

Modelación del proceso de deshidratación por espray de jugo de guayaba

Alfonso Cubillos Varela

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería. Doctorado en Ingeniería
Bogotá D.C., Colombia
2017

Modelación del proceso de deshidratación por espray de jugo de guayaba

Alfonso Cubillos Varela

Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título de:
Doctor en Ingeniería - Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Director:

Dr. Ing. Alexander Gómez Mejía

Línea de Investigación:

Optimización térmica de procesos y secado

Grupo de Investigación:

Biomasa y Optimización Térmica de Procesos - BIOT

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería. Doctorado en Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Bogotá D.C., Colombia

2017

Recuerda que todos los modelos son incorrectos; la pregunta práctica es: qué tan incorrectos deben llegar a ser para convertirse en inútiles.

Esencialmente, todos los modelos son incorrectos, pero algunos son útiles.

George Box

Agradecimientos

Agradecimientos a todas aquellas personas que de una u otra forma han colaborado o apoyado el desarrollo de esta tesis. En ocasiones un comentario oportuno permitió resolver alguno de los inconvenientes presentados en el camino. Principalmente agradezco a mi familia por su comprensión, apoyo y paciencia. A mi padre y mi madre que me enseñaron con su ejemplo que lo realmente valioso en la vida se logra con responsabilidad, dedicación y esfuerzo, valores que han sido pilares fundamentales en mi desarrollo personal y profesional.

Especial agradecimiento al ingeniero Alexander Gómez Mejía, profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional sede Bogotá, quien como tutor y consejero permitió que este trabajo se desarrollara y culminara satisfactoriamente. A la profesora Sonia Lucía Rincón Prat, del mismo Departamento, por su apoyo en la modelación y simulación del proceso térmico, y en el diseño y construcción del secador de gota por filamento de vidrio.

Al profesor Aldo Germán Benavides Morán de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, por sus valiosa formación en los conceptos fundamentales de la dinámica de fluidos computacional. Al ingeniero Carlos Humberto Galeano por su intensiva colaboración en la implementación del modelo de simulación durante la estadía en el Instituto de Tecnología de Karlsruhe (KIT) - Alemania.

A los profesores de la escuela de ingeniería de alimentos de la Universidad del Valle - Cali, Alejandro Fernández Quintero y Claudia Ochoa Martínez, por sus certeros consejos en la formulación del proyecto de investigación y en el análisis de la calidad del producto seco. Además, por permitir el uso de los equipos de laboratorio para la fase experimental.

A Jairo Andrés Gutierrez y Vanessa Gonzáles Torres, estudiantes de maestría de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica la Universidad Nacional y de Ingeniería de Alimentos la Universidad del Valle, respectivamente. Su participación activa en la simulación y experimentación en el secador por aspersión, así como en la modelación del secado de gota, facilitaron en gran medida el trabajo desarrollado.

Finalmente, agradecer el apoyo financiero prestado por Colciencias. Por un lado, por la financiación del doctorado a través de la beca *Francisco José de Caldas* año 2010. Y a *El patrimonio autónomo fondo nacional de financiamiento para la ciencia, la tecnología y la innovación, Francisco José de Caldas* por la financiación del proyecto *Experimentación, modelación y simulación del proceso de secado por aspersión de jugos de frutas* código 110156935131.

Resumen

En esta tesis se modela y simula la calidad de un jugo sintético de guayaba secado por aspersión. La calidad, medida a partir de la humedad, densidad y tamaño de las partículas secas, se analiza con diferentes velocidades y temperaturas del aire, flujos del jugo y velocidades del atomizador. El análisis se realiza a partir de datos experimentales y un modelo de simulación que aplica la dinámica de fluidos computacional (CFD - Computational Fluid Dynamics). Además, se realiza la caracterización de la materia prima para obtener un modelo de secado de gota que permita ser incluida en el modelo de simulación. Los resultados de simulación generados a partir del modelo son similares a los datos obtenidos por experimentación. Lo anterior permite concluir que, el modelo obtenido sirve como base para definir las condiciones de operación del proceso que permitiría obtener un producto con las características de calidad deseadas, o realizar el escalamiento del proceso.

Palabras clave: secado por aspersión, dinámica de fluidos computacional, secador de gota por filamento de vidrio, calidad de producto seco, jugo de guayaba.

Abstract

In this thesis, the quality of dried guava juice by spray drying is modeled and simulated under different process conditions. The quality is measured by the humidity, density, and size of the dried particles while the air flow, air temperature, juice flow and rotational speed of the atomizer are modified. The CFD (Computational Fluid Dynamics) is used to model and simulate the internal airflow and the dried product quality. The air flow profiles and product quality simulated by CFD are compared with experimental measurements carried out in a scale spray dryer. The model and simulations are useful for improving the product quality and scale up purposes.

Keywords: computational fluid dynamics, spray drying, guava juice, glass filament droplet drying.

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Lista de símbolos	XIV
1. Introducción	1
2. Planteamiento del problema	4
2.1. Características que definen la calidad del producto	6
2.2. Variables del proceso que afectan la calidad	7
2.2.1. Propiedades de la materia prima	10
2.2.2. Características del equipo secador	11
2.2.3. Condiciones de operación del proceso	12
2.3. Modelos de simulación CFD	13
2.3.1. Programas CFD utilizados y métodos experimentales de comparación	16
2.3.2. Modelos de turbulencia para el aire en secado por aspersión	22
2.3.3. Modelo de inyección de partículas	23
2.3.4. Modelos de secado de gota	25
2.4. Objetivos específicos y descripción del modelo propuesto	29
3. Modelación del secador por aspersión	33
3.1. Descripción del modelo CFD	33
3.1.1. Modelo de fase continua para el aire	33
3.1.2. Modelo de fase discreto para las gotas	36
3.2. Modelos de secado de gota	37
3.2.1. Modelo de secado de gota de agua	38
3.2.2. Modelo de secado de gotas con sólidos	40
3.3. Método de solución y aplicación del modelo CFD	41
4. Caracterización de la materia prima	47
4.1. Descripción del jugo utilizado	47

4.2.	Caracterización de cinéticas de secado de gota	49
4.2.1.	Diseño del secador de gota	49
4.2.2.	Construcción del secador de gota	51
4.2.3.	Pruebas de operación del secador por filamento de vidrio	56
4.2.4.	Experimentos con gotas de jugo modelo	57
4.3.	Definición del modelo de secado de jugo modelo	63
4.4.	Aplicación del modelo de secado de gota	67
5.	Sección experimental en el secador por aspersion	69
5.1.	Descripción del secador	70
5.2.	Perfiles experimentales del aire	71
5.2.1.	Selección e instalación de instrumentos	72
5.2.2.	Perfiles experimentales de velocidad, temperatura y humedad del aire	78
5.3.	Pruebas de secado por aspersion de jugo modelo	81
5.3.1.	Procedimientos de medición de propiedades	82
5.3.2.	Análisis de resultados	84
6.	Simulación y comparación de resultados	88
6.1.	Sensibilidad de las condiciones de simulación CFD	88
6.1.1.	Cantidad de celdas	88
6.1.2.	Esquema de interpolación	90
6.1.3.	Simulación bi- o tri- dimensional	92
6.2.	Simulación y comparación del perfil de velocidad	93
6.3.	Simulación y comparación de los perfiles de temperatura y humedad	98
6.4.	Simulación y comparación del secado de gotas de jugo	101
7.	Perspectivas	111
8.	Conclusiones	114
A.	Anexo: Resultados experimentales de secador de gota por filamento de vidrio	116
A.1.	Curvas de masa y humedad del jugo modelo	116
A.2.	Efecto de la temperatura del aire en secado de gotas de jugo modelo	118
A.3.	Efecto de la velocidad del aire en secado de gotas de jugo modelo	120
A.4.	Curvas de velocidad de secado y relación CDC del jugo modelo	122
B.	Anexo: Modificación del código OpenFOAM	124
B.1.	Guardar masa de gotas	124
B.2.	Compartir la masa inicial y masa actual de la gota	126
B.3.	Crear la nueva función JuiceEvaporation	128
C.	Anexo: JuiceEvaporation.C	129

D. Anexo: JuiceEvaporation.H	137
Bibliografía	141

Lista de símbolos

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área superficial	m^2	$\int dx$
c_p	Calor específico a presión constante	$\frac{J}{kg\ K}$	Ecuación 3-12
C	Concentración de vapor en la superficie	$\frac{kgmol}{m^3}$	Ecuación 3-20
d	Diámetro	m	DF
h_{fg}	Calor latente de vaporización	$\frac{J}{kg}$	Ecuación 3-15
h	Coefficiente convectivo de energía	$\frac{W}{m^2K}$	Ecuación 3-13
h_m	Coefficiente convectivo de masa	$\frac{m}{s\ K}$	Ecuación 3-19
I	Intensidad de turbulencia	1	$0, 2Re^{-1/8}$
k	Energía cinética turbulenta	$\frac{m^2}{s^2}$	Sección 3.1.1
k	Coefficiente difusivo de energía	$\frac{W}{m\ K}$	Ecuación 3-12
k_m	Coefficiente difusivo de masa	$\frac{kg}{s\ Pa}$	Ecuación 3-23
L	Altura del secador por aspersion	m	DF
m	Masa	kg	DF
M_W	Peso molecular del agua	$\frac{kg}{mol}$	Ecuación 3-19
\dot{m}	Flujo másico	$\frac{kg}{h}$	$\frac{\partial m}{\partial t}$
N	Velocidad de evaporación	$\frac{kg}{s}$	Ecuación 3-24
p_v	Presión parcial de vapor	Pa	Ecuación 3-20
p_{sat}	Presión de vapor saturado	Pa	Ecuación 3-20
R	Constante universal de los gases	$\frac{J}{mol\ K}$	Ecuación 3-20
r	Radio	m	DF
T	Temperatura	K	DF
t	Tiempo	s	DF

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
t_c	Tiempo característico de secado	s	Sección 4.2.4
u	Velocidad	m/s	$\frac{\partial x}{\partial t}$
\mathbf{u}	Vector de velocidad	m/s	$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t}$
V	Volumen	m^3	$\int dx^2$
\dot{V}	Flujo volumétrico	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	$\frac{\partial V}{\partial t}$
w	Velocidad angular	RPM	$\frac{dx}{dt}$
X_{bs}	Contenido de humedad base seca	1	$\frac{m_w}{m_{ms}}$
X_{bh}	Contenido de humedad base húmeda	1	$\frac{m_w}{m_d}$
Re	Número de Reynolds	1	$\frac{vD}{\nu}$
Bi	Número de Biot	1	$\frac{hL}{k}$
Nu	Número de Nusselt	1	$\frac{hd}{k}$
Sh	Número de Sherwood	1	$\frac{h_m d}{k_m}$
Sc	Número de Schmidt	1	$\frac{\mu}{\rho k_m}$
Pr	Número de Prandtl	1	$\frac{c_p \mu}{k}$

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
ϵ	Tasa de disipación de energía	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}^3}$	Sección 3.1.1
μ	Viscosidad dinámica	$\frac{\text{kg}}{\text{m s}}$	Ecuación 3-17
ν	Viscosidad cinemática	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	μ/ρ
ρ	Densidad	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	m/V
ρ_b	Densidad a granel	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Sección 5.3
ρ_s	Densidad aparente	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Sección 5.3
ρ_w	Densidad verdadera	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Sección 5.3
ϕ	Humedad absoluta del aire	$\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire seco}}$
ψ	Humedad relativa del aire	1/%	$\frac{p_v}{p_{\text{sat}}}$

Subíndices

Subíndice	Término
amb	Condiciones ambientales
c	Característico
cr	Crítico
d	Gota líquida (agua o jugo)
D	Disco
eq	Equilibrio
f	Final
g	Gas (aire)
in	Entrada
ms	Materia seca
p	Partícula
t	Turbulento
w	Agua
0	Estado de referencia
x, y, z	Componente cartesiana

Abreviaturas

Abreviatura	Término
CDC	Curva característica de secado
CF	Condiciones de frontera
CFD	Dinámica de fluidos computacional
DF	Dimensión fundamental
RANS	<i>Reynolds average Navier Stokes</i>
RSM	<i>Reynolds stress model</i>
LES	<i>Large eddy simulation</i>
LVD	Velocímetro de láser doppler
MUSCL	Método diferencias finitas <i>upwind</i> de tercer orden
QUICK	Interpolación cuadrática <i>upstream</i> cinemática convectiva

Abreviatura **Término**

RMSE	Raíz del error cuadrático medio
PIV	Velocimetría de imágenes de partículas

1. Introducción

Colombia posee gran potencial en la producción de diversos productos agrícolas gracias a sus condiciones geográficas y ambientales. Sin embargo, el limitado procesamiento poscosecha restringe su ingreso a mercados de mayor potencial económico. Uno de los procesos poscosecha, tal vez el principal, es el secado, pues facilita la conservación, empaque y transporte de la mayoría de los productos agrícolas. Es así como en algunos casos, el secado puede llegar a reducir hasta 8 veces el peso original del producto, conservando sus principales propiedades si se utilizan técnicas y condiciones adecuadas de secado.

Los materiales líquidos, como los jugos de fruta, café y leche se secan para obtener polvos que facilitan su empaque, almacenamiento y transporte. El producto seco, si se requiere, se puede llevar de nuevo a su estado líquido con una calidad parecida al líquido original [61]. De esta forma los sólidos secos en forma de polvo tienen una larga vida de almacenamiento a temperatura ambiente y son usados como alimento, saborizante natural, en la fabricación de dulces, caramelos y otros productos. Existen diferentes métodos de secado y cada uno se puede utilizar con diferentes variantes según la necesidad y la aplicación. El método escogido depende del tipo de alimento que se va a deshidratar, el nivel de calidad que se puede alcanzar y el costo que se puede justificar [77]. Para el caso de disoluciones acuosas y suspensiones las técnicas de deshidratación disponibles son por lecho fluidizado, bandejas, tambor, liofilización y aspersión.

Entre los métodos para deshidratar jugos, la técnica por aspersión es la más utilizada en la industria de alimentos. Actualmente es una técnica bien establecida, sencilla y de bajo costo respecto a las demás [80]. En esta técnica es necesario ajustar las condiciones del proceso según las características del líquido con el fin de garantizar la calidad del producto seco obtenido. Algunas condiciones básicas de calidad incluyen obtener la humedad tal que el producto se pueda almacenar sin problema, pero que no pierda tanta masa que afecte su valor comercial; que el contacto prolongado a altas temperaturas no afecte componentes valiosos para la calidad del producto y que los tamaños de las partículas o su densidad no dificulten su almacenamiento o posterior procesamiento.

Las principales características de calidad del producto seco se pueden relacionar con la humedad final, la densidad a granel y el tamaño medio de las partículas. Otras características de calidad dependen de la aplicación que se dará a ese producto, por ejemplo: las propiedades organolépticas como color, sabor y olor [80], solubilidad [12], pegajosidad, porosidad

[98] y contenido de vitaminas, entre otras. Estas características de calidad dependen de las condiciones del proceso, de las propiedades de la materia prima y de las características del equipo de secado.

El principal problema es definir las condiciones adecuadas de operación del proceso de secado por aspersión para garantizar que el producto seco obtenido posea las características de calidad deseadas. Para aportar a la solución de este problema existen diferentes estrategias. La estrategia seleccionada en este trabajo se basa en modelar, simular y verificar experimentalmente los fenómenos de transferencia de momento, energía y masa que se presentan en la cámara del secador por aspersión. Con este fin se modela el comportamiento del aire en el interior de la cámara del secador y se caracterizan las propiedades de secado de la materia prima a partir del análisis experimental de gotas individuales del líquido. El modelo del comportamiento del aire y el de secado de las gotas se acoplan para modelar y simular el proceso de secado por aspersión.

El objetivo general de este proyecto es construir, implementar y validar un modelo matemático discreto aplicando la dinámica de fluidos computacional (CFD) para el secado por aspersión de jugos de fruta. Se busca que el modelo permita analizar las principales propiedades físicas de calidad del producto seco (humedad, densidad y tamaño de partículas) a partir del efecto de las propiedades de la materia prima (jugo de fruta), las características del equipo de secado (secador por aspersión) y las condiciones del proceso de secado (flujo de materia prima y temperatura y flujo del aire).

El modelo de simulación permite analizar los fenómenos físicos, incluidos los termodinámicos, en el interior del secador, así como relacionar éstos fenómenos con parámetros de calidad como la humedad, el tamaño y la densidad de las partículas durante su recorrido por el secador. De tal manera que se puedan vincular estas características de calidad del producto con las condiciones de operación del proceso y las propiedades del jugo a secar. Este modelo se puede utilizar luego como herramienta para mejorar el desempeño del proceso, aumentar la eficiencia, estudiar los efectos de cambios en la materia prima, como soporte para modificar la geometría del secador y la forma como ingresa el aire, reducir la cantidad de material pegado a las paredes o escalar el proceso.

Las simulaciones con el modelo construido se verifican con experimentación utilizando un jugo modelo de guayaba. Esto debido a que es un producto agrícola promisorio para el país, con alto contenido de vitamina C, con aroma y sabor muy característicos. Es un frutal que en el país ocupa el tercer lugar en relación al área sembrada y el sexto en cuanto al valor de la cosecha, después de los cítricos, la piña, papaya, mango y aguacate. Además porque a pesar de que se genera una gran variedad de productos procesados como mermeladas, jaleas, jugos y bebidas suaves, la exportación de guayaba fresca desde países productores ha sido restringida porque esta fruta es altamente perecedera y susceptible al ataque de la mosca de la fruta [80]. Por tanto existe un alto potencial para el uso de polvo de guayaba en la fabricación de

bebidas, alimentos para bebés, vitaminas y otros productos [17]. Adicionalmente, al secar este jugo por la técnica de deshidratación por aspersion se pueden reducir significativamente los costos de transporte en el envío a los mercados distantes. No obstante, la operación de secado debe ser diseñada cuidadosamente para conservar la calidad del producto.

Al seleccionar esta fruta tropical como producto para probar el modelo se espera aportar herramientas y experiencias que contribuyan a obtener polvo seco de guayaba por aspersion a nivel industrial con los estándares de calidad requeridos. Se aspira que el modelo de secado sirva como base para definir las condiciones de operación del proceso que garanticen ciertas características de calidad, no sólo para el jugo de guayaba, sino también para otros jugos de fruta. Esto facilitaría la aplicación del secado por aspersion en otro jugos, lo que permitiría que la técnica de secado fuera utilizada por pequeñas y medianas industrias, comunidades rurales o cooperativas agrícolas interesadas en generar productos de mayor valor agregado y con potencialidad de exportación.

2. Planteamiento del problema

La técnica de deshidratación por aspersion, también llamada atomización o rocío, permite la obtención de un producto seco en forma de polvo por medio de la transformación de un líquido que contiene material sólido en forma suspendida o disuelta [61]. Se utiliza a nivel industrial desde la segunda guerra mundial debido a la necesidad de reducir los costos de transporte, mejorar las propiedades del producto y facilitar su almacenamiento.

El principio básico de deshidratación por aspersion se basa en el contacto de las gotas de jugo o mezcla con un medio secante, usualmente aire caliente. El aire suministra la energía para evaporar y trasportar el solvente en forma de vapor. La Figura 2-1 muestra los elementos que normalmente conforman un deshidratador por aspersion.

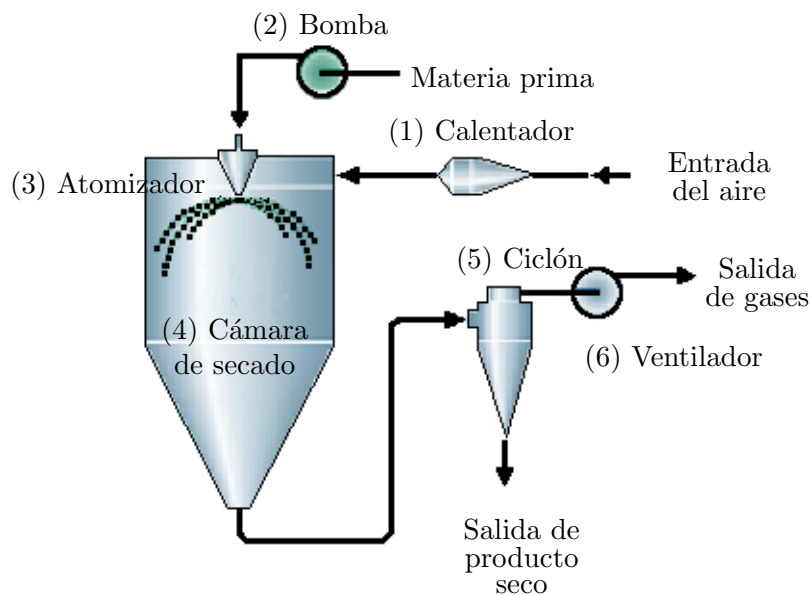


Figura 2-1.: Representación esquemática de un deshidratador por aspersion.

Los principales componentes de este equipo son:

1. **Calentador:** aumenta la temperatura del aire de secado.
2. **Bomba:** envía el jugo de materia prima al secador.
3. **Atomizador:** convierte el flujo de jugo en pequeñas gotas. Las técnicas de atomización

aplican diferentes fuentes de energía para romper el fluido y generar las gotas. Los más utilizados son el atomizador rotatorio y el atomizador de boquilla [57]. Los principales tipos de atomizadores rotatorios de disco son el liso y el de paletas [39].

4. **Cámara de secado:** es la zona donde se realiza el contacto entre el aire y las gotas de líquido. En la base del secador se pueden recoger las partículas más pesadas. Industrialmente se construyen en acero inoxidable, y para laboratorio de vidrio.
5. **Ciclón:** permite separar el aire húmedo de las partículas que transporta.
6. **Ventilador:** succiona el aire de secado.

A pesar de sus ventajas, en el proceso de secado por aspersion se presentan varios retos: que el producto no se pegue a las paredes del secador, que el rendimiento sea el adecuado para el producto, que la materia prima se pueda atomizar y no atasque el atomizador, y que el producto final tenga las características de calidad deseadas. Lograr ciertas condiciones de calidad requiere identificar las propiedades que la definen, de qué depende y cómo modelarla. Por lo anterior, en la Figura 2-2 se presenta un resumen de los principales aspectos que definen la calidad del producto en el secado por aspersion, las condiciones que la afectan y los métodos utilizados para modelarla.

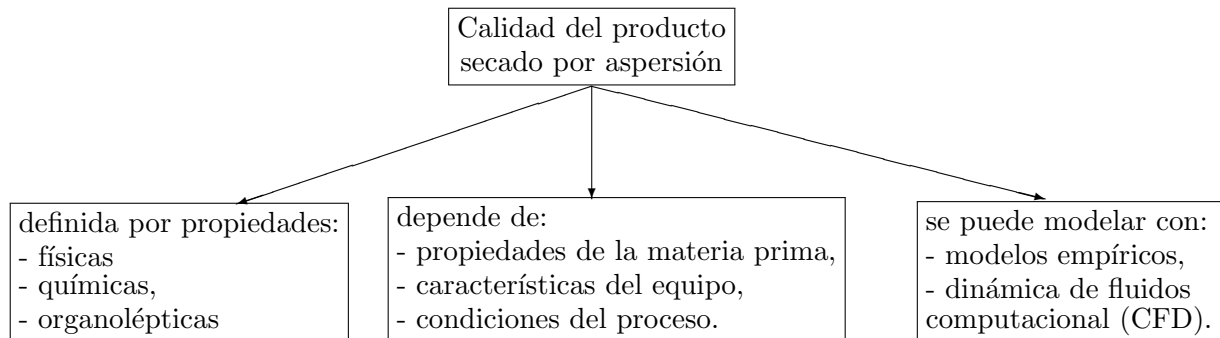


Figura 2-2.: Clasificación de las propiedades que definen la calidad del producto, variables del proceso que las afectan y los métodos para modelar la relación entre las características de calidad y del proceso.

El problema que trata este trabajo es la relación entre la *calidad* de un jugo de fruta secado por aspersion y las *características* del proceso utilizando como herramienta un modelo basado en la *mecánica de fluidos computacional* (CFD). En las siguientes secciones se describen en detalle cada uno de los componentes de análisis: características de calidad del producto, factores que afectan la calidad y los modelos que relacionan la calidad con las condiciones del proceso.

2.1. Características que definen la calidad del producto

Para mejorar la calidad del producto y del proceso es necesario definir qué características de las partículas permiten establecer el nivel de calidad del polvo seco obtenido. Estas características de calidad dependen de la aplicación del producto o sus requerimientos posteriores. Características como las propiedades organolépticas (color, olor y sabor), solubilidad (capacidad de disolverse en un líquido), pegajosidad, porosidad, sólidos residuales, contenido de vitaminas y otros compuestos, permiten especificar la calidad de ciertos productos.

En este proyecto se relaciona la calidad del producto a partir de la medición de la humedad, densidad y tamaño de las partículas. Se seleccionan estas características debido a que son propiedades físicas fundamentales y las más utilizadas como se presentará más adelante con la Tabla 2-2. Son propiedades físicas que se obtienen directamente del modelo de secado sin necesidad de incluir modelos adicionales. Además, estas propiedades físicas tienen injerencia en las demás propiedades de calidad y por ello es prioritario estudiarlas, para luego poder relacionarlas con otras características de calidad. A continuación se describen la importancia de estas propiedades y la forma como se mide cada una [82, 85]:

- **Contenido de humedad:** en los alimentos es necesario controlar adecuadamente su vida útil, el sabor y la textura, así mismo la aglomeración y proliferación bacteriana. Esto se logra midiendo y controlando el *contenido de humedad* final y la *actividad de agua* del producto.

La *humedad* se define como la cantidad de agua que está presente en el material, se relaciona con las condiciones de secado y los mecanismos de formación de la gota. En consecuencia, depende de los cambios en las variables de operación del secado por aspersión (principalmente de la temperatura del aire), además de la composición y concentración de la materia prima. El secado por horno es el método más usado para definir la humedad del producto. En este método el producto se seca a una temperatura controlada, durante cierto tiempo, hasta alcanzar una masa constante de la muestra.

La *actividad de agua* indica la fracción del contenido de humedad total que está libre en el producto, es decir, la humedad disponible para el crecimiento de microorganismos que afectan la estabilidad del producto. A las curvas de equilibrio que relacionan el contenido de humedad y la actividad de agua de un producto a diferentes temperaturas, se les denomina *isotermas de sorción de humedad*.

- **Densidad:** es una de las propiedades básicas, definida como la relación entre la masa y el volumen. Esta tiene implicaciones económicas, comerciales y funcionales. Una alta densidad implica un bajo volumen, que favorece el transporte del material, manipulación y almacenamiento. Por otro lado, en ocasiones se requieren bajas densidades por condiciones de operación o criterios de calidad del producto.

En la formación de las partículas secas es posible que se produzcan poros. Estos poros afectan el volumen ocupado por las partículas y por lo tanto es necesario especificar las diferentes formas de medición de densidad que se describe a continuación.

- La *densidad real* representa la masa del sólido contenido en las partículas, dividido por el volumen ocupado por estos sólidos (excluyendo los poros).
 - La *densidad a granel o de almacenamiento* se refiere a la disposición de las partículas dentro de un recipiente y representa la masa de las partículas contenidas en el recipiente, dividida por el volumen ocupado (incluye poros internos).
 - La *densidad aparente* se define a partir de la densidad de las partículas incluyendo los poros, pero excluyendo el volumen entre las partículas.
- **Tamaño de partículas:** la distribución del tamaño de las partículas no solo informa acerca del tamaño medio, sino también, de la dispersión del tamaño, la aglomeración de las partículas y, dependiendo del método usado, la forma y área superficial. Aunque hay muchos métodos para medir la distribución del tamaño de las partículas, los más útiles en la medición del polvo comprenden dos clases: el análisis por tamiz y la difracción láser. Solamente el análisis de imágenes permite definir la forma real de la partícula de polvo. En la actualidad, el microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) y el microscopio electrónico de transmisión (TEM, por sus siglas en inglés) son los métodos más usados para definir la distribución de forma de las partículas.

La mayoría de las propiedades del producto seco dependen de las características de la materia prima y de su *historia* de secado desde gota hasta convertirse en partícula, es decir, de la interrelación del aire con la gota desde que es atomizada hasta que se convierte en una partícula seca y sale del secador. Estas condiciones del aire dependen de las características de operación del proceso y del equipo. Las variables del proceso que afectan la calidad del producto se describen en la siguiente sección.

2.2. Variables del proceso que afectan la calidad

Las variables del proceso de secado por aspersión afectan las características de calidad del producto. Estas variables del proceso se pueden clasificar en tres grupos: los relacionados con las propiedades de la materia prima, con las características del equipo y con las condiciones de operación del proceso. Las relaciones entre estas variables han sido descritas y analizadas experimentalmente por Chegini et al. [13, 11, 12], Souza [98], Goula y Adamopoulos [33], Zhang et al. [122], Ozmen y Langrish [81] entre otros. Las Tablas **2-1** y **2-2** presentan el análisis de algunos trabajos experimentales que relacionan la calidad del producto con las condiciones del proceso y de la materia prima.

Tabla 2-1.: Experimentos que relacionan las condiciones del proceso con las características del producto seco. Se presentan las condiciones del proceso y en la Tabla 2-2 se muestran las propiedades de las partículas secas para los mismos experimentos.

Autor, año	Líquido	Temperatura del aire [K]	Flujo de aire [cm ³ /s]	Configuración del atomizador	Flujo de líquido [ml/min]	Concentración encapsulante
Jumah et al. [56], 2000	Leche fermentada	353, 363, 373, 393, 403 y 423	632, 727, 777 y 792	1,0, 1,5, 2,0 y 2,5 bar	7, 11, 14, 18, 29 y 36	
García et al. [27], 2004	Jugo de cebada	393, 413 y 433			9, 11 y 13	1, 3 y 5 %
Chegini y Ghobadian [11], 2005	Jugo de naranja	383, 403, 423 y 443		10, 15, 20 y 25 x 1000 rpm	150, 250, 350 y 450	
Chegini y Ghobadian [12], 2007	Jugo de naranja	403, 423 y 433			15, 20, 25 y 30	
Chegini et al. [13], 2008	Jugo de naranja	383, 403, 423, 443 y 463		10, 15, 20 y 25 x 1000 rpm	150, 250, 350 y 450	
Souza [98], 2009	Pulpa de tomate	473, 483 y 493		25, 30 y 35 x 1000 rpm	127, 201 y 276	
Goula y Adamopoulos [34], 2010	Jugo de naranja	383, 393, 403 y 413				4, 2, 1 y 0,25 %
Mahendran [70], 2011	Jugo de guayaba					30, 40, 50 y 60 %
Fernandes et al. [21], 2013	Aceite de romero	408 y 468			8,3 y 16,6	10 y 30 %
Sarabandi et al. [92], 2014	Jarabe de uva	423 y 443				0,5, 1,0, 2,0 y 4,0
Patil et al. [84], 2014	Jugo de guayaba	Entre 443 y 458				Entre 7 y 12 %

Tabla 2-2.: Experimentos que relacionan las condiciones del proceso con características del producto seco. Se presentan los rangos encontrados para cada propiedad analizada. En la Tabla 2-1 se presentan las condiciones del proceso respectivo.

Autor, año	Líquido	Humedad [%]	Tamaño de partículas [μm]	Densidad [g/cm^3]	Otras propiedades
Jumah et al. [56], 2000	Leche fermentada		15,07 - 17,69	0,595 - 0,636	Color, ceniza, sal y grasa
García et al. [27], 2004	Jugo de cebada	9,02 - 3,68			Color, azúcares, minerales y propiedades de rehidratación
Chegini y Ghobadian [11], 2005	Jugo de naranja		5 - 65	0,3 - 0,9	
Chegini y Ghobadian [12], 2007	Jugo de naranja		20 - 35	0,4 - 0,8	Rendimiento y acumulación paredes
Chegini et al. [13], 2008	Jugo de naranja	3,37	28,09	0,657	Sólidos insolubles, rendimiento, propiedades de rehidratación
Goula y Adamopoulos[34], 2010	Jugo de naranja	1,9 - 7,0		0,14 - 0,41	Propiedades de rehidratación
Souza [98], 2009	Pulpa de tomate	4,0 - 6,6	38 - 62	0,50 - 0,78	
Mahendran [70], 2011	Jugo de guayaba	2,14 - 2,24		0,54 - 0,61	Viscosidad y propiedades de rehidratación
Fernandes et al. [21], 2013	Aceite de romero	0,26 - 3,16		0,97 - 1,27	Higroscopicidad
Sarabandi et al. [92], 2014	Jarabe de uva	0,55 - 2,90		0,4 - 0,7	Actividad de agua y propiedades de rehidratación
Patil et al. [84], 2014	Jugo de guayaba	2,15 - 3,87			Vitamina C y propiedades de rehidratación

En la Tabla **2-1** se indica que las principales condiciones del proceso utilizadas para los análisis experimentales de calidad son la temperatura del aire y el flujo de líquido. Además, se realizan diversas investigaciones que alteran las propiedades de la materia prima agregando diferentes concentraciones de encapsulantes. Los encapsulantes son compuestos químicos que facilitan el proceso de secado, pues por su alto peso molecular crean una película alrededor de la gota, evitando que se aglomeren o peguen a las paredes del secador. En la misma revisión se identifica que no se encuentran trabajos experimentales que relacionen características de calidad con la configuración del equipo de secado.

De la Tabla **2-2** se aprecia que las principales propiedades del producto analizadas son la humedad y la densidad. La humedad por ser la propiedad que define el grado de conservación del producto sin que sea afectado por el exceso de agua, y la densidad por su relación con las propiedades de rehidratación. Como resumen, en el diagrama de la Figura **2-3** se muestran las diferentes características del proceso que afectan la calidad: propiedades de la materia prima, condiciones del proceso y las características del equipo. A continuación se describen cada una de ellas.

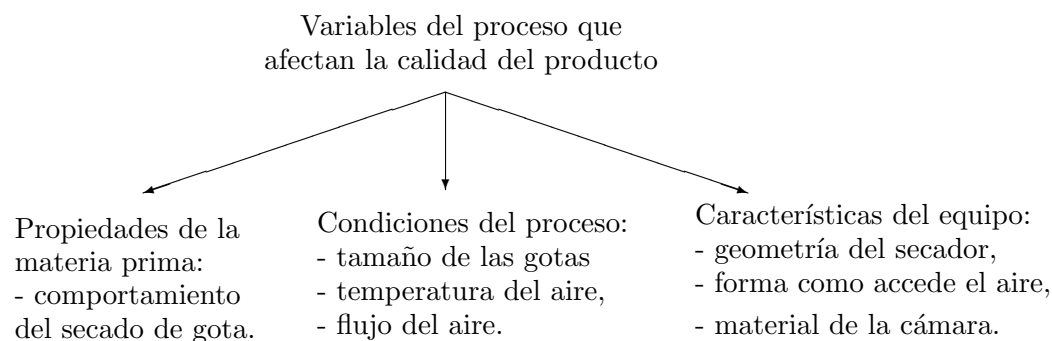


Figura 2-3.: Clasificación de las variables del proceso de secado por aspersion que afectan la calidad del producto seco: propiedades de la materia prima, condiciones del proceso y características del equipo.

2.2.1. Propiedades de la materia prima

Las propiedades de la materia prima (líquido con sólidos disueltos o en suspensión) afectan las características de la gota durante el secado, por eso se hacen diversos esfuerzos para comprender los fenómenos de secado de las gotas individuales o alterar las características de la materia prima con el fin de obtener productos con las condiciones deseadas.

Investigadores como Osorio et al. [80] experimentan con la materia prima al mezclarla con compuestos químicos que forman capas encapsulantes, para cambiar así las propiedades de las gotas durante el secado, y por lo tanto, de las partículas secas. Según Jayasundera et al. [51]

estos encapsulantes generan una capa alrededor de la gota que reduce la pegajosidad de las partículas, evitando que se peguen entre ellas y a las paredes del secador. Los encapsulantes también pueden retener el color y olor característicos de la materia prima.

Para el desarrollo de la fase experimental de esta investigación se utiliza un jugo modelo de guayaba. Se selecciona un jugo modelo con el fin de garantizar la misma materia prima en todos los experimentos tanto de gota como en el secador por aspersión. Con esto se evita que los experimentos se vean afectados por factores de maduración, variedad y disponibilidad de la fruta real. Los criterios de selección, el método de síntesis del jugo modelo y el análisis de sus propiedades se describen en detalle en la sección 4.1.

2.2.2. Características del equipo secador

Las características del equipo que influyen en la calidad están relacionadas con la forma como ingresa el aire a la cámara de secado, la geometría y el material de construcción del secador. Por ejemplo, la pegajosidad del polvo se puede reducir cambiando el material de la cámara de secado [112].

Según Patel et al. [83] y Thibo et al. [102] los equipos de deshidratación por aspersión se pueden clasificar en tres grupos según la capacidad de evaporación: equipos de laboratorio, plantas piloto y equipos industriales. La Tabla **2-3** presenta algunos ejemplos de equipos de secado por aspersión comerciales divididos según la misma clasificación. Los equipos con capacidad de evaporación de 1 kg/h se clasifican como secadores de laboratorio. En esta categoría se pueden ubicar como ejemplo los equipos fabricados por las empresas Edibon, Buchi y LabPlant. Del mismo modo, los equipos con capacidad de evaporación de 6 kg/h se clasifican como plantas piloto de laboratorio y han sido utilizados por Gianfrancesco et al. [29, 30], Huang et al. [46], Ozmen y Langrish [81], Southwell y Langrish [95, 96], Roustapour et al. [88], Stafford et al. [99] y Woo et al. [112, 113]. Los equipos construidos por la empresa GEA son de características industriales y pueden llegar a secadores con capacidad de evaporación de 700 kg/h como el utilizado por Huang y Mujumdar [49]. Según la información comercial de GEA [28] los equipos de referencia *Production Minor* y *VSD* pertenecen al rango de equipos a escala de producción, cuyas medidas y capacidad de evaporación se aprecian en la Tabla **2-3**.

En la Tabla **2-4** se presentan otros ejemplos de secadores por aspersión, se especifica la geometría, el tipo de atomizador y la forma de flujo (co- o contra- corriente). Además, en la misma tabla se relaciona con las condiciones de operación, la materia prima utilizada, así como el programa utilizado para realizar la simulación y el modelo de turbulencia.

Para la fase experimental de este proyecto se utiliza el secador de planta piloto instalado en el *laboratorio de operaciones unitarias de tecnología e ingeniería de alimentos* de la Universidad del Valle en la ciudad de Cali. Entre la presentación del proyecto de tesis y la ejecución del

Tabla 2-3.: Relación de tamaños de algunos secadores por aspersión comerciales indicando capacidad de evaporación, material y tamaño de la cámara. Grupo superior: secadores de laboratorio; grupo intermedio: plantas piloto; grupo inferior equipos industriales.

Ejemplos por marca y referencia de secador en cada grupo	Capacidad máx. de evaporación [kg/h]	Cámara de secado		
		Material	Diámetro en [mm]	Altura en [mm]
Edibon SSPC [18]	1,0	Vidrio	200	500
Buchi B-290 [32]	1,0	Vidrio	165	600
LabPlant SD-06 [80]	1,5	Vidrio	215	500
GEA Mobile Minor [29]	6,0	Acero	800	1310
Secador UniValle	10,0	Acero	780	1360
GEA Production Minor [28]	30,0	Acero	1200	1790
GEA VSD-6.3 [28]	55,0	Acero	1800	2460
GEA VSD-12.5 [28]	110,0	Acero	2500	3600

proyecto, la Universidad del Valle decidió modificar el tipo de flujo pasando de contracorriente a co-corriente. Aún así, se mantiene la capacidad de evaporación de hasta 10 kg/h y las características similares a los secadores de tipo industrial al estar construido en acero inoxidable y no en vidrio como los secadores de laboratorio. Aunque este tipo de equipos se encuentran operando en pequeñas empresas de secado, el utilizado en este proyecto se usa para labores de investigación y desarrollo. Utilizar este equipo permite generar condiciones similares a las industriales pero con las facilidades que ofrece un equipo de laboratorio, lo que ayuda a obtener un punto base para escalar los resultados a condiciones industriales.

El esquema de funcionamiento del equipo se presenta en la Figura 2-1. Se utiliza un atomizador de disco rotatorio y el flujo de aire ingresa en la misma dirección de las gotas (co-corriente). Este equipo está construido en acero inoxidable, además cuenta con los dispositivos, sensores y controladores necesarios para especificar las condiciones de operación del proceso: temperatura y flujo del aire de secado, flujo de líquido de materia prima y velocidad del atomizador rotatorio. Una de las principales características de este equipo es que el aire en la cámara de secado se transporta gracias al vacío que genera el ventilador. Los detalles del equipo se presentan en la sección 5.1. Durante el desarrollo de este proyecto no se modifican o alteran las características del equipo.

2.2.3. Condiciones de operación del proceso

Las condiciones de operación del proceso que afectan la calidad del producto y que son rápidamente ajustables son: el tamaño y velocidad de las gotas (que depende de las características del atomizador, velocidad del atomizador y el flujo de líquido), y la temperatura

y flujo del aire de secado. Por ejemplo, Souza [98] y Chegini et al. [11, 13] analizan experimentalmente las condiciones del proceso (tamaño de la gota y temperatura del aire) para así definir su relación con diferentes características de la calidad del producto.

Por otro lado, Goula y Adamopoulos [33] presentan para la deshidratación de jugo de tomate, entre otras, la relación experimental entre el flujo de aire de secado con la humedad y densidad del polvo seco. Se encuentra que al reducir el flujo de aire de secado la humedad del producto se reduce y la densidad del mismo aumenta. Otros ejemplos de cómo las condiciones de operación del proceso afectan la calidad se pueden apreciar en las Tablas **2-1** y **2-2**. Además, en la Tabla **2-4** se presentan las condiciones de operación para diferentes simulaciones, así como el tipo de equipo y la materia prima utilizada.

En el presente trabajo, se utilizan diferentes condiciones de operación del proceso, donde se analizan los efectos de cambiar la velocidad y temperatura del aire de secado. Lo anterior debido a que al cambiar el flujo y la temperatura se generan diferentes patrones del aire en el secador que modifican la historia de secado de las gotas al convertirse en partículas, y por lo tanto, sus propiedades [32]. Además, se modifica la velocidad del atomizador y el flujo de materia prima debido a que estas condiciones modifican la velocidad y tamaño de las gotas durante el secado.

2.3. Modelos de simulación CFD

Para modelar la relación entre la calidad del producto y las características del proceso de secado se han utilizado diferentes metodologías. Estas van desde las basadas en experimentos a las basadas en modelos matemáticos.

Modelos experimentales

En los estudios de tipo *experimental* se realizan diversos ensayos de laboratorio para definir la relación de la calidad del producto seco con las propiedades de la materia prima (líquido), las condiciones del proceso o características del equipo. Chegini y Ghobadian [11] en su trabajo estudian varios modelos empíricos que relacionan las propiedades del polvo de jugo de naranja y los parámetros de operación del secador por aspersión. Estos autores verifican experimentalmente los efectos de las condiciones del proceso (flujo de la materia prima, velocidad del atomizador y la temperatura del aire de entrada) sobre las propiedades físicas del polvo de jugo de naranja (densidad, tamaño de partículas, contenido de humedad residual, sólidos insolubles y tiempo promedio de rehidratación).

Por otro lado, Sarabadi et al. [92] describen que al incrementar la temperatura del aire se reduce el contenido de humedad, la actividad de agua y la densidad a granel. Así mismo, que la humedad y actividad del agua se afectan de forma significativa por la concentración

de maltodextrina. En general, concluye que aumentando la temperatura del aire de entrada y la concentración de maltodextrina se reduce la pegajosidad aumentando el rendimiento de producción.

Otros estudios experimentales que relacionan la calidad del producto con las condiciones del proceso se presentan en las Tablas **2-1** y **2-2**. Se encuentra en general que este tipo de análisis requieren una gran cantidad de experimentos, como Souza et al. [98] que realizan hasta 33 experimentos. Sólo en algunos casos se crean modelos empíricos, como el desarrollado por Chegini y Ghobian [13] a partir de una red neuronal artificial entrenada por un algoritmo de propagación inversa.

Modelos matemáticos

Otros tipos de estudios utilizan *modelos matemáticos* que plantean ecuaciones de balance de masa, energía y momento, según el caso, para describir los fenómenos que se presentan durante el secado por aspersión. Según Langrish [61], estos modelos se pueden aplicar en tres escalas o niveles según el volumen de control analizado:

- Los modelos que toman como *volumen de control* la cámara de secado completa, asumiendo equilibrio térmico y másico entre el producto y el aire al salir del proceso, lo cual no es correcto en algunos casos, además, se desprecian las características geométricas del secador y la forma como accede el aire a la cámara.
- Los modelos que analizan *discos delgados* del fluido que viajan a velocidad constante en dirección axial al secador (“plug-flow”), estos modelos no tienen en cuenta el movimiento radial de las partículas, ni tampoco los cambios de humedad y temperatura en la dirección radial.
- Los últimos, utilizan la estrategia planteada por la *dinámica de fluidos computacional* (CFD), donde se analizan pequeños volúmenes de fluido en el secador y su relación con cada una de las partículas.

La simulación del proceso de secado por aspersión con CFD tiene la ventaja de analizar la historia de secado de la gota hasta que se convierte en partícula seca, es decir, permite estudiar los fenómenos de transferencia de masa y energía de la gota durante su recorrido desde el atomizador hasta la salida de la cámara de secado. Lo anterior permite analizar los efectos del cambio del flujo de aire en el comportamiento de las gotas y luego partículas: su tiempo de residencia, zonas de aglomeración en el secador, recirculación de partículas, entre otros fenómenos. Por lo tanto, se utiliza en el presente trabajo para modelar el efecto del flujo de aire en la calidad del producto seco.

A continuación se presentan las principales características del CFD y cómo se aplican a la simulación del proceso de secado por aspersión.

Dinámica de fluidos computacional - CFD

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una técnica bien desarrollada gracias a la potencia actual de los equipos de cómputo, los modelos y las herramientas de simulación disponibles. Gracias a esto, Huang et al. [45] utilizan las técnicas numéricas de CFD para analizar el comportamiento del aire con diferentes geometrías de la cámara del secador por aspersión; de la misma forma, Langrish et al. [63] aplican el CFD para analizar el efecto del ángulo con que entra el aire a la cámara de secado. Por otro lado, Kieviet [58] analiza en su tesis doctoral la calidad del producto seco en función de las condiciones del proceso, simulando con CFD el comportamiento de las gotas hasta convertirse en partículas secas.

Oakley [79] describe los principales pasos para realizar la modelación del secador por aspersión utilizando CFD:

1. Se construye una grilla bi- o tri-dimensional que discretice la geometría del aire en el interior de la cámara del secador.
2. Se calcula el flujo de aire en la cámara resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes para cada celda de la malla bi- o tri-dimensional. Estas ecuaciones se obtienen al considerar los balances de masa, momento y energía en un elemento del fluido, resultando en un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales. Adicionalmente, se tienen en cuenta los efectos debidos a un número de Reynolds (Re) elevado, que generan fluctuaciones en los campos de velocidad y presión, los cuales cambian demasiado rápido.
3. Una vez se resuelve el campo de velocidad, se puede calcular la trayectoria de la partícula resolviendo la ecuación de movimiento o segunda ley de Newton. Se pueden tener en cuenta diversas fuerzas (sustentación, Arquímedes, masa virtual, Basset, electrostáticas) pero las más relevantes son el arrastre y la gravedad. Las trayectorias de las partículas pueden ser calculadas usando el promedio de las condiciones del gas; o un modelo estadístico que tenga en cuenta la influencia de las fluctuaciones turbulentas sobre la partícula. La segunda es más realista pero incrementa significativamente el tiempo de cálculo computacional.
4. En paralelo al paso 3, y usando el *modelo de secado* seleccionado, se calcula la transferencia de masa y energía desde las gotas y partículas, así como la velocidad de secado.
5. Las gotas y las partícula tienen un efecto acoplado sobre la velocidad, temperatura y humedad del campo de gas. Estos se tienen en cuenta para ser agregados a las ecuaciones del paso 2. Los pasos 2, 3, 4 y 5 se repiten hasta alcanzar una solución numérica que satisfaga el criterio de convergencia inicialmente especificado.

El diagrama de la Figura 2-4 representa la integración de las ecuaciones del aire y de las gotas en el modelo tipo CFD. Las ecuaciones de momento (velocidad y presión) incluyen el modelo de *turbulencia* que describe su comportamiento de naturaleza caótica. Las ecuaciones

de balance de masa para las gotas incluyen el modelo de secado.

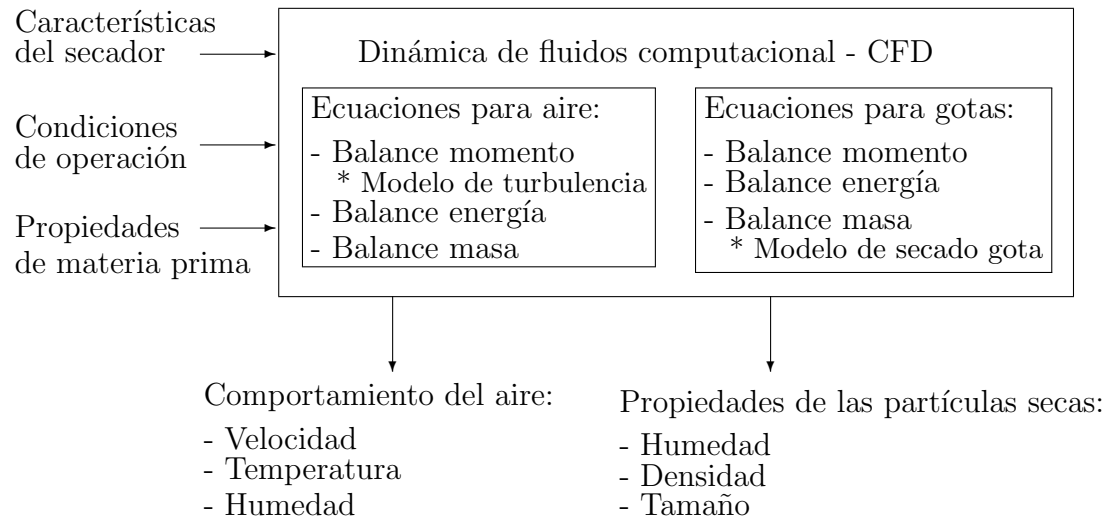


Figura 2-4.: Entradas y salidas del modelo CFD (que incluye el modelo de secado de gota y de turbulencia) utilizado para simular el secado por aspersión.

