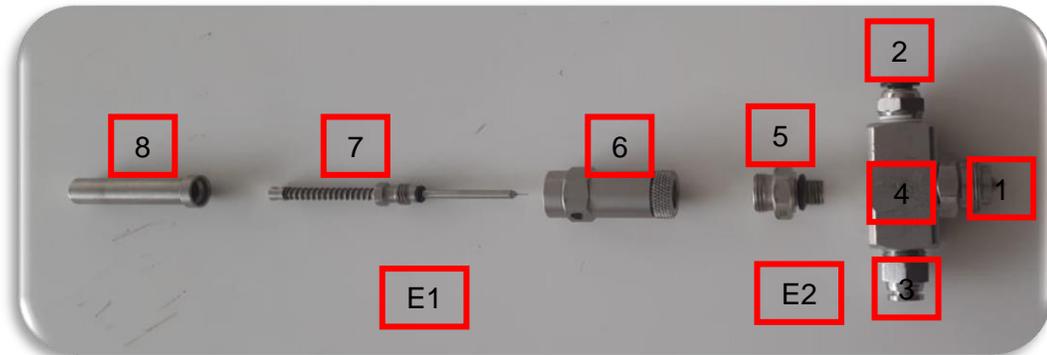
Luego de retirar la tapa proceda a realizar la limpieza de la cámara de secado, para esto utilice cepillos y otros elementos de limpieza plásticos, si usa elementos con cerdas metálicas se pueden adherir pequeñas partículas que luego pueden producir oxido en la misma, luego de la limpieza (Figura 9) de la cámara de secado, limpie los contenedores del producto y la mesa de trabajo, terminado el proceso tape nuevamente el equipo y mediante cinta *foil* realice de nuevo la conexión del aire caliente a la tapa.

Figura 9: Limpieza cámara de mezcla.



7. Aspersor

En este capítulo se describirá el proceso de ensamble, desensamble, limpieza y mantenimiento que se le debe realizar al aspersor para lograr su operación adecuada, es necesario para realizar los procesos el uso de dos llaves expansivas y teflón preferiblemente líquido. La figura 10 muestra las diferentes partes del aspersor.

Figura 10: Aspersor.

1. Boquilla
 2. Acople línea de aire (racord OD de 3/4")
 3. Acople línea de líquido (racord OD de 3/4")
 4. Cuerpo del aspersor
 5. Conexión sistema autolimpiante al cuerpo del aspersor
 6. Cubierta mecanismo autolimpiante
 7. Mecanismo autolimpiante
 8. Tapa accionadora del mecanismo
- E1. Empaque para sello del mecanismo de 3 mm
- E2. Empaque para sello en la conexión con el cuerpo del aspersor 8 mm

Lo primero es roscar y apretar con la ayuda de una llave la boquilla al cuerpo del aspersor (Figura 11) así mismo rosque y apriete los racores OD, use teflón para asegurar el sello

Figura 11: Acople boquilla y racores al cuerpo del aspersor



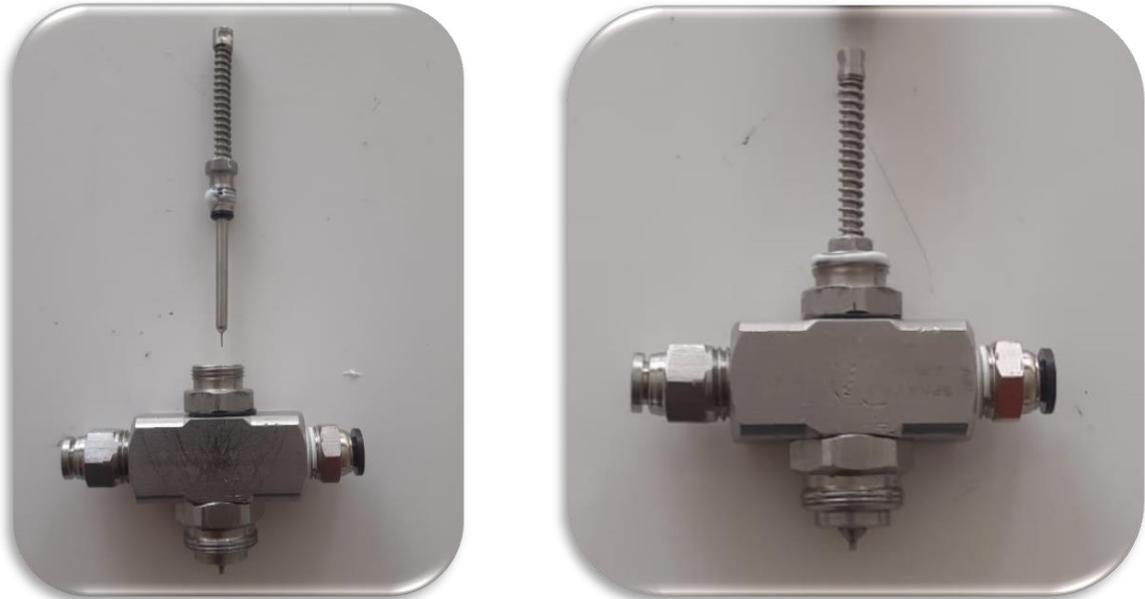
Seguido realice el acople de la conexión del mecanismo autolimpiante asegurando que el empaque de sello se encuentre en buenas condiciones, aplique teflón y realice el roscado y con la ayuda de la llave expansiva apriete hasta lograr el ajuste mecánico. En la Figura 12 se ilustra el proceso.

Figura 12: Acople Conexión del mecanismo autolimpiante al cuerpo del aspersor.



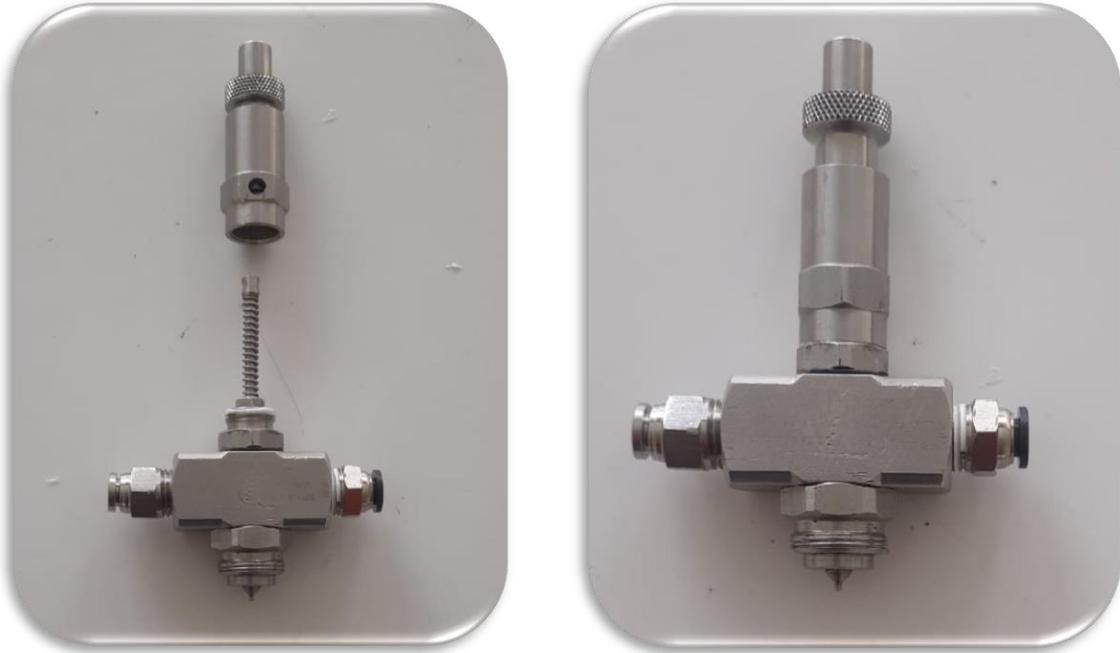
Ya ajustada la conexión proceda a conectar el mecanismo, asegure que el empaque este en su lugar y en óptimas condiciones luego aplique teflón en la rosca y conecte el elemento de conexión al cuerpo del aspersor (Figura 13).