2.3.1. Programas CFD utilizados y métodos experimentales de comparación

La Tabla 2-4 presenta un resumen de la revisión bibliográfica realizada, que analizan el comportamiento del aire y las partículas en el secador por aspersión. En esta tabla se incluye el programa utilizado, el modelo de turbulencia, si la simulación se realiza en 2 o 3 dimensiones, y por último, si en el artículo se presenta validación experimental de los resultados.

Tabla 2-4.: Algunas simulaciones de secadores por aspersión utilizando CFD. Se presenta el autor, el año de la publicación, software usado y dimensión de la simulación (Dim), modelo de turbulencia, solución o mezcla atomizada, si se realiza validación y por último las variables del proceso descrito. (NR : No reporta, H:altura total del secador, D:diámetro del secador, u_g : velocidad del aire de entrada, T_g : temperatura de aire de entrada, \dot{V}_g : flujo de aire de entrada.)

Autor, año	Descripción del equipo	Programa Dim	Modelo de turbulencia	Solución atomizada	Validación	Variables del proceso
Zbicinski [118], 1995	H:1,69 m x D:0,93 m Co-corriente Atomizador boquilla	CFX 2D	$k - \epsilon$ estándar	Clorhidrato de sodio	Compara con Langrish y Kockel [64]	u_g : 0,6 - 2,4 m/s T_g : 353 - 403 K
Kieviet [58], 1997	H:3,70 m x D:2,20 m Co-corriente Atomizador boquilla	CFX 3D	$k - \epsilon$ estándar	Agua y maltodextrina	Experimental anemómetro de hilo caliente	\dot{V}_g : 1515 m ³ /h T_g : 468 K
Southwell et al. [97], 1999	H:3,12 m x D:0,30 m Co-corriente Atomizador boquilla	CFX 2D	$k - \epsilon$ estándar	Agua	Compara con Zbicinski et al. [119]	u_g : 0,6 - 2,4 m/s T_g : 353 - 373 K
Straatsma et al. [100], 1999	H:17 m x D:10 m Co-corriente Atomizador disco	DrySim 2D	$k - \epsilon$ estándar	Leche	No realiza	\dot{m}_g :63 y 108 kg/h T_g : 458 K
Harvie et al. [37], 2001	H:4,26 m x D:1,21 m Contra-corriente No atomización	CFX 3D	VLES	No realiza	Compara con Sharma [94]	\dot{V}_g : 1700 m ³ /h T_g ambiente
Lebarbier et al. [65], 2001	H:0,59 m x D:0,29 m Co-corriente No atomización	CFX 2D	$k - \epsilon$ estándar	No realiza	Partículas de polietileno	\dot{V}_w : 14 m ³ /h T_w ambiente
Harvie et al. [38], 2002	H:7,00 m x D:2,16 m Co-corriente Atomizador de disco	CFX 3D	$k - \epsilon$ estándar	Leche	Compara con Bloore [9]	\dot{V}_g : 0,097 m ³ /h T_g : 483 K

Continúa en la página siguiente

Autor, año	Descripción del equipo	Programa / Dim	Modelo de turbulencia	Solución atomizada	Validación	Variables del proceso
Guo et al.[35], 2003	No especificado No atomización	CFX 3D	TRANS $k - \epsilon$	No realiza	Compara con Usui et al. [104]	$u_g : 7,55$ m/s T_g ambiente
Huang et al. [44], 2003	H:3,70 m x D:2,20 m Co-corriente Atomizador boquilla	Fluent 2D	$k - \epsilon$ estándar	Agua	Compara con Kieviet [58]	$u_g : 7,36 - 9,07$ m/s $T_g : 468$ K
Huang et al. [45], 2003	H:1,69 m x D:0,93 m Co-corriente Atomizador boquilla	Fluent 2D	$k - \epsilon$ estándar	Líquido acuoso	Compara con Langrish y Zbicinski [64]	$\dot{m}_g : 0,047$ kg/s $T_g : 518$ K
Bayly et al. [8], 2004	H:5,28 m x D:1,21 m Contra-corriente No atomización	Fluent 2D	$k - \epsilon$ estándar	No realiza	Anemometría Laser Doppler	$\dot{V}_g : 3814$ m ³ /h T_g ambiente
Goula y Adamopoulos [32], 2004	H:0,47 m x D:0,10 m Co-corriente Atomizador boquilla	Fluent 2D	$k - \epsilon$ estándar	Pulpa de tomate	Temp. de aire Sólidos acumulados	$\dot{V}_g : 17,50$ y $22,75$ m ³ /h $T_g : 403$ K
Langrish et al [63], 2004	H:1,60 m x D:0,80 m Co-corriente No atomización	CFX 3D	RSM - SST	No realiza	Compara con Southwell y Langrish [96]	$\dot{m}_g : 125$ kg/h T_g ambiente
Huang et al. [46], 2004	H:1,60 m x D:1,00 m Co-corriente Disco rotatorio	Fluent 3D	Estándar, RNG, realizable $k - \epsilon$ y RSM	Sacarosa con maltodextrina	Temp. aire con termocupla tipo T	$\dot{m}_g : 0,336$ kg/s $T_g : 468$ K
Huang et al.[43], 2005	H:1,60 m x D:1,00 m Co-corriente Disco rotatorio	Fluent 3D	RNG $k - \epsilon$	Leche	No se realiza	$\dot{m}_g : 0,041$ kg/s $T_g : 453$ K
Lo [69], 2005	H:14 m x D:9,50 m Co-corriente Disco rotatorio	DrySim 3D	No reporta	Leche	No se realiza	$\dot{m}_g : 53000 - 65000$ kg/h $T_g : 458$ K

Continúa en la página siguiente

Autor, año	Descripción del equipo	Programa / Dim	Modelo de turbulencia	Solución atomizada	Validación	Variables del proceso
Li y Zbicinski [66], 2005	H:6 m x D:0,50 m Co-corriente Atomizador boquilla	Fluent 2D	$k - \epsilon$ estándar	Levadura	Compara con Zbicinski y Piatkowski [120]	$u_g : 1,50$ m/s $T_g : 448$ K
Zbicinski et al. [121], 2006	H:6 m x D:0,50 m Co-corriente Atomizador boquilla	Fluent NR	No Reporta	Maltodextrina	Compara con Zbicinski y Piatkowski [120]	$u_g : 0,2 - 1,0$ m/s $T_g : 373 - 773$ K
Huang et al. [48], 2006	H:1,00 m x L : 2,90 m Co-corriente Atomizador boquilla	NR 2D	$k - \epsilon$ estándar	Líquido acuoso	No se realiza	$\dot{m}_g : 0,3$ kg/s $T_g : 523$ K
Huang et al. [40], 2006	H:3,7 m x D:2,2 m Co-corriente Atomizador boquilla	Fluent 3D	RNG $k - \epsilon$	Maltodextrina	Compara con Kieviet [58]	$\dot{m}_g : 3,5 - 5,5$ kg/s $T_g : 523$ K
Huang y Mujumdar [49], 2007	H:22,3 m x D:5,0 m Co-corriente Atomizador boquilla	Fluent 3D	$k - \epsilon$ estándar	No específica	Temperatura y velocidad aire salida	$\dot{m}_g : 3,5 - 5,5$ kg/s $T_g : 523$ K
Huang y Mujumdar [41], 2007	H:3,70 m x D:2,20 m Co-corriente Atomizador boquilla	Fluent 2D	$k - \epsilon$ estándar	Agua	Compara con Kieviet [58]	$u_g : 9,07$ m/s $T_g : 323$ K
Woo et al. [110], 2008	H:3,70 m x D:2,20 m Co-corriente Atomizador boquilla	Fluent 2D	RNG $k - \epsilon$	Sacarosa con maltodextrina	Compara con Harvie et al. [38]	$\dot{m}_g : 0,0268$ kg/s $T_g : 393 - 423$ K
Mezhericher et al. [71], 2008	H:3,70 m x D:2,20 m Co-corriente Atomizador boquilla	Fluent 2D	$k - \epsilon$ estándar	Agua	Compara con Huang et al. [40]	$u_g : 7,36 - 9,08$ m/s $T_g : 468$ K

Continúa en la página siguiente

Autor, año	Descripción del equipo	Programa / Dim	Modelo de turbulencia	Solución atomizada	Validación	Variables del proceso
Mezhericher et al. [72], 2009	H:3,70 m x D:2,20 m Co-corriente Atomizador boquilla	Fluent 3D	$k - \epsilon$ estándar	Agua	Compara con Kieviet [58]	u_g : 7,36 - 9,08 m/s T_g : 468 K
Roustapour et al. [88], 2009	H:1,84 m x D:1,25 m Co-corriente Atomizador rotatorio	Fluent 2D	$k - \epsilon$ estándar	Jugo de limón	Cintas	\dot{m}_g : 0,00189 - 0,0037 kg/s T_g : 408 K
Jim y Chen [52], 2009	H:14,0 m x D:5,6 m Co-corriente Atomizador boquilla	Fluent 2D	$k - \epsilon$	Leche	Temp. de aire y humedad y producto en salida	\dot{m}_g : 70634 kg/h T_g : 488 K
Jim y Chen [53], 2009	H:15,0 m x D:8,0 m Co-corriente Atomizador rotatorio	Fluent 3D	$k - \epsilon$	Leche	No se realiza	\dot{V}_g : 1650 m ³ /min T_g : 483 K
Fletcher y Langrish [23], 2009	H:1,60 x D:0,80 m Co-corriente No atomización	CFX 3D	SAS y $k - \omega$ SST	No realiza	Compara con Southwell y Langrish [95]	u_g : 8 m/s T_g ambiente
Jim y Chen [54], 2010	H:15,0 m x D:8,0 m Co-corriente Atomizador rotatorio	Fluent 3D	$k - \epsilon$ estándar	Leche	Compara con Chen et al. [14]	u_g : 1,65 m/s T_g : 483 K
Mezhericher et al. [73], 2010	H:3,70 m x D:2,20 m Co-corriente Atomizador boquilla	Fluent 2D	$k - \epsilon$ estándar	Suspensión de sflice	Compara con Mezhericher et al. [72]	u_g : 9,08 m/s T_g : 468 K
Ullum et al. [103], 2010	H:4,0 m x 2,6 m Co-corriente Atomizador boquilla	Fluent 3D	$k - \epsilon$ estándar	Maltodextrina	No se realiza	\dot{m}_g : 1900 kg/h T_g : 483 K
Anandhara-makrishnan et al. [5], 2010	H:3,70 m x D:2,20 m Co-corriente Atomizador boquilla	Fluent 3D	$k - \epsilon$ estándar	Maltodextrina	Compara con Kieviet [58]	\dot{m}_g : 0,336 - 0,063 kg/s T_g : 444 - 468 K

Continúa en la página siguiente

Autor, año	Descripción del equipo	Programa / Dim	Modelo de turbulencia	Solución atomizada	Validación	Variables del proceso
Gabites et al. [26], 2010	H:22 m x 18 m Co-corriente Atomizador boquilla	CFX 3D	SST	No realiza	Cintas políester y video cámara	u_g : 17,5 m/s T_g ambiente
Gianfrancesco et al. [31], 2010	H:1,20 m x D:0,80 m Co-corriente Atomizador rotatorio	Fluent 2D	RANS $k - \epsilon$	Maltodextrina	Compara con Gianfrancesco [30]	\dot{m}_g : 110 kg/h T_g : 402 - 451 K
Woo et al. [116], 2011	H:3,30 m x D:0.60 m Co-corriente Mono atomizador	Fluent 2D	$k - \epsilon$ realizable	Lactosa	Compara con Woo et al. [115]	\dot{m}_g :0,002478 kg/s T_g : 372 - 453 K
Jim y Chen [55], 2011	H:15 m x D:8 m Co-corriente Atomizador rotatorio	Fluent 3D	RNG $k - \epsilon$	Leche	Compara con Jin y Chen [54]	\dot{m}_g : 40 kg/s T_g : 483 K
Wawrzyniak et al. [108], 2011	H:37 m x D:6 m Contra-corriente Atomizador boquilla	NR 3D	RSM	Líquido acuoso	Termo anemómetro	\dot{V}_g : 17,67 m ³ /s T_g : 361 K
Salem et al. [91], 2011	H:3,70 m x D:2,20 m Co-corriente Atomizador boquilla	Fluent 2D	RNG $k - \epsilon$	Solución salina	Compara con Kieviet [58]	u_g : 6 - 25 m/s T_g : 468 - 508 K
Woo et al. [113], 2012	H:1,30 m x D:1,00 m Co-corriente Atomizador rotatorio	Fluent 3D	RNG $k - \epsilon$	Sacarosa con maltodextrina	Hilos algodón Anemómetro de hilo	\dot{m}_g : 0,0238 kg/s T_g : 393 K

(Fin de la tabla)

El análisis de los antecedentes indica que Fluent ha sido el programa más utilizado para simular el proceso de secado por aspersión y que la mayoría de las simulaciones en los últimos años se han desarrollado en 3 dimensiones. Esto debido a las componentes tangenciales del aire que se generan por el difusor que se encuentra en la parte superior del secador, los cuales producen flujos que giran alrededor del eje del secador. Estos flujos son difíciles de simular en representaciones axisimétricas según Fletcher et al. [22], Southwell y Langrish [95], y Woo et al. [114].

Para la validación experimental de las simulaciones se han aplicado diferentes métodos con el fin de definir el comportamiento del aire y de las partículas en el secador. A continuación se describen algunos de estos experimentos y los dispositivos utilizados:

- Con un anemómetro de hilo caliente, Kieviet [58] y Woo et al. [113], analizan la velocidad del aire en diferentes ubicaciones en la cámara.
- Southwell y Langrish [96], Bayly et al. [8], y Zbicinski y Piatkowski [120] utilizan un velocímetro láser doppler (LVD) para medir la velocidad de las partículas en posiciones definidas.
- Roustapour et al. [88] atrapan muestras de partículas en el secador por medio de una placa rectangular galvanizada de 15 cm x 10 cm. Esto con el fin de definir la humedad de las partículas en diferentes posiciones del secador.
- Gianfrancesco et al. [30] instalan en el secador 12 termopares y 12 higrómetros, con el fin de determinar la temperatura y la humedad del aire en la cámara.
- Southwell y Langrish [95], Woo et al. [113], y Roustapour et al. [88] observan los patrones de flujo del aire a partir de la instalación de cintas de diferentes materiales que se mueven en la dirección del flujo.

2.3.2. Modelos de turbulencia para el aire en secado por aspersión

En el método de CFD las ecuaciones que describen el movimiento del fluido y la transferencia de energía pueden ser consideradas como una formulación matemática de las leyes de conservación aplicadas al fluido (conservación de masa, energía y momento). Esta formulación se trata de un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que describen el comportamiento de un fluido y que se les denomina las ecuaciones de *Navier-Stokes* [78].

En el comportamiento turbulento del aire en la cámara de secado, ocurren fluctuaciones alrededor de la velocidad media del fluido, lo que causa así mismo fluctuaciones en la energía y el momento. Estas fluctuaciones se pueden presentar desde escalas pequeñas y altas frecuencias que para ser simuladas requieren altos recursos computacionales. Por lo tanto, las ecuaciones son manipuladas para remover la solución de las pequeñas escalas de las fluctuaciones,

generando un conjunto de ecuaciones que son menos costosas de solucionar desde el punto de vista computacional. Sin embargo, al modificar las ecuaciones se agregan variables desconocidas que los modelos de turbulencia necesitan determinar en términos de las cantidades conocidas.

Por lo general se pueden usar dos métodos alternativos para permitir que las ecuaciones de Navier-Stokes incluyan las fluctuaciones turbulentas sin necesidad de ser simuladas directamente: por promedios o por filtrado. Ambos métodos introducen en las ecuaciones términos adicionales que tienen que ser modelados con el propósito de definir su valor.

El modelo **LES** (*Large Eddy Simulation*) presenta un enfoque en el que las turbulencias de mayor escala son modeladas explícitamente usando un filtro en las ecuaciones de Navier-Stokes. La ventaja del modelo LES es que al modelar un menor número de turbulencias (y resolviendo más) se reduce el error introducido por el modelo de turbulencia. El filtro es esencialmente una manipulación matemática para remover los remolinos que son más pequeños que el tamaño del filtro, el cual usualmente se toma como el tamaño de la malla discreta. Este modelo requiere altas prestaciones computacionales pues calcula la energía contenida en los remolinos turbulentos tanto en el dominio del espacio como del tiempo, lo cual es más exigente en las zonas cercanas a las paredes del secador donde las escalas a resolver son más pequeñas.

En los modelos **RANS** (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) se promedian las fluctuaciones del flujo en todo el rango de escalas. Este tipo de modelos reducen significativamente la necesidad de recursos computacionales y son muy adoptados para aplicaciones prácticas de ingeniería. Los modelos tipo RANS más utilizados son el $k - \epsilon$ y sus variantes, el $k - \omega$ y sus variantes y el RSM (Reynolds Stress Model).

Los modelos tipo RANS $k - \epsilon$ han sido utilizados en la simulación del secado por aspersión obteniendo buenos resultados [5, 8, 31, 37, 53, 66]. Asimismo, no requieren altas prestaciones de computo para arrojar resultados adecuados. Por lo tanto, en este trabajo se utiliza un modelo de turbulencia tipo RANS $k - \epsilon$ para la simulación del comportamiento del aire en la cámara del secador de planta piloto.

2.3.3. Modelo de inyección de partículas

La inyección de gotas es una de las condiciones del proceso más complejas de modelar. Pero al mismo tiempo, es indispensable definir el tamaño y la distribución inicial de las gotas en el modelo CFD. El tamaño de la gota al salir del atomizador depende de fenómenos hidrodinámicos aleatorios, y por lo tanto es más sencillo definir una distribución estadística indicando el diámetro medio y la función de distribución de tamaños. La distribución de Rosin Rammler es la más utilizada para definir el tamaño de las gotas en el atomizador de los secadores por aspersión.

La distribución de Rosin-Rammler [106] se basa en la ecuación

$$Y = 1 - \exp(-d/d_c)^n, \quad (2-1)$$

donde Y es la fracción acumulada menor al diámetro d , n es una constante que define la uniformidad del material y d_c es el diámetro característico, definido como el diámetro en el que 63,2% ($1 - 1/e = 0,632$) de las partículas son más pequeñas. La constante de uniformidad n es la pendiente de la línea $\ln[1/(1 - Y)]$ contra d en coordenadas log-log, que se puede obtener de la relación

$$\log \left[\ln \left(\frac{1}{1 - Y} \right) \right] = n[\log(d) - \log(d_c)]. \quad (2-2)$$

El valor d_c también se puede calcular definiendo el valor d donde $\ln[1/(1 - Y)] = 1$.

Específicamente, el tamaño de las partículas depende de las propiedades físicas tanto del líquido atomizado como del aire de secado, principalmente la densidad, viscosidad, tensión interfacial y flujo de aire y líquido. Además de las condiciones particulares del atomizador: velocidad, número de salidas, tamaño y forma de las paletas y diámetro del atomizador [76].

Huang y Mujumdar [42] analizan el efecto de la velocidad del atomizador en el tamaño inicial de las gotas. En este estudio se calcula el diámetro medio de Sauter utilizando la relación [57]

$$d_c = \frac{1,4x10^4(\dot{m})^{0,24}}{(w_D d_D)^{0,83}(nb)^{0,12}}, \quad (2-3)$$

donde \dot{m} es el flujo másico de líquido, w_D la velocidad angular del disco, d_D diámetro del disco, n la cantidad de agujeros del atomizador y b la altura de las paletas. Aún así, los mismos autores afirman que todavía son inciertas las predicciones realizadas en el proceso de aspersión, a pesar de los intensos estudios en los mecanismos de atomización.

Para Kieviet [58] la distribución de tamaños de las gotas es uno de los parámetros más difíciles de modelar. Por eso sugiere recolectar algunas gotas en un líquido en el que las gotas son inmiscibles, para luego medir su tamaño con un microscopio. De esta forma utiliza aceite de silicona para atrapar gotas de un atomizador de boquilla, medir el tamaño con un microscopio y una cámara digital, y así definir la distribución de Rosin Rammler. El procedimiento lo realiza tanto con agua como con maltodextrina, y los parámetros obtenidos los utiliza para simular el comportamiento del secador utilizando CFD.

Otras simulaciones por CFD del proceso de secado por aspersión han utilizado los parámetros de Rosin Rammler definidos experimentalmente por Kieviet [58]. Por ejemplo, Huang et al. [40] presentan un estudio comparativo de un secador por aspersión con disco rotatorio y boquilla, utilizando los parámetros de Kieviet. Otros autores que han utilizado los parámetros de Kieviet para definir la distribución inicial de tamaños en la simulación por CFD son

Huang et al. [46], Huang y Mujumdar [41, 48], Mezhericher et al. [75], Salem et al. [91] y Anandharamakrishna et al. [5], entre otros.

Por otro lado, Woo et al. [110], quienes realizan la evaluación de modelos de secado de gotas en un secador por aspersión, utilizan la distribución de Rosin Rammler a partir de la medición experimental de las partículas que quedan pegadas en las paredes del secador [111]. Woo et al. [110] describen el procedimiento para calcular el tamaño inicial de las gotas a partir del tamaño final de las partículas, suponiendo que no hay cambio en la densidad del producto atomizado. De forma similar, Roustapour et al. [88] simulan el secado de jugo de lima tomando la distribución experimental obtenida en una planta piloto [89]. Y por último, la simulación tridimensional realizada por Jin y Chen [53] utiliza la distribución de tamaños experimental de un secador industrial, al que aplican un factor de encogimiento fijo de 0,73 [67].

En este estudio se decide realizar un análisis experimental para definir las condiciones de la distribución de Rosin Rammler. De forma similar a los procedimientos realizados por Kieviet [58], Woo et al. [110], Jin y Chen [53] y Roustapour et al. [88]. Esto debido a que no se identificaron modelos confiables que permitieran definir la distribución inicial de las gotas. Pues la ecuación 2-3 no incluye condiciones particulares del líquido atomizado o el aire de secado. Además, el fabricante del atomizador no ofrece información técnica de desempeño, así como no es posible identificar el diseño particular del atomizador, la forma y geometría específica de las paletas.

2.3.4. Modelos de secado de gota

Con el fin de garantizar la adecuada simulación del comportamiento de la materia prima en el secador es necesario contar con un modelo apropiado que describa el comportamiento de secado de cada gota que luego se convierte en partícula [22, 74]. Este modelo de secado de gota se incluye en el modelo completo del secador, y de esta forma simular el proceso. Se debe tener en cuenta que en el secador se encuentran miles de gotas y para cada una se calcula su comportamiento por el modelo de secado. Por lo tanto, es recomendable utilizar un modelo de bajo costo computacional y que no sobrecargue la simulación.

La dinámica de secado de las gotas que contienen sólidos usualmente se divide en tres etapas como se muestra en la Figura 2-5. En la primera etapa, cuando la gota con exceso de líquido es sometida al flujo de gas de secado, esta aumenta su calor sensible y comienza la evaporación sobre la superficie. Esta evaporación del líquido genera una reducción del diámetro de la partícula mientras se incrementa la concentración de sólidos cerca a la superficie de la gota. Esto lleva a la precipitación de una fracción de los sólidos en la superficie, y por lo tanto, se cubre con una capa de componente sólido llamado *corteza*.

En este momento, la gota se convierte en una partícula húmeda y así comienza la segunda

etapa de secado. El proceso se ve obstaculizado por la resistencia para la transferencia de masa que genera la corteza. El secado continua hasta que la humedad de la partícula alcanza la humedad de equilibrio con el medio de secado. Después de esto, en la tercera etapa el proceso de secado termina y la partícula sigue aumentando la temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico.

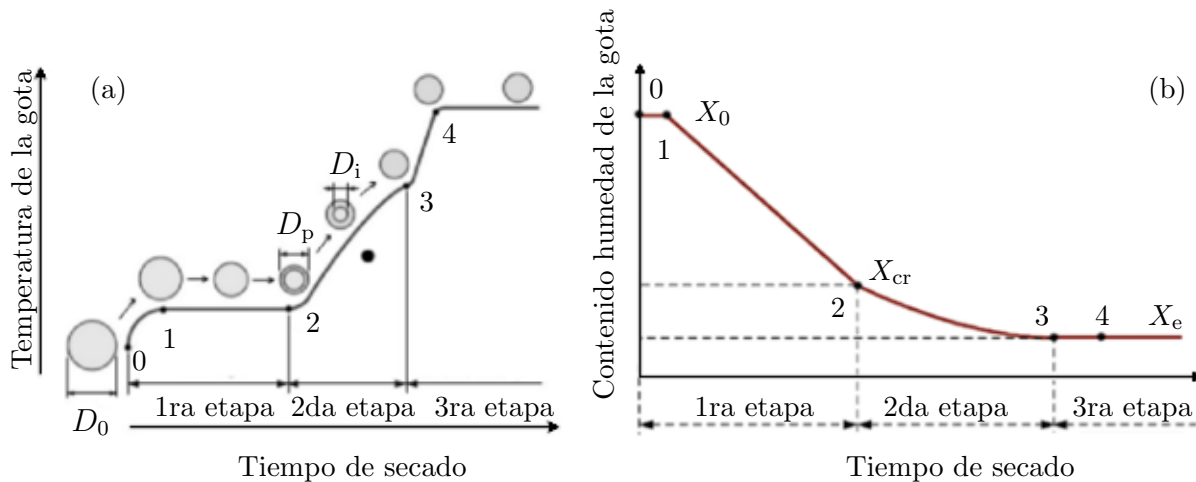


Figura 2-5.: Evolución típica de la temperatura (a) y humedad (b) en el secado de una gota [74, 75]. D_0 diámetro inicial de la gota, D_p diámetro exterior de la corteza, D_i diámetro interno de la corteza, humedad inicial X_0 , de equilibrio X_e y crítica X_{cr} .

En la literatura se han propuesto diversos modelos de secado de las gotas individuales [109]. Además de los modelos empíricos, los modelos de secado generalmente se pueden dividir en dos grupos: los *modelos de difusión* y los *modelos de parámetros concentrados*.

Modelos de difusión: tienen en cuenta en detalle los fenómenos que se presentan durante el secado de la gota que se convierte en partícula. Este modelo describe el proceso usando ecuaciones de continuidad, momento, energía y conservación de especies. La solución de este conjunto de ecuaciones es complicado por la presencia de un dominio que va cambiando, debido a la reducción del diámetro de la gota en la primera etapa del secado. Así mismo, el cambio en la interfaz corteza-líquido en la segunda etapa. Como resultado, la simulación del proceso de secado demanda en la actualidad altos recursos computacionales y tiempos significativos [74].

Modelos de parámetros concentrados: consideran la totalidad de los parámetros de la gota, sin tener en cuenta el gradiente de difusión. Estos modelos requieren resolver ecuaciones algebraicas, resultando en un menor esfuerzo computacional, deseado para los modelos de CFD. A continuación se describen los modelos de parámetros concentrados más utilizados.

- *Curva característica de secado* - CDC (Characteristic Drying Curve): en este modelo, la primera etapa de secado se simplifica por la analogía con la evaporación de una gota de líquido puro. Para el periodo de velocidad decreciente de secado, esta se determina con la velocidad de secado al final de la primera etapa multiplicada por una función que depende del contenido de humedad real, humedad crítica y humedad de equilibrio. La función se ajusta a partir de la curva de secado obtenida por experimentos [25], así mismo el valor de la humedad crítica [75].
- *Enfoque de ingeniería de reacción* - REA (Reaction Engineering Approach): este modelo se ha desarrollado en los últimos años y ha permitido obtener una buena coincidencia con datos experimentales, cálculos rápidos y una menor demanda de recursos computacionales respecto a los demás métodos. Sin embargo, la aplicación de REA para modelar la dinámica de secado de la gota está limitada a los materiales que hasta el momento han sido estudiados experimentalmente. La razón es que el enfoque REA utiliza una correlación empírica entre la densidad parcial de vapor sobre la superficie y el contenido medio de humedad de la gota. Esta correlación empírica puede ser determinada experimentalmente para cada material cuyo comportamiento de secado se modela con diferentes contenidos de humedad. Los modelos tipo REA y su aplicación en combinación con modelos analíticos de dinámica de secado son promisorias debido a su simplicidad y alta precisión para diferentes condiciones de secado.

Los modelos de secado de parámetros concentrados (CDC y REA) se basan en datos experimentales obtenidos del mismo líquido durante su secado. Según el objetivo particular del experimento, se estudia la evaporación del líquido de una gota bajo condiciones controladas y se registran diferentes parámetros de interés. Los principales métodos para analizar el secado de gotas individuales son la *levitación* y la *caída libre*. La levitación puede clasificarse en invasiva y no invasiva. La levitación invasiva implica la suspensión de la gota, ya sea en la punta de un filamento de vidrio o un termopar, mientras que la levitación no invasiva emplea diversas fuerzas físicas para que la gota levite libremente. Las técnicas más usadas han sido la levitación acústica, electromagnética, electrostática y aerodinámica. La técnica de *caída libre* se ha empleado para estudiar una gota individual o una corriente discreta de gotas en caída libre [3, 24].

De las anteriores técnicas, el secador de *filamento de cristal* ha sido el más utilizado para definir las características del secado de gotas individuales [68, 2, 107]. Nan Fu et al. [24] utilizan el secador de filamento de cristal (glass filament) para secar gotas de una solución de lactosa y aplicar la metodología REA. En la Figura 2-6 se muestra un esquema del secador utilizado por este grupo.

En este secador el aire comprimido primero se filtra y se le retira la humedad. El aire luego pasa por una válvula y un flujómetro para obtener un control preciso de velocidad. El aire seco se calienta por medio de una serie de resistencias eléctricas para luego pasar por una

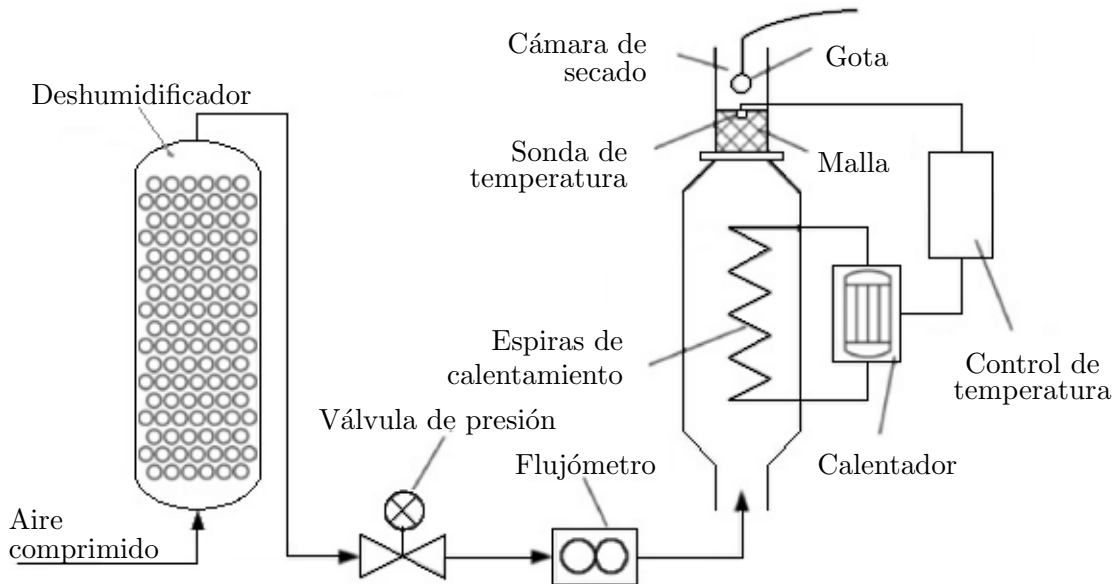


Figura 2-6.: Figura esquemática del equipo utilizado para realizar el experimento de filamento de cristal [24].

serie de mallas de acero ubicadas en la entrada de la cámara de secado, con el fin de obtener un flujo de aire laminar uniformemente distribuido.

Por último, el aire pasa a secar una gota que se sostiene por medio de un *filamento de cristal* que se construye de diámetros muy pequeños [68] (alrededor de 30 a 70 μm). La porción de la punta del filamento de cristal inmersa dentro de la gota es solo del 0,2 % de su volumen. Se estima que el calor conducido a la gota por el filamento de cristal no excede el 1 % del total del calor aplicado a la gota [10].

Durante cada experimento se mide de forma separada la masa de la gota, el diámetro y la temperatura. El diámetro se estima por medio de una cámara digital que registra la gota que luego se convierte en partícula durante el secado; Adhikari et al. [2] magnifican la imagen de la cámara digital entre 20 y 50 veces, además, la misma cámara permite tomar 30 imágenes por segundo. La temperatura se registra por medio de un termopar de alambres finos que se inserta en la gota. La masa se registra por medio de la flexión calibrada del filamento de cristal [24, 107] o por una microbalanza [2] con una precisión de $\pm 0,01$ mg.

Aunque el método de secado de gota por filamento de vidrio es una técnica apropiada para obtener las curvas de secado individuales, este método presenta algunas restricciones comparado con las condiciones dadas en el proceso de secado por aspersión. En comparación, se utilizan gotas de mayor diámetro que permitan medir su masa y sostenerlas en el filamento, menor velocidad del aire para reducir el efecto de las fluctuaciones turbulentas en las mediciones de temperatura y masa, y tampoco se produce el efecto de rotación libre que se

presenta en el secador por aspersión.

En el desarrollo de este proyecto se utiliza el modelo CDC para analizar el comportamiento de secado de las gotas del jugo, el cual se selecciona ya que es una metodología bien conocida y aplicada con buenos resultados en otros alimentos líquidos. Para obtener los parámetros de este modelo se utiliza el experimento de filamento de cristal con las gotas de jugo.

2.4. Objetivos específicos y descripción del modelo propuesto

Los objetivos específicos definidos para el cumplimiento del objetivo general son los siguientes:

1. Especificar un modelo matemático que describa el comportamiento del aire y las gotas/partículas durante el secado por aspersión de un jugo modelo de guayaba y que afectan la calidad del polvo seco; éstos basados principalmente en los modelos utilizados en la dinámica computacional de fluidos (CFD).
2. Caracterizar las propiedades de la materia prima (jugo modelo de guayaba) y de los productos que son necesarias para el desarrollo de los modelos de simulación por CFD que afectan el proceso de secado y por ende la calidad del producto (humedad, densidad y tamaño de partículas). Definir los parámetros de la curva característica de secado (CDC) para las gotas de jugo de guayaba que son incluidos en la simulación por CFD.
3. Estimar por simulación las condiciones del aire (temperatura, humedad y velocidad del aire) en la cámara y las del producto seco (humedad, densidad y tamaño de partículas) al final de proceso de secado por aspersión del jugo modelo de guayaba bajo diferentes flujos de aire a la entrada del secador, utilizando la técnica de CFD, un modelo de turbulencia RANS y la curva característica de secado (CDC).
4. Especificar las condiciones del aire (temperatura, humedad y velocidad) en la cámara del secador por aspersión de una planta piloto, así mismo la calidad del producto seco al final del proceso (humedad, densidad y tamaño de partículas).
5. Especificar las diferencias entre el comportamiento experimental del secador de planta piloto con los resultados de la simulación por CFD.

El diagrama de la Figura 2-7 presenta el problema asociado a la calidad del jugo secado por aspersión descrito previamente. Los recuadros en el diagrama muestran los elementos que son modificados o utilizados en esta tesis. En la parte izquierda se muestran las características del proceso que afectan la calidad del producto. En esta tesis, para la construcción del modelo se tienen en cuenta todos los parámetros del proceso, pero se analiza el efecto de los cambios

en el tamaño y velocidad de las gotas, así como la temperatura y velocidad del aire. En el centro del diagrama se presentan los métodos utilizados para modelar el proceso, se señala como método de modelación la dinámica de fluidos computacional (CFD). Por último, a la derecha del diagrama se especifica las propiedades medidas que son la humedad, densidad y tamaño de las partículas.

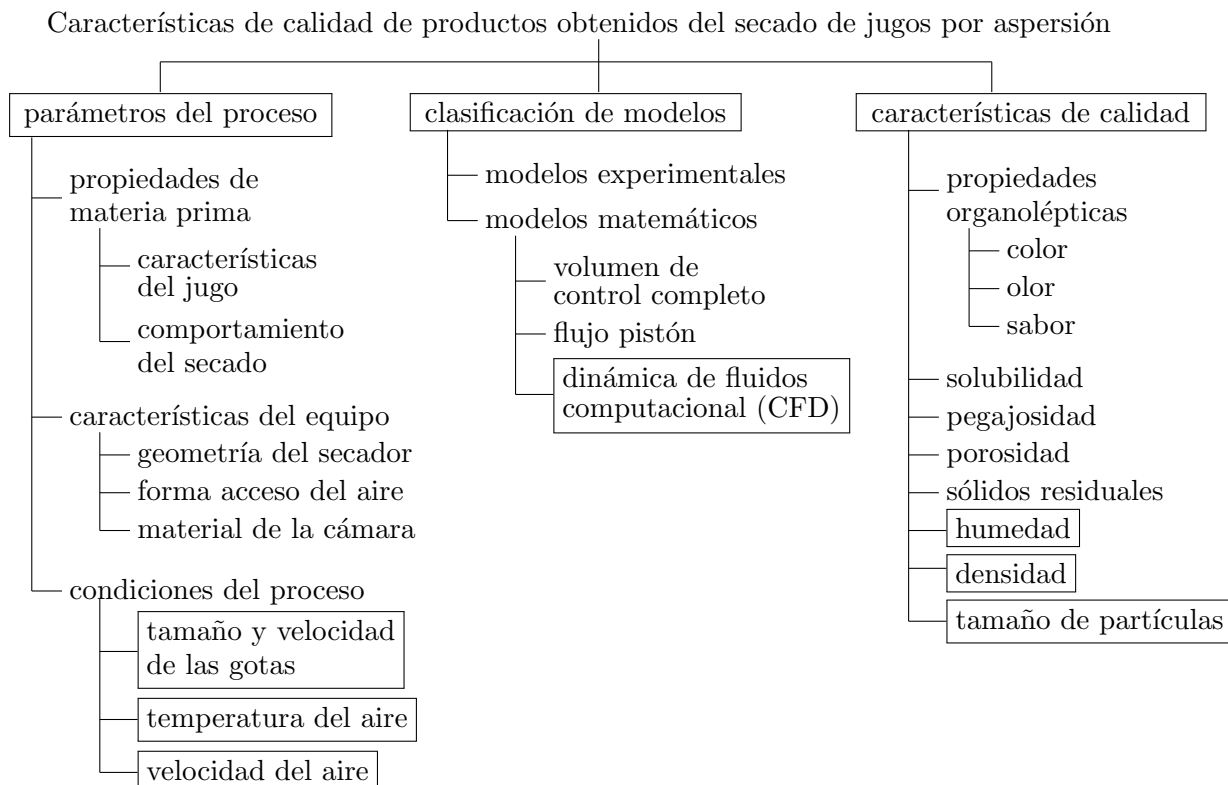


Figura 2-7.: Diagrama del problema de calidad del jugo secado por aspersión, cómo depende de los parámetros del proceso, la clasificación de los modelos y la forma cómo se determina la calidad. El tipo de modelo seleccionado es la dinámica de fluidos computacional (CFD), teniendo en cuenta todas las condiciones del proceso, pero analizando los efectos del tamaño de las partículas, así como temperatura y velocidad del aire. La calidad se define a partir de medición de la humedad, densidad y tamaño de las partículas secas.

La Figura 2-8 presenta el diagrama metodológico para el desarrollo y verificación del modelo matemático discreto utilizado en esta tesis. En la parte izquierda del diagrama se muestran los componentes experimentales del trabajo, en el centro el modelo y simulación, y a la derecha la comparación y análisis. Adicionalmente, en el diagrama se muestra la sección del documento donde se describe en detalle el respectivo componente.

Como resumen metodológico, se plantea la construcción de un modelo que permita relacionar

las propiedades de la materia prima y las condiciones de operación del proceso de secado por aspersión con la calidad del producto seco. El modelo se basa en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) con el que se desarrolla una simulación del aire y las gotas durante el proceso de secado. Las variables de calidad seleccionadas son la humedad, la densidad y el tamaño de las partículas. Las condiciones de operación del proceso seleccionadas para el análisis son la temperatura y la velocidad del aire de ingreso a la cámara de secado, además de la velocidad del atomizador y flujo de materia prima.

Con el propósito de definir el modelo de secado de gota individual para el jugo de fruta seleccionado se diseña y construye un equipo experimental. Se aplica el modelo Curva Característica de Secado (CDC) que luego se integra al modelo de fase discreta en el modelo CFD. La selección del jugo, el diseño y construcción del equipo experimental y el modelo de secado de gota se describen en el capítulo 4.

En la misma fase experimental, se utiliza un anemómetro de hilo caliente y un termohigrómetro para medir la velocidad, temperatura y humedad del aire en diferentes puntos de la cámara del secador bajo diferentes condiciones de operación. También se realizan experimentos para medir las condiciones del producto a la salida del secador. Esto con el fin de verificar los resultados generados por la simulación del aire en el proceso de secado y las propiedades de las partículas a la salida del secador.

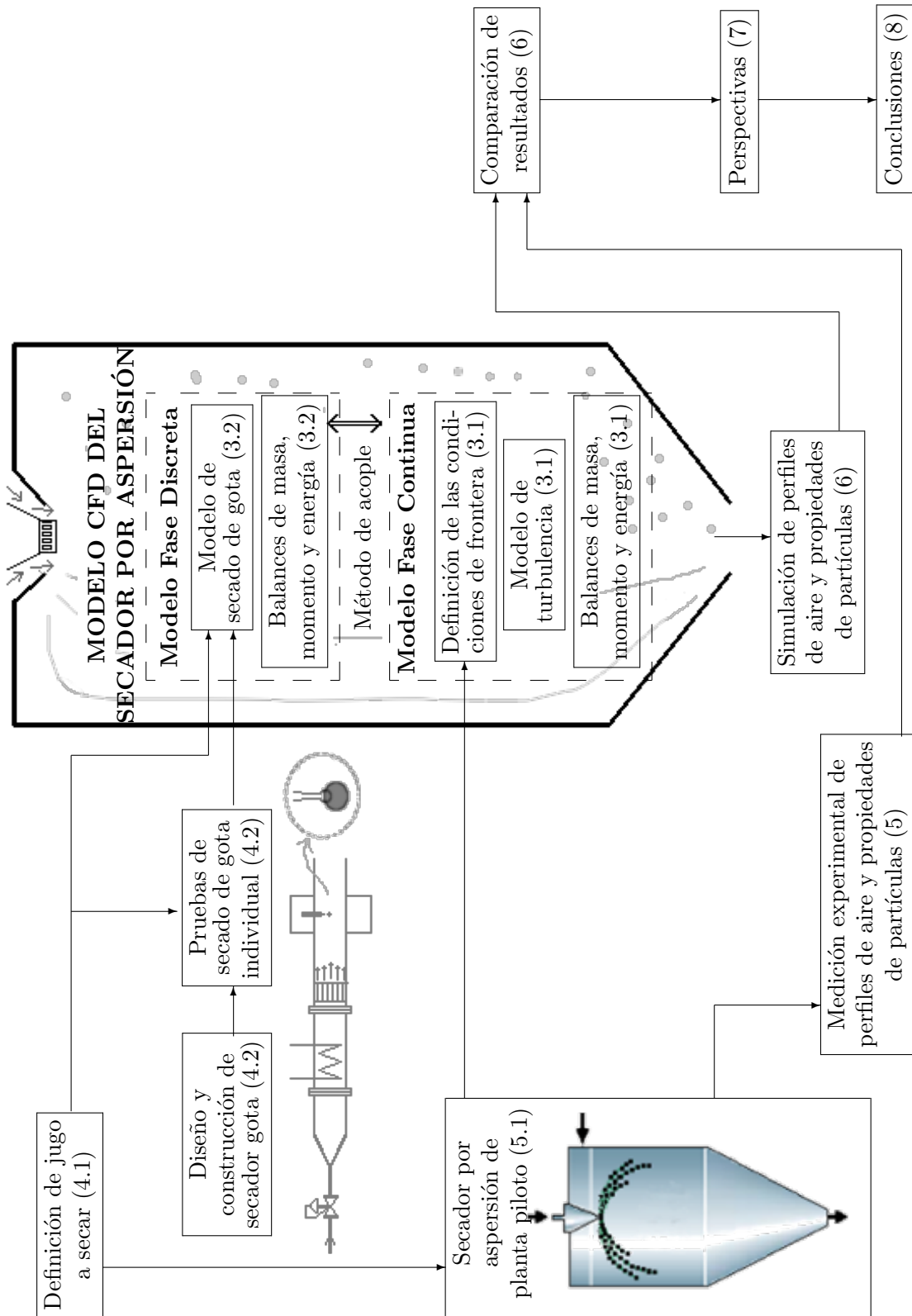


Figura 2-8.: Descripción del proceso metodológico para analizar la calidad del producto a partir del modelo y simulación del secador. Al lado izquierdo de la figura se muestran los elementos experimentales, en el centro los de modelación y simulación y a la derecha los de comparación y análisis. Los números en cada recuadro representan la sección de la tesis donde se describe en detalle el tema respectivo.

3. Modelación del secador por aspersión

En este capítulo se presenta el modelo del secador por aspersión. El modelo se basa en la dinámica de fluidos computacional (CFD) acoplando un modelo de fase continua para el aire y un modelo de fase discreta para las gotas. En la primera parte se presenta el modelo general de CFD y la configuración del mismo. Se describe el modelo de fase continua para el aire, el acople con la fase discreta de las gotas, el modelo de turbulencia utilizado, la inyección de gotas y demás ecuaciones necesarias para construir e implementar el modelo.

A continuación se presentan las principales características del modelo CFD y cómo se aplican a la simulación del proceso de secado por aspersión.

3.1. Descripción del modelo CFD

El desarrollo de un modelo CFD parte de la selección del marco general de análisis que puede ser tipo continuo (Euleriano) o de tipo discreto (Lagrangiano). Cada metodología tiene sus ventajas y desventajas que dependen principalmente del tipo de problema que se desea analizar.

En el caso del secador por aspersión, se puede asumir que las gotas y las partículas están diluidas en el secador, es decir, que el volumen ocupado por las partículas es una fracción muy pequeña del volumen ocupado por el aire en la cámara de secado [49]. Para este tipo de procesos la fracción de partículas en el secador es menor al 5% de su volumen. A partir de esta suposición Fletcher et al. [22] afirman que la mayoría de los secadores por aspersión pueden ser modelados utilizando un enfoque mixto Euleriano/Lagrangiano. Es decir, el fluido se modela computacionalmente como una fase continua (enfoque Euleriano) y las gotas como un número discreto de partículas (enfoque Lagrangiano). Según Kuriakose y Anandharamakrishnan [59], este enfoque tiene la ventaja de ser computacionalmente más liviano que cuando se modelan las gotas de forma continua (enfoque Euleriano/Euleriano).

3.1.1. Modelo de fase continua para el aire

Para el modelo de fase continua se plantean los balances de masa, momento y energía para cada pequeño volumen de control y que en total discretizan el secador. Teniendo en cuenta la interacción con la fase discreta la conservación de masa, o ecuación de continuidad, se

puede presentar de la forma

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = S_m, \quad (3-1)$$

la cual es válida tanto para flujo compresible como incompresible. El primero se define como el término acumulativo o razón de cambio de la densidad en el tiempo. El segundo término describe el flujo neto de masa al elemento por sus fronteras, y se conoce como término convectivo. En el término convectivo se incluye el vector de velocidad \mathbf{u} . La masa transferida de la fase discreta a la fase continua se representa por S_m , en este caso, debido a la evaporación de las gotas de agua.

La ecuación de conservación de momento en un marco de referencia inercial no acelerativa

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{S}_v, \quad (3-2)$$

donde el primero es el término de acumulación o razón de cambio de la velocidad, el segundo es el convectivo o de flujo neto de velocidad por las fronteras del volumen. Todos los términos a la derecha de la ecuación representan las fuerzas externas aplicadas al fluido: p es la presión estática, $(\bar{\boldsymbol{\tau}})$ el tensor de esfuerzos, $\rho \mathbf{g}$ la fuerza gravitatoria de cuerpo y \mathbf{S}_v es el vector de fuerzas que ejercen las partículas discretas sobre la fase continua.

Por último, la ecuación de conservación de energía de la forma

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g E) + \nabla \cdot (\mathbf{u}(\rho_g E + p)) = -\nabla \cdot \left(\sum_j h_j J_i \right) + S_h, \quad (3-3)$$

en la que igualmente el primero es el término acumulativo o de razón de cambio de la energía, y el segundo es el convectivo o flujo de energía por las fronteras del volumen analizado. Al lado derecho se encuentran el término difusivo de energía y la energía transferida de la fase discreta a la fase continua S_h .

Modelo de turbulencia

El régimen de flujo en el secador es de tipo turbulento y por lo tanto es necesario definir un procedimiento para modelar el flujo de aire bajo estas condiciones. El modelo de turbulencia adoptado en este trabajo se basa en los modelos tipo RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). En este tipo de modelos la solución de las variables de las ecuaciones de Navier-Stokes se descomponen en sus componentes promedio y fluctuantes. Por ejemplo, para las componentes de velocidad se presenta como:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad (3-4)$$

donde \bar{u}_i es la velocidad media y u'_i la componente fluctuante.

Al aplicar esta descomposición a las ecuaciones de Navier-Stokes, se incluye un nuevo término denominado *esfuerzo de Reynolds*. Este incluye el producto de la velocidad media de las fluctuaciones ($\overline{u'_i u'_j}$) y representa una cantidad estadística de las velocidades en el punto de coordenadas (i, j) . Para modelar el esfuerzo de Reynolds se puede utilizar la hipótesis de Boussinesq que propone la siguiente ecuación:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}, \quad (3-5)$$

que permite modelar el momento transferido causado por la turbulencia ($\overline{u'_i u'_j}$) por medio de una nueva variable llamada *viscosidad turbulenta* (μ_t).

La ventaja de esta técnica es el relativo bajo costo computacional asociado al cálculo de la viscosidad turbulenta (μ_t). En los modelos $k - \epsilon$ y $k - \omega$ se resuelven dos ecuaciones adicionales (para la energía turbulenta (k) y la velocidad de disipación turbulenta (ϵ), o la velocidad específica de disipación (ω)), y μ_t se calcula en función de k y ϵ o k y ω según el modelo utilizado. La desventaja de la hipótesis de Boussinesq es que se asume que μ_t es una cantidad escalar isotrópica.

El promedio de las velocidades en el punto ($-\rho \overline{v_i v_j}$) se incluye en la ecuación de balance de momento (3-2). Para el caso del modelo RNG $k - \epsilon$ se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3-6)$$

y

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (3-7)$$

donde G_k representa la energía cinética de turbulencia debida a los gradientes de velocidad media, G_b es la generación de energía de turbulencia debido a la flotabilidad, Y_M representa la contribución de la dilatación volumétrica fluctuante en el flujo turbulento compresible, y α_k y α_ϵ son la inversa efectiva del número de Prandtl para k y ϵ , respectivamente.

Los valores de k y ϵ a la entrada del secador se calculan utilizando el método descrito por Langrish y Zbicinski [64]. La energía cinética turbulenta a la entrada (k_{in}) se relaciona con la intensidad de turbulencia (I) con la ecuación

$$k_{in} = (u_{in} I)^2. \quad (3-8)$$

La intensidad de turbulencia (I), definida como la relación entre la raíz media cuadrática de la fluctuación turbulenta (u') y la velocidad media (\bar{u}), es decir $I = u'/\bar{u}$, se estima a partir de la ecuación

$$I = 0, 2Re^{-1/8}, \quad (3-9)$$

para este caso el número de Reynolds se calcula en el ducto de entrada al secador.

La rata de disipación de energía a la entrada (ϵ_{in}) no se mide directamente, pero se puede estimar a partir de la relación entre la longitud de escala turbulenta (l) y la energía cinética turbulenta a partir de la ecuación

$$\epsilon_{in} = \frac{C_\mu^{3/4} k_{in}^{3/2}}{l} \quad (3-10)$$

donde se asume que l es igual al diámetro externo del anillo de ingreso de aire al secador. La constante estándar C_μ para el modelo $k - \epsilon$ es igual a 0,09.

3.1.2. Modelo de fase discreto para las gotas

El comportamiento discreto de la gota se simula a partir de tres modelos fundamentales: el que define su velocidad basado en balances de fuerzas, el que define su temperatura a partir de un balance de energía y el que define su humedad a partir de un balance de masa. El balance de masa y energía para las gotas de agua y jugo se describen en la sección 3.2.

La velocidad y trayectoria de las partículas se calculan resolviendo el balance de fuerzas sobre cada gota y partícula

$$\frac{\partial \mathbf{u}_p}{\partial t} = F_D (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_p) + \mathbf{g} \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_p}, \quad (3-11)$$

donde $F_D (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_p)$ es la fuerza de arrastre por unidad de masa de la partícula suponiendo que las partículas son esferas lisas del diámetro de la gota o partícula.

Las suposiciones aplicadas al modelo CFD se basan en análisis experimentales realizados en el secador por aspersión y consideraciones tomadas de la modelación de este mismo proceso por otros autores. Para el modelo CFD del secador por aspersión de este trabajo se aplican las siguientes suposiciones:

- La fase discreta está diluida en la fase continua y por lo tanto se plantea un enfoque Euleriano/Lagrangiano.
- Se utiliza una estrategia de acople bidireccional entre la fase continua y la fase discreta. Esto con el propósito que en el balance de masa de la gota se tenga en cuenta el aumento de humedad del aire, así como la reducción de temperatura en el balance de energía, principalmente en la zona cercana al atomizador donde la concentración de gotas es más alta. Esta suposición se verifica con el análisis de perfiles de humedad y temperatura que se realiza en la sección 6.3.
- No se genera aglomeración, colisión o rompimiento de las gotas y partículas. Para incluir estos efectos sería necesario contar con el modelo que describe la temperatura de

transición vítrea y de esta forma definir si la gota se aglomera. Igual sucede con el modelo de rompimiento de partículas. Ambos modelos son considerados en la actualidad como de alta complejidad, y se encuentran en etapas de desarrollo.

- Se nota en los experimentos que la mayoría de las gotas que tocan las paredes se pegan a la misma y por lo tanto la probabilidad que reboten es baja. Al no contar con un modelo confiable de transición vítrea, no es posible definir con precisión cuales partículas se pegan y cuales partículas rebotan. Por lo tanto, y para no saturar la simulación con partículas pegadas a las paredes, se prefiere configurar la condición de escape de las *partículas* al tocar las paredes.
- Se asume que la pérdida de energía por las paredes es despreciable debido a que el equipo utilizado cuenta con aislante térmico apropiado para el proceso.
- Se asume que las gotas y partículas son esféricas, lisas y no porosas.
- La gota se encoge uniformemente con la pérdida de agua (encogimiento ideal). Además, no se expande ni explota.
- No se presenta gradiente de temperatura en el interior de la gota o partícula debido al bajo número de Biot obtenido en el proceso ($Bi < 0,1$). En análisis del número de Biot se presenta en la sección 3.2.1.
- La velocidad del aire en este secador es menor a la velocidad del sonido, y por lo tanto se puede asumir como flujo incompresible. Aún así, el solucionador seleccionado (*sprayFoam*) esta definido para flujo compresible. Se asume que esta característica afecta el tiempo de simulación por el recálculo de la densidad del aire, pero no afecte los perfiles de velocidad y temperatura del aire obtenidos.

3.2. Modelos de secado de gota

Como se aprecia en la Figura 2-5 el proceso de secado de gotas se puede dividir en dos etapas principales: la primera cuando se produce la evaporación del agua superficial con una velocidad constante de secado. En este periodo el secado de la gota se considera sin restricciones y es visto simplemente como la evaporación del líquido superficial. La segunda etapa comienza cuando se alcanza la humedad crítica (X_{cr}) después de la formación de la corteza donde el secado se presenta por la difusión del agua a través de esta corteza. El proceso continúa hasta que se alcanza la humedad de equilibrio (X_{eq}) que depende de la humedad y temperatura del aire de secado.

El modelo de secado de gota de jugo se divide en dos partes, en la primera se asume que la gota esta compuesta únicamente por agua y se plantean los respectivos balances de masa y energía. En la segunda se utiliza el concepto de curva característica de secado (CDC) para

considerar el efecto del sólido en la difusión del agua. A continuación se describe inicialmente el modelo de secado de gota de agua, y luego el modelo incluyendo el efecto de los sólidos disueltos.

3.2.1. Modelo de secado de gota de agua

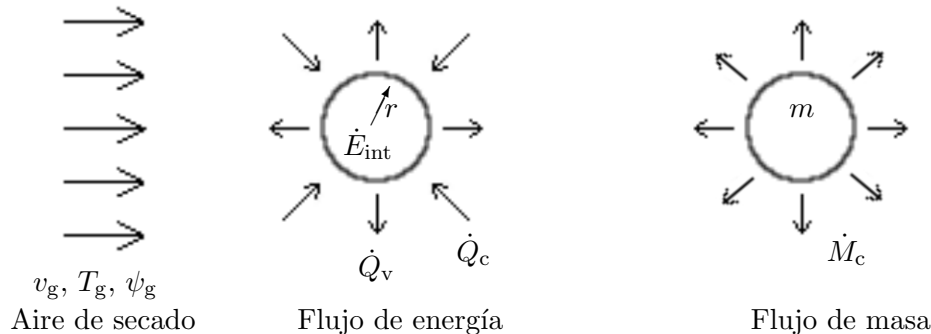


Figura 3-1.: Flujo de energía y masa de la gota con el aire de secado. En el flujo de energía esta incluido el flujo de calor por convección (\dot{Q}_c) y por evaporación (\dot{Q}_v). El flujo de masa se presenta por el gradiente de difusión (\dot{M}_c).

La Figura 3-1 muestra el flujo de energía y masa ideal sobre la gota teniendo en cuenta el efecto de la velocidad, temperatura y humedad del aire de secado (v_g , T_g y ψ_g). En este modelo no se tiene en cuenta la transferencia de energía entre el filamento y la gota ya que el mismo modelo se utiliza en el secador por aspersión.

Balance de energía

En el balance de energía se incluye la acumulación de energía en la gota \dot{E}_{int} , el transporte en la frontera por convección (\dot{Q}_c) y por evaporación (\dot{Q}_v). La ecuación general de conducción de calor se plantea de la forma

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + \dot{q}, \quad (3-12)$$

donde normalmente no se presenta efecto de fuente o sumidero ($\dot{q} = 0$). Si se supone que la gota tiene forma esférica perfecta, la ecuación general de conducción se puede plantear en coordenadas esféricas con las respectivas condiciones de frontera

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad \text{con las CF} \quad \begin{cases} \partial T / \partial r = 0 & r = 0, \\ k \frac{\partial T}{\partial r} = -Q_c + Q_v & r = r_d. \end{cases} \quad (3-13)$$

Según el resultado experimental presentado más adelante en la Figura 5-13, el diámetro máximo de una partícula en el secador por aspersión es de 0,1 mm que para las condiciones

del aire de secado se obtiene un Biot ($Bi = h r_d/k$) igual a 0,04. Similar al reportado por Adhikari et. al [2] para gotas, formadas por una mezcla de fructosa, glucosa, ácido cítrico y maltodextrina, con valores de Biot desde 0,07 a 0,11. En el secador por filamento de vidrio el máximo diámetro de gota es 1,8 mm, con el que se obtiene un valor Biot de 0,20. El cual es comparable con el Biot igual a 0,15 obtenido por Farid [20] para gotas de leche.

A partir del número de Biot se puede asumir que la distribución de temperatura en el interior de la gota es despreciable. Pues el Biot se encuentra con valores cercanos o menores a 0,1 según lo propuesto por Chen y Peng [16], Mezchericher et. al [74] y Chen [15]. En conclusión, se puede suponer que la temperatura es uniforme en toda la gota y por lo tanto el balance de energía se puede plantear como

$$m c_p \frac{dT_d}{dt} = Q_c + Q_v \quad (3-14)$$

que reemplazando el calor por convección Q_c y por evaporación Q_v quedaría de la forma

$$m c_p \frac{dT_d}{dt} = h A_d (T_g - T_d) + h_{fg,d} \frac{dm}{dt}. \quad (3-15)$$

El coeficiente de transferencia de calor (h) se puede calcular utilizando el número de Nusselt, que relaciona el aumento de transferencia de calor desde una superficie por la que pasa el fluido, comparada con la transferencia por conducción. El número de Nusselt se puede determinar para el secado de gotas utilizando la ecuación de Ranz-Marshall [87]

$$Nu = \frac{h d_d}{k_g} = 2 + 0,6 Re^{1/2} Pr^{1/3}, \quad (3-16)$$

donde el número de Prandtl relaciona la difusividad de momento con la difusividad térmica, y se obtiene mediante la ecuación

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k_g}. \quad (3-17)$$

Balance de masa

El flujo de masa esta gobernado principalmente por un fenómeno convectivo debido al gradiente de difusión. Este gradiente se debe a la diferencia entre la concentración de vapor en la superficie de la gota y del vapor del aire alrededor de la misma

$$-\frac{dm_d}{dt} = \dot{M}_c A_d \quad (3-18)$$

donde la velocidad de evaporación por convección (\dot{M}_c) se define a partir de la ecuación

$$\dot{M}_c = h_m M_W (C_d - C_g). \quad (3-19)$$

La concentración de vapor en la superficie de la gota (C_d) se calcula suponiendo que la presión parcial de vapor en la interfase es igual a la presión de vapor saturado (p_{sat}) a la temperatura de la gota (T_d) y la concentración de vapor en el aire (C_g) se calcula utilizando la humedad relativa del aire (ψ):

$$C_d = \frac{p_{\text{sat}@T_d}}{RT_d} \quad , \quad C_g = \psi \frac{p_{\text{sat}@T_g}}{RT_g} \quad . \quad (3-20)$$

Remplazando en el balance de masa se obtiene

$$-\frac{dm_d}{dt} = A_d h_m \frac{M_W}{R} \left(\frac{p_{\text{sat}@T_d}}{T_d} - \psi \frac{p_{\text{sat}@T_g}}{T_g} \right) \quad (3-21)$$

El coeficiente de transferencia de masa (h_m) se puede calcular utilizando el número de Sherwood, que representa la relación de la transferencia total de masa y el transporte netamente difusivo. El número de Sherwood se puede determinar para el secado de gotas utilizando, entre otras, la ecuación de Froessling

$$Sh = \frac{h_m d_d}{k_m} = 2 + 0,6 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (3-22)$$

donde el número de Schmidt (Sc) relaciona la difusividad de momento con la difusividad másica, y se obtiene con la ecuación

$$Sc = \frac{\mu}{\rho k_m} \quad (3-23)$$

3.2.2. Modelo de secado de gotas con sólidos

El modelo CDC propuesto por Langrish y Kockel [62] se basa en la suposición de una reducción de la velocidad de secado por la presencia de la corteza sólida. Usando este modelo, la velocidad de transferencia de masa en la segunda fase se puede plantear de la forma

$$N_p = f N_d, \quad (3-24)$$

donde la velocidad de secado de la partícula ($N_p = dm_p/dt$) se calcula a partir de la velocidad de secado de la gota de agua ($N_d = dm_d/dt$) utilizando la ecuación 3-21 y la velocidad relativa de secado (f). El valor de f se toma igual a 1 ($f = 1$) para el primer periodo de secado ($X > X_{\text{cr}}$) y para el segundo periodo de secado ($X < X_{\text{cr}}$) se han propuesto las ecuaciones 3-25 y 3-26 con el fin de calcular la velocidad relativa de secado f . Langrish y Kockel [62] utilizan la ecuación 3-25 para modelar y simular el secado de leche. La ecuación 3-26, propuesta por Huang et. al [46], es utilizada por Woo et. al [109] definiendo un valor de $n=2,58$ para sucrosa y $n=1,98$ para una mezcla sucrosa y maltodextrina, así como Langrish [60] que define $n=0,48$ para fibras de celulosa.

$$f = \frac{N_p}{N_d} = \frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}}, \quad (3-25)$$

$$f = \frac{N_p}{N_d} = \left[\frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}} \right]^n. \quad (3-26)$$

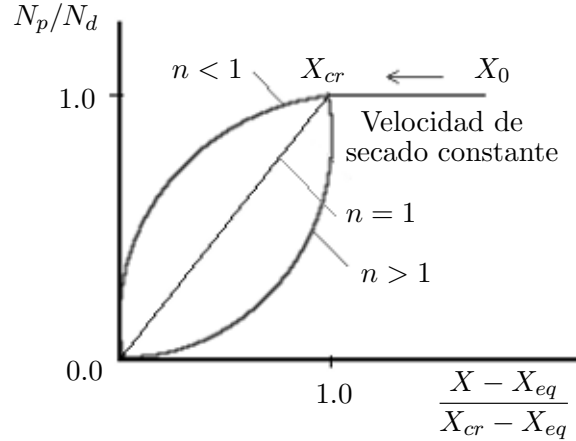


Figura 3-2.: Curvas características de velocidad de secado [47].

La Figura 3-2 presenta el comportamiento típico de la velocidad de secado de una gota con sólidos. Según Huang et al. [47] el secado se puede dar de tres formas: lineal ($n = 1$), cóncava ($n > 1$) o convexa ($n < 1$). Según Fyhr y Kemp [25] la forma funcional de f se ajusta a la curva de velocidad de secado obtenida experimentalmente. El valor de la humedad crítica (X_{cr}) también se define a partir de experimentos y se asume constante para el líquido utilizado. En la sección 4.3 se presenta el análisis experimental utilizado para definir la humedad crítica (X_{cr}) y la forma adecuada para la velocidad relativa de secado (f).

3.3. Método de solución y aplicación del modelo CFD

Las ecuaciones descritas en la sección 3.1 se organizan en forma de algoritmo presentado en la Figura 3-3. Este algoritmo de solución se resuelve para cada periodo de tiempo de cálculo, es decir, para un periodo de tiempo definido. En el siguiente periodo de cálculo se repite el algoritmo con las condiciones iniciales obtenidas en el periodo anterior.

Para resolver el modelo CFD se utiliza la biblioteca de funciones de OpenFOAM V3.0.0. OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) es una biblioteca de funciones de código libre y de fuente abierta escritas en C++ que utiliza el método de los volúmenes finitos para manipular y resolver ecuaciones diferenciales parciales. Permite resolver problemas de mecánica de medios continuos incluyendo la mecánica de fluidos computacional (CFD).

OpenFOAM posee diversas características particulares que se describen a continuación:

- El código es abierto, lo que permite acceder a todas las librerías para analizar directamente cuales son los modelos, ecuaciones y órdenes ejecutadas por el código.
- El código puede ser ajustado y recompilado para ajustarse a las necesidades específicas si es necesario.
- La documentación es reducida lo que dificulta el uso y personalización de la herramienta.
- OpenFOAM incorpora de forma directa compatibilidad con otras herramientas para realizar el posprocesamiento. Los datos se pueden manipular y presentar en forma de matrices, tablas, gráficas, imágenes y animaciones.
- OpenFOAM no tiene restricciones respecto a la cantidad de procesadores para computación en paralelo. Restricción que sí se evidencia en algunas herramientas de tipo comercial.
- No tiene restricciones respecto al uso de los resultados. Es decir que OpenFOAM y sus resultados se pueden usar directamente para aplicaciones comerciales o industriales. A diferencia de algunos paquetes comerciales que restringen su uso dependiendo del tipo de licencia, que en la mayoría de los casos es de uso exclusivamente académico.

OpenFOAM esta dividido en solucionadores (*solvers*) dependiendo el problema planteado y el tipo de ecuaciones a resolver. Para resolver las ecuaciones del modelo para el secador por aspersión se utiliza el solucionador de OpenFOAM denominado *sprayFoam*. Este solucionador permite resolver problemas de tipo transitorio para flujo compresible, laminar o turbulento, multifásico con la inyección de parcelas discretas. Para resolver el acoplamiento presión-velocidad *sprayFoam* utiliza el algoritmo tipo PIMPLE, que combina el método SIMPLE (Semi-implicit Pressure-linked equations) con el método PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator) para corregir la presión y velocidad de forma explícita [105].

En el método SIMPLE primero se calcula una aproximación del campo de velocidad resolviendo la ecuación de momento y el gradiente de presión se calcula usando la distribución de presión a partir de la iteración previa o un valor inicial supuesto; luego se formula y resuelve la ecuación de presión con el fin de obtener la nueva distribución de presión; por último, se corrige el campo de velocidad y se calcula el nuevo conjunto de flujos conservativos. La ecuación discreta de momento y la ecuación de corrección de la presión se resuelven de forma implícita, y la ecuación de corrección de velocidad se resuelve de forma explícita. El método PISO divide los operadores en un predictor implícito y múltiples pasos de corrección explícitos. Este esquema no se considera un método iterativo pues se necesitan muy pocos pasos de corrección para obtener la exactitud deseada. En cada paso de tiempo se predicen los campos de velocidad y temperatura, luego son corregidas en varios pasos.

En la formulación del proyecto de tesis de doctorado se planteó el uso de ANSYS/Fluent

como herramienta de simulación. Pero al analizar las características de OpenFOAM se decide utilizarlo para realizar este trabajo. Esto debido a las ventajas que tiene respecto al cálculo en paralelo sin restricciones, facilidad para ajustar o modificar las ecuaciones de simulación (código abierto) y la posibilidad de utilizar los resultados en posibles aplicaciones comerciales o industriales.

Volumen de control y condiciones de frontera

La geometría del secador se describe en la Figura 5-4. Para discretizar el volumen de control se utiliza una malla estructurada construida a partir de hexaedros. La malla se construye por medio de la herramienta básica de OpenFOAM para enmallado denominada *blockMesh*. Además, se realiza un análisis de sensibilidad de malla, que se presenta en la sección 6.1.1, para definir el grado de refinamiento necesario con el propósito de obtener resultados confiables.

Las condiciones de frontera en las paredes del secador se configuran como paredes sólidas sin deslizamiento e isotérmicas. Se define la entrada de aire en la parte superior como un anillo alrededor del atomizador. La velocidad de entrada del aire se calcula a partir del flujo másico y la geometría del anillo de ingreso del aire. El valor de k y ϵ a la entrada son calculados utilizando las ecuaciones 3-8, 3-9 y 3-10 dadas por Langrish y Zbicinski [64].

En la parte inferior se encuentra la salida del aire y las partículas con una presión absoluta de 89,75 kPa. Esta presión se calcula a partir de la medición de la presión manométrica interna del secador (-0,25 kPa) y la presión atmosférica en el sitio del secador (90 kPa). Además, se agrega al volumen de control una pequeña porción del ducto de salida para evitar que las inestabilidades por la recirculación afecten la estabilidad de la simulación.

La inyección de gotas de agua o jugo se aplica en la zona donde se encuentra el atomizador rotatorio y se utiliza la distribución de Rosin-Rammler para definir la distribución inicial de tamaño. Los parámetros de la distribución de Rosin-Rammler se obtienen del análisis experimental del tamaño de partículas descrito en la sección 5.3.2. Se asume que las gotas de agua se *pegan* a las paredes hasta su evaporación total, y las partículas de jugo que chocan con las paredes *escapan* del volumen de control, es decir, se ignoran del cálculo.

Los resultados para cada caso se posprocesan utilizando los programas *paraView* y *gnuplot*. Se obtienen los perfiles de velocidad, temperatura y humedad según cada experimento. En los casos donde se simula el secado de gotas de jugo se construye una tabla con las propiedades de las partículas que salen del secador por la parte inferior. De esta tabla se obtiene la distribución de tamaños de partículas, el promedio de humedad y densidad real. Los resultados obtenidos se comparan con los datos experimentales presentados en la sección 5.3.2.

La Figura 3-4 presenta el proyecto dividido en tres fases: modelación, simulación y experi-

mentación. En cada fase se analizan las condiciones del aire de secado, con gotas de agua y por último con la inyección del jugo modelo.

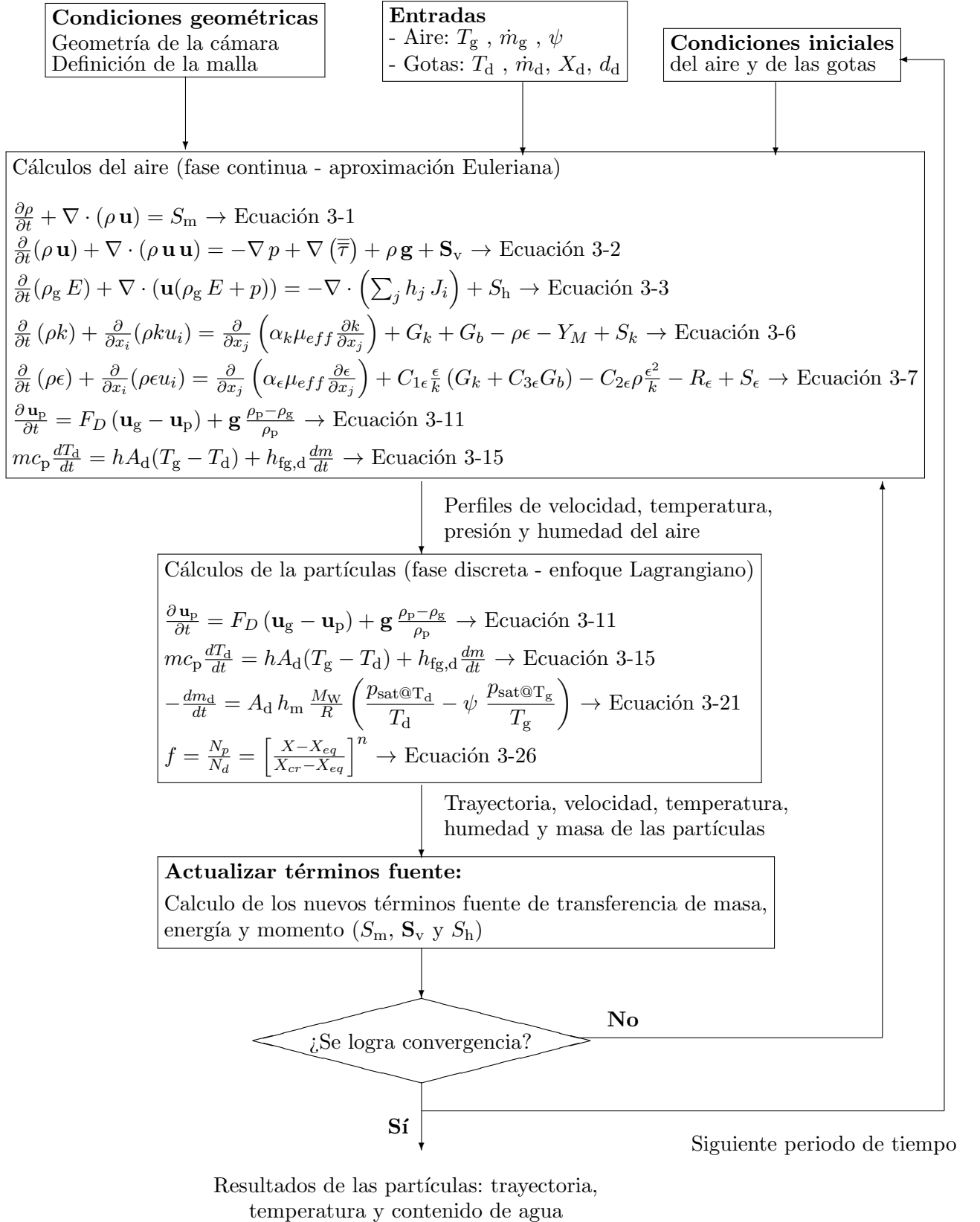


Figura 3-3.: Diagrama de flujo del modelo planteado para la simulación del proceso de secado por aspersion a partir de CFD. Este diagrama se repite para cada periodo de tiempo de cálculo.

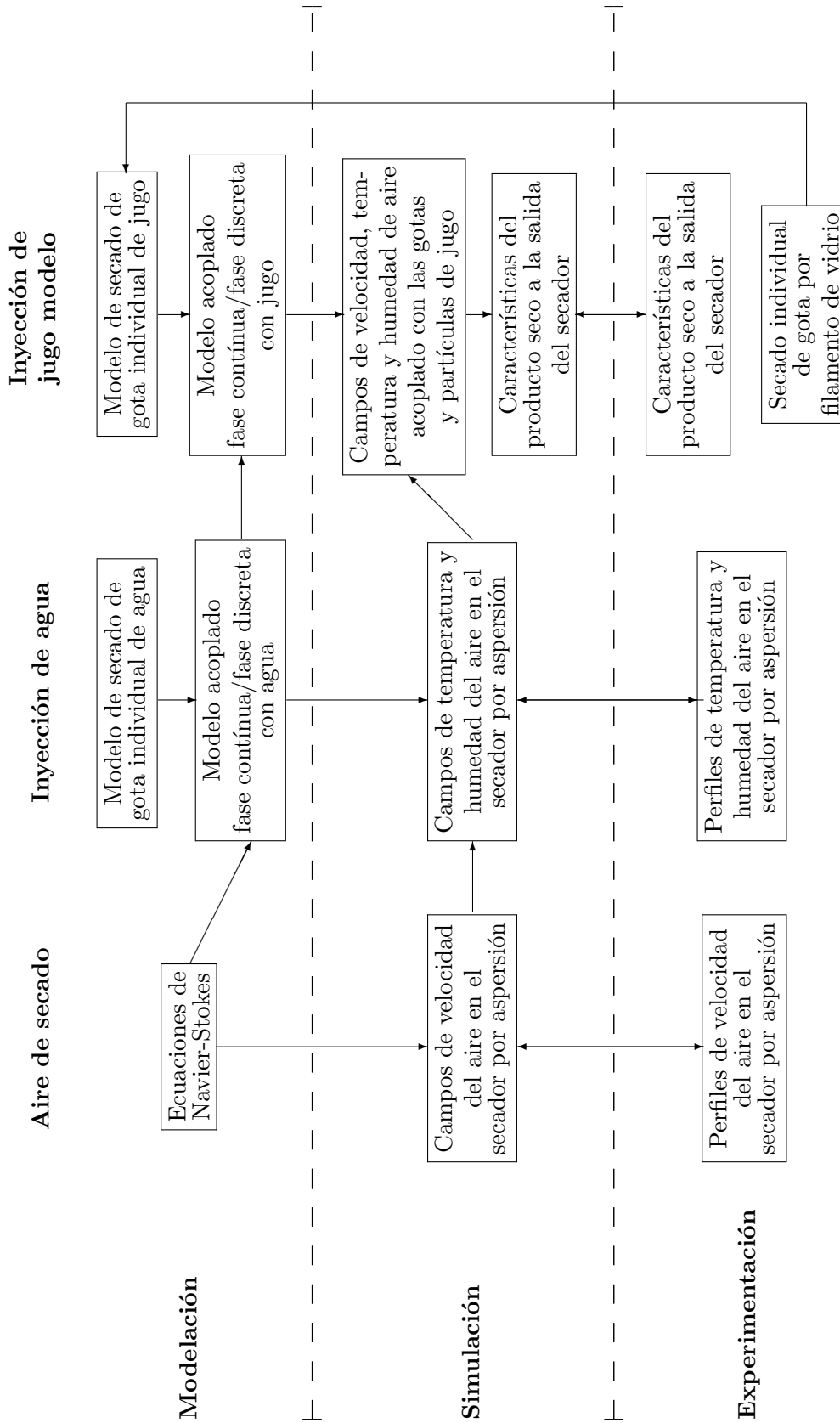


Figura 3-4.: Descripción del proceso metodológico para analizar la calidad del producto a partir del modelo y simulación del secador. El modelo, la simulación y la experimentación se divide en tres fases: análisis del aire, con gotas de agua y con gotas de jugo. A partir del modelo se obtienen los resultados de simulación que luego se comparan con los datos experimentales.

4. Caracterización de la materia prima

En este capítulo se presentan y analizan las propiedades principales del jugo modelo de fruta seleccionada. Se describe el diseño y construcción del equipo secador de gota por filamento de vidrio, sus características, funcionamiento y las pruebas realizadas. Se describen los experimentos con las gotas del jugo modelo de fruta. Por último se hace un análisis del modelo de secado y su ajuste a los datos experimentales.

4.1. Descripción del jugo utilizado

Las frutas tropicales son consideradas importantes para la seguridad alimentaria de países en vías de desarrollo, desde el punto de vista nutricional así como por su contribución a los beneficios de las exportaciones y de los ingresos. Según la FAO [19], el 90 % de las frutas tropicales que se producen son consumidas dentro de los mismos países productores. Un 5 % se comercializan como frutas frescas y el restante como productos elaborados. Este tipo de alimentos se ha convertido en recursos de gran valor para el mercado mundial y el colombiano [36]. Variedad de industrias demandan frutas para fabricar alimentos; la farmacéutica y homeopática han empezado a consumir frutas frescas y procesadas en escalas pequeñas, entre 24 toneladas de fruta fresca y 27 toneladas de fruta procesada, según el estudio sectorial de Agrocladenas [1].

De acuerdo con Tafur y Toro [101], de los diez frutales más importantes económica y socialmente para el país, la naranja, mango, aguacate, guayaba y mandarina representan el 44,8 % del área total sembrada con frutales. Entre estos, la guayaba, es considerado uno de los más promisorios por su agradable sabor y riqueza nutritiva reflejada en el contenido de vitaminas (16), minerales, aminoácidos y fibra; acorde a las necesidades y/o preferencias de los consumidores de alimentos sanos, nutritivos, fáciles de preparar y presentar componentes que puedan reducir o prevenir algunas enfermedades [36]. La guayaba presenta alto contenido en vitamina C (ácido ascórbico), la cual es importante para la salud (antiescorbútica) y la industria alimentaria [90]. Su contenido en fibra dietaria facilita la evacuación de residuos alimenticios del organismo, lo que reduce la aparición de enfermedades asociadas a la deficiencia en este componente. La pectina, una de las formas de la fibra, es apreciada en la industria de los alimentos por su capacidad para la formación de geles.

A pesar de sus propiedades, el procesamiento de la guayaba colombiana presenta retraso

tecnológico, que se evidencia en bajos rendimientos, deficiencias en la calidad, inestabilidad en la oferta y en los precios de la fruta, así como en los productos procesados. Según el estudio de Agrocadenas [1], esto afecta la competitividad del producto, por lo que la única alternativa es la tecnificación de los frutales e implementar un sistema de manejo integral y sistemático.

Las razones para escoger el jugo de guayaba para el desarrollo de este trabajo se basan en las características ya descritas: su extensivo cultivo en el país, sus altas posibilidades de exportación y las deficiencias en su procesamiento. Inicialmente se consideró trabajar con gotas del propio jugo de guayaba, pero posteriormente se decide realizar los experimentos con un jugo modelo artificial de guayaba. El jugo modelo artificial permite homogenizar los resultados experimentales, tanto los realizados en el secador de gota como en el secador por aspersión de planta piloto.

El jugo modelo se construye a partir de los componentes básicos de jugo de guayaba reportados en la base de datos de nutrientes Australiana (NUTTAB) [7] y estudios realizados por Shamsudin et al. [93], Osorio et al. [80], Gutiérrez [36] y Ashaye et al. [6]. La Tabla 4-1 muestra los porcentajes de cada uno de los componentes del jugo modelo de guayaba, el cual se utiliza tanto en el análisis de secado de gota por filamento de vidrio como en el secador por aspersión de planta de piloto.

Tabla 4-1.: Contenido nutricional del jugo modelo de guayaba (g/100g) definido a partir de estudios realizados por Shamsudin et al. [93], Osorio et al. [80], Gutiérrez [36] y Ashaye et al. [6].

Agua	Sacarosa	Fructosa	Glucosa	Fibra	Ácido cítrico
87,37	0,41	4,53	4,28	2,22	1,19

El objetivo es utilizar un jugo modelo lo más parecido posible al empleado en el secado por aspersión industrial, es por esto que se adiciona al jugo modelo 12% de maltodextrina con un equivalente de dextrosa 10DE. De esta forma el jugo tiene un total de 22% de sólidos. La maltodextrina facilita el secado por aspersión de jugos de fruta porque aumenta el peso molecular y por lo tanto la temperatura de transición vítrea [86]. La adición de maltodextrina al jugo modelo reduce la posibilidad que se pegue a las paredes [2], la aglomeración del producto y la conservación de las principales propiedades organolépticas [80, 31]. El jugo modelo de guayaba con Maltodextrina tiene 20 grados Brix.

Las principales propiedades termodinámicas del jugo de guayaba y que son necesarias para modelar el proceso de secado se identifican a partir de las ecuaciones 3-12 a 3-26. Estas propiedades termodinámicas se presentan en la Tabla 4-2, las cuales se obtienen a partir de los trabajos realizados por Shamsudin et al. [93] y Zainal et al. [117]. Las isotermas de sorción del jugo de guayaba se obtienen del trabajo realizado por Hubinger et al. [50].

Tabla 4-2.: Propiedades termodinámicas del jugo de guayaba real.

Propiedad	Valor o ecuación	Unidades
Viscosidad aparente	$\mu = 15,68 \pm 1,06$	mPa s
Conductividad térmica	$k = 0,14 + 0,42X_{bh}$	$\frac{W}{m K}$
Calor específico a presión constante	$c_p = 3473,2 + 0,807 (T - 273,15)$	$\frac{J}{kg K}$
Densidad	$\rho = 1047,9 - 0,45 (T - 273,15)$	$\frac{kg}{m^3}$

Para modelar y simular el secado de gotas de jugo, además de las propiedades ya descritas, es necesario definir el comportamiento de transferencia de masa y energía de las gotas con el aire de secado [22, 74]. En la siguiente sección se describe el equipo experimental utilizado para especificar las condiciones de transferencia de masa y energía.

4.2. Caracterización de cinéticas de secado de gota

El equipo secador de gota por filamento de vidrio permite medir diferentes condiciones de la gota durante el proceso de secado. Con este se logra obtener el cambio de masa, temperatura y diámetro de una gota, durante su proceso de secado, bajo diferentes condiciones de velocidad y temperatura del aire.

La suspensión de gotas en un filamento de vidrio es uno de los métodos más utilizados debido a su bajo costo y facilidad de construcción en comparación con las técnicas de levitación no invasiva. Esta técnica ofrece un método sencillo para monitorear los cambios de masa, diámetro y temperatura de la gota durante el secado. A pesar de estas ventajas, el método de filamento de vidrio no permite analizar gotas tan pequeñas como las utilizadas en el secador por aspersión. Además, no se produce la rotación de la gota que se genera en el secador y es posible la transferencia de calor del filamento a la gota.

Se selecciona el método de secado por filamento de vidrio por permitir medir de forma directa la masa, temperatura y tamaño de la gota durante el secado. La gota se mantiene en la misma posición en el filamento de vidrio y por lo tanto se facilita su ubicación durante el experimento, a diferencia del método de caída libre. Además, actualmente se cuenta con microbalanzas con la precisión adecuada para medir los cambios de masa de la gota. Por último, este método no requiere control de posición como el método de levitación acústica o electromagnética.

4.2.1. Diseño del secador de gota

Basados en los antecedentes se definen las condiciones de operación del equipo secador de gota diseñado y construido para el desarrollo de este trabajo. En la Tabla 4-3 se presenta

este análisis de antecedentes y los valores seleccionados para el secador de gota. En esta tabla se presenta el tamaño inicial de la gota, además de las condiciones de secado como velocidad, temperatura y humedad del aire de secado.

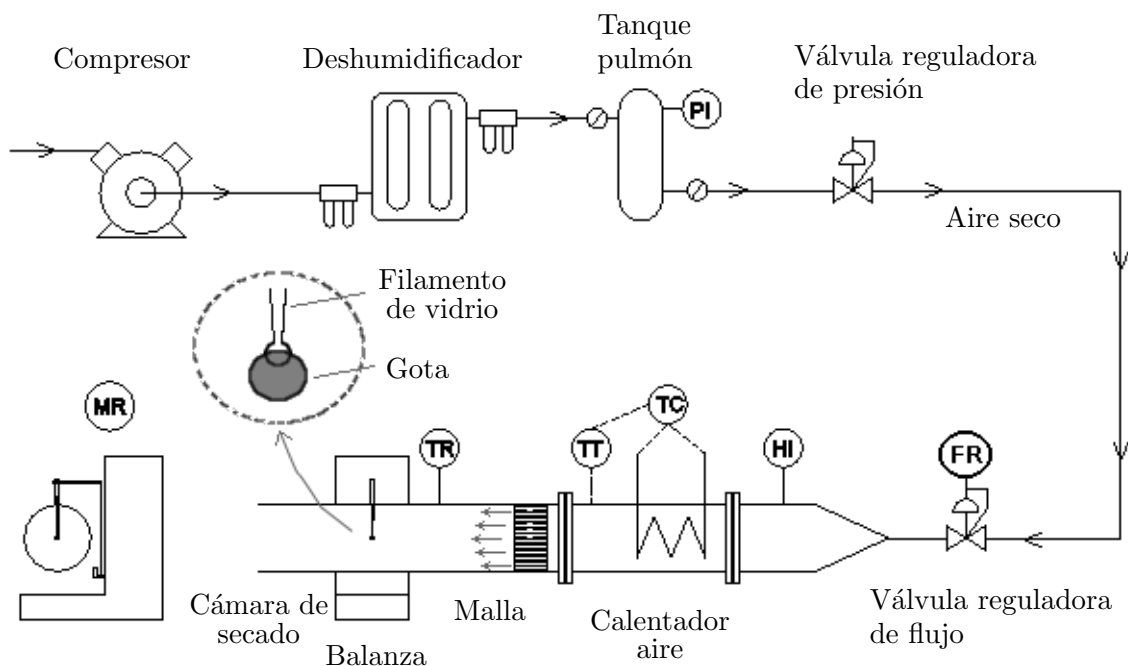
Tabla 4-3.: Condiciones de operación del secador de gota por filamento de vidrio utilizado por diferentes autores y en este trabajo.

Referencia	Tamaño de gota [mm]	Velocidad del aire [m/s]	Temperatura del aire [K]	Humedad del aire [kg/kg]
Lin et al. [68]	0,40 - 2,50	0,25 - 2,00	340 - 379	0,0010
Lin et al. [67]	1,45	0,45 - 1,00	340 - 379	0,0650
Fu et al. [24]	0,60 - 1,80	0,75	343 - 383	0,0010
Adhikari et al. [2]	2,30	1,00	336 - 368	0,0020
Walton D.E. [107]	2,30 - 1,80	0,25-1,00	323 - 473	0,0025
Este proyecto	1,00 - 3,00	0,25-4,00	300 - 420	0,0001

Basados en el diseño se presenta en la Figura 4-1 un diagrama esquemático del secador de gota que es construido e implementado en el *laboratorio de transmisión de calor* de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. El aire comprimido se filtra y se le retira la humedad hasta máximo 10 ppm de agua, según el catalogo del fabricante.

El aire seco se almacena en un tanque pulmón de 22 litros con el propósito de homogenizar la humedad y reducir las fluctuaciones de flujo que pueda producir el compresor durante cada prueba. El aire luego pasa por una válvula reguladora de presión y una válvula reguladora de flujo másico para obtener un control preciso de la velocidad del aire (hasta 4 m/s) medida en el punto donde se ubica la gota. El aire seco se calienta por medio de una serie de resistencias eléctricas (hasta 473 K) y se mantiene a una temperatura definida por medio de un control digital. Por último, el aire pasa a través de la cámara circular (diámetro interno de 45 mm) para secar una gota que se genera por medio de una micro-jeringa (con volumen hasta de 3 μ l) y se sostiene de un filamento de vidrio que se construye de diámetros muy pequeños (aproximadamente 0,1 mm).

Durante cada experimento se mide de forma separada la masa, temperatura y tamaño de la gota. La masa se registra por medio de una micro-balanza con una precisión de 0,002 mg. La temperatura se registra por medio de un termopar tipo T de alambres finos (diámetro de 0,025 mm) que se inserta en la gota. La forma y tamaño de la gota se registra con la cámara de video digital que magnifica la imagen real entre 20 a 30 veces y adquiere 30 imágenes por segundo.



PI: Indicador de presión TT: Transmisor de temperatura
 HI: Indicador de humedad TR: Registro de temperatura
 TC: Controlador de temperatura MR: Registro de masa FR: Registro de flujo

Figura 4-1.: Diseño esquemático del secador de gota por filamento de vidrio. El aire ingresa por el compresor, pasa al deshumidificador, luego a la válvula de flujo para posteriormente aumentar su temperatura en el calentador. En la cámara de secado se ubica la gota sobre un filamento que está soportado en una balanza.

4.2.2. Construcción del secador de gota

El secador por filamento de vidrio construido se muestra en la Figura 4-2. Este se construye utilizando los siguientes equipos y dispositivos referenciados en la misma figura:

1. **Compresor:** compresor seco libre de aceite SCHULZ 2 x 1 HP MSV 12/100. Tanque 100 litros. Presión de operación 5,5 - 8,2 bar. Desplazamiento teórico 340 l/min (no se muestra en la figura).
2. **Deshumidificador:** desecador Hankinson DHW-13. Humedad de salida 10 ppm H₂O. Flujo de trabajo 290 l/min. Presión máxima 6,9 bar.
3. **Válvula reguladora de flujo:** válvula control de flujo másico Cole-Parmer EW-32907-77. Flujo de trabajo 2,5 a 250 l/min. Precisión +/- 0,8% de la lectura.
4. **Calentador de aire:** calentador de aire construido en tubo de acero inoxidable de



Figura 4-2.: Detalles del secador de gota construido: (2) secador de aire, (3) controlador de flujo másico, (4) calentador de aire, (6) transductores de temperatura, (7) micro balanza y (9) cámara de video.

diámetro 50,8 mm y con bridas ferulables. Potencia máxima de 2 kW.

5. **Control de temperatura:** control de temperatura y/o proceso digital Autonics TZN4S-14S.
6. **Transductores de temperatura:** transductor de temperatura Autonics CN-6100-C1.
7. **Balanza:** balanza Mettler Toledo XP26DR. Capacidad máxima 5,1 g, resolución 0,002 mg, repetibilidad (carga mínima) 0,002 mg.
8. **Ducto de secado:** cilindro de vidrio con longitud de 20 cm y diámetro interno de 45 mm. En la entrada del ducto de secado se instala una malla para obtener condiciones de flujo laminar.
9. **Cámara de video:** microscopio digital Coleparmer de 5 megapíxeles de resolución y aumento de 10X a 200X. Cuenta con conexión USB y sensor imagen 1/4" CMOS.
10. **Mili termocupla:** termocupla tipo T Omega COCO 001 con diámetro de alambres

de 0,025 mm (no se muestra en la figura).

11. **Micro jeringa:** micro jeringa SGE 5BR-5 con un volumen máximo de 5 μl . La precisión y repetibilidad de la microjeringa es de $\pm 2\%$ del valor medido (no se muestra en la figura).

El secador de gota utiliza un sistema de adquisición de datos conectado a un computador que registra cada 0,5 s las siguientes variables:

- Flujo másico y temperatura del aire en la válvula reguladora de flujo.
- Humedad del aire después de la válvula reguladora de flujo.
- Temperatura del aire en la cámara de secado de gota.
- Masa de la gota en la microbalanza.
- Temperatura de la gota de la militermocupla.

La cámara de video se conecta al mismo computador utilizando la conexión USB para obtener un video digital del proceso de secado de la gota en cada experimento. La información registrada por el sistema de adquisición de datos y el video digital son sincronizados utilizando el reloj del computador. Es decir, aunque los datos del experimento y el video digital están en archivos separados, la hora de registro de cada archivo permite realizar la sincronización de la información.

Los datos registrados en el computador se procesan para obtener la curva de secado específica para cada experimento. Este procesamiento incluye la eliminación de los datos que no concuerden con el experimento, eliminación de ruido por medio de filtrado digital y ponderación de la respuesta más adecuada.

Para cada experimento primero se configura la válvula de control de flujo para definir la velocidad de aire de secado que puede estar entre 0,25 y 4,0 m/s calculada para la presión atmosférica y la temperatura específica de cada prueba. Luego se especifica la temperatura del aire de secado entre 300 y 420 K utilizando el controlador de temperatura. Cuando el aire alcanza la temperatura seleccionada se utiliza una derivación para desviar el aire y así reducir el efecto del aire al colocar la gota. Se usa la micro jeringa para generar una gota entre 1 y 5 μl que se ubica en el filamento de vidrio o en la termocupla. Para medir el cambio de masa y temperatura se realizan experimentos independientes debido a que cada uno requiere un montaje particular como se explica a continuación.

Medición de masa de la gota

Para la medición de masa de la gota se construye un nuevo brazo soporte como se muestra en la Figura 4-3. El brazo soporte conserva el centro de gravedad de medición para así evitar

el error por desbalanceo. En la balanza (7) se instala el brazo soporte (13) sobre el cual se coloca el filamento de vidrio (14). El filamento de vidrio se inserta dentro de la cámara de secado (8) y en la punta del filamento se coloca la gota (15).

La Figura 4-4 muestra el proceso de ubicación de una gota de $3 \mu\text{l}$ de agua en el filamento de vidrio. En la primera foto se muestra el filamento de vidrio (14) y la punta de la jeringa (11) con una pequeña gota en el extremo. En las siguientes fotos se muestra la transferencia de la gota al filamento, y en la última foto se aprecia la gota de agua sostenida por el filamento de vidrio.

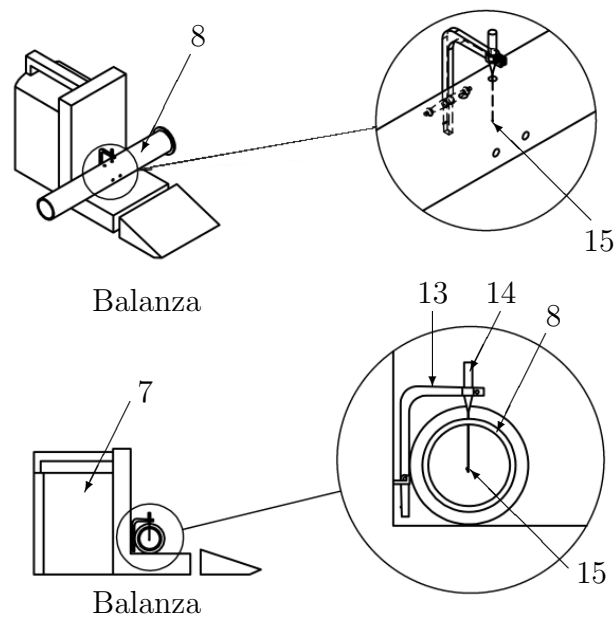


Figura 4-3.: En la balanza (7) se ubica el brazo soporte (13) en el que se instala el filamento de vidrio (14). En la punta del filamento de vidrio (14) se sostiene la gota (15) que se seca por medio del aire del ducto de secado (8).



Figura 4-4.: Proceso utilizado para ubicar una gota de agua de $3 \mu\text{l}$ (15) en el filamento de vidrio (14) usando la micro jeringa (11).

Medición de temperatura de la gota

Para la medición de la temperatura de la gota se reemplaza el filamento de vidrio por la mili-termocupla, que además de sostener la gota, mide su temperatura como se muestra en la Figura 4-5. Se asume que no cambian las condiciones de transferencia de calor al cambiar entre el filamento de vidrio y la termocupla.

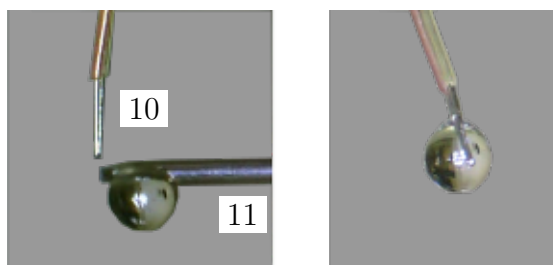


Figura 4-5.: Ubicación de gota para la medición de la temperatura en la micro-termocupla (10) usando la microjeringa (11).

Medición de forma y tamaño de gota

Con el propósito de analizar la forma y tamaño de la gota durante el secado se utiliza una video cámara digital de 5 mega pixeles con aumento de 10 X a 200 X y una velocidad de 30 imágenes por segundo. La cámara se ubica al frente de la gota y se registra en un video el proceso de secado. Este video se procesa digitalmente para definir el tamaño y forma de la gota en función del tiempo.

La Figura 4-6 muestra algunas de las imágenes capturadas por la cámara de video durante el proceso de evaporación de una gota de agua. En cada imagen se aprecia la punta de la militermocupla dentro de la gota de agua en este caso. En la misma figura se aprecia en la parte inferior izquierda el tiempo de secado en segundos para el que se presenta la foto.