Figura 13: Acople del mecanismo autolimpiante al sistema de conexión del cuerpo del aspersor.



Luego proceda a introducir la tapa accionadora en la cubierta del mecanismo, aplique teflón en la rosca de conexión entre la cubierta y el mecanismo, por último, apriete el conjunto hasta lograr el ajuste. La Figura 14 describe el proceso.

Figura 14: Acople de la cubierta del mecanismo y tapa accionadora al mecanismo autolimpiante.



Para acoplar la boquilla a la tapa se agrega teflón en la rosca de la boquilla, luego se rosca todo el conjunto en la tapa hasta lograr el ajuste mecánico (Figura 15).

Figura 15: Acople aspensor a la tapa del secador.



Finalizada la conexión puede proceder a conectar las mangueras de líquido y aire del aspensor para terminar el proceso de ensamble del aspensor. Cuando se presenten fugas en cuerpo de la válvula o en el sello del mecanismo autolimpiante es necesario el cambio de los empaques.

8. Sistema eléctrico

El sistema eléctrico (Figura 16) que alimenta todo el equipo se encuentra en la parte posterior del equipo, se compone de un breaker totalizador de donde se alimenta el tablero de control, las resistencias eléctricas, el ventilador y la bomba que suministra el líquido. Para que las resistencias se enciendan o apaguen se cuenta con un contactor el cual cierra o abre de acuerdo con la señal de salida que envía el controlador de temperatura, la conexión del ventilador es directa con el encendido del sistema de control, mientras que la bomba dosificadora cuenta con su toma y puede encenderse directamente desde el panel frontal de la misma. La tapa del tablero de fuerza debe permanecer cerrada y solo debe abrirse en caso de que se deba validar que el breaker totalizador este cerrado o para hacer algún cambio de elementos por daño, para esto asegúrese primero de que el suministro eléctrico este desconectado y tome todas las medidas de precaución.

Figura 16: Tablero de fuerza secador por aspersión.



9. Posibles fallas

A continuación, se describen una serie de fallas que se pueden presentar, así mismo se describe la solución para esos casos.

Resistencias no calienta

- Valide que la conexión eléctrica este correcta.
- Valide que la temperatura SV del control de temperatura este correcta.
- Revise que el ventilador este operando y no tenga ningún bloqueo mecánico.
- El controlador de temperatura posee un testigo que indica si la señal de operación para las resistencias esta activada o desactivada, si la misma se encuentra activada y la conexión eléctrica está bien, la falla está en el contactor por lo cual sería necesario su cambio.

No se produce aspersion

- Valide que las presiones y caudales de aire son los necesarios para hacer su proceso.
- Revise que la bomba de líquido este encendida y el caudal de líquido cumpla con las necesidades de su proceso.
- En caso de que los parámetros estén bien pero no se produzca aspersion revise el manómetro de aire y la manguera de aire si la presión de aire comienza a variar y el líquido se regresa por la manguera que suministra el aire existe un taponamiento en el aspersor, apague el equipo y realice el desensamble del mismo limpie la boquilla y vuelva a realizar la instalación.

10. Recomendaciones

Se recomienda tener las siguientes consideraciones para un adecuado uso y mejoramiento del proceso de secado por aspersion

- Revisar periódicamente el nivel de aceite del compresor y lubricar cuando sea necesario, así mismo validar el estado del filtro de humedad y aceite del compresor, en caso de deterioro cambiarlo.

- Se recomienda al terminar de trabajar con el producto poner en funcionamiento la aspersion con agua, con la finalidad de limpiar el sistema de líquido y ayuda con la limpieza de la cámara de mezcla.
- Precalentar y concentrar los productos con el fin de aumentar la concentración de solidos solubles y obtener mejores resultados y calidad del producto.
- Aislar la cámara de mezcla para que se obtenga mayor eficiencia y la temperatura de salida sea mayor y por ende la productividad y calidad del producto aumente.