Figura 4-6.: Cambio de tamaño y forma de una gota de agua registrado por cámara de video durante el secado. El volumen inicial de la gota de agua es de $1 \mu\text{l}$, la velocidad del aire es $0,05 \text{ m/s}$ y la temperatura de 355 K . En cada imagen se indica el tiempo en segundos.

4.2.3. Pruebas de operación del secador por filamento de vidrio

Las pruebas de verificación del secador de gota se realizan utilizando gotas de agua destilada. Se compara el cambio de masa y temperatura de la gota con un modelo teórico de secado de gota descrito por Walton [107, 4]. El modelo teórico de evaporación de agua se basa en balances de masa y energía descritos en la sección 3.2. La Figura 4-7 muestra el cambio de masa de una gota de volumen inicial $2 \mu\text{l}$ (a) y $3 \mu\text{l}$ (b). En la misma figura se superponen los datos obtenidos en el secador experimental con el modelo de secado teórico. Las curvas experimentales mostradas en esta figura no se normalizan con el propósito de presentar las gráficas tal y como se obtienen del experimento, las gráficas de análisis se presentan normalizadas más adelante.

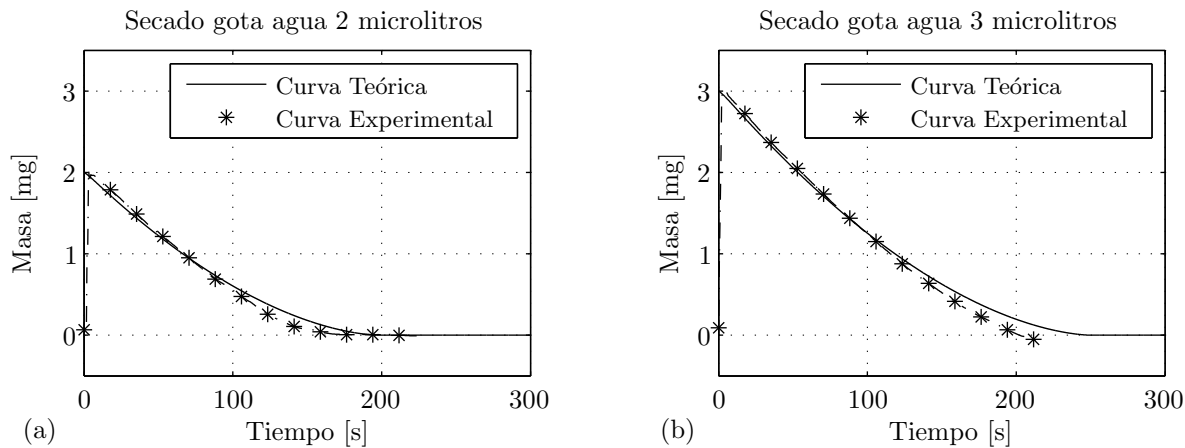


Figura 4-7.: Cambio de masa de gota de agua durante secado ($v_g=0,50 \text{ m/s}$, $T_g=355 \text{ K}$) y comparación de modelo teórico con datos experimentales. (a) Gota volumen inicial $2 \mu\text{l}$. (b) Volumen gota inicial $3 \mu\text{l}$.

En el experimento de medición de la temperatura de la gota se ubican dos termocuplas en la misma posición del secador: una para medir la temperatura de la gota como muestra la Figura 4-5 (*termocupla de gota*) y otra para medir la temperatura del aire (*termocupla de aire*). La *termocupla de gota* registra la temperatura del aire cuando no se encuentra gota en la termocupla. Es decir, ambas termocuplas registran la misma temperatura cuando no hay gota. El valor registrado por la *termocupla de gota* se reduce hasta cierto valor cuando se ubica una gota en la termocupla. En el caso de ubicar una gota de agua, la gota se evapora totalmente y allí la *termocupla de gota* registra de nuevo la temperatura del aire. Este fenómeno se aprecia dos veces en la Figura 4-8 (a), donde se presenta la temperatura del aire y de una gota de agua de $3 \mu\text{l}$ de volumen inicial.

La Figura 4-8 (b) muestra, para el mismo periodo de tiempo, los dos experimentos de la Figura 4-8 (a). En la misma figura se muestra la temperatura obtenida del modelo teórico de secado de gota descrito por las ecuaciones 3-21 y 3-15. La temperatura de gota de agua

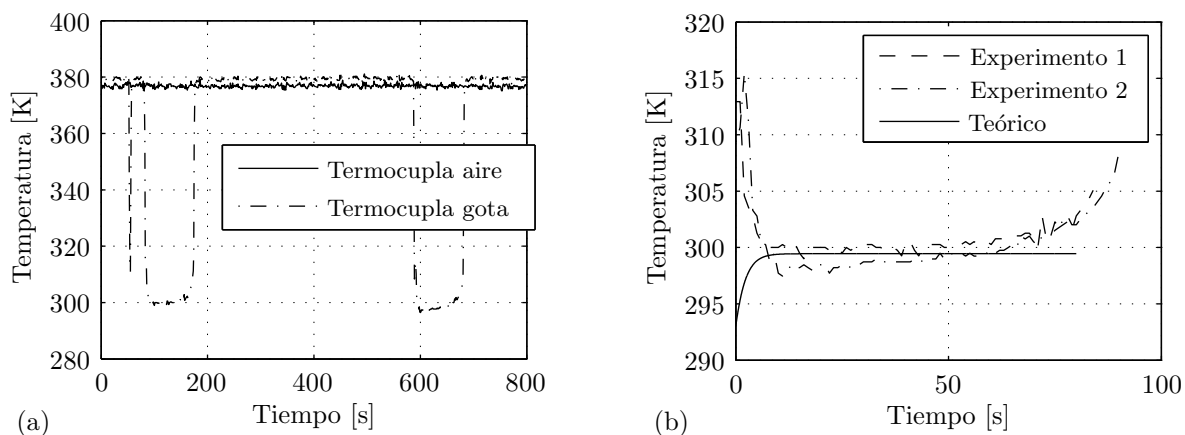


Figura 4-8.: Temperatura de aire y de gota de agua durante su evaporación. (a) Las dos termocuplas miden la temperatura del aire cuando no hay gota. En el momento de ubicar una gota de agua en la *termocupla de gota* esta registra su temperatura hasta que se evapora totalmente. En la figura se aprecian dos experimentos de evaporación de gota de agua. (b) Comparación de la temperatura experimental en la evaporación de agua y la obtenida con el modelo teórico.

teórica comienza a temperatura ambiente y llega a una temperatura de equilibrio, que en este caso, coincide con la temperatura experimental.

Las pruebas con agua y la comparación de los datos experimentales con modelos teóricos permiten concluir que el sistema de secado de gota por filamento de vidrio funciona adecuadamente. Esto gracias a que los datos obtenidos en el experimento son comparables a los obtenidos utilizando el modelo teórico de secado de gotas agua.

4.2.4. Experimentos con gotas de jugo modelo

Después de verificar el adecuado funcionamiento del equipo secador de gota por filamento de vidrio se procede a hacer los experimentos con el jugo modelo. Las pruebas se realizan con diferentes condiciones de velocidad y temperatura del aire de secado como se presenta en la Tabla 4-4. A partir del experimento base (1) se realizan modificaciones en la velocidad y temperatura del aire de secado. Para cada experimento se utilizan tres tamaños iniciales de gota (1, 2 y 3 μl). Cada experimento se realiza por triplicado, eso quiere decir que se realizan en total 45 pruebas. Además, para cada prueba se secan tres gotas de agua bajo las mismas condiciones de secado del jugo, esto con el fin de verificar en cada caso las condiciones del proceso y el modelo de secado.

La Figura 4-9 presenta como ejemplo el procesamiento que se realiza para cada experimento. En el Anexo A.1 se presentan los resultados obtenidos para los demás experimentos. La

Tabla 4-4.: Plan experimental para analizar el secado de gotas de jugo modelo con diferentes condiciones de velocidad y temperatura del aire.

Experimento	1	2	3	4	5
Velocidad del aire [m/s]	0,75	0,75	0,75	0,50	1,00
Temperatura del aire [K]	370	350	390	370	370

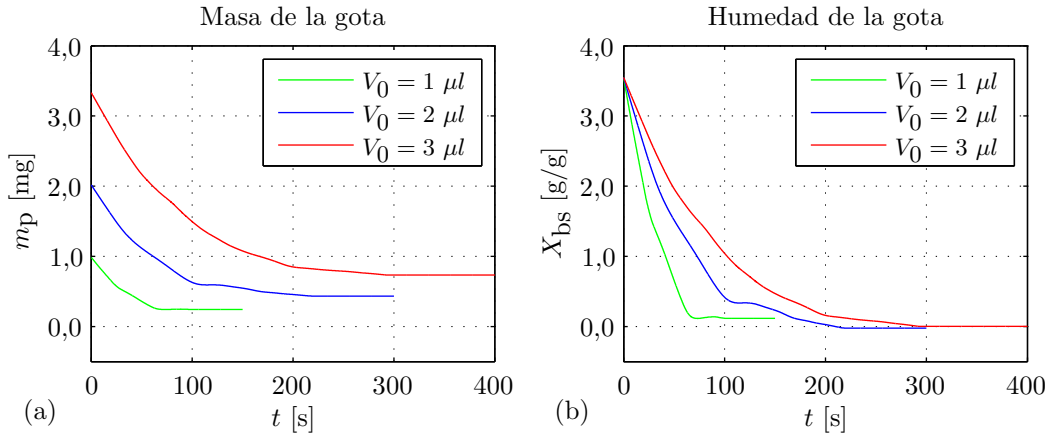


Figura 4-9.: Procesamiento de los datos experimentales para el experimento 4 ($v_g=0,50$ m/s y $T_g=370$ K), se presentan los resultados para cada volumen inicial de gota (V_0). (a) masa de la gota en el tiempo y (b) humedad de la gota en el tiempo.

gráfica (a) muestra el cambio de masa en el tiempo para cada volumen inicial de gota. Estas curvas se obtienen al filtrar y promediar los tres experimentos para cada volumen inicial. La gráfica (b) describe el cambio de humedad en base seca en función del tiempo. La humedad en base seca ($X_{bs} = m_w/m_{ms}$) se calcula a partir de la proporción de componentes sólidos descritos en la Tabla 4-1 (m_{ms}) y la masa de agua (m_w). La masa de sólidos se mantiene constante, mientras que la masa de agua se calcula a partir de la pérdida de masa de la partícula de la gráfica (a).

La Figura 4-10 compara para la gota de $3 \mu\text{l}$, bajo la misma velocidad del aire ($v_g=0,75$ m/s), el efecto de la temperatura del aire. Las gráficas de comparación para las gotas de 1 y $2 \mu\text{l}$ se presentan en el Anexo A.2. En la gota de $3 \mu\text{l}$ (figura 4-10) no se aprecia diferencia en el comportamiento de secado para diferentes temperaturas. En la gota de $2 \mu\text{l}$ (Anexo A.2) la diferencia es pequeña en la curva de masa para $T_g = 350$ K y también en la curva de humedad para $T_g = 390$ K. Para el secado de gota de $1 \mu\text{l}$ se aprecia una diferencia en la curva de masa y humedad con $T_g = 390$ K.

La Figura 4-11 compara para la gota de $3 \mu\text{l}$, bajo la misma temperatura del aire ($T_g=370$ K), el efecto de la velocidad del aire. Las gráficas de comparación para las gotas de 1 y $2 \mu\text{l}$ se

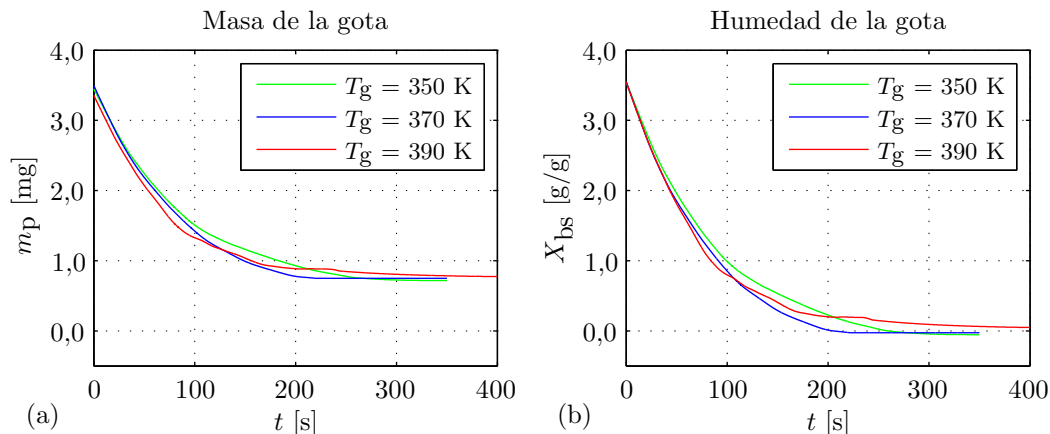


Figura 4-10.: Comparación de los experimentos 1, 2 y 3, velocidad constante ($v_g=0,75$ m/s) y cambio de temperatura del aire (T_g), para la gota $V_0 = 3 \mu\text{l}$. (a) comparación del cambio de masa y (b) comparación del cambio de humedad, ambas en función del tiempo.

presentan también en el Anexo A.3. En la curva de masa de 2 y $3 \mu\text{l}$ (figura 4-11 y Anexo A.3) se aprecia una pequeña diferencia debida a que no poseen exactamente la misma masa inicial, pero esta diferencia no se evidencia en la curva de humedad respectiva. De estas figuras se puede asumir que, para el mismo volumen inicial, el efecto de la velocidad del aire es muy pequeño en el rango analizado.

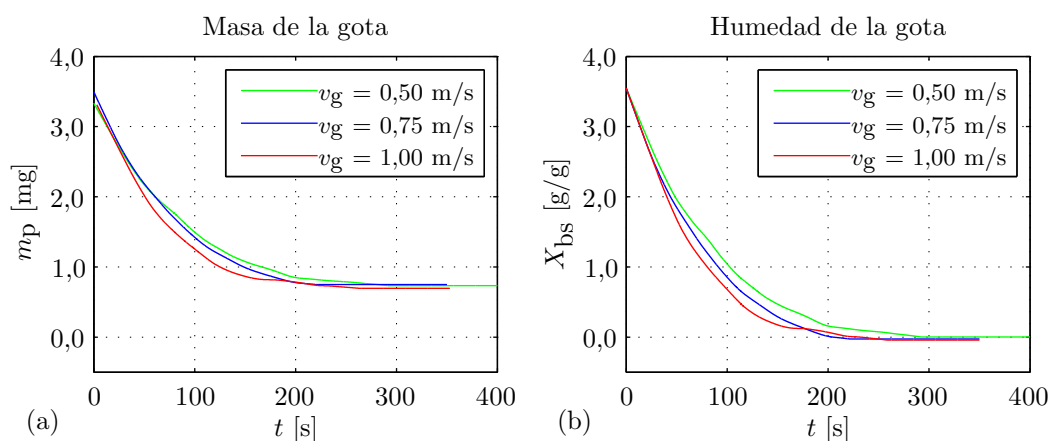


Figura 4-11.: Comparación de los experimentos 1, 4 y 5, temperatura constante ($T_g=370$ K) y cambio de velocidad del aire (v_g), para la gota $V_0 = 3 \mu\text{l}$. (a) comparación del cambio de masa y (b) comparación del cambio de humedad, ambas en función del tiempo.

De las Figuras 4-10 y 4-11, así como las presentadas en el Anexo A.2 y A.3, se puede

concluir que para cada volumen inicial se identifican dinámicas de secado muy similares. Lo que permite indicar que, para las condiciones analizadas en estos experimentos, el efecto de la velocidad y temperatura del aire en el comportamiento de secado de la gota es muy pequeño. En la siguiente sección, donde se describe el ajuste al modelo de secado, se presenta un análisis cuantitativo del comportamiento de secado para las condiciones analizadas en estos experimentos. De las figuras que muestran la humedad de la gota se aprecia que la humedad final es cercana a cero, y por lo tanto se puede asumir que la humedad de equilibrio para los experimentos es $X_{eq} = 0$.

Las Figuras 4-12, 4-13 y 4-14 muestran el proceso de secado para varias gotas del jugo modelo de guayaba. Para cada foto se incluye el tiempo de secado en segundos. La primera imagen en cada figura muestra el filamento de vidrio utilizado. De la Figura 4-12 se aprecia que para la gota de $1 \mu\text{l}$, la cabeza del filamento de vidrio tiene aproximadamente el mismo diámetro que la gota de jugo. De esta misma figura se nota que durante el secado la gota va recubriendo el filamento y por lo tanto no se obtiene una partícula definida.

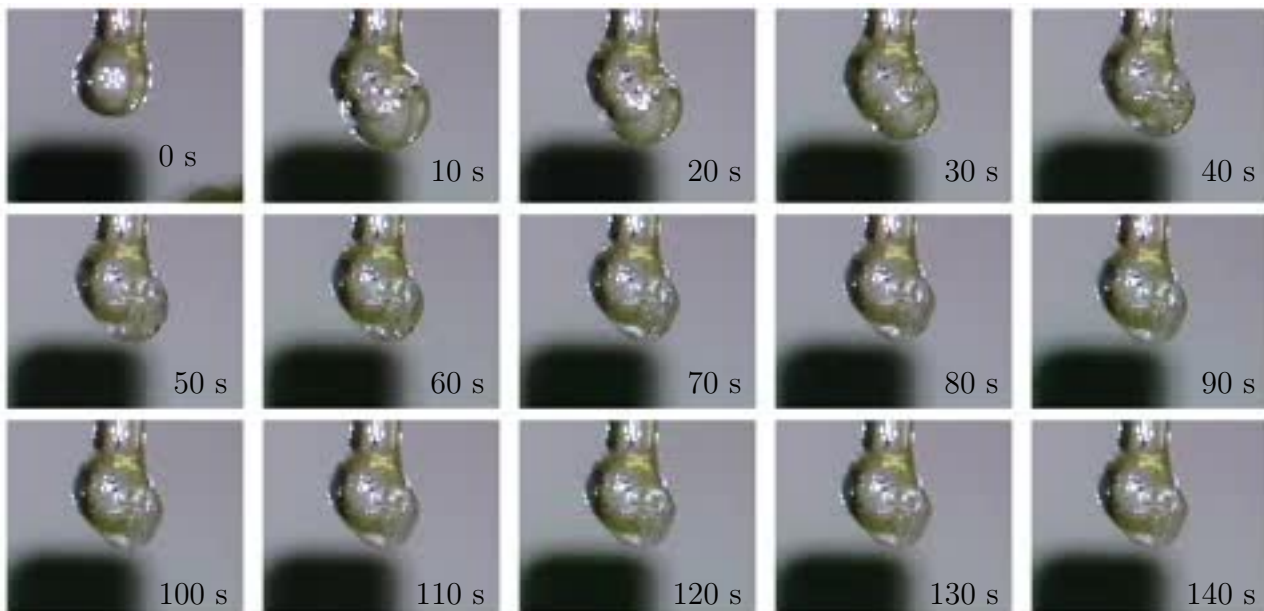


Figura 4-12.: Cambio de tamaño y forma de la gota de jugo durante secado. Experimento 1 ($v_g=0,50 \text{ m/s}$, $T_g=370 \text{ K}$) con $V_0 = 1 \mu\text{l}$. En cada imagen se muestra el tiempo de secado en segundos.

De las Figuras 4-13 y 4-14 se aprecia cómo inicialmente se presenta un encogimiento uniforme de la gota. Luego la gota pierde su forma al recogerse uno de sus costados. De las imágenes también se puede concluir que el filamento en que se sostiene la gota, impide la deformación uniforme de la gota.

Utilizando procesamiento digital de imágenes se mide el cambio de tamaño de las gotas

durante el secado. Se encuentra que la resolución del video y la interferencia del filamento no permiten generar un perfil de tamaño que aporte información valiosa. La deformación de la gota, como se aprecia en las Figuras 4-13 y 4-14, también impide realizar un análisis cuantitativo del tamaño de gota.

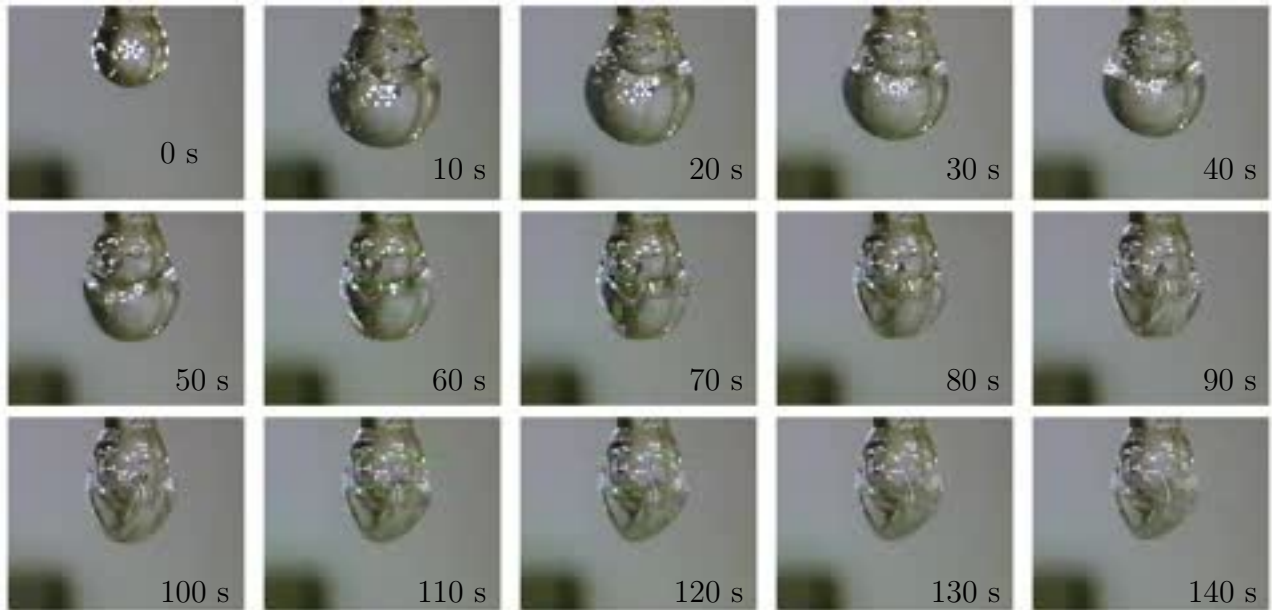


Figura 4-13.: Cambio de tamaño y forma de la gota de jugo durante secado. Experimento 1 ($v_g=0,50$ m/s, $T_g=370$ K) con $V_0 = 2 \mu\text{l}$. En cada imagen se muestra el tiempo de secado en segundos.

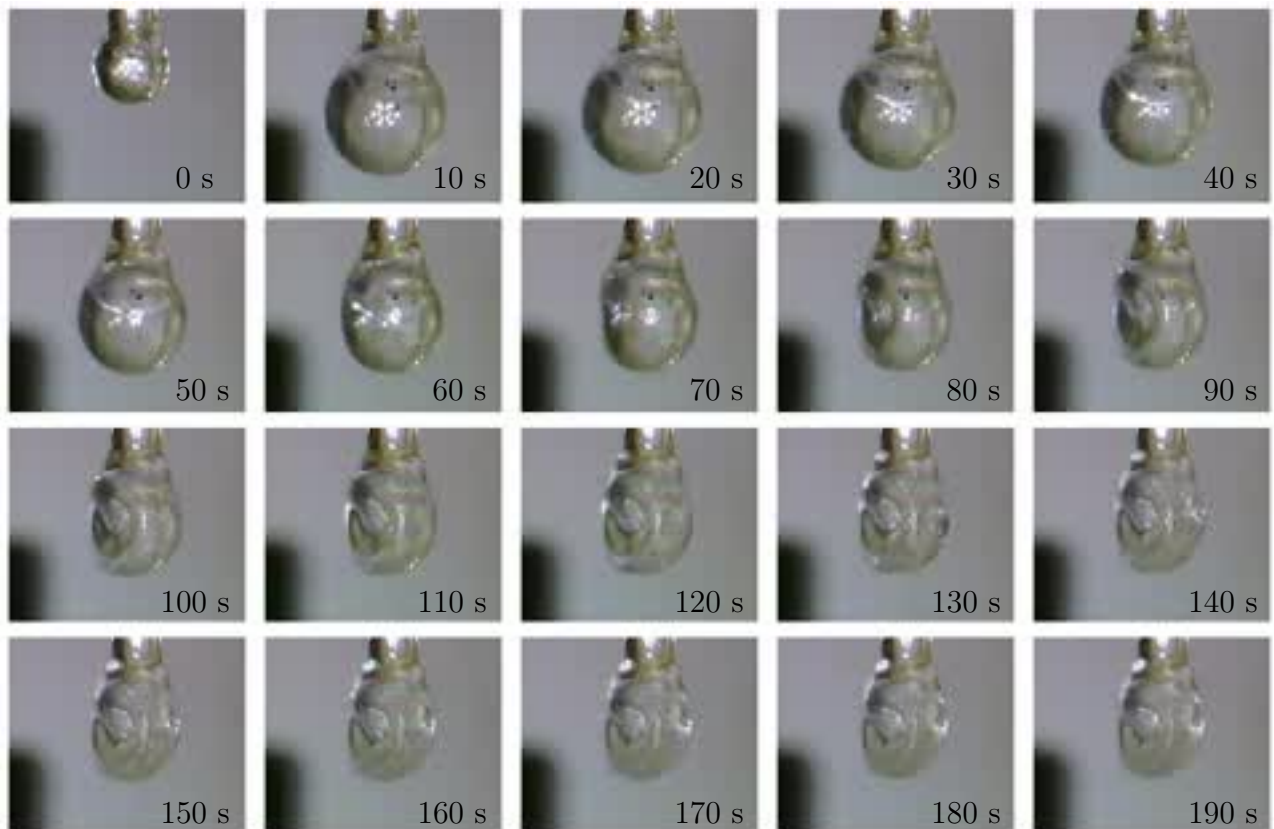


Figura 4-14.: Cambio de tamaño y forma de la gota de jugo durante secado. Experimento 1 ($v_g=0,50$ m/s, $T_g=370$ K) con $V_0 = 3 \mu\text{l}$. En cada imagen se muestra el tiempo de secado en segundos.

4.3. Definición del modelo de secado de jugo modelo

A partir de los resultados experimentales se calcula el valor de humedad crítica (X_{cr}) y la forma adecuada para f de la ecuación 3-26. La Figura 4-15(a) presenta la velocidad experimental de secado, bajo las mismas condiciones, para una gota de jugo (N_p) y una gota de agua (N_d). La velocidad de secado (N) se calcula a partir del cambio de masa respecto al tiempo por medio de la relación $\Delta m/\Delta t$. De esta gráfica se obtiene el tiempo en que la velocidad de secado de la gota de jugo es diferente a la velocidad de secado de la gota de agua, lo que indica el inicio de la segunda etapa del proceso de secado. La Figura 4-15 (b) presenta la humedad de la gota de jugo y por medio de esta se define la humedad crítica (X_{cr}) con el tiempo obtenido en la figura (a).

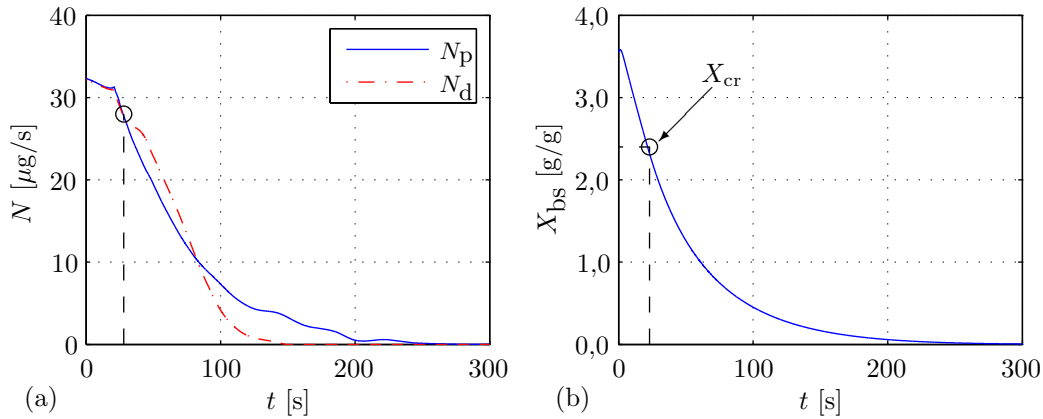


Figura 4-15.: Análisis para obtener humedad crítica X_{cr} del experimento 1 ($v_g=0,75$ m/s, $T_g=370$ K y $V_0=2$ μl). (a) velocidad de secado N para la gota de agua N_d y el jugo N_p , donde se identifica el punto en que la velocidad de secado de la gota de jugo es diferente a la del agua. (b) humedad X de la gota en la misma escala de tiempo para identificar la humedad crítica X_{cr} .

La curva característica de secado se basa en la Figura 3-2 la cual se calcula como la relación normalizada entre la velocidad de secado del jugo (N_p) y la velocidad de secado sin restricción (N_d), como se muestra en la Figura 4-16 (a). La velocidad de secado sin restricción (N_d) se obtiene del secado experimental de una gota de agua bajo las mismas condiciones del proceso. La Figura 4-16 (b) presenta la curva característica de secado (CDC) experimental a partir de la humedad crítica (X_{cr}) y la humedad de equilibrio (X_{eq}), que se asume igual a cero basado en los resultados obtenidos previamente. La humedad crítica también se puede encontrar en la Figura 4-16 (b), donde se aprecia un comportamiento constante en los valores mayores a 1 de la abscisa $(X - X_{eq})/(X_{cr} - X_{eq})$, comportamiento descrito en la Figura 3-2.

A partir de la Figura 4-16 (b) se aplica la relación descrita por la curva característica de

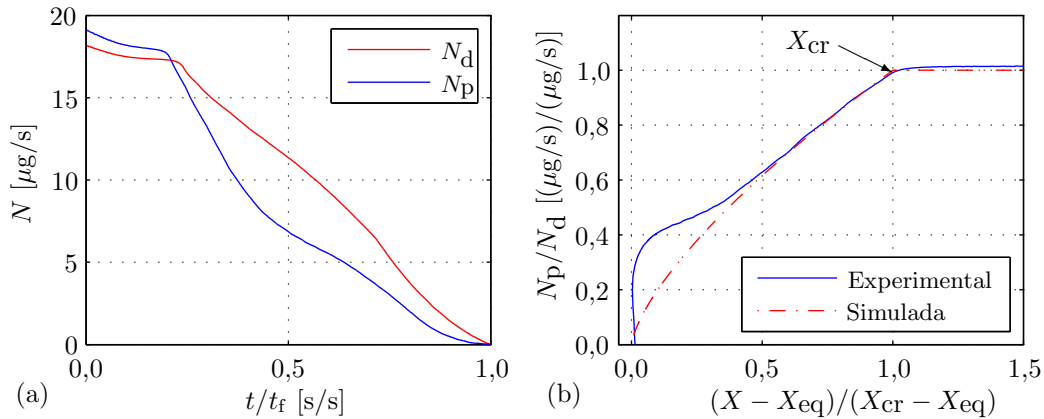


Figura 4-16.: Análisis de curva característica de secado (CDC) para el experimento 2 ($v_g=0,75$ m/s, $T_g=350$ K y $V_0=1$ μl). (a) velocidad de secado normalizada N para la gota de agua N_d y el jugo N_p y (b) comparación de curva característica experimental y simulada.

secado (CDC) por medio de la ecuación

$$\frac{N_p}{N_d} = \left[\frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}} \right]^n, \quad (4-1)$$

donde sólo es necesario definir el valor de la constante n . Para obtener este valor se utiliza la curva de pérdida de masa experimental, como la mostrada en la Figura 4-9 (a), y un algoritmo de optimización que minimiza el error entre los datos experimentales y el modelo para encontrar el valor adecuado de n de la ecuación 4-1. Este procedimiento se realiza para cada experimento y para cada volumen inicial de gota. La Figura 4-16 (b) compara la curva característica de secado experimental y la obtenida por medio de simulación.

La Figura 4-17 presenta la humedad crítica (X_{cr}) y el valor de ajuste experimental a la ecuación CDC (n) obtenidos para cada uno de los experimentos. Se encuentra para cada caso que el valor de X_{cr} y n se reduce con el tamaño inicial de la gota. De la misma figura se encuentra que, para el mismo tamaño inicial de gota, las condiciones del proceso de secado (X_{cr} y n) no cambian de forma significativa. Es decir, al cambiar la temperatura o velocidad del aire no se presenta diferencia relevante en X_{cr} o n , utilizando el mismo volumen inicial de la gota. Por lo tanto, se concluye que, para los experimentos realizados, las condiciones del modelo CDC (X_{cr} y n) sólo se ven afectadas por el tamaño inicial de la gota.

Aún así, es de esperar que al reducir el tamaño inicial de la gota se alcance más rápido la humedad crítica, es decir, más cercana a la humedad inicial. Esto debido a que la difusión de temperatura y humedad se realiza en menor tiempo, lo que genera una rápida formación de la corteza superficial. Es así como se asume que, para las gotas más pequeñas, la humedad

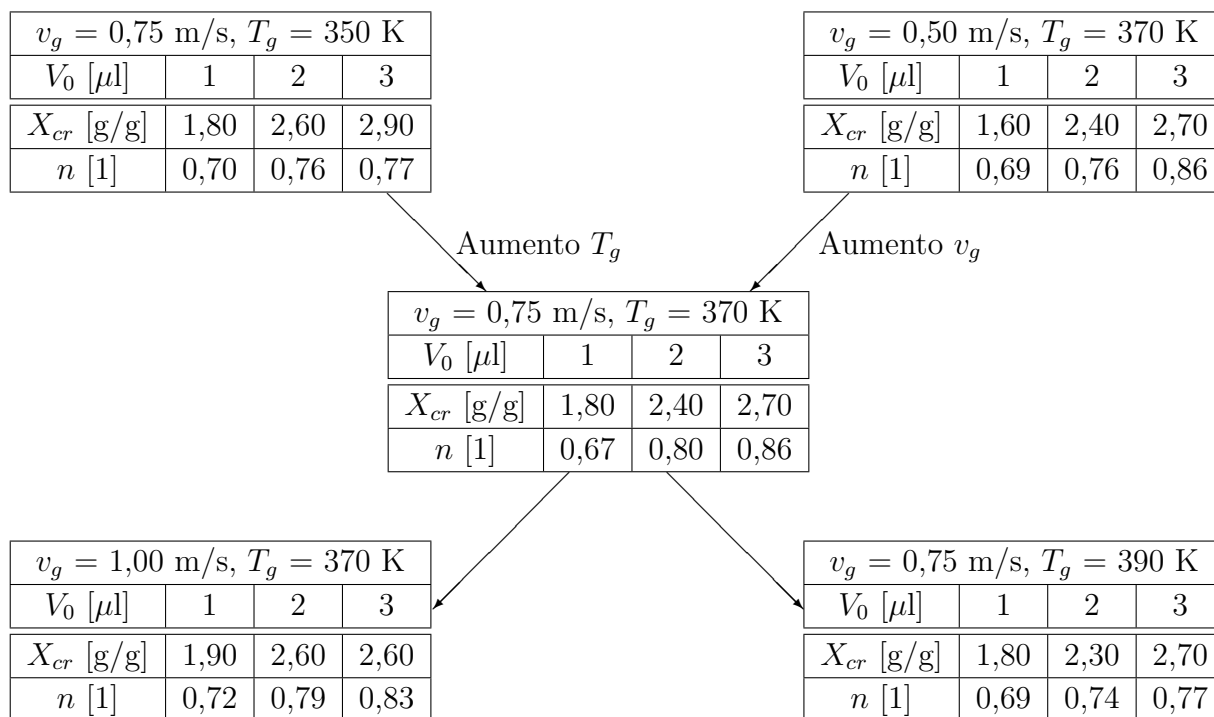


Figura 4-17.: Diagrama de resultados del secado de gotas de jugo modelo de guayaba. Se presentan los 5 experimentos y las condiciones de cada uno (v_g velocidad y T_g temperatura del aire) para cada volumen inicial de gota (V_0). Se presenta la humedad crítica obtenida (X_{cr}) y el parámetro experimental de ajuste n al modelo CDC.

crítica se logra muy rápido y por lo tanto cercana a la humedad inicial. Adicionalmente, este comportamiento es el esperado por el aumento de la masa molecular debido a la maltodextrina. Este fenómeno ha sido descrito por Woo et al. [109], Langrish y Kockel [62], así como Fhyr y Kemp [25].

Por lo tanto, la reducción de la humedad crítica al reducir el tamaño inicial de la gota puede ser debido a tres razones. Primero, a que el cambio de masa de las gotas pequeñas es reducido comparado con el ruido que se genera en la adquisición de la señal, por lo tanto no se puede apreciar la dinámica de secado de forma tan clara como al utilizar gotas de tamaño inicial mayor. Segundo, que las gotas de 1μ l son más difíciles de ubicar y por lo tanto se está perdiendo cierto tiempo de la dinámica de secado. Por último, debido a que en muchos de los experimentos la gota de 1μ l no se sostiene en el filamento, sino que por el efecto de capilaridad recubre el filamento de vidrio, como se aprecia en la Figura 4-12. Las razones descritas indican que la reducción de la humedad crítica con la reducción del tamaño inicial es debido a las condiciones del experimento.

Las Figuras 4-18 y 4-19 presentan un análisis de sensibilidad para n y X_{cr} , respectivamente. Se comparan los valores obtenidos en la Figura 4-17 en la respuesta de secado para la masa de la gota (a) y la curva característica de secado (b). De la Figura 4-18 se aprecia que al reducir el valor de n se obtiene una respuesta de secado levemente más rápida, y más cóncava para la curva característica de secado. En el caso de cambio de la humedad crítica X_{cr} , como muestra la Figura 4-19, se aprecia que al reducirla se obtiene también una respuesta de secado un poco más rápida. En ambos casos se encuentra que el efecto de X_{cr} y n es pequeño para los valores obtenidos en la Figura 4-17.

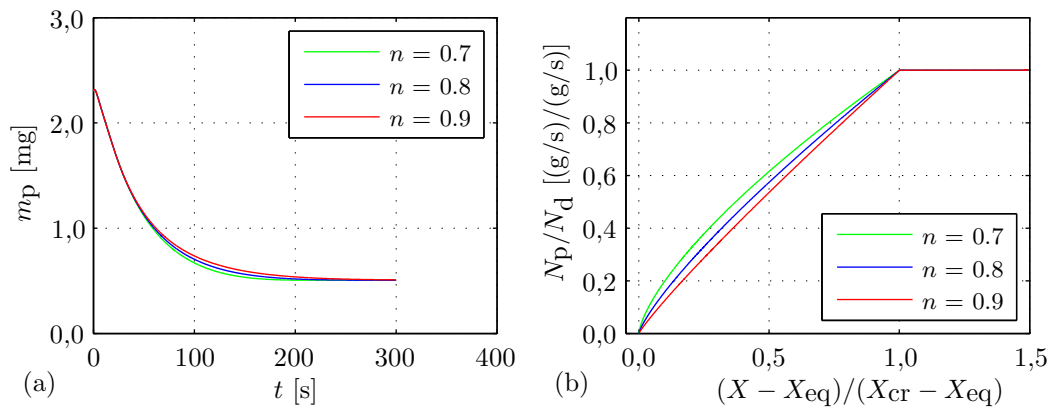


Figura 4-18.: Análisis de sensibilidad del parámetro de ajuste n para la simulación del experimento 1 ($v_g=0,75$ m/s, $T_g=370$ K y $V_0 = 2 \mu\text{l}$) con $X_{cr} = 2,40$. (a) masa de la gota en el tiempo , (b) curva característica de secado (CDC).

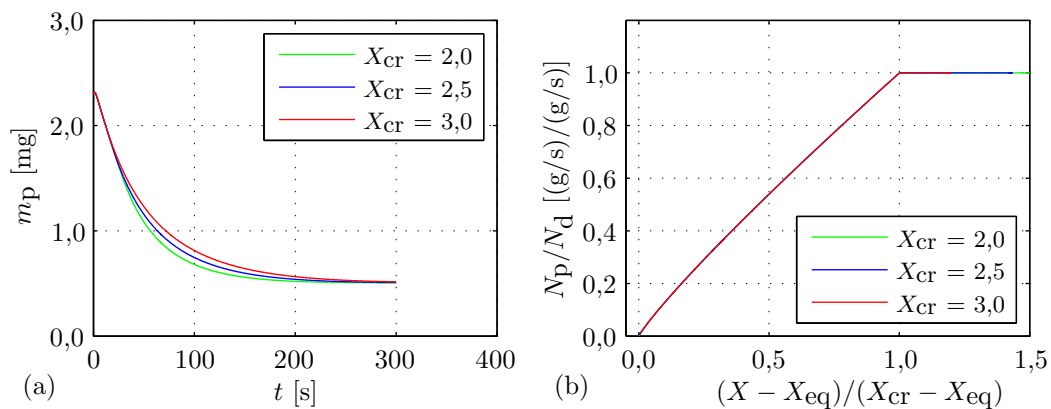


Figura 4-19.: Análisis de sensibilidad de la humedad crítica X_{cr} para la simulación del experimento 1 ($v_g=0,75$ m/s, $T_g=370$ K y $V_0 = 2 \mu\text{l}$) con $n = 0,8$. (a) masa de la gota en el tiempo , (b) curva característica de secado (CDC).

De la Figura 4-17 y del análisis presentado se decide utilizar un único valor de n que corresponde al obtenido con las gotas más pequeñas, es decir $n = 0,70$. Se asume que la reducción de la humedad crítica con el tamaño de la gota es debido a las condiciones específicas del experimento y por lo tanto se decide asumir la humedad crítica igual a la humedad inicial ($X_{cr} = X_0$). En resumen, la ecuación

$$f = \frac{N_p}{N_d} = \left[\frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}} \right]^n = \left[\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \right]^{0,7}, \quad (4-2)$$

se utiliza para simular el comportamiento de secado de las gotas de jugo modelo de guayaba en el secador por aspersión.

La Figura 4-20 muestra un ejemplo de la comparación entre los datos experimentales y la respuesta del modelo obtenido con la ecuación 4-2 bajo las mismas condiciones de secado. De las gráficas se puede observar un buen ajuste entre los datos experimentales y el modelo propuesto para diferentes condiciones de secado.

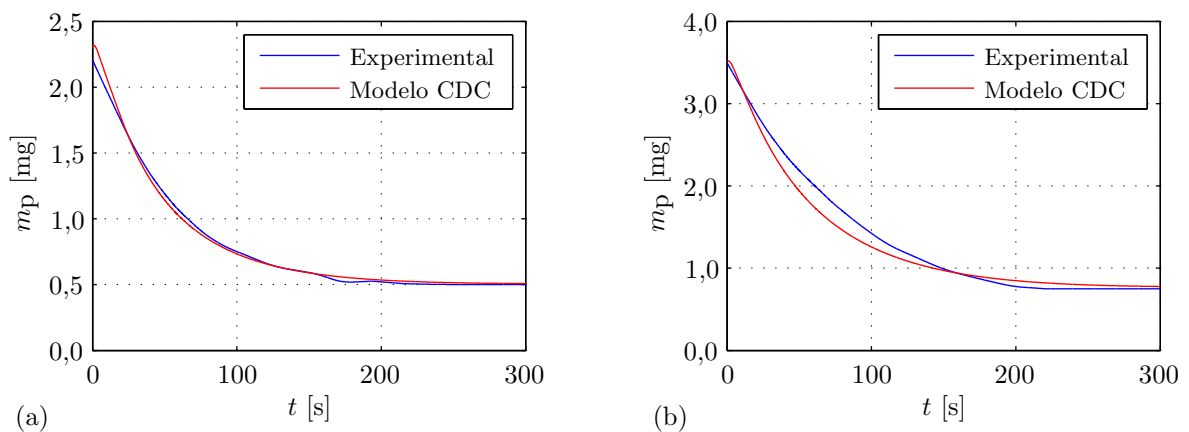


Figura 4-20.: Ejemplo de comparación de los datos experimentales con el modelo CDC para gotas de jugo modelo de guayaba. Experimento 1 ($v_g=0,75$ m/s, $T_g=370$ K). (a) Volumen inicial de gota $V_0 = 2 \mu\text{l}$, (b) Volumen de inicial de gota $V_0=3 \mu\text{l}$.

Con el modelo de gota obtenido se pasa a utilizarlo en el secador por aspersión. Este modelo se aplica a cada una de las gotas inyectadas en el secador para analizar el comportamiento de humedad de las partículas.

4.4. Aplicación del modelo de secado de gota

El análisis de secado de gotas individuales de jugo modelo se realiza con el propósito de definir un modelo de secado que pueda ser implementado en la simulación del secador por aspersión. A pesar de que el secador de gota por filamento de vidrio permite analizar el

cambio de masa de las gotas de jugo modelo durante el secado, las diferencias con el proceso de secado por aspersión hacen necesario analizar las condiciones de aplicación del modelo de secado y sus limitaciones. Estas condiciones se analizan a continuación:

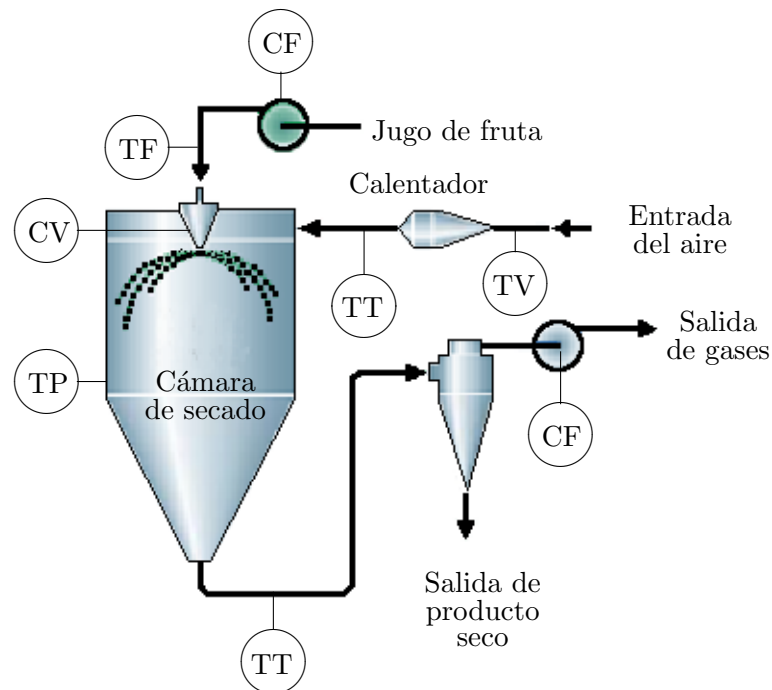
- Diferencia en la velocidad del aire de secado. La velocidad del aire en el secador por aspersión llega a máximo 25 m/s, mientras que en el secador de gota por filamento de vidrio se utilizan velocidades del aire de 0,50, 0,75 y 1,00 m/s. Se espera que el modelo de secado de gotas obtenido sea aplicable en el secador por aspersión gracias a dos consideraciones: la primera, que a pesar de la alta velocidad del aire en el secador por aspersión, se debe tener en cuenta que la velocidad que influye es la velocidad relativa entre el aire y las partículas. Debido a que el secador es del tipo co-corriente, se asume que esta diferencia de velocidad es pequeña y que las velocidades de secado son cercanas a las utilizadas en el secador por filamento del vidrio. La segunda consideración parte de la Figura 4-11, donde se aprecia que para el rango de velocidad analizada se encuentra una pequeña diferencia en el comportamiento de secado de las partículas.
- Diferencia de la temperatura del aire de secado. La temperatura del aire en el secador por aspersión llega máximo a 473 K, mientras que en el secador de gota por filamento se llega a la temperatura del aire de 390 K. De la Figura 4-17 se aprecia que el comportamiento de secado de las gotas no se afecta debido al cambio de temperatura del aire en el rango de temperatura analizado. Es por esto que se asume que no hay efecto de la temperatura del aire en el secador por aspersión.
- Diferencias en el tamaño de las gotas. Se estima que las gotas que se inyectan al secador por aspersión tienen un diámetro medio de 0,1 mm, mientras que los diámetros en el secador de gota son de 0,6, 1,2 y 1,9 mm para las gotas de 1, 2 y 3 μl , respectivamente. Del análisis realizado se encuentra que el tamaño de las gotas afecta principalmente la humedad crítica y el factor n . Del análisis realizado se decide utilizar el valor más pequeño de n y la humedad crítica igual a la humedad inicial.

El modelo de secado de gota descrito por la ecuación 4-2 se implementa en el modelo de simulación del secador presentado en el Capítulo 6.

Con el estudio en detalle de las gotas de jugo como materia prima, se pasa a analizar el secador como equipo. En el siguiente capítulo se analiza experimentalmente las condiciones de operación del secador por aspersión. Se describen los perfiles experimentales del aire, tanto de velocidad, como temperatura y humedad.

5. Sección experimental en el secador por aspersión

En este capítulo se analiza experimentalmente el efecto de diferentes condiciones de operación del proceso de secado con los perfiles de flujo de aire y las características de calidad del producto. Para realizar estos experimentos se utiliza un secador por aspersión de laboratorio ubicado en la Universidad del Valle - Cali que se muestra en la Figura 5-1 y el jugo modelo de guayaba descrito en la sección 4.1.



TT: Transductor de temperatura TP: Transductor de presión
TF: Transductor de flujo CF: Control de flujo
TV: Transductor de velocidad CV: Control de velocidad

Figura 5-1.: Representación esquemática del secador por aspersión de la Universidad del Valle. Se presenta en el diagrama los sensores básicos y variables de control.

Con el fin de especificar los perfiles de flujo en la cámara del secador se diseñan y realizan diversos experimentos que permiten medir la velocidad, temperatura y humedad del aire

en la cámara de secado. Experimentalmente también se caracteriza la calidad del producto definida por la humedad, densidad y tamaño de las partículas para diferentes condiciones de operación del proceso.

Inicialmente se describe el secador por aspersión, luego se presenta el análisis del flujo de aire, de humedad y temperatura en el interior de la cámara de secado bajo diferentes condiciones de operación. Por último se presentan los resultados del análisis de calidad del producto con la variación de las condiciones de operación del proceso.

5.1. Descripción del secador



Figura 5-2.: Secador por aspersión con capacidad de evaporación de 10 kg/h de agua del *laboratorio de operaciones unitarias de tecnología e ingeniería de alimentos* de la Universidad del Valle, Cali - Colombia.