Bibliografía

[1] Phisut, N. (2012). Spray drying technique of fruit juice powder: some factors influencing the properties of product. *International food research journal*, 19(4), 1297.

[2] Dirección de estudios económicos (2022), Exportaciones colombianas del sector agropecuario-agroindustrial y las medidas no arancelarias (2000-2020), Elaboración: Departamento Nacional de Planeación – Documento: 539.

[3] DANE, (2016), Boletín mensual insumos y factores asociados a la producción agropecuaria, El cultivo de la naranja Valencia (*Citrus sinensis* [L.] Osbeck) y su producción como respuesta a la aplicación de correctivos y fertilizantes y al efecto de la polinización dirigida con abeja *Apis mellifera*.

[4] Shishir, M. R. I., & Chen, W. (2017). Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. *Trends in Food Science & Technology*, Volumen 65, pag. 49-67.

[5] Tontul, I., & Topuz, A. (2017). Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Trends in Food Science & Technology*, 63, 91-102.

[6] Chauhan, A. K., & Patil, V. (2013). Effect of packaging material on storage ability of mango milk powder and the quality of reconstituted mango milk drink. *Powder Technology*, 239, 86-93.

[7] Calla Chacon, L. A., & Canaza Camargo, J. (2012). Construcción de un secador por atomización a nivel de laboratorio y su evaluación en la obtención de leche en polvo. Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano (Perú).

- [8] Soltani, S., Gerde, P., Acevedo, F., & Rasmuson, A. (2015). Counter-current spray drying with stream separation: Computational modeling of a novel dryer design. *Chemical Engineering Research and Design*, 93, 163-173.
- [9] Walters, R. H., Bhatnagar, B., Tchessalov, S., Izutsu, K. I., Tsumoto, K., & Ohtake, S. (2014). Next generation drying technologies for pharmaceutical applications. *Journal of pharmaceutical sciences*, 103(9), 2673-2695.
- [10] Yanza Hurtado, E. G. (2003). Diseño de un secador por atomización a nivel piloto para jugo concentrado de tomate de árbol. Tesis para obtener el grado de ingeniero químico, Universidad Nacional de Colombia.
- [11] Cruz Cerón, L. G., & Hinojosa Rojas, K. L. (2015). Diseño y construcción de un secador por atomización para la obtención de colorante natural a partir de la remolacha (Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- [12] Jaskulski, M., Wawrzyniak, P., & Zbiciński, I. (2018). CFD simulations of droplet and particle agglomeration in an industrial counter-current spray dryer. *Advanced Powder Technology*, 29(7), 1724-1733.
- [13] Cal, K., & Sollohub, K. (2010). Spray drying technique. I: Hardware and process parameters. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 99(2), 575-586.
- [14] Huang, L. X., Kumar, K., & Mujumdar, A. S. (2006). A comparative study of a spray dryer with rotary disc atomizer and pressure nozzle using computational fluid dynamic simulations. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 45(6), 461-470.
- [15] Tontul, I., & Topuz, A. (2017). Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Trends in food science & technology*, 63, 91-102.

- [16] Spraying Systems Co, Boquillas automaticas, (27 de enero del 2020), product-pulsajet_10000auh-10-700x700.webp (imagen jpg), https://www.spray.com.mx/spray_nozzles/automatic_nozzles.aspx.
- [17] Cyco, Air atomizing nozzle, (27 de enero del 2020), air-atomizing-nozzles-introduction.jpg.webp (imagen jpg), <https://www.ccnozzle.com/air-atomizing-nozzle-introduction-and-application>.
- [18] Made in China, boquilla ultrasónica, (27 de enero del 2020), https://es.made-in-china.com/co_cycospray/product_Manufacture-Price-Mist-Ultrasonic-Atomizer-Nozzle-Micro-Droplet-Dry-Fog-Ultrasonic-Fogging-Nozzle_rrygesyeg.html.
- [19] García Cruz, E. E. (2011). Optimización del secado por aspersión de mucílago de pitahaya (*Hylocereus undatus*) en función de sus propiedades reológicas (Tesis Doctoral, Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR OAXACA).
- [20] Daniel Barros, Introduction - Home-Made Cyclone Dust Collection System, (27 de enero del 2020) <https://co.pinterest.com/pin/622552348463361307/>.
- [21] Gómez-Daza, J. C., & Ochoa-Martínez, C. I. (2011). Dinámica de fluidos computacional en operaciones de secado y refrigeración aplicados a la industria de alimentos. *Ingeniería y Competitividad*, 13(2), 103-114.
- [22] Malekjani, N., & Jafari, S. M. (2018). Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 206-223.
- [23] Jubaer, H., Xiao, J., Chen, X. D., Selomulya, C., & Woo, M. W. (2019). Identification of regions in a spray dryer susceptible to forced agglomeration by CFD simulations. *Powder technology*, 346, 23-37.
- [24] Chegini, G. R., & Ghobadian, B. (2005). Effect of spray-drying conditions on physical properties of orange juice powder. *Drying technology*, 23(3), 657-668.