Para la fase experimental se utiliza el secador por aspersión del *laboratorio de operaciones unitarias de tecnología e ingeniería de alimentos* de la Universidad del Valle - Cali. El secador tiene una capacidad de evaporación de 10 kg/h de agua y su esquema de funcionamiento se presenta en la Figura 5-1 y el equipo se puede apreciar en la Figura 5-2. La forma como accede el aire a la cámara de secado y el atomizador de disco se muestran en la Figura 5-3.

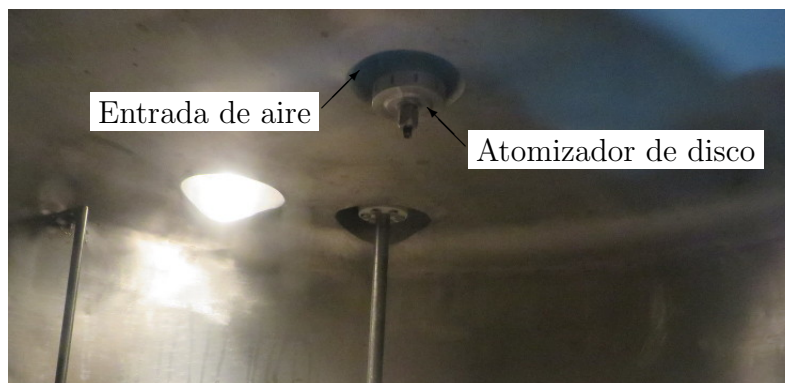


Figura 5-3.: Entrada de aire a la cámara de secado y atomizador de disco del secador por aspersion.

El secador es de tipo co-corriente, es decir, que tanto la gotas como el aire ingresan y viajan en la misma dirección desde la parte superior. Las partículas secas y el aire húmedo salen del secador por la parte inferior del mismo. El atomizador es de tipo disco rotatorio que gira gracias a un motor eléctrico. El equipo trabaja con presión manométrica negativa debido a que el ventilador se encuentra ubicado a la salida del mismo. Está construido totalmente en acero inoxidable y cuenta con los dispositivos, sensores y controladores necesarios para especificar las condiciones de operación del proceso: temperatura y flujo del aire de secado, flujo de líquido de materia prima y velocidad del atomizador rotatorio.

En la Figura 5-4 se presentan las principales dimensiones del secador por aspersion. En la misma figura se muestra un diagrama del detalle del atomizador y la forma como accede el aire a la cámara de secado. El equipo tiene posibilidad de manejar un rango de temperatura del aire en la entrada entre 353 K y 523 K, y flujo de aire entre 42 y 50 m³/h. Esto permite una capacidad de evaporación entre 10 y 25 kg/h de agua. La presión en el interior de la cámara de secado opera a una presión manométrica de -0,25 kPa.

5.2. Perfiles experimentales del aire

Para estudiar y comprender los fenómenos de flujo en la cámara del secador se miden los perfiles de velocidad, temperatura y humedad del aire. Los perfiles de velocidad se toman utilizando diferentes flujos de aire a la entrada pero a temperatura ambiente sin la inyección de ningún líquido. Los perfiles de temperatura y humedad se adquieren a diferentes temperaturas de aire y flujos de líquido, utilizando agua como líquido de inyección. Las razones para realizar los experimentos de esta forma se describen más adelante en esta misma sección. Se presenta a continuación el proceso de selección e instalación de los sensores necesarios para medir los perfiles de velocidad, temperatura y humedad del aire.

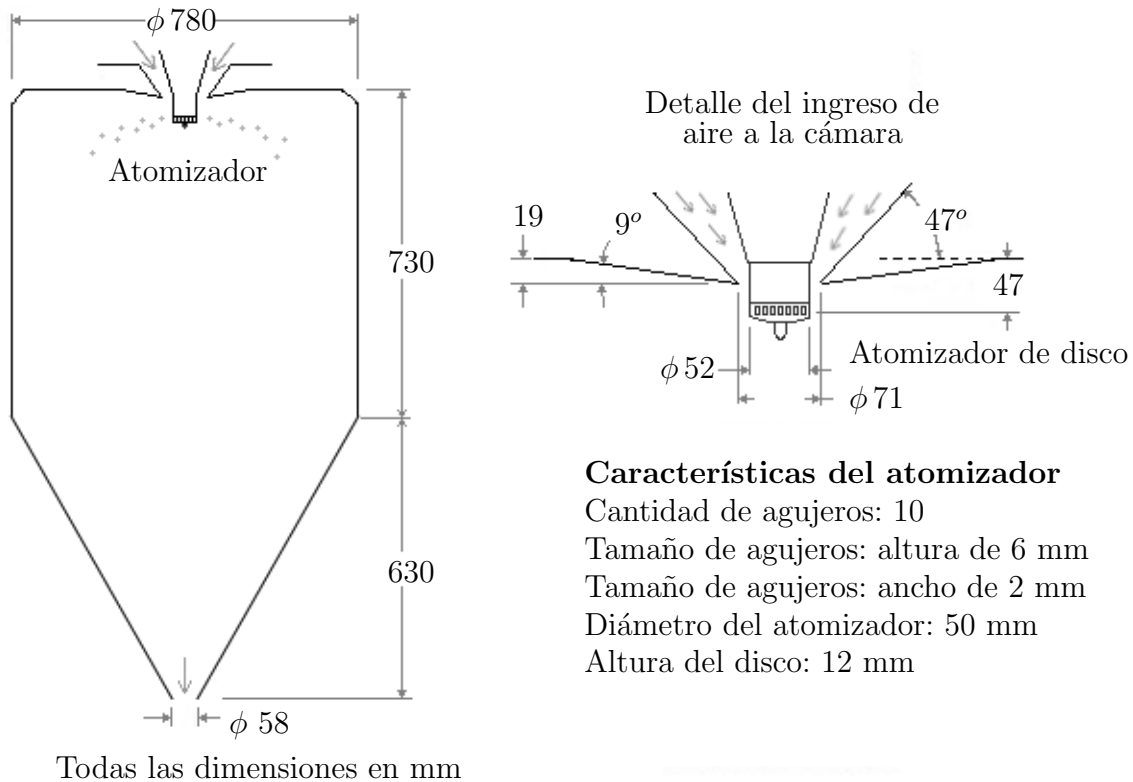


Figura 5-4.: Diagrama de las dimensiones generales del secador por aspersión de la Universidad del Valle. En la parte superior se encuentra el ingreso de aire y del atomizador de gotas. Al lado se presenta el detalle del ingreso del aire alrededor del atomizador de disco.

5.2.1. Selección e instalación de instrumentos

Basados en los reportes y artículos publicados por Kieviet [58], Southwell et al. [95], Huang et al. [46, 49] y otros [65, 112], se pueden estimar las condiciones medias del flujo al interior de la cámara de secado y sus características principales. Con esta información se definen los requerimientos de los sensores que se instalan en el secador por aspersión de planta piloto disponible.

La Tabla 5-1 muestra un resumen de los requerimientos definidos para el sensor de velocidad de aire. De acuerdo a las condiciones de operación se requiere un equipo de anemometría de hilo caliente que permita medir velocidades de aire entre los 0 y 20 m/s a una temperatura de aire de 323 K o superior. Dicho equipo deberá tener la capacidad de almacenar datos, preferiblemente en un medio fácilmente compatible con computador. La velocidad de adquisición de 1 dato por segundo es la más común en este tipo de equipos, y aunque es deseable trabajar con un equipo de mayor velocidad de adquisición, no es posible adquirir un dispositivo de mayores prestaciones debido al alto costo. Igualmente es deseable utilizar un sensor

de tipo multidireccional que permita adquirir las diferentes componentes de la velocidad de forma simultánea pero el costo de esta tecnología también impide su uso en este proyecto.

Tabla 5-1.: Descripción de los requerimientos a tener en cuenta para selección del sensor de velocidad de aire.

Criterio analizado	Condición necesaria o deseada	Descripción
Variable a medir	Velocidad del aire	Para describir el campo de velocidades del aire en la cámara de secado por aspersión
Rango de medición	Entre 0 y 20 m/s	Según investigaciones relacionadas y parámetros de funcionamiento del secador
Tipo o tecnología	Anemometría de hilo caliente	Usado ampliamente en investigaciones relacionadas. Menores costos de adquisición y de implementación que otras tecnologías como PIV (velocimetría de partículas) y sónico.
Velocidad de adquisición de datos	1 dato por segundo (preferiblemente mayor)	Es la velocidad más usada en este tipo de investigaciones. Es deseable contar con un equipo de mayor velocidad de adquisición.
Transmisión y almacenamiento de información	Preferible que guarde información de forma autónoma y que no necesite cables para descargar datos	Disminuir los tiempos de implementación y captura de datos de formas más confiable
Temperatura de trabajo (sonda)	323 K o mayor preferiblemente	Requerido para medir el campo de velocidad bajo diferentes condiciones de temperatura de operación.

La Tabla 5-2 muestra los requerimientos del sensor de temperatura y humedad para el aire en el interior de la cámara. Se recomienda el uso de un termohigrómetro que permita la medición simultánea de temperatura hasta 340 K y humedad cercana al 100 %. El sensor debe tener una sonda que sea fácilmente instalable en el secador por aspersión. La adquisición de datos debe ser automática, de fácil manipulación y envío al computador.

Tabla 5-2.: Descripción de los requerimientos a tener en cuenta para la selección del sensor de temperatura y humedad del aire.

Criterio analizado	Condición necesaria o deseada	Descripción
Variable a medir	Temperatura y humedad del aire	Para describir el campo de temperatura en la cámara de secado por aspersión
Rango de temperatura	293 a 393 K	Rango mínimo de medición de temperatura.
Rango de humedad	10 a 95 % HR.	Requerido para definir el campo de humedad en el interior del equipo
Velocidad de adquisición	2 datos por segundo, o mayor	Representa el tiempo estándar de respuesta en equipos de esta tecnología. Suficiente para realizar una descripción del campo de temperatura y humedad en la cámara de secado.
Transmisión y almacenamiento de información	Preferible que guarde información de forma autónoma y que no necesite cables para descargar datos	Disminuir los tiempos de implementación y captura de datos de forma más confiables

Basados en el análisis de requerimientos presentados se seleccionan los siguientes sensores:

- Anemómetro de hilo caliente:

Referencia	EXTECH SDL 350
Rango	0 a 25 m/s
Resolución	0,01 m/s
Precisión	+/- 5 % de lectura
Velocidad de adquisición	1 dato/s
Almacenamiento	Hasta 30.000 datos por memoria SD
Temperatura de trabajo	273 a 323 K

- Termo-higrómetro:

Referencia	VAISALA HM70 - Sonda HMP77
Rango de temperatura	203 K a 453 K
Precisión en temperatura	+/- 0,5 K
Rango de humedad	0 - 100 %
Precisión en humedad	(1,5 + 0,015 x lectura) % RH
Velocidad de adquisición	1 dato/s
Almacenamiento	Hasta 2.700 datos

Debido a las condiciones de operación del anemómetro de hilo caliente no se puede instalar en la cámara mientras se realiza la inyección de agua o algún producto pues la alta temperatura o el impacto de gotas y partículas pueden afectar el filamento del anemómetro. La sonda del termohigrómetro se puede dañar si ingresa algún tipo de sólido a la misma, por lo tanto no se puede instalar la sonda del termohigrómetro cuando se sequen productos con sólidos disueltos o en suspensión.

Por lo anterior se decide realizar primero una serie de experimentos introduciendo solamente aire para medir los perfiles de velocidad del aire utilizando el anemómetro de hilo caliente.

La primera serie de experimentos se realiza con aire a temperatura ambiente para medir los perfiles de velocidad. Se realiza con temperatura ambiente debido a que el fabricante recomienda no usar el equipo con aire caliente sin la inyección de líquido. La segunda serie se realiza con aire caliente e inyectando gotas de agua. De esta forma se miden los perfiles de temperatura y humedad instalando el termohigrómetro.

Instalación de los sensores en la cámara de secado

El montaje de los sensores permite ubicar la sonda de medición en diferentes puntos internos de la cámara de secado. Al tomar diferentes puntos de posición axial y radial, se puede definir una aproximación al campo de velocidad, humedad y temperatura del aire.

Con el montaje de los sensores se espera llegar mínimo a 6 posiciones axiales medidas desde la parte superior del secador y a 5 posiciones radiales medidas desde el centro del secador. En el diseño del sistema de montaje de los sensores se tienen en cuenta las siguientes condiciones:

- Evitar que el montaje del sensor afecte las condiciones normales del flujo.
- Permitir al menos dos grados de libertad en la ubicación de la sonda (axial y radial).
- Evitar modificaciones permanentes en la cámara de secado. Es decir, que el equipo funcione sin problema sin la instalación del sensor.
- Repetibilidad en la ubicación del sensor.

Se diseña y construye el sistema mostrado en la Figura 5-5. Este consta de un cilindro que se instala en la parte superior del secador. Por el cilindro se atraviesa un tubo de acero inoxidable en forma de L de 1/4" de diámetro. Por el interior del tubo, o sonda, se coloca el cable del sensor y en el extremo se fija el transductor del sensor.

La sonda se puede manipular desde la parte exterior superior del secador. Con dos grados de libertad, la sonda se desplaza de forma vertical para generar movimiento axial, y angularmente para generar un movimiento radial.

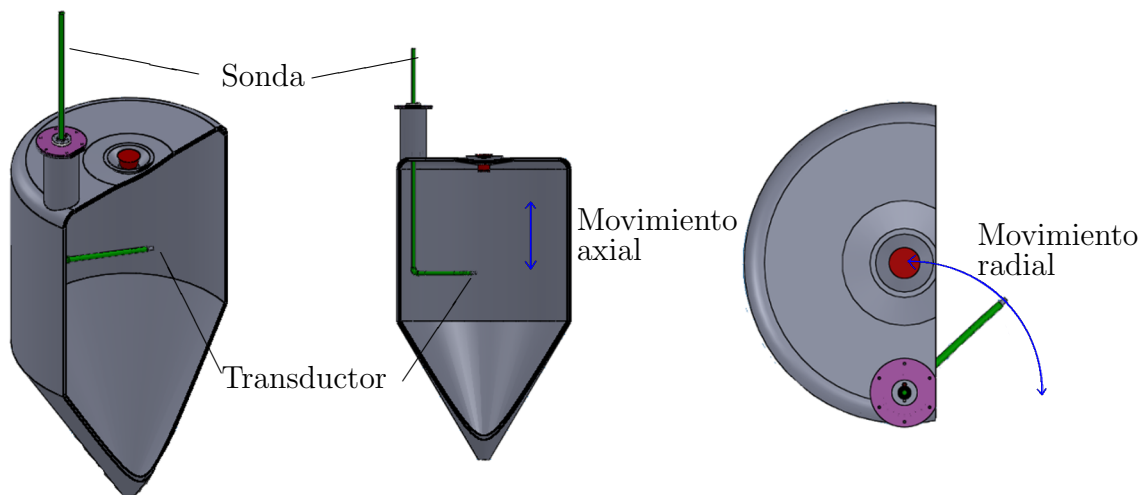


Figura 5-5.: Diagrama del montaje de sensor. Desde la parte superior del secador se puede manipular la *sonda* para ubicar el *transductor* en diferentes posiciones *axiales* o *radiales*.

La Figura 5-6 presenta dos fotos del montaje de la sonda. La primera muestra la parte interior del secador, donde se aprecia la sonda y el transductor, así como el atomizador y la entrada de aire a la cámara. La segunda foto muestra la parte exterior superior del secador, donde se aprecia el montaje utilizado para definir la posición axial y/o radial del transductor.

Con este montaje, el transductor del sensor de velocidad o del termohigrómetro, se puede ubicar en diferentes posiciones dentro del secador. La principal ventaja del sistema es que se puede modificar la posición desde la parte exterior del secador, lo que implica que no es necesario abrir o detener el secador para cambiar la ubicación del transductor.

Las mediciones de los perfiles de velocidad, temperatura y humedad se realizan en 9 posiciones axiales y 6 radiales. A cada plano axial se le denomina línea (que van del 1 al 9) y están medidos desde la parte superior del secador. A cada posición radial se le denomina punto y está medida de forma lineal desde el centro del secador. La Figura 5-7 (a) muestra la vista frontal del secador y algunos de los planos axiales (líneas 1, 3, 5, 7 y 9). La figura

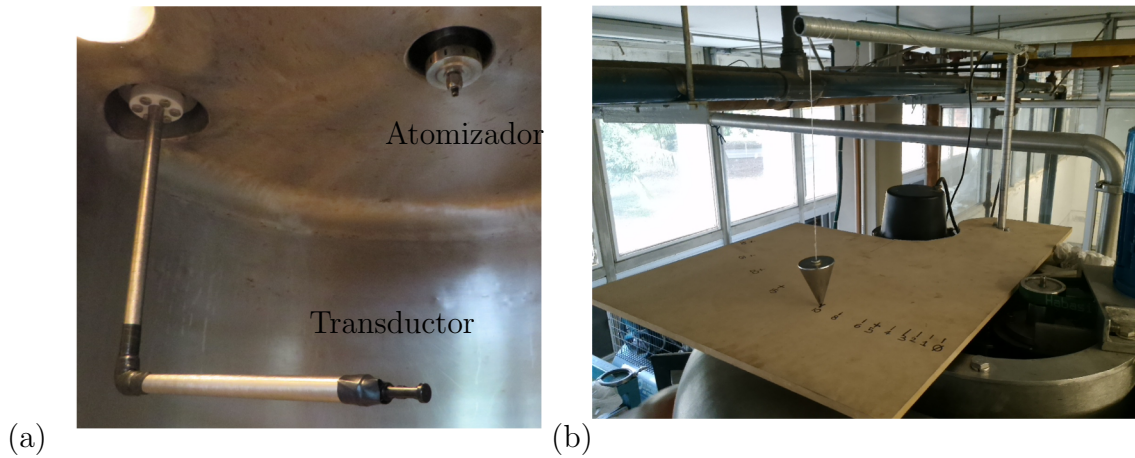


Figura 5-6.: Fotos del montaje para sensor. (a) Sonda en forma de L con transductor de velocidad en el extremo. (b) Parte superior externa del secador donde se aprecia el sistema utilizado para ubicar la posición radial de la sonda.

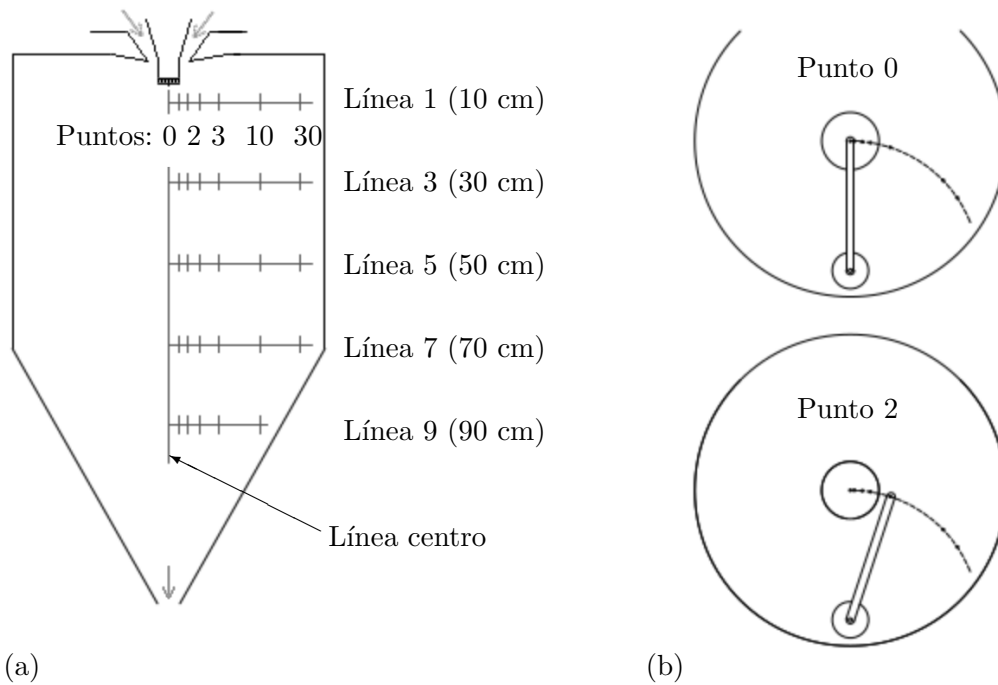


Figura 5-7.: Puntos de medición axiales y radiales. (a) Posiciones axiales definidas por *líneas* medidas desde la parte superior del secador y la línea de centro. (b) Las posiciones radiales se definen por *puntos* medidos desde el centro del secador.

(b) muestra la vista superior del secador y dos de los puntos de medición (0 y 2). Los puntos se refieren a la distancia medida desde el centro del atomizador al punto en cuestión en cm. Así por ejemplo, la medición en el *punto 3.5* se refiere al plano que esta a 30 cm desde la

parte superior y a 5 cm del centro.

En cada medición el secador se configura para el experimento específico, se ubica luego la sonda en el punto de interés. Se espera un minuto para que el flujo alrededor de la sonda se estabilice y luego se toman los datos durante 5 minutos, con una velocidad de muestreo de 1 dato por segundo. Estos datos por punto de medición se procesan para obtener el valor medio y la desviación media.

5.2.2. Perfiles experimentales de velocidad, temperatura y humedad del aire

Con la instalación de los sensores se pasa a realizar las mediciones de los perfiles de velocidad, temperatura y humedad dentro de la cámara de secado. Se analizan dos grupos de experimentos resumidos en la Tabla 5-3: el primero en donde solamente se ingresa aire al secador para medir los perfiles de velocidad del aire. Se realiza a temperatura ambiente debido a que el sensor de velocidad tiene restricciones de temperatura de trabajo. En este caso se realizan tres experimentos modificando el flujo de entrada de aire al secador.

En el segundo grupo de experimentos se utiliza aire caliente y se inyectan gotas de agua para definir los perfiles de humedad y temperatura en el interior del secador. No se mide velocidad del aire con agua porque la alta temperatura y humedad pueden dañar el anemómetro, y no se inyecta el jugo modelo porque las partículas secas pueden afectar el termohigrómetro. En este grupo de experimentos se hacen pruebas modificando el flujo y temperatura del aire, así como el flujo de agua. Se ajusta la velocidad del atomizador en 25000 RPM y se mantiene fijo en todas las pruebas. El flujo de aire y líquido se mide a la entrada a las condiciones ambientales donde se realiza el experimento ($T_{\text{amb}} = 300 \text{ K}$ y $T_{\text{atm}} = 90,14 \text{ kPa}$).

Tabla 5-3.: Plan para obtener perfiles experimentales de velocidad, temperatura y humedad en secador por aspersión. Se modifica el flujo y temperatura del aire, así como el flujo de agua de inyección. Los primeros tres experimentos se realizan sin agua y con aire a temperatura ambiente (T_{amb}), los siguientes se realizan inyectando agua.

Experimento	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
Flujo aire [kg/h]	103	126	145	83	83	83	83	91
Flujo aire [l/s]	27	33	38	22	22	22	22	24
Temperatura aire [K]	T_{amb}	T_{amb}	T_{amb}	443	413	473	443	443
Flujo de agua [kg/h]	0	0	0	1,34	1,34	1,34	2,09	1,34

La Figura 5-8 muestra los perfiles de velocidad axial normalizada (u/u_{in}) respecto a la posición radial normalizada (r/R) para los experimentos 1.1, 1.2 y 1.3. La velocidad axial

normalizada se calcula en relación a la magnitud de la velocidad de entrada (u_{in}) y la posición radial normalizada respecto al radio interno del secador (R). La Figura 5-8 (a) muestra los perfiles experimentales de velocidad para el experimento 1.2 sobre las líneas 1 a 5. El resto de las líneas, de la 6 a la 9, no se muestra debido que son prácticamente iguales a la línea 5. La gráfica muestra líneas continuas entre los puntos que corresponden a los datos experimentales.

La Figura 5-8 (b) muestra los perfiles de velocidad normalizada de los experimentos 1.1, 1.2 y 1.3, para las líneas 1, 3, 4 y 6. De esta figura se aprecia que al cambiar la velocidad de entrada, no se genera cambio en el perfil de velocidad normalizada en el interior de la cámara. Es decir, los perfiles de velocidad normalizados no se ven afectados por el cambio en la velocidad de ingreso.

De la Figura 5-8 se aprecia que el perfil de velocidad se aplanan en la posición $r/R = 0,25$. Esto indica que la capa límite del jet de flujo de aire se encuentra en esta posición aproximadamente. En la figura también se encuentra que el perfil de velocidad se va aplanando a medida que se aleja verticalmente del atomizador, llegando a los 50 cm (línea 5) a ser prácticamente constante en todo el perfil.

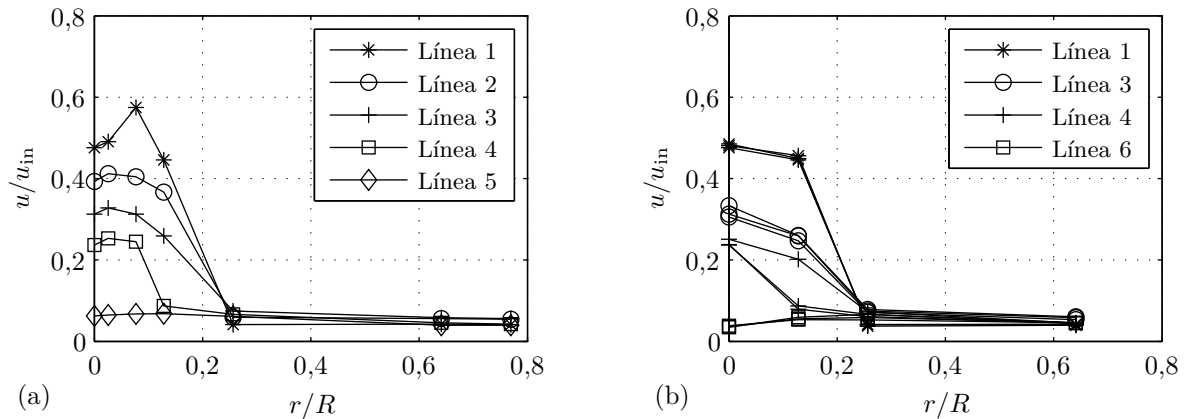


Figura 5-8.: Perfiles experimentales de velocidad axial del aire para los experimentos 1.1, 1.2 y 1.3. (a) Perfiles de velocidad normalizada para el experimento 1.2. (b) Comparación de perfiles de velocidad normalizada para los experimentos 1.1, 1.2 y 1.3. Los perfiles de los experimentos se superponen concluyendo que no hay efecto de la velocidad de entrada en los perfiles de velocidad normalizada.

La Figura 5-9 muestra los perfiles para el experimento 2.1, la figura (a) presenta la temperatura normalizada respecto a la temperatura de entrada y la figura (b) la humedad específica a las condiciones de presión y temperatura dentro del secador. De las líneas 1 y 2 se aprecia el cambio abrupto tanto de la temperatura como de la humedad en el punto cercano a $r/R = 0,25$ ratificando el límite del jet apreciado en la Figura 5-8. Desde la línea 3 se aprecia un aplanamiento del perfil de temperatura y humedad del aire.

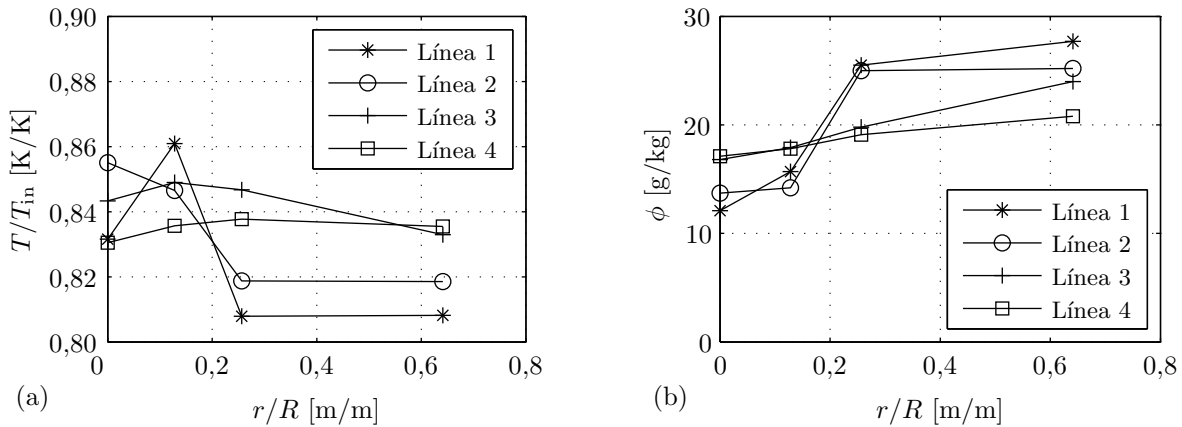


Figura 5-9.: Perfiles de temperatura normalizada y humedad específica del aire, medidos en el mismo punto al mismo tiempo, para el experimento 2.1 y diferentes líneas de nivel. ($T_g = 443$ K, $\dot{m}_g = 83$ kg/h, $\dot{m}_w = 1,34$ kg/h).

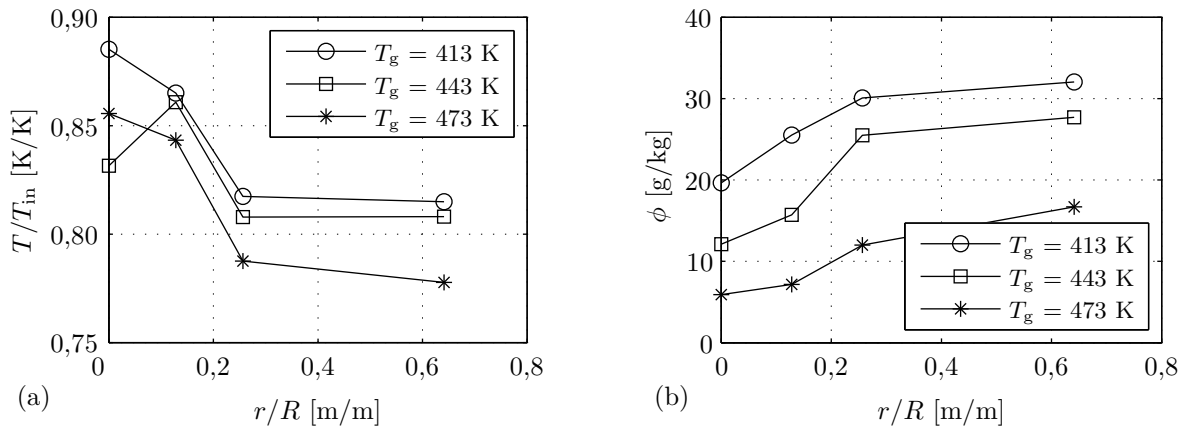


Figura 5-10.: Perfiles de temperatura normalizada y humedad específica del aire, medidos en el mismo punto al mismo tiempo, en la línea 1 con flujo de aire ($\dot{m}_g = 83$ kg/h) y de agua constante ($\dot{m}_w = 1,34$ kg/h), para diferentes temperaturas de aire (experimentos 2.1, 2.2 y 2.3).

La Figura 5-10 muestra los perfiles de temperatura normalizados y humedad para los experimentos 2.1, 2.2 y 2.3. En estos experimentos solo se cambia la temperatura del aire de entrada. La figura (a) muestra los perfiles de temperatura normalizados para la línea 1. En esta figura se aprecia que al aumentar la temperatura de entrada se genera una reducción en el perfil de temperatura normalizado. Este efecto se produce porque el cambio de temperatura de entrada (ΔT_{in}) para cada experimento es mayor al cambio que se produce en el perfil de temperatura (ΔT) dentro de la cámara del secador. En otras palabras, como $\Delta T < \Delta T_{in}$ la relación T/T_{in} es menor para valores mayores de T_{in} .

La Figura 5-10 (b) muestra los perfiles de humedad para la línea 1 en los experimentos 2.1, 2.2 y 2.3. En esta figura se aprecia un cambio en el perfil de humedad específica respecto a la temperatura de ingreso de aire. Entre mayor es la temperatura del aire menor es la humedad específica.

La Figura 5-11 muestra los perfiles de temperatura normalizada y humedad para los experimentos 2.1 y 2.4. En estos experimentos se cambia el flujo de agua que ingresa al secador. En la temperatura normalizada se aprecia un pequeño aumento de los perfiles de temperatura al aumentar el flujo de líquido, posiblemente debido al aumento de la conductividad y capacidad térmica del aire más húmedo. De la misma forma se aprecia un aumento en el perfil de humedad específica al aumentar el flujo de agua de entrada.

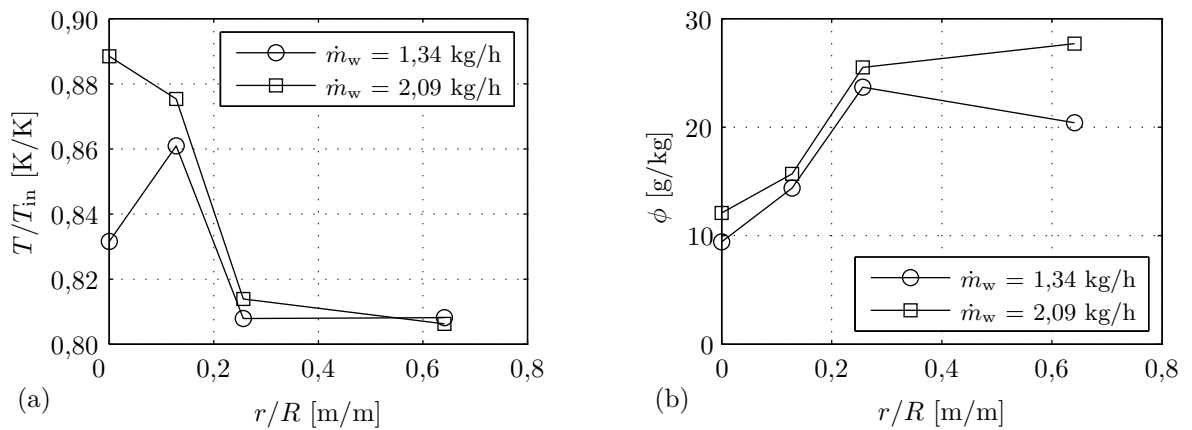


Figura 5-11.: Perfiles de temperatura normalizada y humedad específica del aire en la línea 1 con flujo ($\dot{m}_g = 83$ kg/h) y temperatura de aire ($T_g = 443$ K) para diferentes flujos de agua (experimentos 2.1 y 2.4).

La Figura 5-12 muestra los perfiles de temperatura y humedad normalizadas para los experimentos 2.1 y 2.5. En estos experimentos se hacen cambios en el flujo de aire que ingresa al secador. Al aumentar el flujo de aire se reducen los perfiles de temperatura normalizada y los perfiles de humedad específica. La reducción de la temperatura es posible que se deba, como se explicó anteriormente, a la reducción de la conductividad y capacidad térmica del aire más seco para el experimento con mayor flujo de aire.

5.3. Pruebas de secado por aspersión de jugo modelo

Para definir el efecto de las condiciones de operación del proceso en la calidad del producto seco a la salida del secador se realizan 5 experimentos resumidos en la Tabla 5-4. En cada experimento se utiliza el jugo modelo de guayaba descrito en la Tabla 4-1 y se cambia el flujo y temperatura del aire de entrada, el flujo de jugo modelo y la velocidad del atomizador.

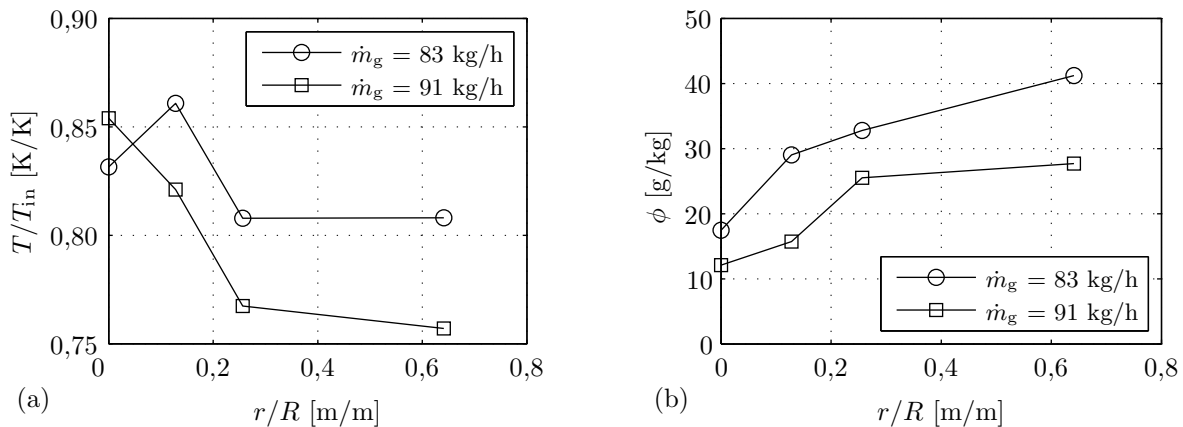


Figura 5-12.: Perfiles de temperatura normalizada y humedad específica del aire en la línea 1 con temperatura del aire ($T_g = 443$ K) y flujo de agua ($\dot{m}_w = 1,34$ kg/h) para diferentes flujos de aire (experimentos 2.1 y 2.5).

Tabla 5-4.: Plan experimental con jugo modelo en secador por aspersión.

Experimento	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.1R
Flujo de aire [kg/h]	63	81	63	63	63	63
Flujo de aire [l/s]	17	22	17	17	17	17
Temperatura del aire [K]	453	453	483	453	453	453
Flujo de jugo [ml/min]	14	14	15	14	30	14
Velocidad atomizador [$\times 1000$ RPM]	25	25	25	30	25	25

5.3.1. Procedimientos de medición de propiedades

Para cada experimento se caracteriza la calidad del polvo seco obtenido a la salida mediante la medición del *tamaño de las partículas*, *densidad real del producto* y *humedad final*.

A continuación se describe el procedimiento para medir cada una de estas propiedades.

Humedad del producto

Se utiliza el método de estufa para definir la humedad del producto. Cada medición se hace por triplicado realizando el siguiente procedimiento:

1. Se limpian 3 cajas petri y se mide la masa de cada una.
2. En cada una de las cajas petri se colocan aproximadamente 2 gramos de producto recién salido del secador. Se mide la masa del producto con la caja petri y se calcula la masa del producto húmedo (m_t).
3. Las tres muestras se dejan en un horno al vacío, a temperatura de 330 K por un tiempo

de 24 horas.

4. Se retiran las muestras del horno y se mide la masa del producto seco con la caja petri. Se calcula la masa de agua eliminada durante el secado (m_w).
5. La humedad en base seca [b.s. g/g] del producto al salir del secador se define con la relación:

$$X_{bs} = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m_w}{m_t - m_w} \quad (5-1)$$

- X_{bs} : Humedad en base seca [b.s. g/g]
- m_w : Masa de agua en el producto [g]
- m_s : Masa de materia seca en el producto [g]
- m_t : Masa total del producto (agua + materia seca) [g]

Densidad real

Esta se define con el método del picnómetro. Se utiliza éter de petróleo como líquido disímil, debido a que los azúcares no se disuelven en este tipo de éter. Se deben tener ciertas precauciones debido que el éter de petróleo es muy inflamable y volátil, además se debe usar elementos de protección como guantes y mascarilla. El procedimiento realizado por triplicado es el siguiente:

1. Determinar la masa del picnómetro limpio y seco (m_p).
2. Agregar aproximadamente 1 gramo de producto al picnómetro y definir la masa (m_{pp}).
3. Llenar el picnómetro con éter de petróleo y medir la masa completa (m_{ppe}).
4. Determinar la densidad real con la ecuación:

$$\rho = \frac{(m_{pp} - m_p) \rho_{eter}}{\rho_{eter} Vol_{pic} - m_{ppe} + m_{pp}} \quad (5-2)$$

Medición de la distribución de tamaño de partículas

Para definir la distribución de tamaño de partículas se utiliza el método de difracción láser en vía líquida (aceite mineral). Se utiliza el Analizador de Tamaño de Partículas Mastersizer 2000 (rango de medición entre 0,02 - 2000 μm). La Figura 5-13 (a) muestra la distribución de tamaño de las partículas para todos los experimentos presentados en la Tabla 5-4. La Figura 5-13 (b) presenta el análisis del tamaño de las partículas usando la distribución de Rosin-Rammler descrita en la sección 2.3.3 por medio de la ecuación 2-2. La Figura 5-14

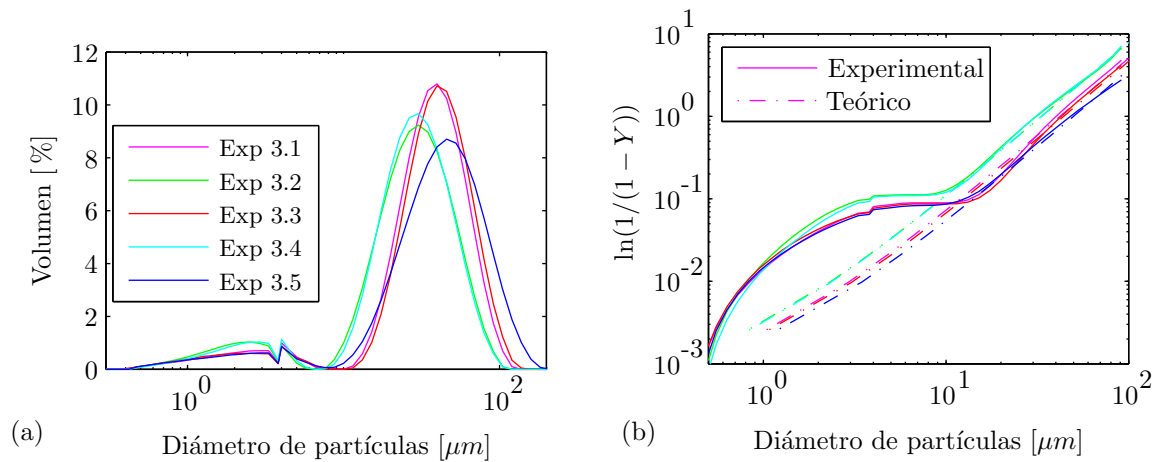


Figura 5-13.: (a) Distribución de tamaño de partículas obtenidas con el MASTERSIZER 2000 para todos los experimentos de la Tabla 5-4. (b) Análisis de distribución de Rosin-Rammler para los mismos experimentos. Se comparan los resultados experimentales con los obtenidos teóricamente por la distribución.

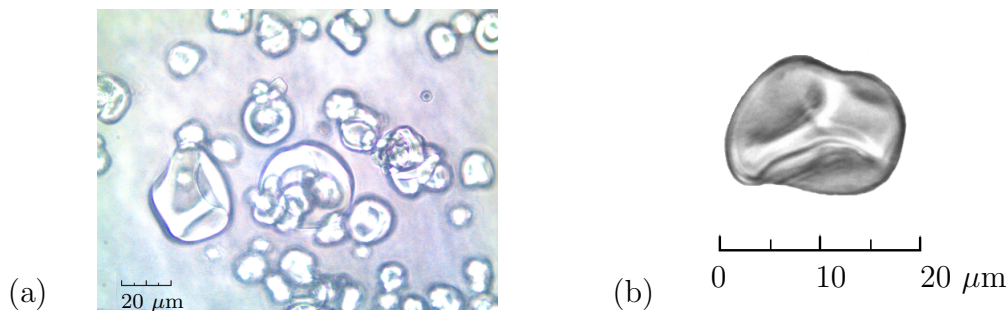


Figura 5-14.: Fotos de partículas tomadas con microscopio electrónico. (a) Grupo de partículas algunas de ellas aglomeradas. (b) Partícula individual donde se aprecia su tamaño.

muestra dos fotos tomadas con microscopio óptico. En estas fotos se aprecia coherencia con la escala de tamaños obtenidas utilizando el Mastersizer 2000.

A partir de los resultados experimentales se encuentran los parámetros de la distribución de Rosin-Rammler presentados en la Tabla 5-5, además del diámetro medio de las partículas. La Figura 5-13 (b) compara la distribución de tamaños experimental (líneas continuas) y la teórica ajustada a la distribución teórica de Rosin-Rammler (líneas punteadas).

5.3.2. Análisis de resultados

La Tabla 5-5 resume los resultados de análisis de calidad de las partículas del jugo modelo bajo diferentes condiciones de secado. En esta tabla se aprecia la tendencia de cambio de las

diferentes propiedades en cada experimento.

Tabla 5-5.: Resumen de resultados. En la parte superior se muestran las condiciones para cada experimento, en la parte inferior se presentan los resultados de las variables de salida.

Experimentos	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
VARIABLES DE ENTRADA					
Flujo de aire [kg/h]	63	81	63	63	63
Flujo de aire [l/s]	17	22	17	17	17
Temperatura del aire [K]	453	453	483	453	453
Flujo de jugo [ml/min]	14	14	15	14	30
Velocidad atomizador [x1000 RPM]	25	25	25	30	25
VARIABLES DE SALIDA					
Densidad [g/ml]	1,53	1,41	1,40	1,34	1,38
Humedad [b.s. g/kg]	1,76	1,14	0,85	0,50	3,23
Diámetro medio de partículas [μm]	41,24	32,23	44,17	32,13	50,10
Diámetro característico (d_c) [μm]	43,00	34,00	45,00	34,00	51,00
Constante de uniformidad (n) [1]	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90

A partir de los resultados del tamaño de las partículas presentados en la Figura 5-13 y la Tabla 5-5, se encuentra que al aumentar el flujo de líquido de entrada (experimento 3.5) se obtienen partículas más grandes, condición que es de esperarse debido a que pasa mayor cantidad de fluido por el atomizador. Así como al aumentar la velocidad del atomizador (experimento 3.4) se encuentren partículas más pequeñas gracias a que el atomizador tiene mayor energía para romper el fluido en gotas más pequeñas. Respecto a las condiciones del aire de secado, flujo y temperatura, el aumento de la temperatura no afecta de forma significativa el tamaño de las partículas (experimento 3.3), por el contrario, el aumento del flujo de aire (experimento 3.2) si influye, al reducir el tamaño de las gotas a la salida pues genera una fuerza cortante transversal al atomizador que rompe las gotas en una más pequeñas.

Respecto a la constante de uniformidad (n) de Rosin-Rammler, se encuentra que es la misma para todas las configuraciones experimentales analizadas, efecto que se puede apreciar en la Figura 5-13 (b) pues la pendiente de las curvas es similar para los diferentes experimentos. Es posible que este parámetro dependa principalmente del tipo y la geometría del atomizador, y no de las condiciones de operación del atomizador. Los resultados encontrados se comparan con los obtenidos experimentalmente por Kieviet [58], quien define para la inyección de maltodextrina el diámetro característico $70,05 \mu\text{m}$ y la constante de uniformidad de 2,09.

En el análisis de la humedad del producto a la salida, se encuentra que al aumentar el flujo

y temperatura del aire (experimento 3.2 y 3.3, respectivamente) se reduce la humedad de las partículas. Efecto que es de esperarse debido a que la humedad de equilibrio depende de la temperatura, y también porque al aumentar el flujo hay una mayor capacidad del aire para recibir la humedad de las gotas. Al aumentar la velocidad del atomizador (experimento 3.4) se encuentra una alta reducción de la humedad final del producto, efecto que se puede relacionar a que las gotas son más pequeñas y por lo tanto se facilita el proceso de difusión de masa en la gota. Por último, el incremento del flujo de líquido (experimento 3.5) donde se encuentra una alta humedad final es debida al efecto combinado de inyectar una mayor cantidad de agua al sistema, y por lo tanto menor capacidad de evaporación del aire, además del incremento del tamaño de las gotas que reduce su capacidad de secado, como se describió anteriormente.

La densidad de las partículas esta relacionada directamente con el tamaño y su humedad. Así se encuentra que para los experimentos 3.2, 3.3 y 3.4 donde se presenta una reducción de la humedad, es decir menor masa de las partículas, y por lo tanto una menor densidad. En el caso del experimento 3.5 se encuentra un aumento significativo del diámetro de las partículas, y por lo tanto de su volumen. Este efecto reduce la densidad de las partículas a pesar del aumento de la humedad.

Los resultados del análisis de las propiedades del producto a la salida se resumen en la Tabla 5-6 donde se presenta si la propiedad aumenta (\uparrow) o se reduce (\downarrow) y se compara con trabajos realizados por Chegini et al. [11] y Swoza [98]. En general los resultados obtenidos en este trabajo están de acuerdo a los resultados presentados por otros autores.

Tabla 5-6.: Comparación de los cambios de las propiedades del jugo modelo seco para diferentes condiciones de secado. Se comparan los resultados de este trabajo (*) con los presentados por Chegini et al. [11] y Swoza [98]. Se utiliza una línea (-) para donde no se encuentra referencia de comparación.

Cambio del proceso	Propiedades del producto seco								
	Densidad			Humedad			Tamaño de partícula		
Fuente:	*	[11]	[98]	*	[11]	[98]	*	[11]	[98]
\uparrow Flujo de aire	\downarrow	-	-	\downarrow	-	-	\downarrow	-	-
\uparrow Temperatura aire	\downarrow	\downarrow	\downarrow	\downarrow	\downarrow	\downarrow	\uparrow	\uparrow	-
\uparrow Velocidad atomizador	\downarrow	\uparrow	\downarrow	\downarrow	\downarrow	-	\downarrow	\downarrow	-
\uparrow Flujo de líquido	\downarrow	\uparrow	\uparrow	\uparrow	\uparrow	\uparrow	\uparrow	\uparrow	-

Chegini et al. [11] miden la densidad a granel con 20 g de producto dentro de un cilindro de 100 ml, la muestra se deja caer 10 veces a una alfombra de caucho desde una altura de 15 cm. Swoza [98] define la densidad real a granel medida con un picnómetro usando tolueno como líquido inmiscible. Debido a la diferencia en los métodos de medición de la densidad no es posible comparar directamente los cambios de humedad en los diferentes casos.

Los resultados presentados en este capítulo se utilizan para ser comparados con los obtenidos por la simulación del proceso. En el siguiente capítulo se presenta el modelo de simulación del secador y la comparación con los datos experimentales. El modelo de simulación se aplica en las condiciones de operación de los diferentes planes experimentales, y cada uno de los resultados puede ser comparado con los resultados de simulación.

6. Simulación y comparación de resultados

En esta sección se aplica el modelo descrito en el capítulo 3 para obtener los resultados de la simulación del secador, que luego se comparan con los resultados experimentales. Primero se analiza la sensibilidad de las condiciones de la simulación CFD en los resultados obtenidos. Luego se utilizan las configuraciones del proceso descritas en la fase experimental para generar los perfiles del aire en toda la geometría del secador, así mismo, las condiciones del producto durante el proceso. Por último, los resultados de simulación se comparan y analizan con los datos experimentales.

6.1. Sensibilidad de las condiciones de simulación CFD

A continuación se analiza el efecto de las principales configuraciones del modelo CFD en los resultados de la simulación. Se analiza el efecto de la cantidad de celdas discretas, del esquema de interpolación y de la simulación bi- o tri- dimensional. Al utilizar diferentes configuraciones del modelo CFD se puede seleccionar el más adecuado para la simulación del secador por aspersión.

Para realizar el análisis se utiliza como referencia una de las configuraciones experimentales, cuyos resultados se comparan con los obtenidos de las simulaciones. La simulación y comparación con los demás experimentos, así como el efecto de las diferentes configuraciones del proceso, se analizan en la siguiente sección. La Tabla **6-1** presenta las condiciones del proceso utilizadas para realizar el análisis de sensibilidad.

6.1.1. Cantidad de celdas

Se presentan los resultados de la simulación utilizando diferentes cantidades de celdas. El resumen de las condiciones de las simulaciones se presentan en la Tabla **6-2**, donde se encuentra la cantidad de celdas utilizada en cada simulación. La Figura **6-1** presenta los perfiles de velocidad para la línea 1 y centro; la Figura **6-2** presenta la distribución de celdas para cada configuración.

Del análisis de la Figura **6-1** se puede observar que las simulaciones 2 y 3, con 1215 y 2162

Tabla 6-1.: Parámetros de simulación utilizados para realizar el análisis de sensibilidad de las condiciones de simulación.

Entrada de aire			
\dot{m}_g	Flujo másico	126	kg/h
u	Velocidad axial	19,05	m/s
v	Velocidad radial	0	m/s
w	Velocidad tangencial	0,88	m/s
$ \mathbf{u} $	Magnitud velocidad	19,07	m/s
T	Temperatura	299	K
ψ	Humedad relativa	75	%
k	Intensidad turbulenta	2,09	m ² /s ²
ϵ	Disipación turbulenta	0,701	m ² /s ³
Salida de aire			
P	Presión	89750	Pa
Entrada de gotas		No se inyectan gotas	

celdas respectivamente, presentan comportamientos muy similares. En cambio, la simulación 1 (con 532 celdas) difiere en su comportamiento a las otras dos. De esto se puede concluir que usar simulaciones con 1215 permite obtener simulaciones similares al utilizar un número mayor de celdas.

Tabla 6-2.: Parámetros específicos de simulación para prueba de estabilidad de malla.

Simulaciones	1	2	3
Configuración del modelo CFD			
Dimensión	Simulación axisimétrica		
Cantidad de celdas	532	1215	2162
Esquema de interpolación	<i>upwind</i>		
Modelo de turbulencia	$k - \epsilon$		
Tipo de simulación	Transiente - t_f 10 s		

Durante el proceso de elaboración de este análisis se evidenció la importancia que tiene la forma de discretización y cantidad de celdas utilizadas. Esto debido a que una distribución inadecuada de las celdas discretas genera inestabilidades numéricas que no permiten obtener la convergencia de la simulación. Se encontró que es importante controlar la relación de aspecto de las celdas alrededor de la entrada de aire, así como en la zona límite del jet alrededor del centro.

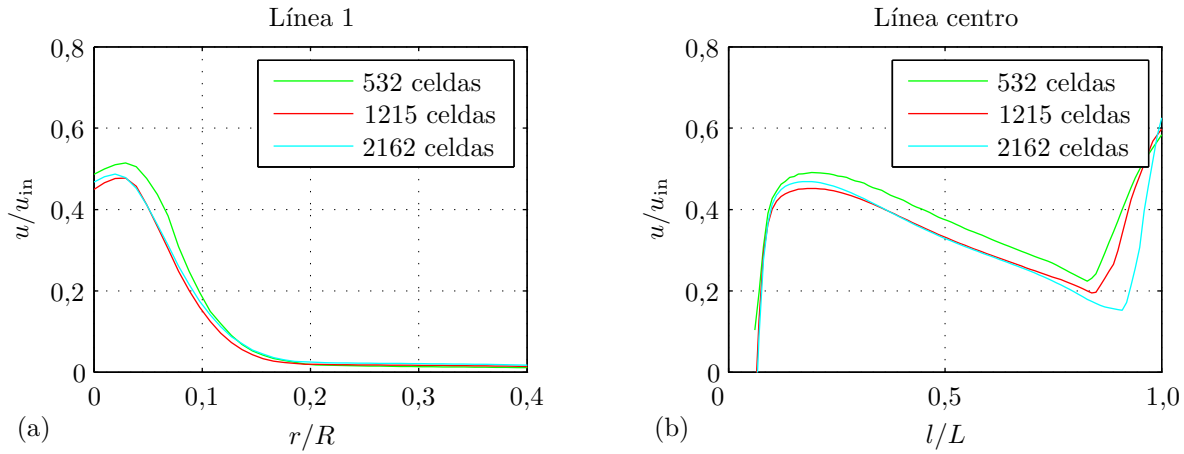


Figura 6-1.: Comparación de las simulaciones utilizando diferente número de celdas discretas para los perfiles de velocidad normalizada. (a) Línea 1 respecto a la posición radial normalizada. (b) Línea centro del secador respecto a la posición axial normalizada. El detalle de las posiciones, línea 1 y línea centro, se presenta en la Figura 5-7.

6.1.2. Esquema de interpolación

Para analizar el efecto en la simulación de los diferentes métodos de interpolación se prueban 8 métodos incluidos en OpenFOAM. La simulación se realiza bajo las condiciones generales descritas en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3.: Parámetros específicos de simulación para prueba de esquemas de interpolación.

Simulaciones	1 - 8
Configuración del modelo CFD	
Dimensión	Simulación axisimétrica
Cantidad de celdas	1215
Esquemas de interpolación	Ver Tabla 6-4
Modelo de turbulencia	$k - \epsilon$
Tipo de simulación	Transiente - t_f 10 s

La Tabla 6-4 presenta los resultados de las simulaciones con los diferentes esquemas de interpolación. En esta tabla se analiza la raíz del error medio cuadrado (RMSE), calculado a partir de los resultados experimentales para la misma configuración del proceso; el residual final para la componente de velocidad en x ; y el tiempo de ejecución requerido para obtener los resultados.

De la Tabla 6-4 se observa que la simulación 4, que utiliza el método QUICK, presenta el

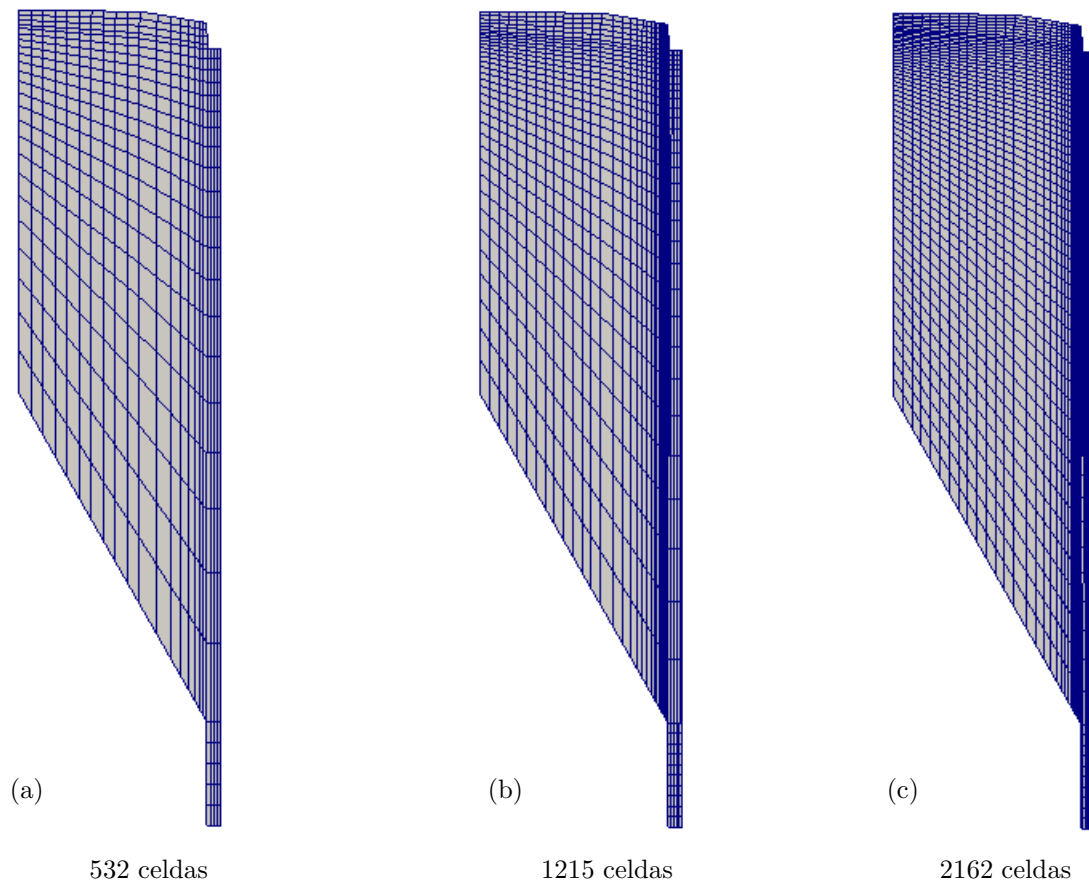


Figura 6-2.: Comparación de mallas axisimétricas con diferente cantidad de celdas especificadas en cada imagen.

menor valor de RMSE, pero los mayores para el residual final y tiempo de ejecución. El segundo menor valor de RMSE se obtiene en la simulación 1, con el método *upwind*, además uno de los valores más pequeños de residual final y el menor tiempo de ejecución.

La Figura 6-3 compara los perfiles de velocidad para la línea 1 y la línea del centro al utilizar los esquemas de interpolación que generan el menor valor de RMSE. De la figura se aprecia que no se presenta una diferencia significativa respecto a las respuestas obtenidas con los métodos *upwind*, *lineal corregido* y *vanLeer*.

Se selecciona entonces para el resto de las simulaciones el método de interpolación *upwind*, debido a que presenta uno de los valores más pequeños de RMSE, residual final y tiempo de ejecución. Es importante aclarar que este resultado se obtiene para la configuración de tamaño de celdas seleccionado, si se utiliza otro tipo de configuración es necesario repetir el análisis.

Tabla 6-4.: Resultados de simulación con diferentes esquemas de interpolación. Se presenta el número de la simulación (**Sim**), el nombre del esquema, la raíz de error medio cuadrado (**RMSE**) respecto a los resultados experimentales, el residual final y el tiempo de ejecución.

Sim	Esquema	RMSE	Residual final	Tiempo de ejecución
1	Upwind	0,1562	1,1e-7	1810 s
2	Lineal corregido	0,1673	3,7e-9	3595 s
3	Lineal upwind	0,1840	3,1e-6	3199 s
4	QUICK	0,1357	4,4e-4	5821 s
5	MUSCL	0,1685	4,9e-4	5346 s
6	Minmod	0,1683	1,4e-6	2712 s
7	SuperBee	0,1741	2,6e-5	3266 s
8	vanLeer	0,1610	5,0e-4	5632 s

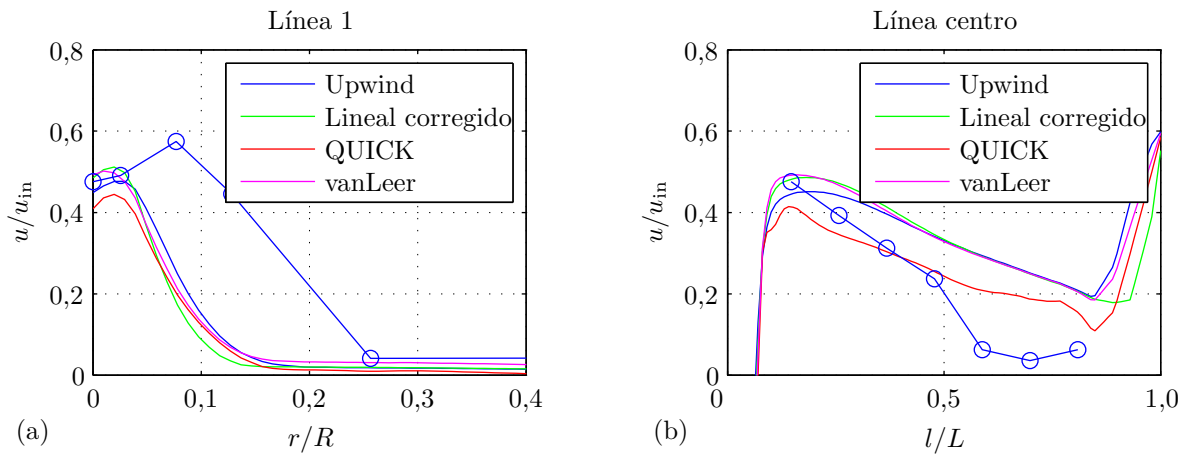


Figura 6-3.: Comparación de las simulaciones utilizando diferentes esquemas de interpolación para los perfiles de velocidad normalizada. Las líneas continuas representan los resultados de simulación y la línea con puntos corresponde a las mediciones experimentales. (a) Línea 1 respecto a la posición radial normalizada. (b) Línea centro respecto a la posición axial normalizada.

6.1.3. Simulación bi- o tri- dimensional

Se realiza una serie de simulaciones creando la geometría tridimensional y la respectiva discretización. En este caso se debe prestar atención con la distribución de velocidad del aire a la entrada para garantizar la componente tangencial de la velocidad del aire. La Tabla 6-5 presenta los parámetros específicos de las simulaciones del análisis dimensional, para ambos casos se utilizan las mismas condiciones de operación descritas en la Tabla 6-1. La Figura 6-

4 presenta la geometría y la distribución de celdas. En la misma figura se muestra el perfil del flujo de aire en el plano medio del secador, así como los vectores de flujo de aire en la zona de entrada.

La Figura 6-5 presenta los perfiles de velocidad para la simulación bi- y tri-dimensional bajo las mismas condiciones de flujo. De este análisis se encuentra que la simulación bi-dimensional no puede representar el efecto de la velocidad tangencial del aire a la entrada, como sí lo puede hacer la simulación tridimensional. De la figura se encuentra que la componente tangencial del aire a la entrada hace que el jet central sea un poco más ancho que el jet encontrado en la simulación bi-dimensional. Este efecto se debe a la fuerza centrífuga que genera la componente tangencial de la velocidad del aire alrededor del centro.

A pesar que la simulación tri-dimensional representa mejor la forma del jet central del aire, este efecto no es significativo comparado con la cantidad de celdas adicionales que se debe usar. La simulación tri-dimensional utiliza 50 veces más celdas que la simulación bi-dimensional y por lo tanto el tiempo de cálculo es mucho mayor. Teniendo en cuenta que la simulación debe incluir otros fenómenos como el secado discreto de las gotas, y que es necesario simular diferentes condiciones de operación del proceso, se decide trabajar con la simulación bi-dimensional.

Tabla 6-5.: Parámetros específicos de simulación para prueba dimensional.

Simulaciones	1	2
Configuración del modelo CFD		
Dimensión	bi- (2D)	tri- (3D)
Cantidad de celdas	1215	69120
Esquema de interpolación	<i>upwind</i>	
Modelo de turbulencia	$k - \epsilon$	
Tipo de simulación	Transiente - t_f 10 s	

6.2. Simulación y comparación del perfil de velocidad

A continuación se presenta la validación del modelo con flujo de aire en el interior del secador. Para esta verificación se aplican al modelo descrito los experimentos 1.1, 1.2 y 1.3 del plan experimental presentado en la Tabla 5-3. Los resultados de la simulación son comparados con los datos experimentales correspondientes. La Tabla 6-6 resume las condiciones de frontera del modelo para la simulación de aire sin gotas ni partículas. A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos en la simulación del campo de velocidad de aire. Estos modelos sirven como referencia para las simulaciones posteriores con gotas de agua y gotas de jugo.

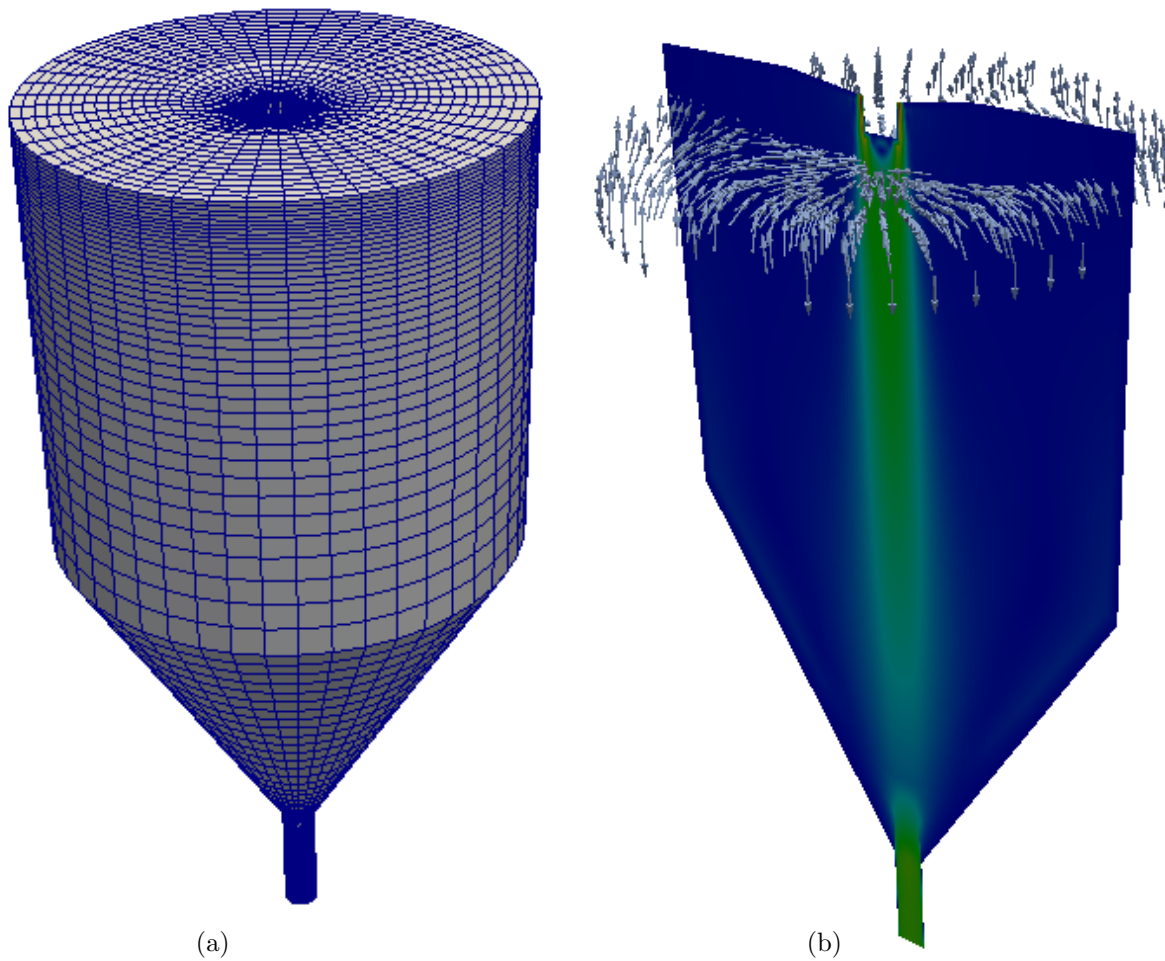


Figura 6-4.: Representación tridimensional (3D) del secador por aspersión. (a) Distribución de celdas discretas. (b) Perfil de velocidad del aire y vectores de flujo para la parte superior del secador.

La Figura **6-6** presenta el campo axisimétrico de velocidad del secador para el caso 1.2. La distribución de vectores de velocidad se presenta en la figura (a) donde se aprecia la recirculación del aire desde el centro del secador a las paredes del mismo. En la figura (b) se muestra la superficie de velocidad del aire donde se aprecia el jet de aire alrededor del centro del secador por aspersión.

La Figura **6-7** muestra la comparación de los perfiles de velocidad experimental y simulado para el experimento 1.2 ($\dot{m}_g=126$ kg/h). Se presentan los perfiles para las líneas 1 y 2 en la figura (a), y en la figura (b) las líneas 3 y 4. Se aprecia en la figura que el perfil de velocidad simulado cae de forma más rápida que los datos experimentales. Lo que indica que el ancho

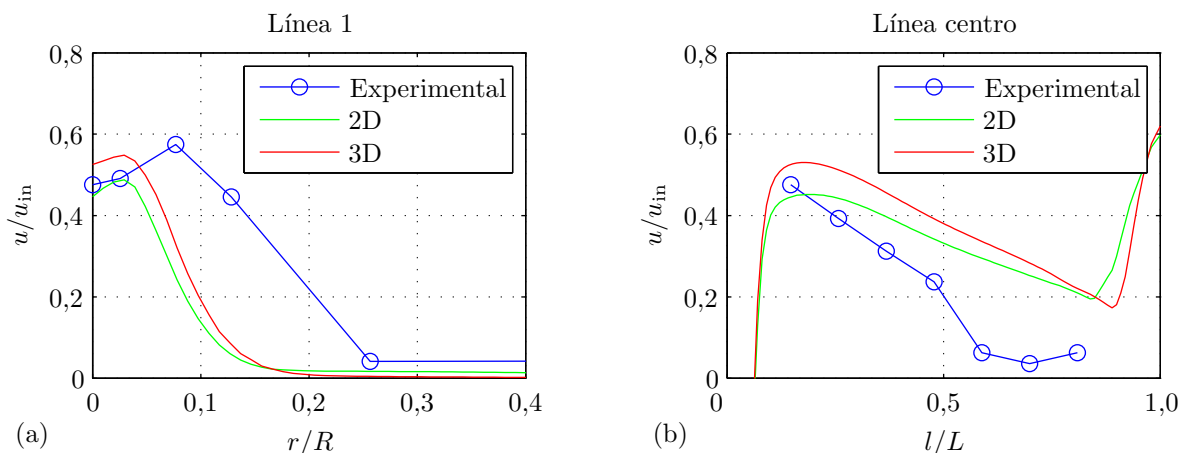


Figura 6-5.: Comparación de las simulaciones utilizando un modelo bidimensional (2D) y tridimensional (3D). (a) Línea 1 respecto a la posición radial normalizada. (b) Línea centro respecto a la posición axial normalizada.

Tabla 6-6.: Condiciones de frontera para las simulaciones de los perfiles de aire sin agua ni jugo.

Experimentos		1.1	1.2	1.3	Unidad
Entrada de aire					
\dot{m}_g	Flujo másico	103	126	145	kg/h
u	Velocidad axial	15,58	19,05	21,91	m/s
v	Velocidad radial	0	0	0	m/s
w	Velocidad tangencial	0,59	0,88	1,18	m/s
$ \mathbf{u} $	Magnitud velocidad	15,59	19,07	21,94	m/s
T	Temperatura	299			K
ψ	Humedad relativa	75			%
k	Intensidad turbulenta	1,47	2,09	2,68	m^2/s^2
ϵ	Disipación turbulenta	0,413	0,701	1,013	m^2/s^3
Salida de aire					
P	Presión	89,75			kPa
Entrada de gotas		No se inyectan gotas			

del jet simulado es menor al observado de forma experimental.

La Figura 6-8 compara, para los experimentos 1.1, 1.2 y 1.3, los perfiles de velocidad en la línea 1 y 2. En esta figura también se aprecia que el ancho del jet simulado es más reducido que el encontrado de forma experimental. Este efecto se genera independientemente del flujo de entrada de aire, lo que indica que sin importar el flujo de entrada, el jet se mantiene fijo

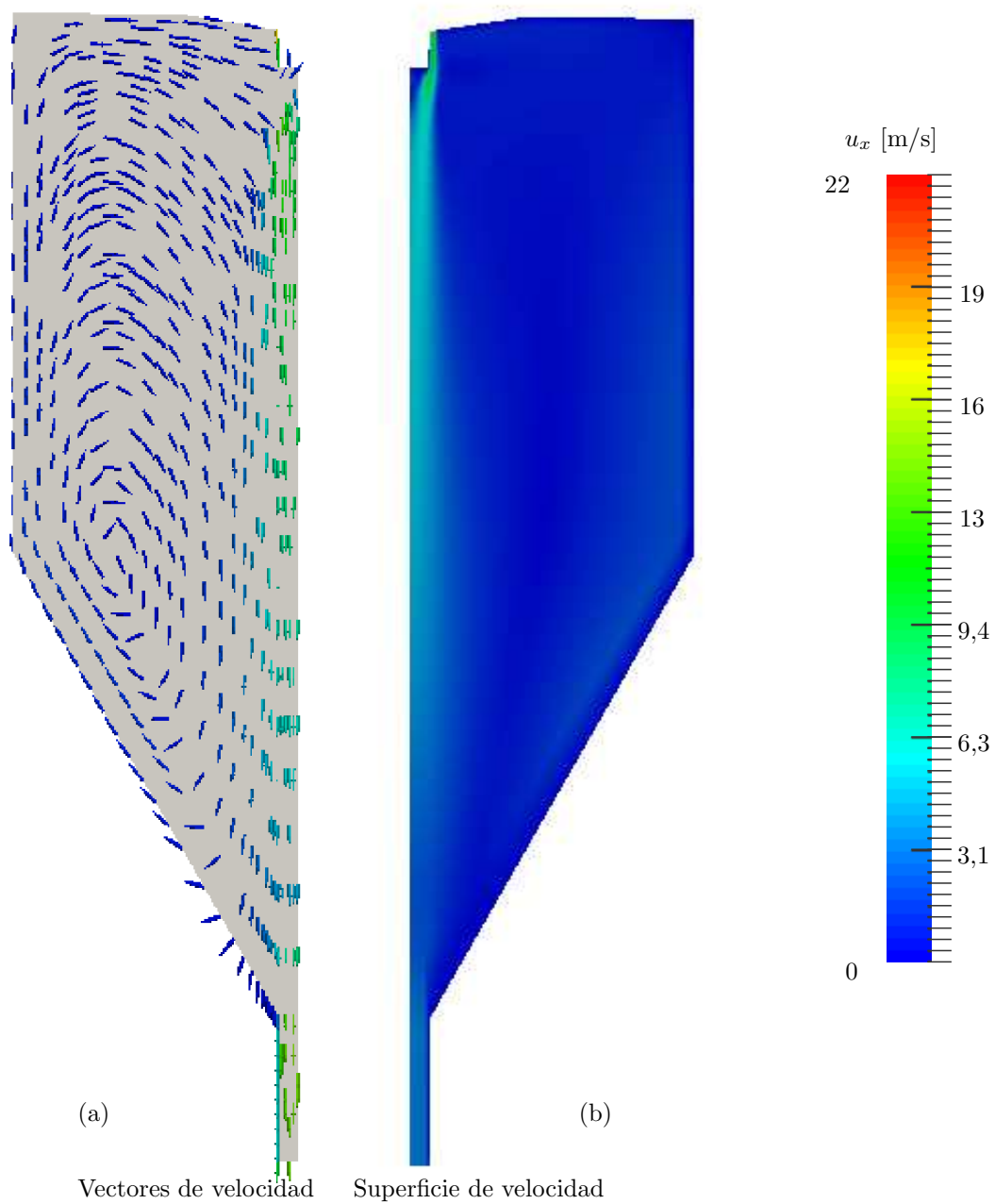


Figura 6-6.: Campo de velocidad de aire caso $\dot{m}_g=126$ kg/h. (a) Malla discreta axisimétrica. *Centro:* Distribución de vectores de velocidad del aire donde se aprecia la recirculación del flujo. (b) Superficie de velocidad del aire donde se aprecia el *jet* alrededor del eje del secador.

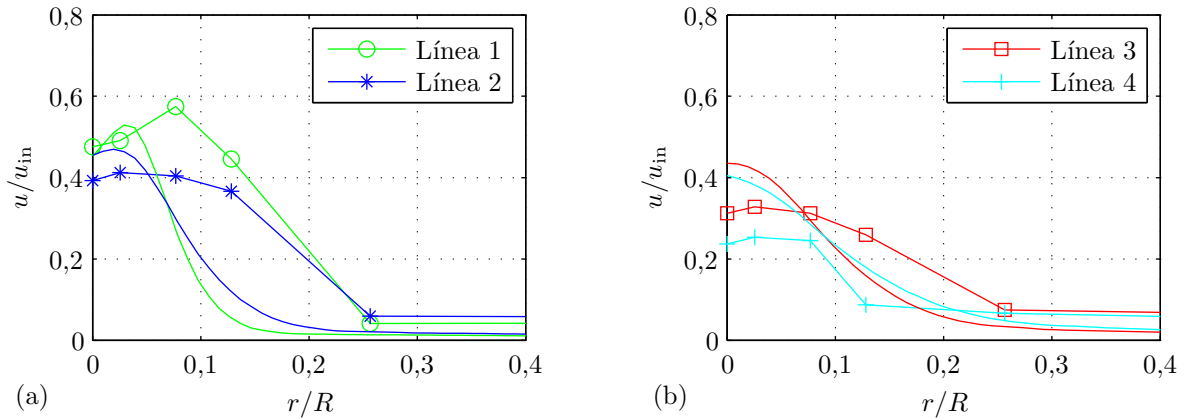


Figura 6-7.: Comparación de los resultados experimentales y simulados para los perfiles de velocidad normalizada respecto a la posición radial normalizada en el experimento 1.2 ($\dot{m}_g=126$ kg/h). (a) Líneas 1 y 2 (b) Líneas 3 y 4. Las líneas continuas representan los resultados de simulación y las líneas con puntos corresponden a las mediciones experimentales.

tanto en la simulación como en los datos experimentales.

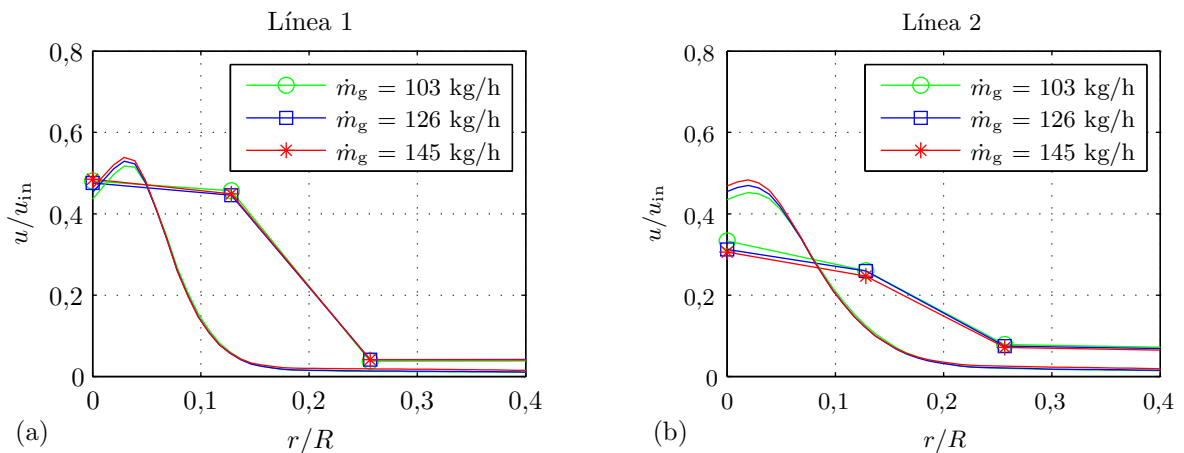


Figura 6-8.: Comparación de perfiles de velocidad axial del aire para los experimentos 1.1, 1.2 y 1.3. (a) Línea 1. (b) Línea 2. Las líneas continuas representan los resultados de simulación y las líneas con puntos corresponde a las mediciones experimentales.

A pesar de que el jet simulado no se ajusta perfectamente al experimental, los resultados y el modelo permiten tener una mejor comprensión de los campos de velocidad en el interior del secador. El modelo de simulación se toma como base para obtener los perfiles de temperatura y humedad del aire inyectando gotas de agua. La simulación y comparación de estos perfiles

se muestran en la siguiente sección.

6.3. Simulación y comparación de los perfiles de temperatura y humedad

Luego de definir un modelo conveniente para el campo de velocidad de aire, se procede a incluir a la simulación la inyección de gotas de agua. La Tabla **6-7** resume las condiciones de frontera y la configuración de las simulaciones para los casos en que se simula la inyección de agua al secador.

La Figura **6-9** presenta la inyección de gotas de agua y los campos de temperatura y humedad para el experimento 2.1. Al inyectar las gotas de agua se aprecia una rápida reducción de la temperatura del aire y la dispersión de la humedad por la cámara de secado. Se encuentra también que la mayor concentración de agua, y por lo tanto menor temperatura, se ubica en la dirección de la salida de las gotas de agua. Es decir, al frente de las aberturas del atomizador.

La Figura **6-10** muestra la comparación de perfiles de temperatura normalizada para las líneas de 1 a 4 en el experimento 2.1. Se aprecia en la figura que el comportamiento de la línea 1 no es acorde a la tendencia de la línea 2 ni a la simulada. Este comportamiento puede ser el resultado de errores en la medición tanto del primer como del segundo punto, o debido a que el sistema no está completamente centrado axialmente. La Figura **6-11** presenta la humedad específica para las líneas de 1 a 4 comparando los datos experimentales con los resultados simulados.

Los perfiles de temperatura y humedad presentados en las Figuras **6-10** y **6-11** también evidencian un rápido cambio de las variables respecto al radio del secador. Teniendo así concordancia con la forma del perfil de velocidad de aire que también cae muy rápido. De estas figuras se puede concluir que los perfiles de temperatura y humedad se relacionan directamente con el perfil de velocidad, y si el jet de flujo es más delgado que los resultados experimentales, los perfiles de temperatura y humedad también lo están.

La Figura **6-12** compara los perfiles de temperatura normalizados y humedad específica para los experimentos 2.1, 2.2 y 2.3, donde solo se cambia la temperatura del aire de entrada. En estas figuras se aprecia que la simulación tiene la misma tendencia de cambio ante la modificación de la temperatura del aire a la entrada. La Figura **6-13** muestra los perfiles de temperatura normalizada y humedad específica para los experimentos 2.1 y 2.4, donde se analiza el cambio del flujo de agua inyectada. Se aprecia igualmente una concordancia de la tendencia de cambio entre el modelo de simulación y los datos experimentales al aumentar el flujo de agua.

La Figura **6-14** muestra los perfiles de temperatura y humedad normalizadas para los expe-

Tabla 6-7.: Condiciones de frontera para las simulaciones de los perfiles de aire con agua. Se presentan las condiciones de entrada y salida de aire, así como la de inyección de gotas de agua.

Simulaciones		2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	Unidad
Entrada de aire							
\dot{m}_g	Flujo másico	83	83	83	83	91	kg/h
u	Velocidad axial	12,54	12,54	12,54	12,54	13,75	m/s
v	Velocidad radial	0	0	0	0	0	m/s
w	Velocidad tangencial	0,68	0,68	0,68	0,68	0,70	m/s
$ \mathbf{u} $	Magnitud velocidad	12,56	12,56	12,56	12,56	13,77	m/s
T_g	Temperatura	443	413	473	443	443	K
ψ	Humedad relativa	70					%
k	Intensidad turbulenta	1,01	1,01	1,01	1,01	1,18	m ² /s ²
ϵ	Disipación turbulenta	0,234	0,234	0,234	0,234	0,298	m ² /s ³
Salida de aire							
P	Presión	89,75					kPa
Entrada de gotas							
Líquido atomizado		Agua					
Velocidad del atomizador		25000					RPM
\dot{m}_w	Flujo másico	3,7e-4	3,7e-4	3,7e-4	5,8e-4	3,7e-4	kg/s
T_w	Temperatura	293					K
Densidad		1000					kg/m ³
Calor específico		4187					J/(kg K)
Humedad inicial		—					%
Diámetro min.		0,1					μm
Diámetro max.		200					μm
Diámetro med.		60					μm
Parámetro Rosin-Rammler		2					1
Interacción partícula-pared		Se pega					

rimentos 2.1 y 2.5 (cambio de flujo de agua). De nuevo el modelo responde de forma parecida a los datos experimentales.

En general, de la comparación de los resultados de simulación CFD y los datos experimentales se puede concluir que, aunque no es exacta la concordancia de los perfiles de velocidad, temperatura y humedad, se evidencia coherencia en la tendencia de los resultados, y similitud en la escala y amplitud de los mismos. La principal diferencia, en la mayoría de los perfiles, se encuentra en el diámetro del jet de flujo. La simulación presenta un jet angosto, es decir de menor diámetro, en comparación al que se puede apreciar a partir de los datos

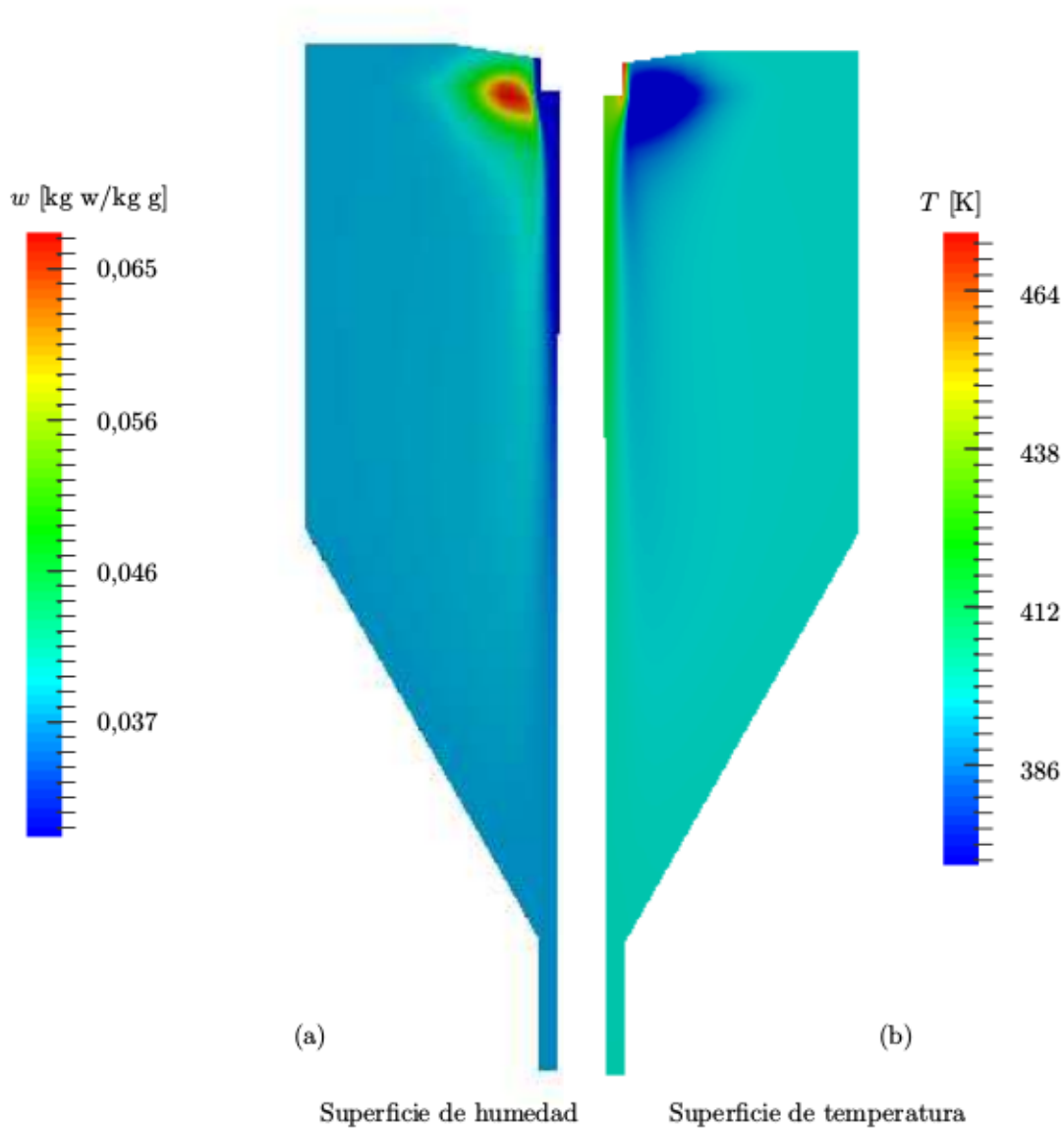


Figura 6-9.: Campo axisimétrico de humedad y temperatura del aire para el experimento 2.1. ($\dot{m}_g = 83 \text{ kg/h}$, $u = 12,54 \text{ m/s}$, $v = 0 \text{ m/s}$, $w = 0,68 \text{ m/s}$, $T_g = 443 \text{ K}$)
 (a) Superficie de humedad específica. (b) Superficie de temperatura del aire.

experimentales.

A partir de los resultados obtenidos del proceso de modelación, simulación y comparación de resultados, se estima que los criterios de simulación hasta ahora seleccionados son adecuados para analizar los fenómenos en el interior de la cámara de secado. Por lo tanto, estos criterios se utilizan como base para inyectar finalmente el jugo modelo y de esta forma poder analizar la calidad en función de las condiciones de operación del proceso.

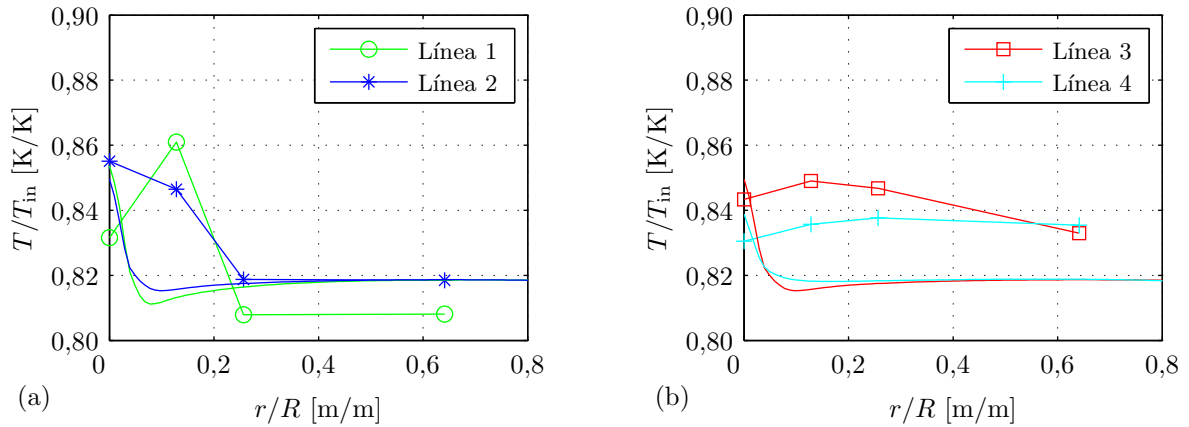


Figura 6-10.: Comparación de perfiles de temperatura normalizada del aire para el experimento 2.1 y diferentes líneas de nivel. Las líneas continuas representan los resultados de simulación y las líneas con puntos corresponden a las mediciones experimentales.

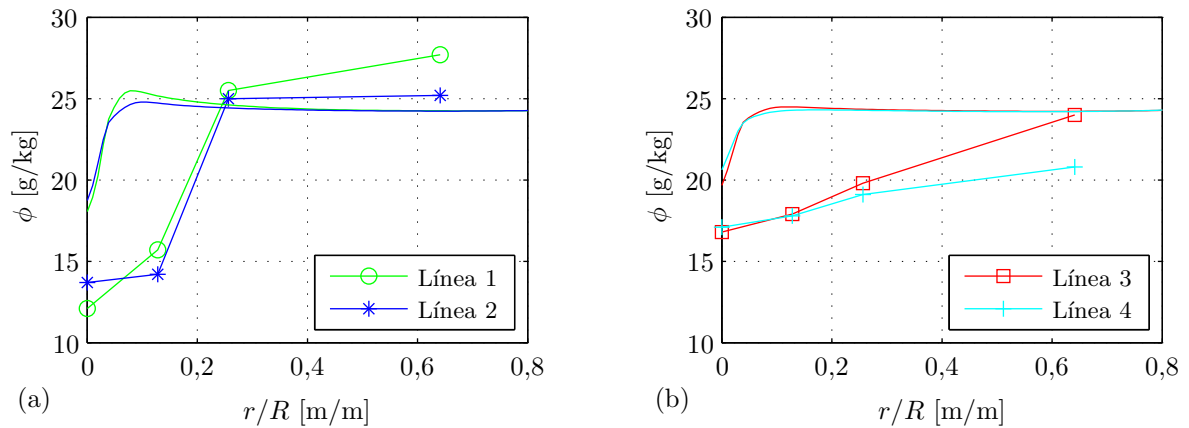


Figura 6-11.: Comparación de perfiles de humedad específica del aire para el experimento 2.1 y diferentes líneas de nivel. Las líneas continuas representan los resultados de simulación y las líneas con puntos corresponden a las mediciones experimentales.

6.4. Simulación y comparación del secado de gotas de jugo

En esta sección se inyectan gotas del jugo modelo descrito en la sección 4.1. El modelo de secado aplicado a la simulación se describe en la sección 3.2. OpenFOAM y el solver *sprayFOAM* no incluyen este tipo de modelo y por tanto es necesario programarlo para

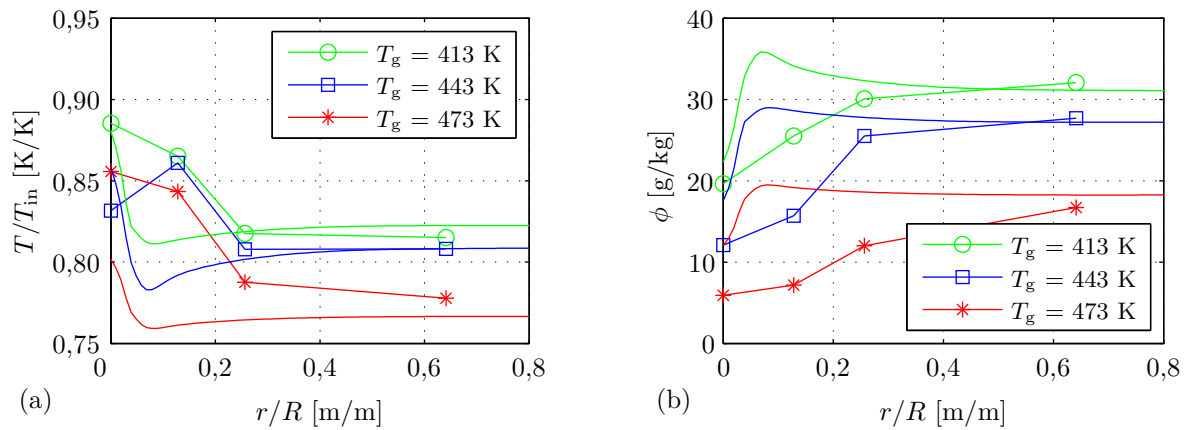


Figura 6-12.: Comparación de perfiles de temperatura normalizada y humedad específica del aire en la línea 1 utilizando diferentes temperaturas de aire (T_g). Las líneas continuas representan los resultados de simulación y las líneas con puntos corresponden a las mediciones experimentales.

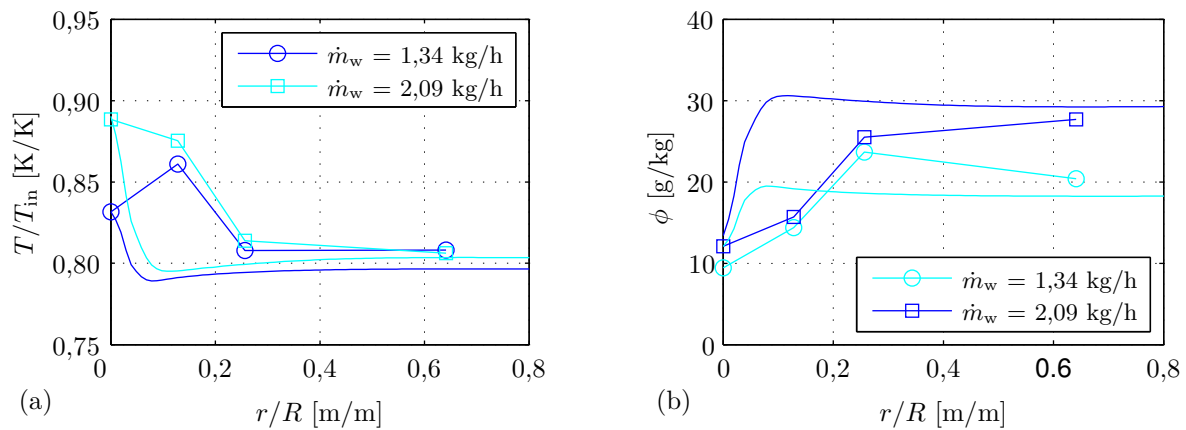


Figura 6-13.: Comparación de perfiles de temperatura normalizada y humedad específica del aire para el experimento 2.1 y 2.4 (cambio de flujo de agua). Las líneas continuas representan los resultados de simulación y las líneas con puntos corresponden a las mediciones experimentales.

poder utilizarlo en la simulación. En el ANEXO A se presenta la forma de implementar el nuevo modelo de secado, la creación de la nueva función y el procedimiento de compilación de OpenFOAM para incluirlo. La implementación del modelo se prueba con los experimentos descritos en la sección 4.2.4 y utilizando la geometría del secador de gota por filamento de vidrio descrito en la sección 4.2.