[25] Fazaeli, M., Emam-Djomeh, Z., Ashtari, A. K., & Omid, M. (2012). Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder. *Food and Bioprocess Processing*, 90(4), 667-675.

[26] Chegini, G. R., & Ghobadian, B. (2007). Spray dryer parameters for fruit juice drying. *World Journal of Agricultural Sciences*, 3(2), 230-236.

[27] Aucayauri Meza, E. N. (2011). Estudio de la cinética de degradación térmica del ácido ascórbico durante la pasteurización del zumo de naranja valencia (*Citrus sinensis*). Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú.

[28] Portada Mamani, S. R. (2022). Optimización del porcentaje de lactosuero, zumo de naranja (*Citrus sinensis*) y zanahoria (*Daucus carota*) para la elaboración de una bebida nutritiva edulcorada con stevia (*Stevia rebaudiana* b.). Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Juliaca.

[29] Ramos A., Cogua R., Sanchez C., Tovar J. (2021). Approximations to CFD simulation of a spray drying system using OpenFoam. 22nd International Drying Symposium.

[30] Ferziger, J. H., Perić, M., & Street, R. L. (2002). Computational methods for fluid dynamics (Vol. 3, pp. 196-200). Berlin: Springer.

[31] Anandharamakrishnan, C., Gimbut, J., Stapley, A. G. F., & Rielly, C. D. (2010). A study of particle histories during spray drying using computational fluid dynamic simulations. *Drying Technology*, 28(5), 566-576.

[32] Goula, A. M., & Adamopoulos, K. G. (2010). A new technique for spray drying orange juice concentrate. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(2), 342-351.

[33] Caparino, O. A., Tang, J., Nindo, C. I., Sablani, S. S., Powers, J. R., & Fellman, J. K. (2012). Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. *Journal of Food Engineering*, 111(1), 135-148.

- [34] Mondragón, R., Julia, J. E., Barba, A., & Jarque, J. C. (2013). El proceso de secado por atomización: formación de gránulos y cinética de secado de gotas. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 52(4), 159-168.
- [35] Flaquer-Florez, D. R., Delgado-Solarte, D. M., & Fernández-Quintero, A. (2016). Secado por aspersión de soluciones modelo representativas de zumos de frutas/spray drying model for solutions representative of fruits juices. *Vitae*, 23, S387.
- [36] Osorio, C., Forero, D. P., & Carriazo, J. G. (2011). Characterisation and performance assessment of guava (*Psidium guajava* L.) microencapsulates obtained by spray-drying. *Food Research International*, 44(5), 1174-1181.
- [37] Osorio, C., Forero, D. P., & Carriazo, J. G. (2011). Characterisation and performance assessment of guava (*Psidium guajava* L.) microencapsulates obtained by spray-drying. *Food Research International*, 44(5), 1174-1181.
- [38] Phisut, N. (2012). Spray drying technique of fruit juice powder: some factors influencing the properties of product. *International Food Research Journal*, 19(4), 1297.
- [39] Phoungchandang, S., & Sertwasana, A. (2010). Spray-drying of ginger juice and physicochemical properties of ginger powders. *Science Asia*, 36(1), 40-45.