La Figura 6-15 muestra la simulación del secado de una gota de jugo en el secador por

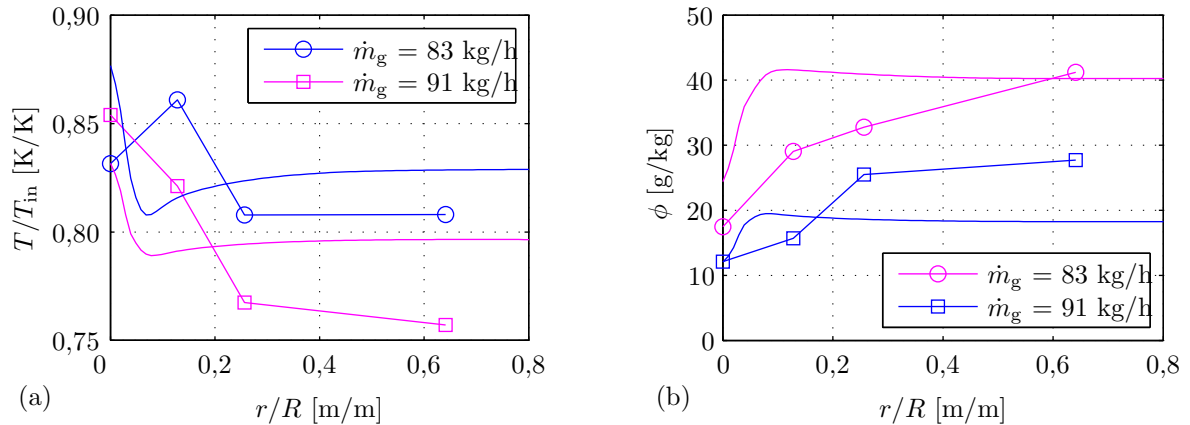


Figura 6-14.: Comparación de perfiles de temperatura y humedad del aire para el experimento 2.1 y 2.5 (Cambio de flujo de aire). Las líneas continuas representan los resultados de simulación y las líneas con puntos corresponden a las mediciones experimentales.

filamento de vidrio. En la figura se aprecia la gota y el perfil de aire. También se compara la masa obtenida experimentalmente con el obtenido por simulación con OpenFOAM y la nueva función.

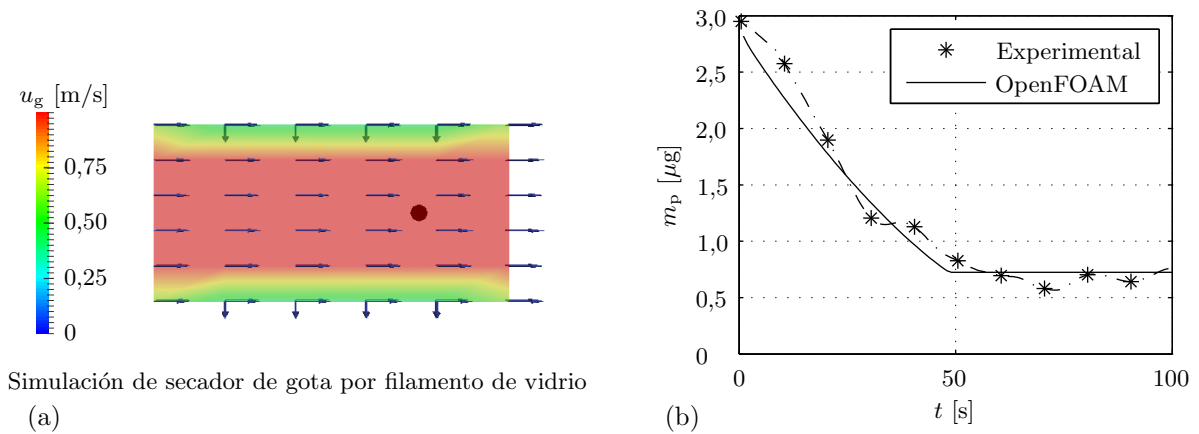


Figura 6-15.: (a) Simulación del secador de gota por filamento de vidrio, donde el punto representa la gota. La gota no se presenta a escala real. (b) Comparación de masa obtenida experimentalmente con simulación por OpenFOAM. Simulación de una gota de $3 \mu\text{l}$ bajo las condiciones del experimento 5 ($u_g=1 \text{ m/s}$ y $T_g=383 \text{ K}$).

La Tabla 6-8 presenta las condiciones de frontera utilizadas para las simulaciones de jugo modelo. La Figura 6-16 presenta una de las simulaciones inyectando el jugo modelo. En la

Tabla 6-8.: Condiciones de frontera para las simulaciones de calidad con jugo modelo. Se presentan las condiciones de entrada y salida de aire, así como la de inyección de gotas de jugo.

Simulaciones		3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	Unidad
Entrada de aire							
\dot{m}_g	Flujo másico	63	81	63	63	63	kg/h
u	Velocidad axial	9,51	12,24	9,51	9,51	9,51	m/s
v	Velocidad radial	0	0	0	0	0	m/s
w	Velocidad tangencial	0,68	0,68	0,68	0,68	0,70	m/s
$ \mathbf{u} $	Magnitud velocidad	9,53	12,26	9,53	9,53	9,53	m/s
T_g	Temperatura	453	453	483	453	453	K
ψ	Humedad relativa	70					%
k	Intensidad turbulenta	1,01	1,01	1,01	1,01	1,18	m ² /s ²
ϵ	Disipación turbulenta	0,234	0,234	0,234	0,234	0,298	m ² /s ³
Salida de aire							
P	Presión	89,75					kPa
Entrada de gotas							
Líquido atomizado		Jugo modelo de guayaba					
Velocidad del atomizador		25	25	25	30	25	x1000 RPM
\dot{m}_d	Flujo másico	3,7e-4	3,7e-4	3,7e-4	5,8e-4	3,7e-4	kg/s
T_d	Temperatura	293					K
Densidad		1000					kg/m ³
Calor específico		4187					J/(Kg K)
X_0	Humedad inicial	3,55					%
Diámetro min.		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	μm
Diámetro máx.		230	230	230	230	230	μm
Diámetro crítico (d_{cr})		73	64	75	64	81	μm
Parámetro Rosin-Rammler		1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	
Interacción partícula-pared		Escapa					

parte superior se encuentra la inyección de las gotas y en la parte inferior la salida de las partículas secas. En la figura (a) se presentan las partículas coloreadas por masa y en la (b) coloreadas por temperatura. De la imagen (a) se encuentra que las partículas de mayor masa (coloreadas de rojo y verde) salen del atomizador, pasan por el jet de aire y se dirigen hacia la pared lateral del secador. Las partículas más pequeñas (coloreadas de azul) siguen la misma trayectoria del jet de aire, y se dirigen directamente a la salida del secador. La imagen (b), que presenta la temperatura de las partículas, permite observar que las partículas llegan a su temperatura máxima en una zona muy cercana al atomizador y la entrada de aire.

La Figura 6-17 presenta los perfiles de humedad específica (a) y temperatura (b) del aire al inyectar las gotas de jugo modelo. De la distribución de humedad, Figura 6-17 (a) se aprecia un aumento de la humedad específica en la dirección de la inyección de las partículas. La distribución de temperatura se dirige en la misma dirección del jet y no se aprecia un efecto significativo por la inyección de las gotas de jugo modelo.

De las partículas simuladas que salen por la parte inferior se toma una muestra de 1000 partículas con todas sus propiedades: masa, densidad, diámetro, tiempo de residencia, etc. Con esta información se calcula la humedad, diámetro y densidad promedio de las partículas obtenidas. La comparación de los valores experimentales y simulados para cada una de las variables se presenta en la Tabla 6-9.

Las Figuras 6-18 y 6-19 representan el comportamiento de cambio de las propiedades de calidad del producto bajo diferentes condiciones de operación del proceso. Se comparan directamente las tendencias de cambio para los resultados obtenidos por simulación y por experimentación. Se puede concluir que el modelo de simulación sigue las tendencias de cambio al modificar la configuración en las condiciones de entrada.

Tabla 6-9.: Resumen de resultados. En la partes superior se muestra de nuevo las condiciones para prueba, en la parte de abajo se resumen los resultados de cada propiedad en cada experimento.

Experimentos	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
Variables del proceso					
Flujo de aire [kg/h]	63	81	63	63	63
Temperatura del aire [K]	453	453	483	453	453
Flujo de jugo [ml/min]	14	14	15	14	30
Velocidad atomizador [x1000 RPM]	25	25	25	30	25
Calidad del producto					
Densidad experimental [g/ml]	1,53	1,41	1,40	1,34	1,38
Densidad simulada [g/ml]	1,92	1,17	1,52	1,18	2,08
Humedad experimental [b.s. g/kg]	1,73	1,14	0,85	0,50	3,23
Humedad simulada [b.s. g/kg]	1,82	1,35	1,02	0,84	1,32
Diámetro medio experimental [μm]	41,24	32,23	44,17	32,13	50,10
Diámetro medio simulado [μm]	39,85	37,12	41,81	30,24	45,25

En general se aprecia que los resultados simulados y experimentales se encuentran en escalas similares. Se distingue que hay coherencia entre el resultado experimental y simulado, principalmente para la medición de humedad. Para la densidad y diámetro medio se identifica buena correlación para el cambio de temperatura del aire.

Para el cambio de velocidad del aire se aprecia que aunque la calidad cambia en el mismo

sentido, no lo hace en la misma proporción. Por ejemplo, se aprecia que al aumentar la velocidad del aire se reduce el diámetro medio tanto en los resultados de simulación como experimental. Pero la simulación genera un cambio de menor magnitud a la encontrada en los experimentos. Efecto contrario se aprecia en la densidad, pues el resultado experimental presenta menor magnitud de cambio que el calculado por la simulación.

Caso contrario a los anteriores se aprecia para el cambio de flujo de líquido, donde la densidad y la humedad presentan tendencias de cambio opuestas. En otras palabras, al aumentar el flujo de líquido de jugo, se aprecia que la simulación y los resultados experimentales exhiben tendencia de cambio opuestas para la densidad y humedad de las partículas.

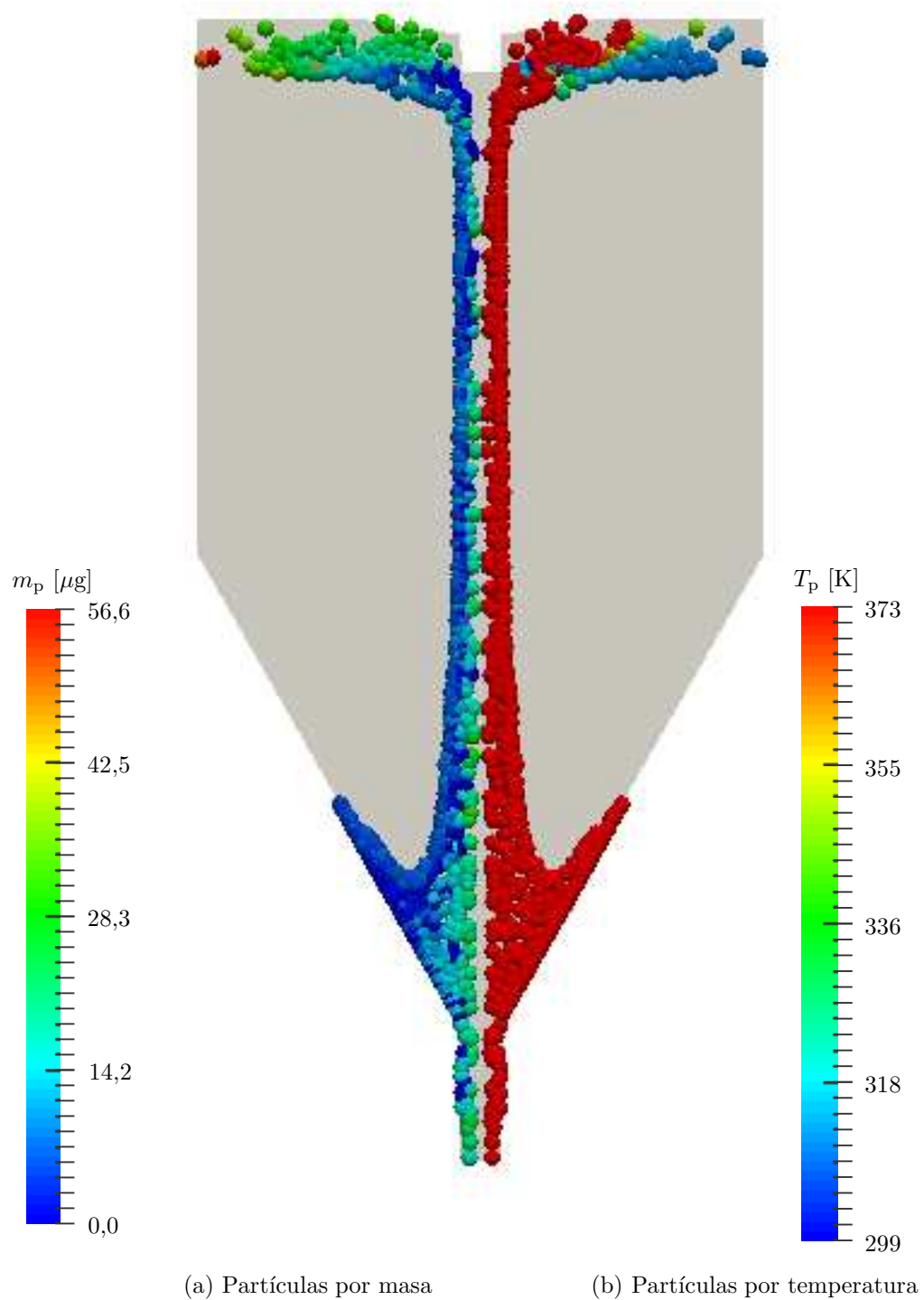


Figura 6-16.: Representación de la distribución de partículas por masa (a) y por temperatura (b) de jugo modelo en interior de la cámara de secado para la simulación 3.5 ($\dot{m}_g = 36$ kg/h, $u = 9,51$ m/s, $v = 0$ m/s, $w = 0,7$ m/s, $T_g = 453$ K).

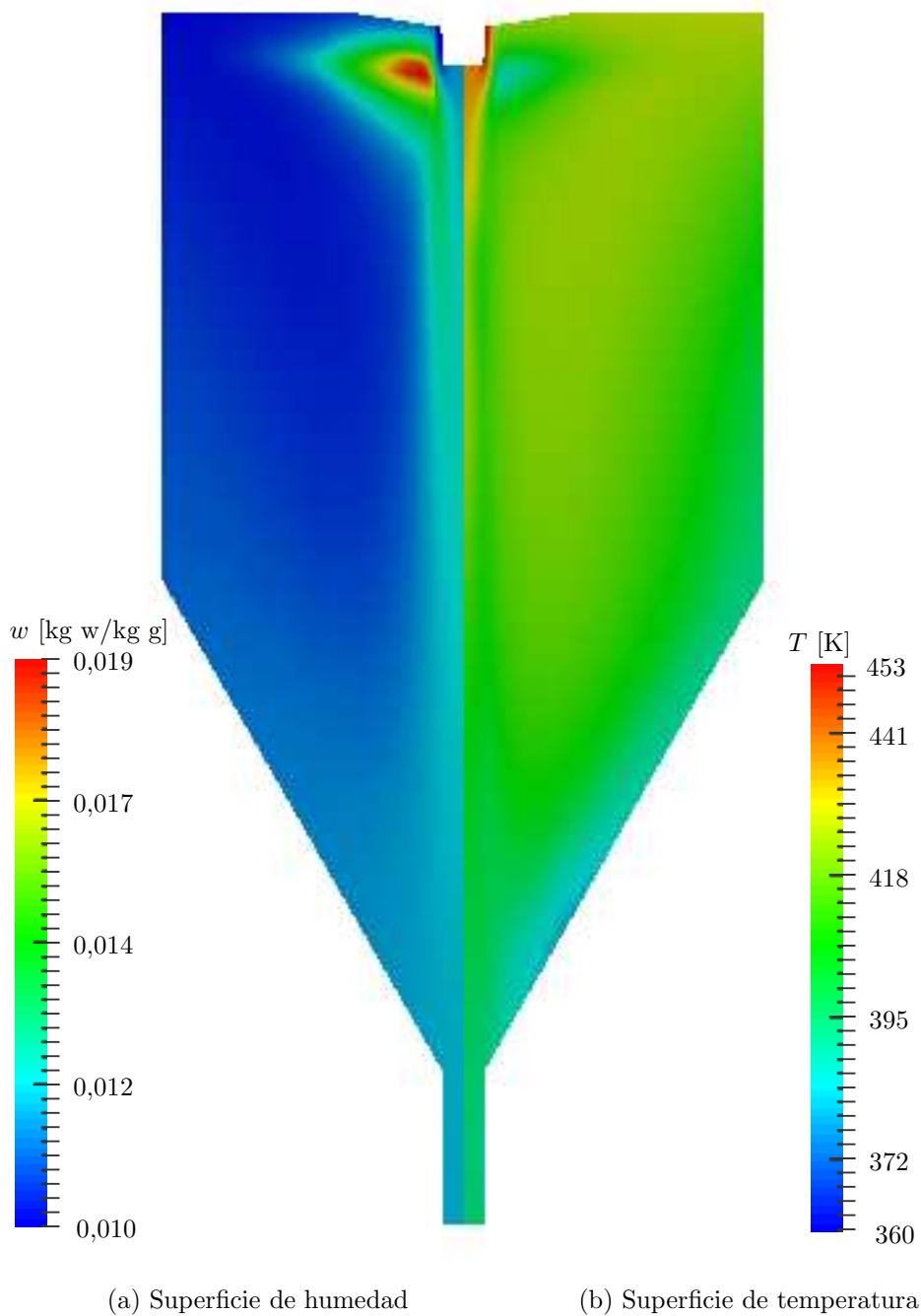


Figura 6-17.: Representación de los perfiles de temperatura (a) y humedad específica del aire (b) con la inyección de partículas de jugo modelo en interior de la cámara de secado para la simulación 3.5 ($\dot{m}_g = 36$ kg/h, $u = 9,51$ m/s, $v = 0$ m/s, $w = 0,7$ m/s, $T_g = 453$ K).

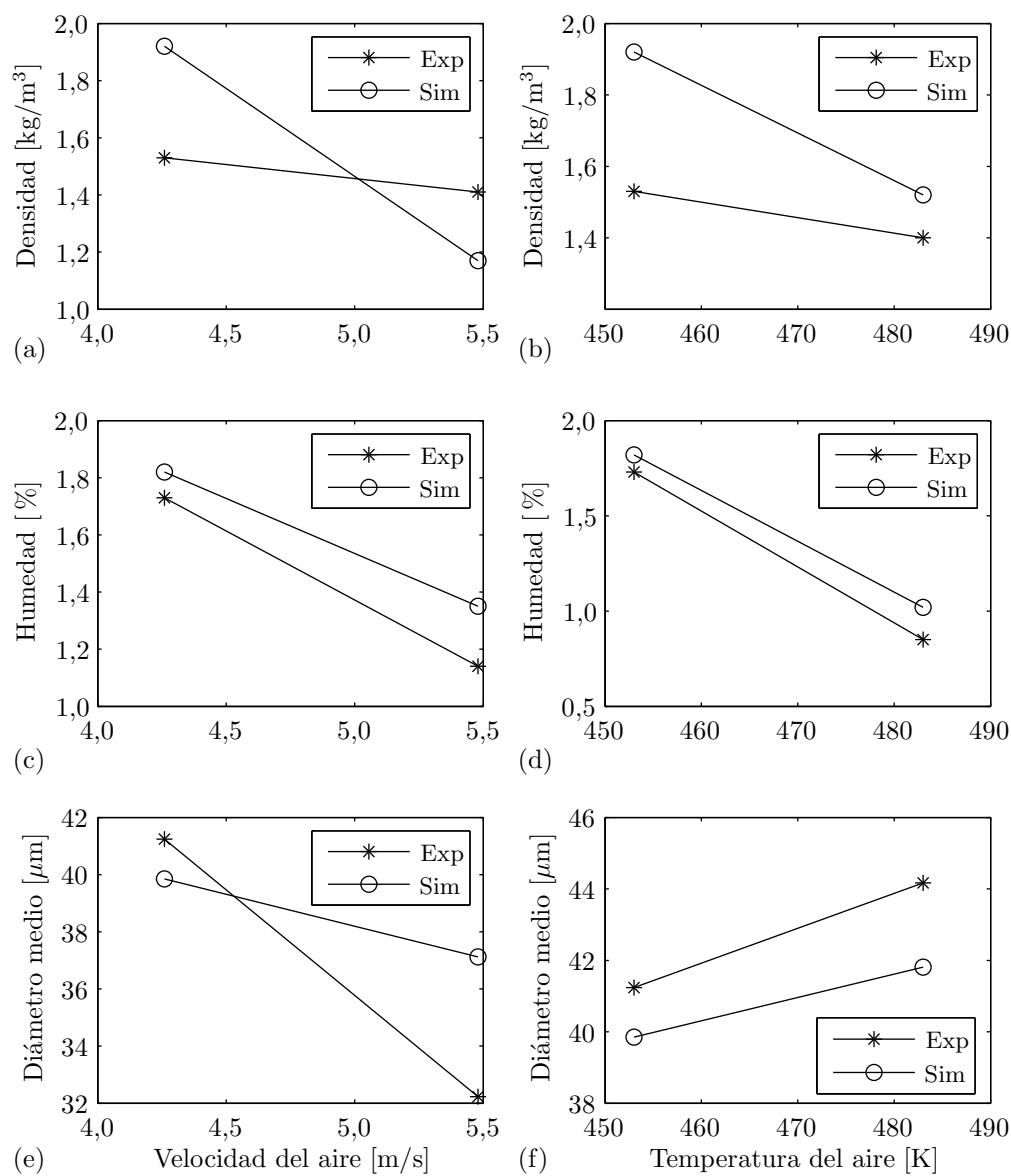


Figura 6-18.: Comparación de los resultados experimental y simulado de calidad del producto (humedad, densidad y diámetro de partículas) al utilizar diferentes flujos de jugo y velocidades del atomizador (Exp: experimental, Sim: simulado).

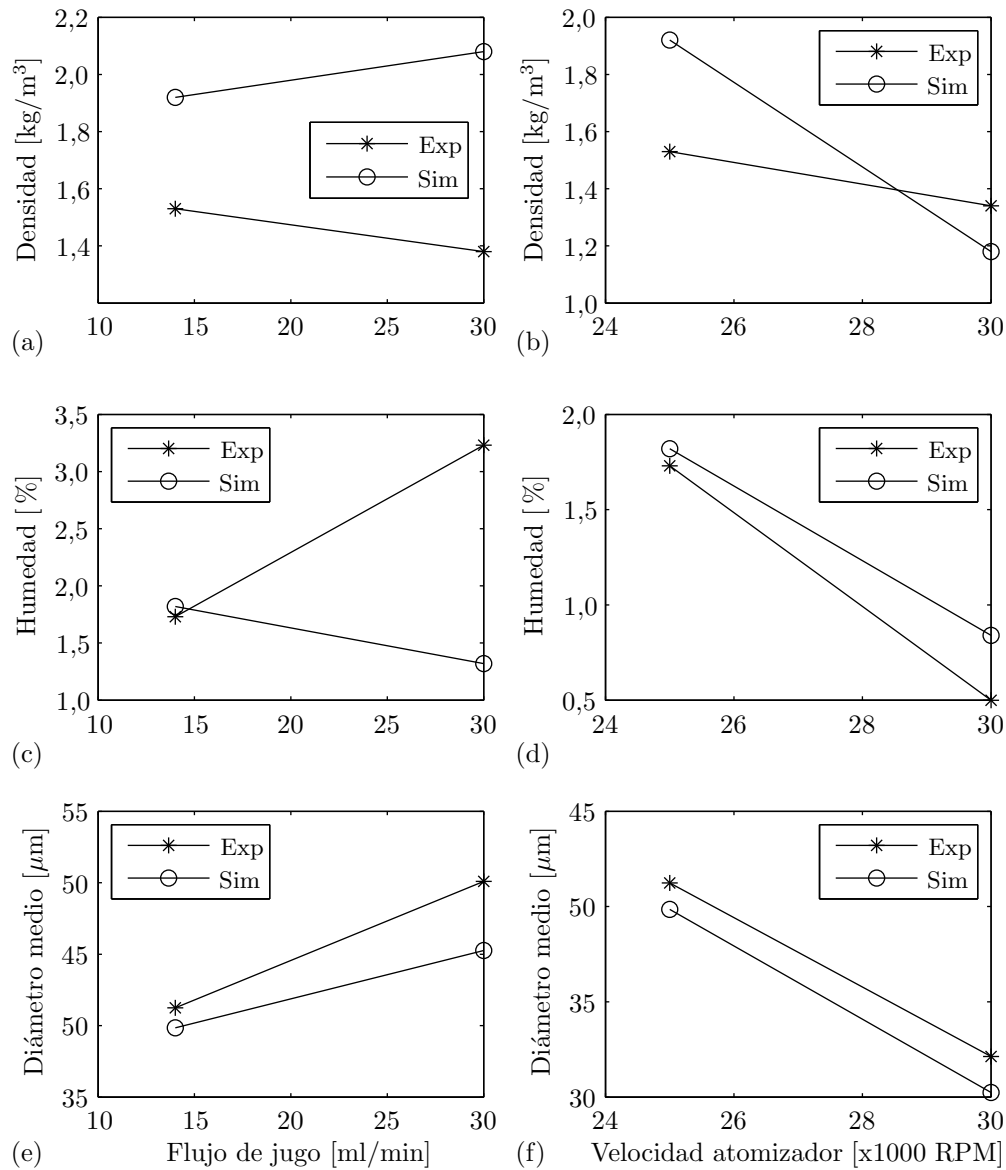


Figura 6-19.: Comparación de los resultados experimental y simulado de calidad del producto (humedad, densidad y diámetro de partículas) al utilizar diferentes velocidades y temperaturas de aire de secado (Exp: experimental, Sim: simulado).

7. Perspectivas

A partir de los estudios y discusiones presentados en esta tesis doctoral, las perspectivas de trabajos futuros se orientan en tres grandes direcciones.

La primera y más importante se relaciona con el uso del modelo para definir las condiciones del proceso que permitan obtener la calidad deseada del producto. Es decir, se espera que a partir de las condiciones de calidad requeridas, el modelo permita definir las condiciones apropiadas del proceso. En este sentido, es posible plantear una estrategia de optimización cuya función objetivo minimice la diferencia entre las condiciones de calidad obtenidas con las deseadas. Además, donde las variables de control son las condiciones del proceso como velocidad y temperatura del aire, velocidad del atomizador y flujo de líquido. La estrategia de optimización utilizaría la información del secador, de la caracterización de la materia prima y el modelo de simulación para aplicar un modelo de optimización que permita especificar las condiciones del proceso y así obtener las características de calidad deseadas.

El segundo grupo de perspectivas se orientan a mejorar los datos obtenidos en los experimentos de secador de gota y secador por aspersion. En la operación del secador de gota y las pruebas realizadas, se evidenciaron algunos inconvenientes y restricciones. Estos se relacionan con la técnica experimental seleccionada, y otros con la operación particular del equipo construido. Estos inconvenientes y su posible solución se citan a continuación:

- La dificultad para operar las válvulas de flujo que permiten ubicar la gota sin la presencia de flujo de aire. Estas válvulas son manuales, y si no se operan adecuadamente pueden generar perturbaciones en el sistema que afectan la medición. Se sugiere entonces instalar válvulas motorizadas que faciliten su operación.
- El posible efecto que tiene el incremento de la temperatura del aire en la operación de la micro balanza. Esto se evidencia porque en ocasiones, antes de empezar un experimento, se debe esperar un prolongado tiempo antes que la medida en la balanza se estabilice. Para reducir este efecto se podría instalar un aislante térmico entre el experimento y la balanza.
- Los filamentos de vidrio obtenidos para realizar el experimento tienen un diámetro medio de 0,5 mm, que es grande comparado con experimentos similares que cuentan con filamentos de aproximadamente 0,07 mm. Además, las dimensiones de los filamentos no son uniformes debido a que son fabricados de forma artesanal. Sería posible construir

estos filamentos de otro material y técnicas de fabricación. Por ejemplo, utilizar una impresora 3D para construir los filamentos en Nylon, material de baja conductividad térmica y resistente a temperaturas de trabajo hasta 380 K.

- Los filamentos de vidrio de menor diámetro, por su fragilidad, se partían con mucha facilidad durante la limpieza. Esto dificultó su uso en algunos de los experimentos.
- Debido a problemas de calibración de los sensores de temperatura, se hizo necesario repetir la serie experimental. Por lo tanto es necesario revisar el ajuste de todos los sensores antes de realizar cualquier experimento.

Por otro lado, en esta tesis se utilizó una representación artificial del jugo de guayaba, y por lo tanto es de interés definir las posibles diferencias en el secado entre este jugo modelo y el jugo real. El experimento de secado de gota también permitiría definir las diferencias al secar diferentes tipos de jugos de fruta o el efecto del uso de encapsulantes.

En la fase experimental del secador por aspersión se encontraron algunos defectos y restricciones experimentales que pueden afectar los resultados obtenidos. Es por lo anterior que es necesario identificarlos y describirlos para analizar y tener en cuenta su posible efecto y solución:

- Atomizador descentrado. El atomizador del secador se encuentra descentrado respecto a la entrada del aire, como se muestra en la Figura 7-1. Este defecto puede generar un perfil de flujo asimétrico respecto al eje central del secador. El defecto es más crítico si se tiene en cuenta la forma angular como se toman los datos dentro del mismo secador. Este error no fue posible corregirlo y al no tenerlo en cuenta en el diseño experimental, no se plantearon estrategias para estimarlo o corregirlo.
- Velocidad tangencial del aire a la entrada. En la parte superior del secador se encuentra el difusor de aire. Este difusor reduce la velocidad, aumenta la presión y aumenta la velocidad tangencial del aire antes de ingresar a la cámara de secado. Desafortunadamente en este estudio no fue posible examinar la forma geométrica del difusor para incluir en la simulación el efecto del mismo. Además, al no contar con un anemómetro multidireccional no fue posible medir este efecto.
- Flujo de la bomba peristáltica. Se utiliza una bomba peristáltica para enviar el líquido al atomizador. Se identifica que el flujo de líquido definido para los experimentos es muy bajo en relación al rango de operación de la bomba. Esto genera pulsos en la operación de la bomba que pueden afectar la inyección del jugo modelo. Además, en ocasiones se generan taponamientos del líquido por los ductos que llevan al atomizador. Esto obligó en ciertas ocasiones a repetir algunos experimentos.
- Hermeticidad del sistema. Como se describió en este capítulo, el equipo funciona por el

vacío que se genera en la cámara del secador por el ventilador de succión. Si la puerta de la cámara no se cierra de forma hermética, o el empaque hace un cierre ineficiente, se genera un ingreso de aire que no pasa por el calentador y aumenta la presión dentro de la cámara. Esto puede afectar la velocidad del aire en el interior del secador, el balance de masa y la temperatura del aire. Para resolver este problema, se coloca una cinta plástica tratando de sellar completamente la puerta del secador.

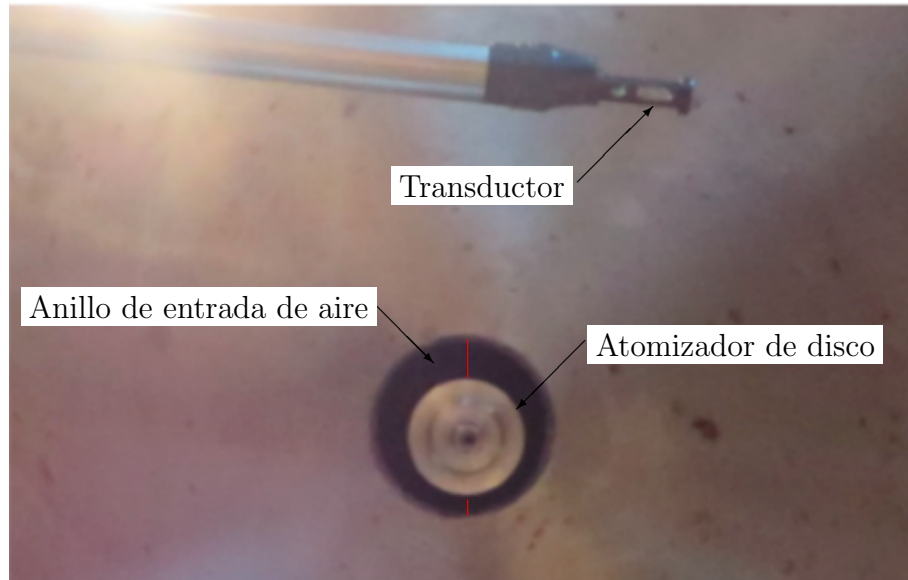


Figura 7-1.: Anillo de entrada de aire descentrado respecto al atomizador de disco. Espacio superior = 14 mm y espacio inferior = 5 mm.

Para poder dar unas razones más precisas respecto a las fuentes de discrepancias, sería necesario tomar una mayor cantidad de puntos experimentales alrededor del jet de flujo y corregir los posibles problemas que ocasionan el desalineamiento del atomizador con la entrada de aire. Así mismo, es necesario evaluar con precisión la magnitud de la componente tangencial de la velocidad del aire a la entrada, pues es posible que también esté afectando el diámetro del jet experimental. Además, poder estimar la intensidad de la turbulencia en la misma entrada del secador pues es posible que también influya en la forma del jet.

El tercer grupo de perspectivas se relacionan con los modelos utilizados para simular el proceso. Por un lado, basado en el modelo de secado de gota con parámetros concentrados (CDC) planteado en esta tesis, se propone comparar los resultados con un modelo que tenga en cuenta la difusión de masa y energía en el interior de la gota. El objetivo es validar el modelo propuesto y poder analizar el efecto del encapsulante y los diferentes componentes del jugo. Respecto al modelo CFD sería valioso analizar otras estrategias de modelación del fenómeno turbulento, entre las cuales se podría utilizar DNS (Direct Navier Stokes Simulation) y LES (Large Eddy Simulation) las cuales incluyen el fenómeno politrópico de la turbulencia.

8. Conclusiones

Se seleccionó, implementó y validó un modelo de simulación aplicando la dinámica de fluidos computacional (CFD) para el secado por aspersión de un jugo de fruta. El modelo presentado permite analizar las condiciones de flujo de aire en el interior del secador y las principales propiedades de calidad del producto seco a partir del efecto de las condiciones del proceso de secado, las propiedades de la materia prima y las características del equipo. En el trabajo se muestra cómo el modelo propuesto representa similitud a los resultados experimentales, tanto para los perfiles de velocidad, humedad y temperatura del aire, además de la calidad del producto seco a la salida del secador. A continuación se describen en detalle las principales conclusiones logradas en este trabajo.

Se selecciona la curva característica de secado (CDC) como modelo de secado de las gotas de jugo analizado. Para definir los parámetros del modelo se construye un secador de gota por filamento de vidrio que permite adquirir los cambios de masa de la gota bajo diferentes condiciones de velocidad y temperatura del aire, así como de tamaño inicial de la gota. A partir de las curvas de secado obtenidas se define la constante de ajuste experimental, donde se concluye que esta no depende de las condiciones de secado (velocidad y temperatura del aire) pero sí del tamaño inicial de la gota. De esta forma se seleccionó un parámetro único para el jugo que se puede utilizar luego en la simulación del proceso de secado por aspersión.

Por otra parte, se estimó por simulación las condiciones del aire en la cámara y las del producto seco en el secador. Se utilizaron en las simulaciones diferentes flujos de aire a la entrada del secador y se analizaron las condiciones del flujo de aire y de las partículas. De este proceso se logra concluir que el modelo en dos dimensiones, de aproximadamente 500 celdas, con el método de interpolación tipo *upwind* y de turbulencia $k-\epsilon$ ofrece resultados adecuados para cumplir el objetivo. Además, que el modelo de secado de gota CDC permite analizar el cambio de las propiedades de las gotas de jugo durante su secado en el proceso.

Se especifican experimentalmente las condiciones del aire en la cámara del secador por aspersión, así como la calidad del producto seco al final del proceso. Para esto se instala en el secador un anemómetro de hilo caliente y un termo higrómetro con el fin de medir la velocidad además de la temperatura y humedad del aire, respectivamente. Para medir los perfiles se definen posiciones discretas en el secador y se toma la velocidad, humedad y temperatura en estos puntos. Como conclusión se puede decir que los sensores seleccionados permiten medir los perfiles de aire deseados. Igualmente, se seleccionan los métodos para medir las

propiedades de las partículas a la salida del secador, lo que permitió definir las condiciones de calidad bajo los criterios seleccionados.

Los resultados de las simulaciones y los datos experimentales de los perfiles de flujo en el secador concuerdan en general y responden de forma similar ante los cambios en las condiciones de operación. Es así como de ambos resultados se encuentra que el perfil de velocidad normalizado se mantiene igual al cambiar la velocidad del aire en la entrada. Por otro lado, que al aumentar la temperatura del aire a la entrada, se reduce la temperatura normalizada y la humedad específica. Además, que al aumentar el flujo de agua de entrada se aumenta la temperatura normalizada pero se reduce la humedad específica. Y por último que con el aumento del flujo de aire se reduce la temperatura normalizada pero se aumenta la humedad.

En la comparación de los resultados de simulación y de experimentación, se descubre que el perfil del jet simulado es de menor diámetro al jet obtenido experimentalmente. Este fenómeno se encuentra tanto en la comparación de los perfiles de velocidad del aire, como en los de temperatura y humedad. La causa principal de este fenómeno se debe a que el modelo axisimétrico seleccionado no logra tener en cuenta el efecto de giro del aire, que gracias a la fuerza centrífuga afecta el diámetro del flujo. A pesar de esta diferencia, se decide utilizar esta configuración del modelo debido a que ofrece unos resultados valiosos para el análisis sin la necesidad de utilizar un gran recurso computacional.

A pesar de las diferencias en los perfiles de flujo se encuentra que la simulación y los datos experimentales se aproximan en las condiciones de calidad del producto. Se encuentra una buena concordancia para el aumento de temperatura del aire, donde se aprecia que la densidad y humedad disminuyen mientras el diámetro final aumenta. También se encuentra concordancia en la tendencia para el aumento de la velocidad del aire, donde se reduce la densidad, humedad y diámetro medio, aunque en diferentes proporciones para la simulación y los datos experimentales. Caso similar se aprecia para el aumento de la velocidad del atomizador, donde se evidencia una reducción en todas las condiciones de calidad, pero en uno de los casos en diferente proporción. Por último, las mayores diferencias se aprecian para el flujo de jugo, donde la simulación y los datos experimentales presentan respuestas contrarias ante el aumento del flujo de jugo.

El análisis de la materia prima, adicional a la modelación y simulación del secador, se utilizan como herramienta de análisis del proceso de secado por aspersion. No obstante los resultados experimentales difieran en cierta medida con los de simulación, esta herramienta ofrece resultados aproximados que tienen valor en el estudio del proceso. Además, que sirven como base para emprender estudios de optimización del proceso, escalamiento y aumento de la calidad.

A. Anexo: Resultados experimentales de secador de gota por filamento de vidrio

A continuación se presentan los resultados obtenidos en todos los experimentos de secado de gota descritos en la Tabla 4-4.

A.1. Curvas de masa y humedad del jugo modelo

Las Figuras A-1 y A-2 presentan el cambio de masa y humedad de cada volumen inicial de gota para los experimentos 1, 2, 3 y 5. Los resultados del experimento se muestran en la Figura 4-9.

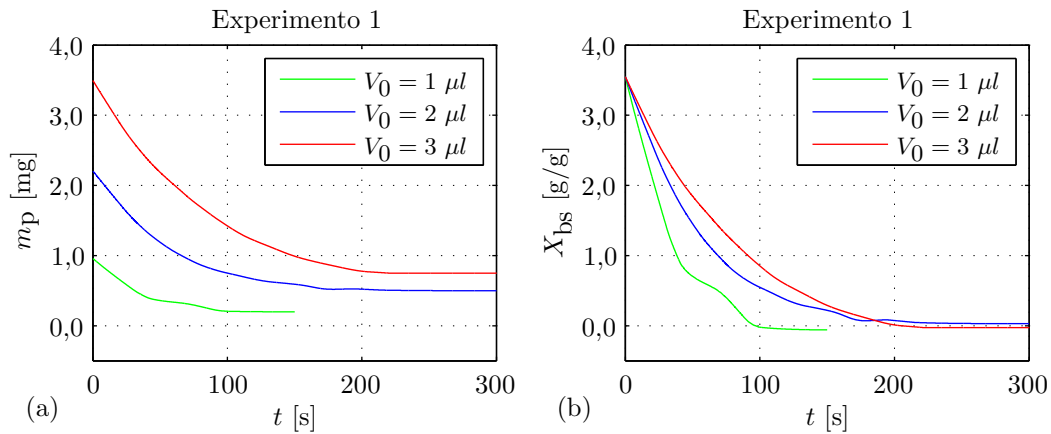


Figura A-1.: Curvas de cambio de masa (a) y de humedad (b) para el experimento 1 ($v_g=0,5$ m/s y $T_g=370$ K), se presentan los resultados para cada volumen inicial de gota (V_0).

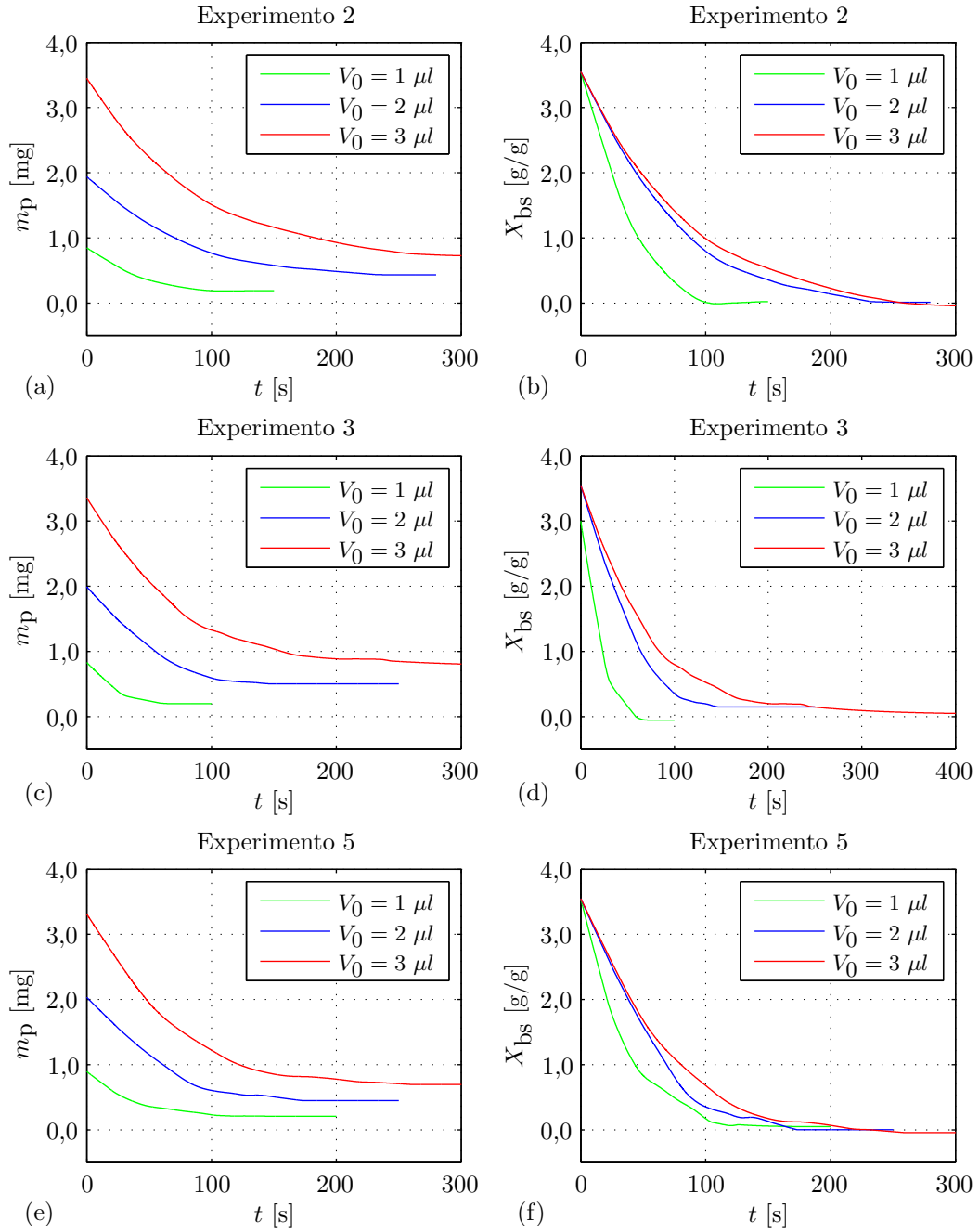


Figura A-2.: Curvas de cambio de masa (a) y de humedad (b) para el experimento 2 ($v_g=0,75 \text{ m/s}$ y $T_g=350 \text{ K}$), experimento 3 ($v_g=0,75 \text{ m/s}$ y $T_g=390 \text{ K}$) y experimento 5 ($v_g=1,00 \text{ m/s}$ y $T_g=370 \text{ K}$). Se presentan los resultados para cada volumen inicial de gota (V_0).

A.2. Efecto de la temperatura del aire en secado de gotas de jugo modelo

La Figura A-3 muestra el efecto de la temperatura del aire de secado en el cambio de masa y humedad para las gotas 1 y 2 μl . El efecto sobre la gota de 3 μl se presenta en la Figura 4-10. La Figura A-4 presenta el efecto de la temperatura del aire de secado en la velocidad de secado y la curva característica de velocidad de secado.

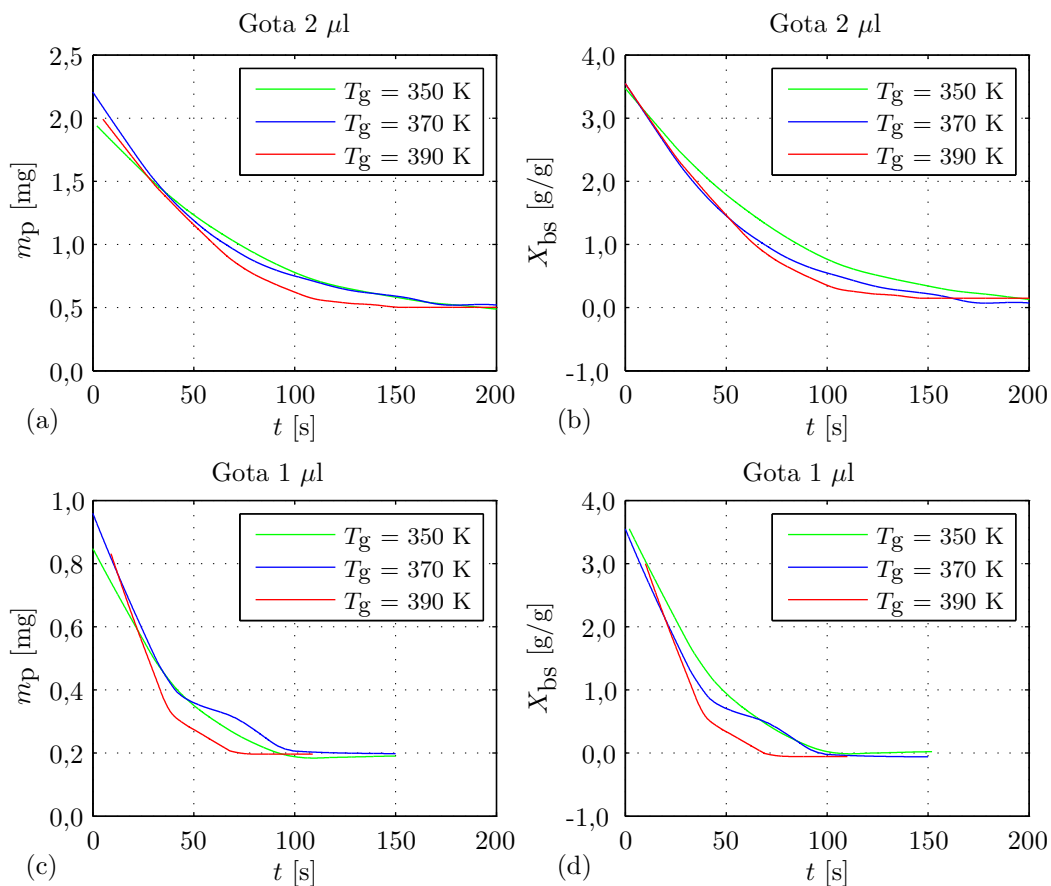


Figura A-3.: Comparación de los experimentos 1, 2 y 3, velocidad constante del aire ($v_g=0,75$ m/s) y cambio de temperatura del aire (T_g), para las gotas $V_0=1$ μl y $V_0=2$ μl . (a) y (c) comparación del cambio de masa, y (b) y (d) comparación del cambio de humedad, todas en función del tiempo.

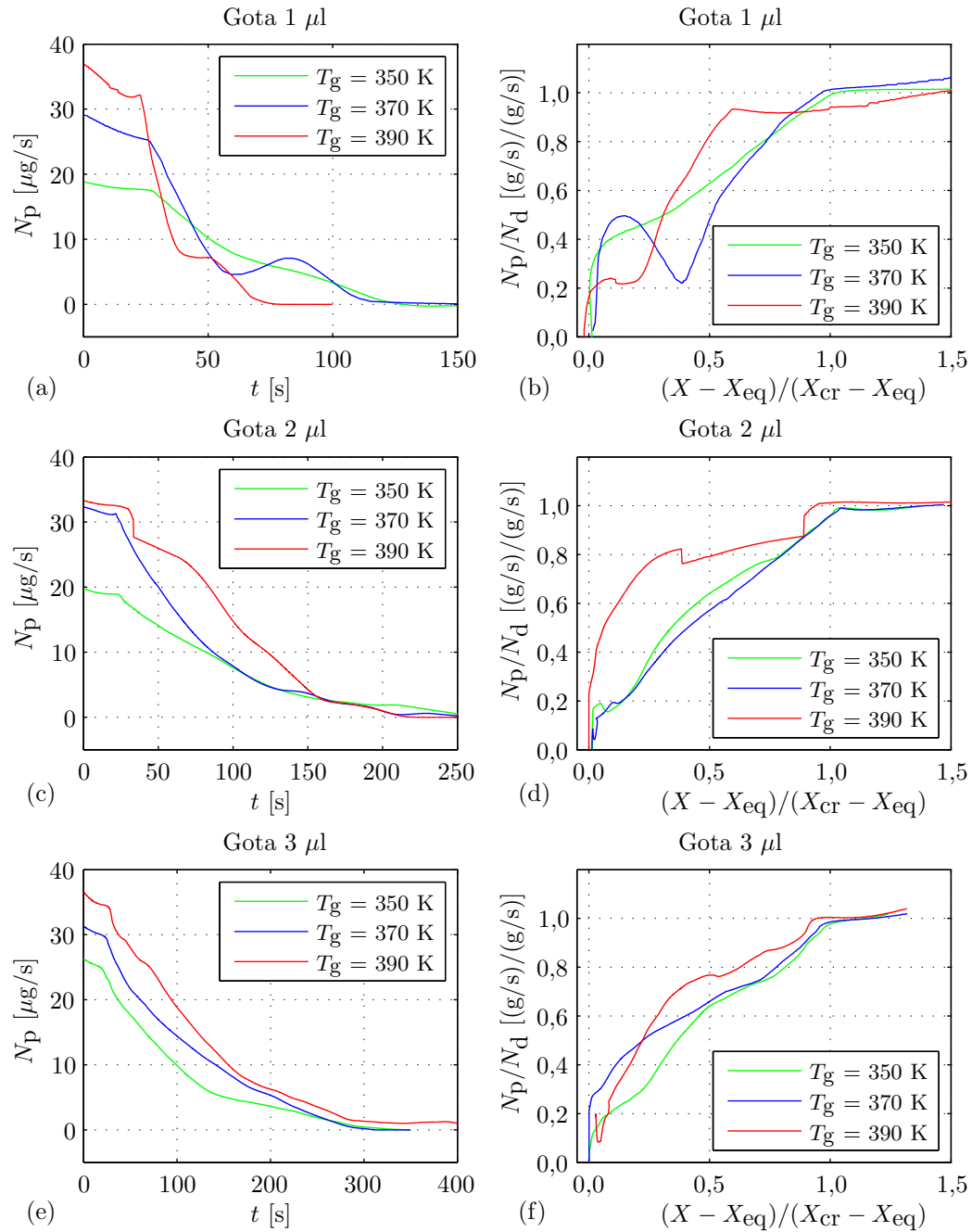


Figura A-4.: Efecto de la temperatura del aire en la velocidad de secado y la curva característica de secado para cada volumen inicial de gota. La velocidad del aire es constante ($v_g=0,50\text{ m/s}$).

A.3. Efecto de la velocidad del aire en secado de gotas de jugo modelo

La Figura A-5 muestra el efecto de la velocidad del aire de secado en el cambio de masa y humedad para las gotas de 1 y 2 μl . El efecto sobre la gota de 3 μl se presenta en la Figura 4-11. La Figura A-6 presenta el efecto de la velocidad del aire de secado en la velocidad de secado y la curva característica de velocidad de secado.

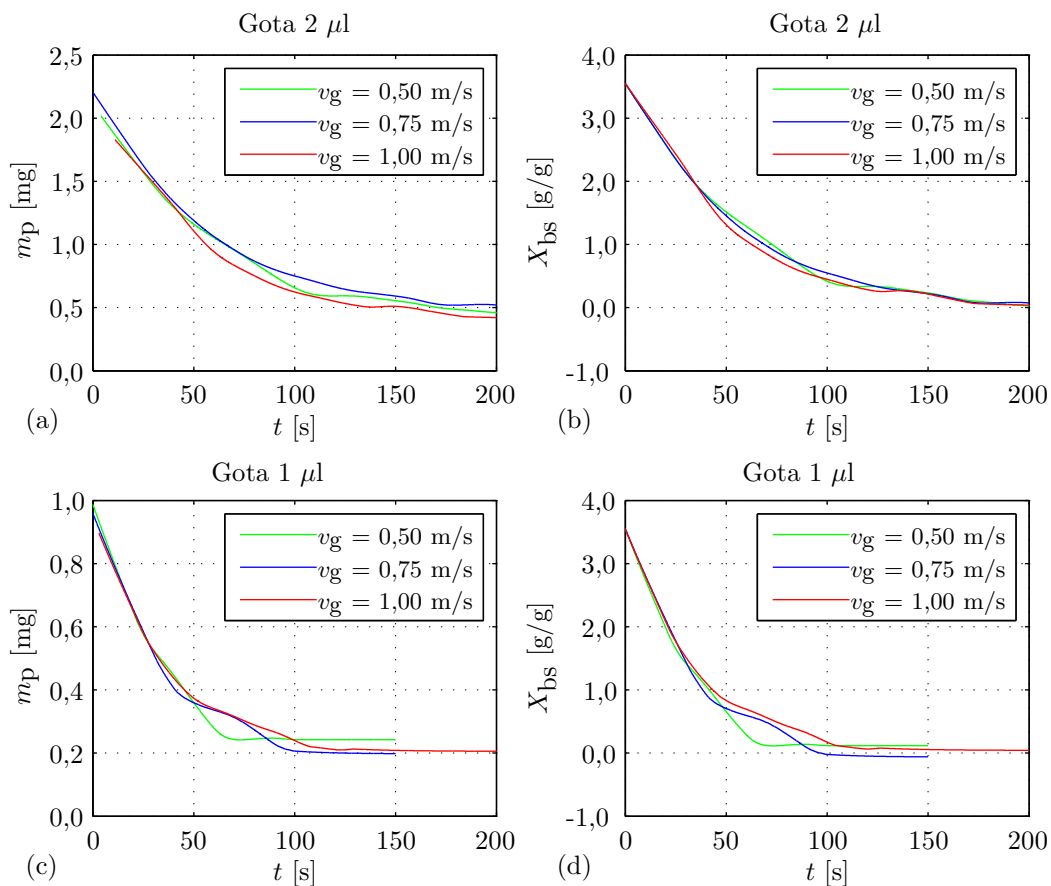


Figura A-5.: Comparación de los experimentos 1, 4 y 5, temperatura constante ($T_g=370$ K) y cambio de velocidad del aire (v_g) para la gota de volumen $V_0=1 \mu\text{l}$ y $V_0=2 \mu\text{l}$. (a) y (c) comparación del cambio de masa, (b) y (d) comparación del cambio de humedad, todas en función del tiempo.

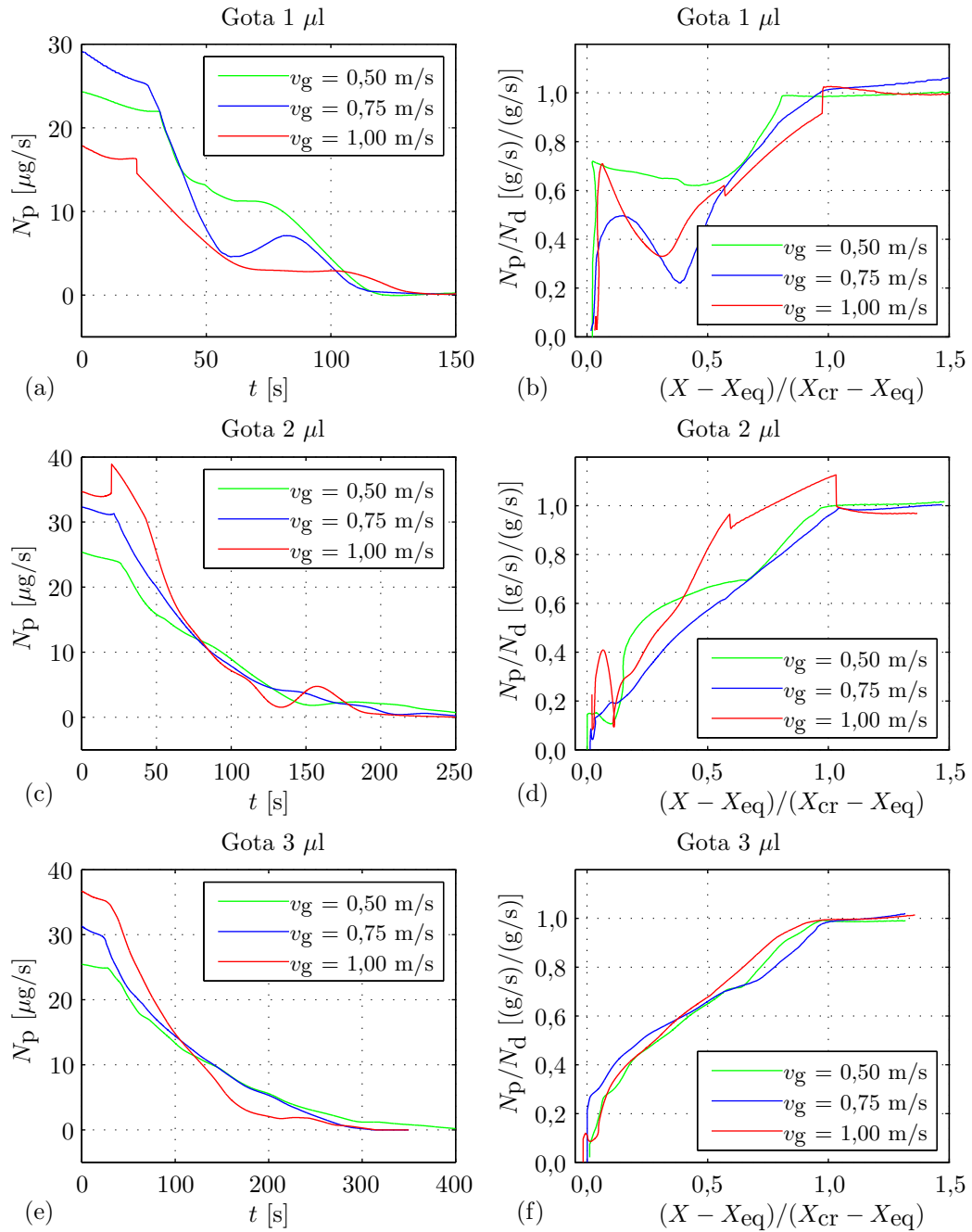


Figura A-6.: Efecto de la velocidad del aire en la velocidad de secado y la curva característica de secado para cada volumen inicial de gota. La temperatura del aire es constante ($T_g=370$ K).

A.4. Curvas de velocidad de secado y relación CDC del jugo modelo

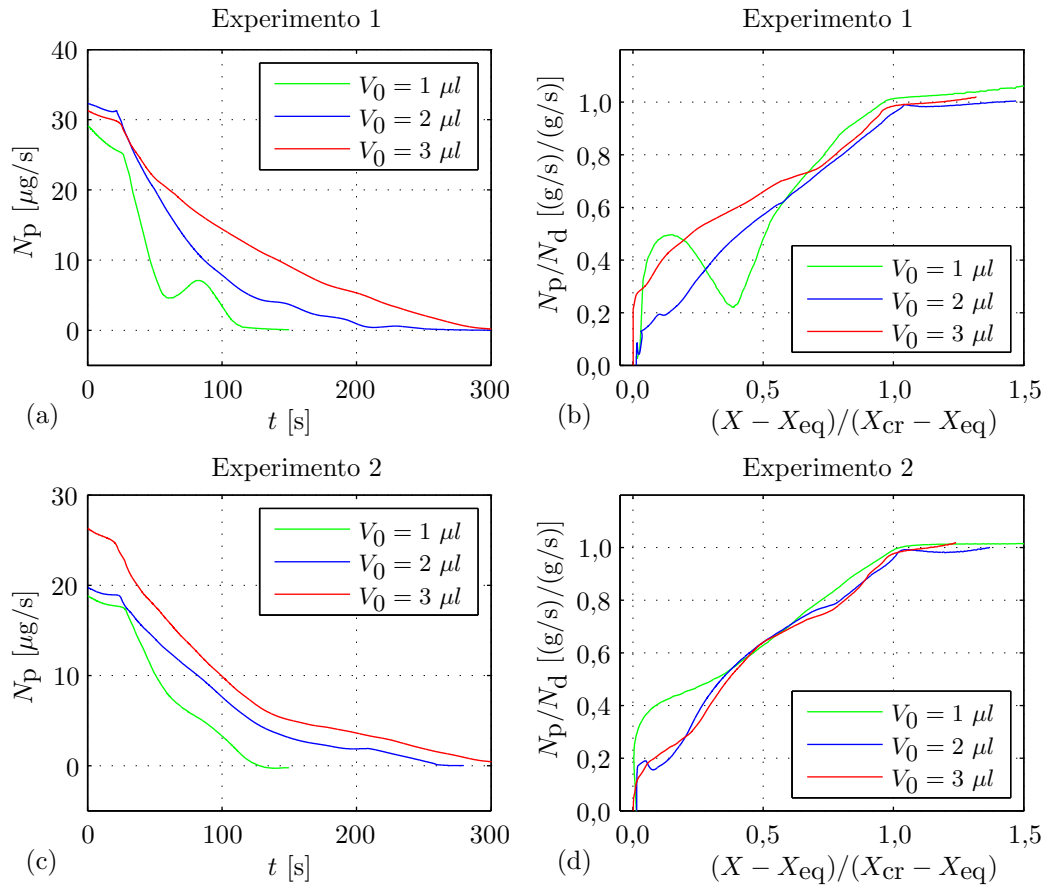


Figura A-7.: Procesamiento de los datos experimentales para el experimento 1 ($v_g=0,50$ m/s y $T_g=370$ K) y experimento 2 ($v_g=0,50$ m/s y $T_g=350$ K). Se presentan los resultados para cada volumen inicial de gota (V_0). (a) y (c) velocidad de secado en el tiempo, (b) y (d) curva característica de velocidad de secado.

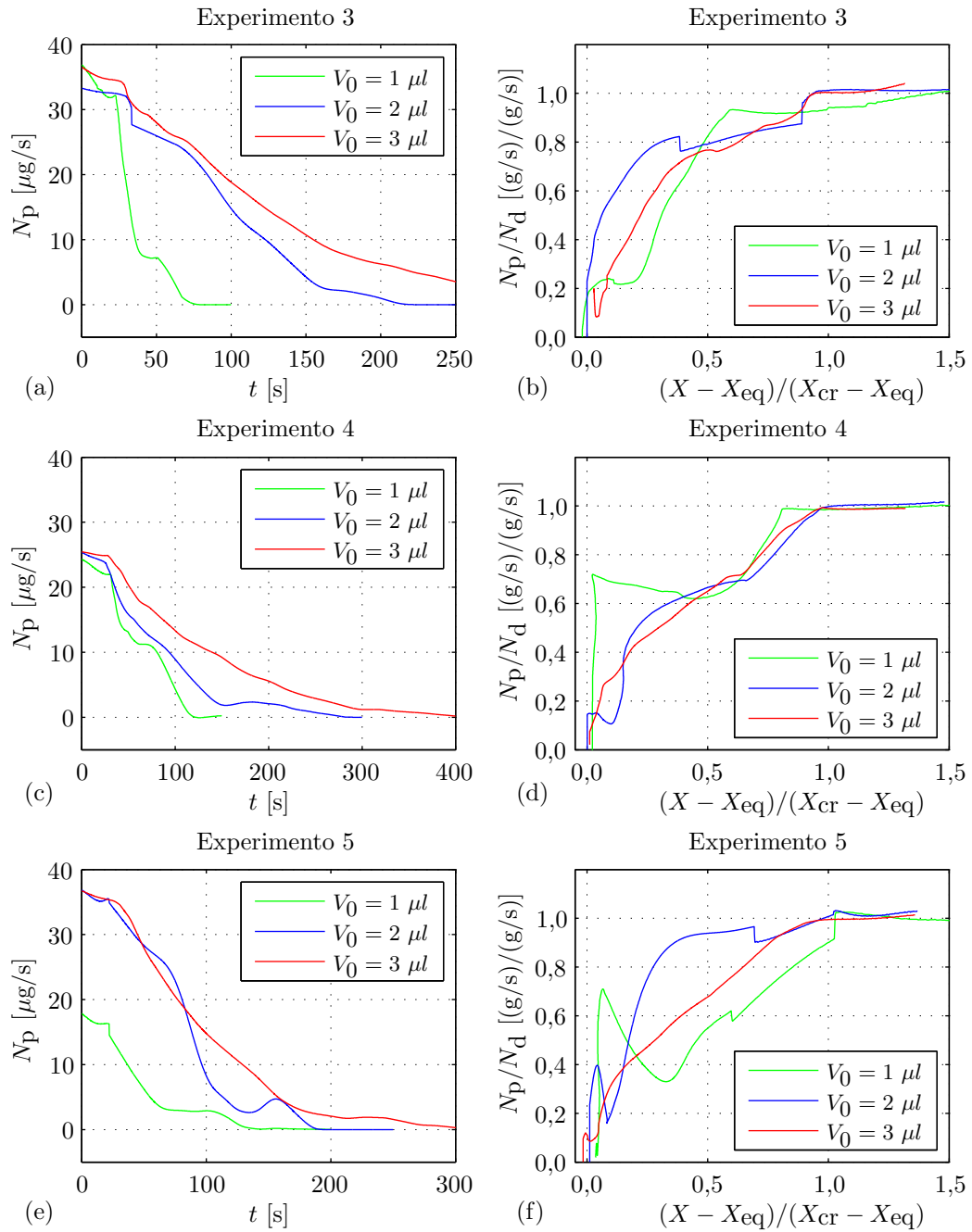


Figura A-8.: Procesamiento de los datos experimentales para el experimento 3 ($v_g=0,75$ m/s y $T_g=390$ K), experimento 4 ($v_g=0,50$ m/s y $T_g=370$ K) y experimento 5 ($v_g=1,00$ m/s y $T_g=370$ K). Se presentan los resultados para cada volumen inicial de gota (V_0). (a) velocidad de secado en el tiempo y (b) curva característica de velocidad de secado.

B. Anexo: Modificación del código OpenFOAM

A continuación se describen las modificaciones realizadas al código de OpenFOAM con el fin de incluir el secado de gotas de jugo. Se utiliza como base el solver multifásico `sprayFoam` que ya incluye por defecto las opciones `NoPhaseChange`, `LiquidEvaporation` y `LiquidEvaporationBoil`. En resumen se utiliza la opción `LiquidEvaporation` como base para crear una llamada `JuiceEvaporation` que tiene en cuenta la humedad de la gota y la fracción de masa. Los archivos definitivos `JuiceEvaporation.C` y `JuiceEvaporation.H` se incluyen en los Anexos B y C respectivamente.

Para realizar estas modificaciones es necesario compilar el programa directamente desde las fuentes disponibles en <http://openfoam.org/download/>. Seguir las instrucciones descritas en la página oficial y posteriormente realizar las modificaciones presentadas a continuación. Para este trabajo se utilizó la versión 4.1 de OpenFOAM.

B.1. Guardar masa de gotas

En la simulación multifásica se guardan las principales propiedades de las partículas discretas: diámetro, temperatura, tiempo de residencia, etc, excepto la masa de las gotas. Se presenta a continuación el procedimiento para guardar la masa de las partículas discretas. Esto se realiza con el fin de facilitar el posprocesamiento de análisis de las gotas.

Primero se debe modificar el archivo `kinematicParcelIO.C` el cual se encuentra en la ruta: `$FOAM_SRC/lagrangian/intermediate/parcels/Templates/KinematicParcel`. Las modificaciones al archivo son las siguientes:

```
kinematicParcelIO.C
...
    IOField<vector> UTurb(c.fieldIOobject("UTurb", IOobject::NO_READ), np);
// --- Modificaciones: Inicio ---
    IOField<scalar> mass(c.fieldIOobject("mass", IOobject::NO_READ), np);
// --- Modificaciones: Fin ---
...
```

```

        UTurb[i] = p.UTurb();
// --- Modificaciones: Inicio ---
        mass[i] = p.mass();
// --- Modificaciones: Fin ---

...

        UTurb.write();
// --- Modificaciones: Inicio ---
        mass.write();
// --- Modificaciones: Fin ---

...

        << token::SPACE << p.UTurb()
// --- Modificaciones: Inicio ---
        << token::SPACE << p.mass();
// --- Modificaciones: Fin ---

```

Se puede realizar el cambio de forma automática ejecutando el siguiente código en el terminal:

```

cd $FOAM_SRC/lagrangian/intermediate/parcels/Templates

file="./KinematicParcel/KinematicParcelIO.C"

sed -i 's&\(IOField<vector> UTurb(c.fieldIOobject("UTurb", IOobject::NO_READ), np);\)&\1\
// --- Modificaciones: Inicio --- \
        IOField<scalar> mass(c.fieldIOobject("mass", IOobject::NO_READ), np); \
// --- Modificaciones: Fin --- \
&' $file

sed -i 's&\(= p.UTurb();\)&\1\
// --- Modificaciones: Inicio --- \
        mass[i] = p.mass(); \
// --- Modificaciones: Fin --- \
&' $file

sed -i 's&\(UTurb.write();\)&\1\
// --- Modificaciones: Inicio --- \
        mass.write(); \
// --- Modificaciones: Fin --- \
&' $file

sed -i 's&<< token::SPACE << p.UTurb();&<< token::SPACE << p.UTurb() //; \
        << token::SPACE << p.mass(); // Nueva linea \
&' $file

```

Luego es necesario compilar de nuevo el programa para que tenga en cuenta los cambios:

```
$ cd $FOAM_SRC/..
$ wcleanMachine
$ ./Allwmake
```

B.2. Compartir la masa inicial y masa actual de la gota

Para calcular la humedad de la gota se necesita la masa actual y la masa inicial de la gota. Por lo tanto se deben enviar dos nuevas variables (`mass` y `mass0`) a la función de evaporación general. Para eso se agregan como entradas en todas la funciones que tienen el método `calculate`. Eso quiere decir que los archivos tanto `.C` como `.H` `LiquidEvaporation`, `LiquidEvaporationBoil`, `NoPhaseChange` y `PhaseChangeModel` se tiene que agregar las líneas donde se define el método `calculate`:

```
        scalarField& dMassPC,
// --- Modificaciones: Inicio ---
        const scalar mass0,
        const scalar mass
// --- Modificaciones: Fin ---
```

Para hacerlo por código, ejecutar las siguientes líneas:

```
fold="$FOAM_SRC/lagrangian/intermediate/submodels/Reacting/PhaseChangeModel/"

cambio="// --- Modificaciones: Fin --- \n const scalar mass0, \n \
const scalar mass \n // --- Modificaciones: Fin ---"

sed -i s_"(scalarField& dMassPC\)"_"\1,\n $cambio"_ \
    $fold/LiquidEvaporation/LiquidEvaporation.C
sed -i s_"(scalarField& dMassPC\)"_"\1,\n $cambio"_ \
    $fold/LiquidEvaporation/LiquidEvaporation.H
sed -i s_"(scalarField& dMassPC\)"_"\1,\n $cambio"_ \
    $fold/LiquidEvaporationBoil/LiquidEvaporationBoil.H
sed -i s_"(scalarField& dMassPC\)"_"\1,\n $cambio"_ \
    $fold/LiquidEvaporationBoil/LiquidEvaporationBoil.C
sed -i s_"(scalarField& dMassPC\)"_"\1,\n $cambio"_ \
    $fold/NoPhaseChange/NoPhaseChange.C
sed -i s_"(scalarField& dMassPC\)"_"\1,\n $cambio"_ \
    $fold/NoPhaseChange/NoPhaseChange.H
sed -i s_"(scalarField& dMassPC\)"_"\1,\n $cambio"_ \
    $fold/PhaseChangeModel/PhaseChangeModel.H
```


Por último se debe definir la variable `mass0` y `mass` en el archivo `ReactingParcel.C`. Esto se tiene que hacer de la línea que tiene la orden: `phaseChange.calculate`

```

...
                                ReactingParcel.C
...

        scalarField hmm(dMassPC);
// --- Modificaciones: Inicio ---
        const scalar mass0 = this->mass0(); // masa inicial del parcel
// --- Modificaciones: Fin ---

...

        X,
        dMassPC,
// --- Modificaciones: Inicio ---
                mass0,
                mass
// --- Modificaciones: Fin ---

```

Para hacerlo por código:

```

cd $FOAM_SRC/lagrangian/intermediate/parcels/Templates/ReactingParcel

file="parcels/Templates/ReactingParcel/ReactingParcel.C"

sed -i 's&\(hmm(dMassPC);\)&\1\
// --- Modificaciones: Inicio ---
        const scalar mass0 = this->mass0(); // masa inicial del parcel \
// --- Modificaciones: Fin ---
&' $file

sed -i 's&\(
        dMassPC\
);\)&\
        dMassPC,\
// --- Modificaciones: Inicio ---
        mass0, \
        mass \
// --- Modificaciones: Fin ---
);&' $file

```

En este paso se debe volver a compilar.

```

$ cd $FOAM_SRC
$ ./Allwmake

```

B.3. Crear la nueva función JuiceEvaporation

Sacar una copia de `LiquidEvaporation.C` y `LiquidEvaporation.H`, a esa copia se le llama `JuiceEvaporation.C` y `JuiceEvaporation.H` respectivamente. Todo esto dentro de la carpeta `PhaseChangeModel`. Se puede realizar esta acción ejecutando el siguiente código en el terminal.

```
cd $FOAM_SRC/lagrangian/intermediate/submodels/Reacting/PhaseChangeModel
cp -r LiquidEvaporation JuiceEvaporation
cd JuiceEvaporation
sed s/LiquidEvaporation/JuiceEvaporation/g \LiquidEvaporation.C >JuiceEvaporation.C
sed s/LiquidEvaporation/JuiceEvaporation/g \LiquidEvaporation.H >JuiceEvaporationT.H
sed s/liquidEvaporation/JuiceEvaporation/g \JuiceEvaporationT.H >JuiceEvaporation.H
rm JuiceEvaporationT.H LiquidEvaporation.H LiquidEvaporation.C
```

Luego agregar al archivo `makeReactingParcelPhaseChangeModels.H`, que se encuentra en la carpeta `$FOAM_SRC/lagrangian/intermediate/parcels/include/` las siguientes líneas

```
makeReactingParcelPhaseChangeModels.H
```

```
#include "LiquidEvaporationBoil.H"
#include "JuiceEvaporation.H"

...

    makePhaseChangeModelType(LiquidEvaporationBoil, CloudType);
\
    makePhaseChangeModelType(JuiceEvaporation, CloudType);
```

Por último compilar con las ordenes:

```
$ cd $FOAM_SRC
$ wcleanLnIncludeAll
$ wcleanMachine
$ wclean
$ ./Allwmake
```

El contenido completo de los archivos `JuiceEvaporation.C` y `JuiceEvaporation.H` se presentan en el anexo B y C, respectivamente. Se debe recordar recompilar al modificar estos archivos.

C. Anexo: JuiceEvaporation.C

```
/*-----*\
===== |
\\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      / O peration  |
\\      / A nd        | Copyright (C) 2011-2015 OpenFOAM Foundation
  \\    / M anipulation |
-----*/

License
  This file is part of OpenFOAM.

  OpenFOAM is free software: you can redistribute it and/or modify it
  under the terms of the GNU General Public License as published by
  the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or
  (at your option) any later version.

  OpenFOAM is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT
  ANY WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or
  FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the GNU General Public License
  for more details.

  You should have received a copy of the GNU General Public License
  along with OpenFOAM. If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.

/*-----*/

#include "JuiceEvaporation.H"
#include "specie.H"
#include "mathematicalConstants.H"

using namespace Foam::constant::mathematical;

// * * * * * Private Member Functions * * * * * //

template<class CloudType>
Foam::tmp<Foam::scalarField> Foam::JuiceEvaporation<CloudType>::calcXc
(
    const label cellI
) const
```

```

{
    scalarField Xc(this->owner().thermo().carrier().Y().size());

    forAll(Xc, i)
    {
        Xc[i] =
            this->owner().thermo().carrier().Y()[i][cellI]
            /this->owner().thermo().carrier().W(i);
    }

    return Xc/sum(Xc);
}

template<class CloudType>
Foam::scalar Foam::JuiceEvaporation<CloudType>::Sh
(
    const scalar Re,
    const scalar Sc
) const
{
    return 2.0 + 0.6*Foam::sqrt(Re)*cbrt(Sc);
}

// * * * * * Constructors * * * * * //

template<class CloudType>
Foam::JuiceEvaporation<CloudType>::JuiceEvaporation
(
    const dictionary& dict,
    CloudType& owner
)
:
    PhaseChangeModel<CloudType>(dict, owner, typeName),
    liquids_(owner.thermo().liquids()),
    activeLiquids_(this->coeffDict().lookup("activeLiquids")),
    liqToCarrierMap_(activeLiquids_.size(), -1),
    liqToLiqMap_(activeLiquids_.size(), -1)
{
    if (activeLiquids_.size() == 0)
    {
        WarningIn
        (
            "Foam::JuiceEvaporation<CloudType>::JuiceEvaporation"
            "("
            "const dictionary& dict, "
            "CloudType& owner"

```

```

        )"
    ) << "Evaporation model selected, but no active liquids defined"
      << nl << endl;
}
else
{
    Info<< "Participating liquid species:" << endl;

    // Determine mapping between liquid and carrier phase species
    forAll(activeLiquids_, i)
    {
        Info<< "    " << activeLiquids_[i] << endl;
        liqToCarrierMap_[i] =
            owner.composition().carrierId(activeLiquids_[i]);
    }

    // Determine mapping between model active liquids and global liquids
    const label idLiquid = owner.composition().idLiquid();
    forAll(activeLiquids_, i)
    {
        liqToLiqMap_[i] =
            owner.composition().localId(idLiquid, activeLiquids_[i]);
    }
}
}

template<class CloudType>
Foam::JuiceEvaporation<CloudType>::JuiceEvaporation
(
    const JuiceEvaporation<CloudType>& pcm
)
:
    PhaseChangeModel<CloudType>(pcm),
    liquids_(pcm.owner().thermo().liquids()),
    activeLiquids_(pcm.activeLiquids_),
    liqToCarrierMap_(pcm.liqToCarrierMap_),
    liqToLiqMap_(pcm.liqToLiqMap_)
{}

// * * * * * D e s t r u c t o r * * * * * //

template<class CloudType>
Foam::JuiceEvaporation<CloudType>::~JuiceEvaporation()
{}

```

```

// * * * * * Member Functions * * * * * //

template<class CloudType>
void Foam::JuiceEvaporation<CloudType>::calculate
(
    const scalar dt,
    const label cellI,
    const scalar Re,
    const scalar Pr,
    const scalar d,
    const scalar nu,
    const scalar T,
    const scalar Ts,
    const scalar pc,
    const scalar Tc,
    const scalarField& X,
    scalarField& dMassPC,
// --- Modificaciones: Inicio ---
    const scalar mass0,
    const scalar mass
// --- Modificaciones: Fin ---
) const
{
    // immediately evaporate mass that has reached critical condition
    if ((liquids_.Tc(X) - T) < SMALL)
    {
        if (debug)
        {
            WarningIn
            (
                "void Foam::JuiceEvaporation<CloudType>::calculate"
                "("
                "const scalar, "
                "const label, "
                "const scalar, "
                "const scalar, "
                "const scalar, "
                "const scalar, "
                "const scalar, "
                "const scalar, "
                "const scalar, "
                "const scalar, "
                "const scalar, "
                "const scalarField&, "
                "scalarField&"
                ") const"
            ) << "Parcel reached critical conditions: "
                << "evaporating all available mass" << endl;
        }
    }
}

```

```

    forAll(activeLiquids_, i)
    {
        const label lid = liqToLiqMap_[i];
        dMassPC[lid] = GREAT;
    }

    return;
}

// construct carrier phase species volume fractions for cell, cellI
const scalarField Xc(calcXc(cellI));

// --- Modificaciones: Inicio ---
// Leer los datos de la gota para la simulacion
const scalar Hbs0 = readScalar(this->coeffDict().lookup("Hbs0"));
const scalar Heq = readScalar(this->coeffDict().lookup("Heq"));
const scalar Hcr = readScalar(this->coeffDict().lookup("Hcr"));
const scalar fn = readScalar(this->coeffDict().lookup("fn"));
const scalar fs = readScalar(this->coeffDict().lookup("fs"));

const scalar mseca = mass0/(Hbs0+1);          // masa de la parte seca
scalar Hbs = (mass-mseca)/mseca;    // Humedad base seca
scalar f = fn*(max(Hbs - Heq,0)/(Hcr - Heq)); // Parametro de restriccion
f = pow(f,fs);

// Info<< "    Parametro de ajuste = " << f << nl;
// --- Modificaciones: Fin ---

// calculate mass transfer of each specie in liquid
forAll(activeLiquids_, i)
{
    const label gid = liqToCarrierMap_[i];
    const label lid = liqToLiqMap_[i];

// --- Modificaciones: Inicio ---
// Info<< "    Humedad relativa      = " << Xc[gid] << nl;
// Info<< "    Temperatura parcel    = " << Tc << nl;
// Info<< "    Presion parcel        = " << pc << nl;
// --- Modificaciones: Fin ---

// --- Modificaciones: Inicio ---
// vapour diffusivity [m2/s]
//original: const scalar Dab = liquids_.properties()[lid].D(pc, Ts); //
const scalar Dab = liquids_.properties()[lid].D(pc, Tc); // Modificado
// --- Modificaciones: Fin ---

```

```

// saturation pressure for species i [pa]
// - carrier phase pressure assumed equal to the liquid vapour pressure
// close to the surface
// NOTE: if pSat > pc then particle is superheated
// calculated evaporation rate will be greater than that of a particle
// at boiling point, but this is not a boiling model
const scalar pSat = liquids_.properties()[lid].pv(pc, T);

// Schmidt number
const scalar Sc = nu/(Dab + ROOTVSMALL);

// Sherwood number
const scalar Sh = this->Sh(Re, Sc);

// mass transfer coefficient [m/s]
const scalar kc = Sh*Dab/(d + ROOTVSMALL);

// --- Modificaciones: Inicio ---
// vapour concentration at surface [kmol/m3] at film temperature
// original: const scalar Cs = pSat/(RR*Ts);
const scalar Cs = pSat/(RR*T); // Modificado

// vapour concentration in bulk gas [kmol/m3] at film temperature
// original: const scalar Cinf = Xc[gid]*pc/(RR*Ts);
const scalar Cinf = Xc[gid]*pc/(RR*Tc); // Modificado
// --- Modificaciones: Fin ---

// molar flux of vapour [kmol/m2/s]
const scalar Ni = max(kc*(Cs - Cinf), 0.0);

// mass transfer [kg]
// Original: dMassPC[lid] += Ni*pi*sqr(d)*liquids_.properties()[lid].W()*dt;

// --- Modificaciones: Inicio ---
dMassPC[lid] += f*Ni*pi*sqr(d)*liquids_.properties()[lid].W()*dt;
// --- Modificaciones: Inicio ---

}
}

template<class CloudType>
Foam::scalar Foam::JuiceEvaporation<CloudType>::dh
(
    const label idc,
    const label idl,
    const scalar p,

```



```

    const scalar T
) const
{
    scalar dh = 0;

    typedef PhaseChangeModel<CloudType> parent;
    switch (parent::enthalpyTransfer_)
    {
        case (parent::etLatentHeat):
        {
            dh = liquids_.properties()[idl].hl(p, T);
            break;
        }
        case (parent::etEnthalpyDifference):
        {
            scalar hc = this->owner().composition().carrier().Ha(idc, p, T);
            scalar hp = liquids_.properties()[idl].h(p, T);

            dh = hc - hp;
            break;
        }
        default:
        {
            FatalErrorIn
            (
                "Foam::scalar Foam::JuiceEvaporation<CloudType>::dh"
                "("
                "const label, "
                "const label, "
                "const scalar, "
                "const scalar"
                ") const"
            ) << "Unknown enthalpyTransfer type" << abort(FatalError);
        }
    }

    return dh;
}

template<class CloudType>
Foam::scalar Foam::JuiceEvaporation<CloudType>::Tvap
(
    const scalarField& X
) const
{
    return liquids_.Tpt(X);
}

```

```
template<class CloudType>
Foam::scalar Foam::JuiceEvaporation<CloudType>::TMax
(
    const scalar p,
    const scalarField& X
) const
{
    return liquids_.pvInvert(p, X);
}
```

```
// ***** //
```

D. Anexo: JuiceEvaporation.H

```
/*-----*\
===== |
\\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      / O peration   |
\\      / A nd         | Copyright (C) 2011-2015 OpenFOAM Foundation
  \\    / M anipulation |
-----*/
```

License

This file is part of OpenFOAM.

OpenFOAM is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or (at your option) any later version.

OpenFOAM is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the GNU General Public License for more details.

You should have received a copy of the GNU General Public License along with OpenFOAM. If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.

Class

Foam::JuiceEvaporation

Description

Liquid evaporation model
- uses ideal gas assumption

```
/*-----*/
```

```
#ifndef JuiceEvaporation_H
#define JuiceEvaporation_H

#include "PhaseChangeModel.H"
#include "liquidMixtureProperties.H"
```

```
// * * * * * //

namespace Foam
{
/*-----*\
                Class JuiceEvaporation Declaration
\*-----*/

template<class CloudType>
class JuiceEvaporation
:
    public PhaseChangeModel<CloudType>
{
protected:

    // Protected data

        //- Global liquid properties data
        const liquidMixtureProperties& liquids_;

        //- List of active liquid names
        List<word> activeLiquids_;

        //- Mapping between liquid and carrier species
        List<label> liqToCarrierMap_;

        //- Mapping between local and global liquid species
        List<label> liqToLiqMap_;

    // Protected Member Functions

        //- Sherwood number as a function of Reynolds and Schmidt numbers
        scalar Sh(const scalar Re, const scalar Sc) const;

        //- Calculate the carrier phase component volume fractions at cellI
        tmp<scalarField> calcXc(const label cellI) const;

public:

        //- Runtime type information
        TypeName("juiceEvaporation");

    // Constructors

        //- Construct from dictionary
```

```
JuiceEvaporation(const dictionary& dict, CloudType& cloud);

//- Construct copy
JuiceEvaporation(const JuiceEvaporation<CloudType>& pcm);

//- Construct and return a clone
virtual autoPtr<PhaseChangeModel<CloudType> > clone() const
{
    return autoPtr<PhaseChangeModel<CloudType> >
    (
        new JuiceEvaporation<CloudType>(*this)
    );
}

//- Destructor
virtual ~JuiceEvaporation();

// Member Functions

//- Update model
virtual void calculate
(
    const scalar dt,
    const label cellI,
    const scalar Re,
    const scalar Pr,
    const scalar d,
    const scalar nu,
    const scalar T,
    const scalar Ts,
    const scalar pc,
    const scalar Tc,
    const scalarField& X,
    scalarField& dMassPC,
// --- Modificaciones: Inicio ---
    const scalar mass0,
    const scalar mass
// --- Modificaciones: Fin ---
) const;

//- Return the enthalpy per unit mass
virtual scalar dh
(
    const label idc,
    const label idl,
    const scalar p,
```

```
        const scalar T
    ) const;

    //- Return vapourisation temperature
    virtual scalar Tvap(const scalarField& X) const;

    //- Return maximum/limiting temperature
    virtual scalar TMax(const scalar p, const scalarField& X) const;
};

// * * * * * //

} // End namespace Foam

// * * * * * //

#ifdef NoRepository
#   include "JuiceEvaporation.C"
#endif

// * * * * * //

#endif

// ***** //
```

Bibliografía

- [1] La industria procesadora de frutas y hortalizas en Colombia / MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL - OBSERVATORIO AGROCADENAS COLOMBIA. Bogotá, 2005 (82). – Documento de trabajo. – 51 p.
- [2] ADHIKARI, B. ; HOWES, T. ; BHANDARI, B. R. ; TROUNG, V.: Surface Stickiness of Drops of Carbohydrate and Organic Acid Solutions During Convective Drying: Experiments and Modeling. En: *Drying Technology* 21 (2003), Nr. 5, p. 839
- [3] ADHIKARI, Benu ; HOWES, T. ; BHANDARI, B. R. ; TROUNG, Vinh: Experimental studies and kinetics of single drop drying and their relevance drying of sugar-rich foods: A review. En: *International Journal of Food Properties* 3 (2000), Nr. 3, p. 323–351
- [4] ALI AL ZAITONE, Belal ; TROPEA, Cameron: Evaporation of pure liquid droplets: Comparison of droplet evaporation in an acoustic field versus glass-filament. En: *Chemical Engineering Science* 66 (2011), p. 3914–3921
- [5] ANANDHARAMAKRISHNAN, C. ; GIMBUN, J. ; STAPLEY, A. G. F. ; RIELLY, C. D.: A Study of Particle Histories during Spray Drying Using Computational Fluid Dynamic Simulations. En: *Drying Technology* 28 (2010), Nr. 5, p. 566–576
- [6] ASHAYE, O.A. ; BABALOLA, S.O. ; BABALOLA, A.O. ; J.O., Aina ; S.B., Fasoyiro: Chemical and Organoleptic Characterization of Pawpaw and Guava Leathers. En: *World Journal of Agricultural Sciences* 1 (2005), Nr. 1, p. 50–51
- [7] TABLES FOR USE IN AUSTRALIA (NUTTAB), Nutrient. *NUTTAB 2010 Online Searchable Database*. Abril 2015
- [8] BAYLY, Andrew. E. ; JUKES, Paul ; GROOMBRIDGE, Michael ; MCNALLY, Clare: Airflow patterns in a counter-current spray drying tower - simulation and measurement. En: *Proceedings of the international drying symposium -cd-rom edition Drying 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, 2004, p. 775–781
- [9] BLOORE, C.G.: *A Quality Control System for the Manufacture of Spray Dried Milk Powders*. Nueva Zelanda, Massey University, Tesis de Grado, Febrero 1981
- [10] CHARLESWORTH, D. H. ; MARSHALL, W. R.: Evaporation from drops containing

- dissolved solids. En: *AIChE Journal* 6 (1960), Nr. 1, p. 9–23. – ISSN 1547–5905
- [11] CHEGINI, G. R. ; GHOBADIAN, B.: Effect of Spray-Drying Conditions on Physical Properties of Orange Juice Powder. En: *Drying Technology* 23 (2005), Nr. 3, p. 657–668
- [12] CHEGINI, G. R. ; GHOBADIAN, B.: Spray Dryer Parameters for Fruit Juice Drying. En: *World Journal of Agricultural Sciences* 3(2) (2007), p. 230–236
- [13] CHEGINI, G.R. ; KHAZAEI, J. ; GHOBADIAN, B. ; GOUDARZI, A.M.: Prediction of process and product parameters in an orange juice spray dryer using artificial neural networks. En: *Journal of Food Engineering* 84 (2008), Nr. 4, p. 534–543
- [14] CHEN, XD ; LAKE, R ; JEBSON, S: Study of milk powder deposition on a large industrial dryer. En: *Food and bioproducts processing : transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part C*. 71 (1993), September, p. 180—186. – ISSN 0960–3085
- [15] CHEN, Xiao D.: The Basics of a Reaction Engineering Approach to Modeling Air-Drying of Small Droplets or Thin-Layer Materials. En: *Drying Technology* 26 (2008), Nr. 6, p. 627–639
- [16] CHEN, Xiao D. ; PENG, Xiaofeng: Modified Biot Number in the Context of Air Drying of Small Moist Porous Objects. En: *Drying Technology* 23 (2005), Nr. 1-2, p. 83–103
- [17] CHOPDA, Chetan A. ; BARRETT, Diane M.: Optimization of Guaya Juice and Powder Production. En: *Journal of Food Processing and Preservation* 25 (2001), Nr. 6, p. 411–430
- [18] EDIBON, Equipamiento Didáctico T. *Secador de Spray Controlado desde Computador (PC), con SCADA y Control PID - SSPC*. 2016
- [19] FAO: *Situación actual y perspectivas a plazo medio para las frutas tropicales. Grupo del azúcar y las bebidas refrescantes. Servicio de materias primas, productos tropicales y hortícolas*. 2005. – Última revisión: feb 2015
- [20] FARID, Mohammed: A new approach to modelling of single droplet drying. En: *Chemical Engineering Science* 58 (2003), Nr. 13, p. 2985 – 2993. – ISSN 0009–2509
- [21] FERNANDES, Regiane VictÃ. B. ; BORGES, Soraia V. ; BOTREL, Diego A.: Influence of spray drying operating conditions on microencapsulated rosemary essential oil properties. En: *Food Science and Technology (Campinas)* 33 (2013), 02, p. 171 – 178. – ISSN 0101–2061
- [22] FLETCHER, D.F. ; GUO, B. ; HARVIE, D.J.E. ; LANGRISH, T.A.G. ; NIJDAM, J.J. ; WILLIAMS, J.: What is important in the simulation of spray dryer performance and

- how do current CFD models perform? En: *Applied Mathematical Modelling* 30 (2006), Nr. 11, p. 1281–1292
- [23] FLETCHER, D.F. ; LANGRISH, T.A.G.: Scale-adaptive simulation (SAS) modelling of a pilot-scale spray dryer. En: *Chemical Engineering Research and Design* (2009), Nr. 10, p. 1371–1378
- [24] FU, Nan ; WAI WOO, Meng ; LIN, Sean Xu Q. ; ZHOU, Zihao ; DONG CHEN, Xiao: Reaction Engineering Approach (REA) to model the drying kinetics of droplets with different initial sizes—experiments and analyses. En: *Chemical Engineering Science* 66 (2011), p. 1738–1747
- [25] FYHR, Christian ; KEMP, Ian C.: Comparison of different drying kinetics models for single particles. En: *Drying Technology* 16 (1998), Nr. 7, p. 1339–1369
- [26] GABITES, J.R. ; ABRAHAMSON, J. ; WINCHESTER, J.A.: Air flow patterns in an industrial milk powder spray dryer. En: *Chemical Engineering Research and Design* 88 (2010), Nr. 7, p. 899–910
- [27] GARCÍA, C. ; GONZÁLEZ, M. B. ; OCHOA, L. A. ; MEDRANO, H.: Microencapsulación de jugo de cebada verde mediante secado por aspersion microencapsulation of barley green juice by spray drying microencapsulación de zume de cebada verde mediante secado por aspersion. En: *Ciencia y Tecnologia Alimentaria* 4 (2004), Nr. 4, p. 262–266
- [28] GEA. *GEA Niro spray drying, Small-scale solutions for R&D and production*. 2016
- [29] GIANFRANCESCO, A. ; TURCHIULI, C. ; DUMOULIN, E. ; PALZER, S.: Prediction of Powder Stickiness along Spray Drying Process in Relation to Agglomeration. En: *Particulate Science and Technology* (2009), Nr. 5, p. 415–427
- [30] GIANFRANCESCO, Alessandro ; TURCHIULI, Christelle ; DUMOULIN, Elisabeth: Powder agglomeration during the spray-drying process: measurements of air properties. En: *Dairy Sci. Technol.* 88 (2008), Nr. 1, p. 53–64
- [31] GIANFRANCESCO, Alessandro ; TURCHIULI, Christelle ; FLICK, Denis ; DUMOULIN, Elisabeth: CFD Modeling and Simulation of Maltodextrin Solutions Spray Drying to Control Stickiness. En: *Food and Bioprocess Technology* 3 (2010), Nr. 6, p. 946–955
- [32] GOULA, Athanasia M. ; ADAMOPOULOS, Konstantinos G.: Influence of Spray Drying Conditions on Residue Accumulation—Simulation Using CFD. En: *Drying Technology* (2004), p. 1107–1128
- [33] GOULA, Athanasia M. ; ADAMOPOULOS, Konstantinos G.: Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on powder properties. En: *Journal of Food*

- Engineering* 66 (2005), Nr. 1, p. 35–42
- [34] GOULA, Athanasia M. ; ADAMOPOULOS, Konstantinos G.: A new technique for spray drying orange juice concentrate. En: *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 11 (2010), Nr. 2, p. 342 – 351. – ISSN 1466–8564
- [35] GUO, B. ; LANGRISH, T.A.G. ; FLETCHER, D.F.: Simulation of Gas Flow Instability in a Spray Dryer. En: *Chemical Engineering Research and Design* 81 (2003), Nr. 6, p. 631–638
- [36] GUTIERREZ DEVIA, Anyelo A.: *Evaluación de la calidad de frutos de guayaba Psidium guajava L. del banco de germoplasma de CORPOICA Palmira*. Palmira, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado, 2013
- [37] HARVIE, D.J.E. ; LANGRISH, T.A.G. ; FLETCHER, D.F.: Numerical Simulations of Gas Flow Patterns Within a Tall-Form Spray Dryer. En: *Chemical Engineering Research and Design* 79 (2001), Nr. 3, p. 235–248
- [38] HARVIE, D.J.E. ; LANGRISH, T.A.G. ; FLETCHER, D.F.: A Computational Fluid Dynamics Study of a Tall-Form Spray Dryer. En: *Food and Bioproducts Processing* 80 (2002), Nr. 3, p. 163–175
- [39] HERRING, W. M. ; MARSHALL, W. R.: Performance of vaned-disk atomizers. En: *AIChE Journal* 1 (1955), Nr. 2, p. 200–209. – ISSN 1547–5905
- [40] HUANG, Li X. ; KUMAR, Kurichi ; MUJUMDAR, A.S.: A comparative study of a spray dryer with rotary disc atomizer and pressure nozzle using computational fluid dynamic simulations. En: *Chemical Engineering and Processing* 45 (2006), Nr. 6, p. 461–470
- [41] HUANG, Li X. ; MUJUMDAR, A. S.: A computational fluid dynamic study of a low-humidity co-current spray dryer. En: *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering* 2 (2007), Nr. 1, p. 12–19
- [42] HUANG, Li X. ; MUJUMDAR, Arun S.: The Effect of Rotary Disk Atomizer RPM on Particle Size Distribution in a Semi-Industrial Spray Dryer. En: *Drying Technology* 26 (2008), Nr. 11, p. 1319–1325
- [43] HUANG, Li X. ; PASSOS, M. L. ; KUMAR, Kurichi ; MUJUMDAR, A. S.: A Three-Dimensional Simulation of a Spray Dryer Fitted with a Rotary Atomizer. En: *Drying Technology* 23 (2005), Nr. 9-11, p. 1859–1873
- [44] HUANG, Lixin ; KUMAR, Kurichi ; MUJUMDAR, A. S.: A Parametric Study of the Gas Flow Patterns and Drying Performance of Co-current Spray Dryer: Results of a Computational Fluid Dynamics Study. En: *Drying Technology* 21 (2003), Nr. 6, p. 957–978

- [45] HUANG, Lixin ; KUMAR, Kurichi ; MUJUMDAR, A. S.: Use of Computational Fluid Dynamics to Evaluate Alternative Spray Dryer Chamber Configurations. En: *Drying Technology* 21 (2003), Nr. 3, p. 385–412
- [46] HUANG, Lixin ; KUMAR, Kurichi ; MUJUMDAR, A. S.: Simulation of a Spray Dryer Fitted with a Rotary Disk Atomizer Using a Three-Dimensional Computational Fluid Dynamic Model. En: *Drying Technology* 22 (2004), Nr. 6, p. 1489–1515
- [47] HUANG, Lixin ; KUMAR, Kurichi ; MUJUMDAR, Arun. S.: Computational fluid dynamic simulation of droplet drying in a spray dryer. En: *Proceedings of the international drying symposium -cd-rom edition Drying 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, 2004, p. 326–332
- [48] HUANG, Lixin ; MUJUMDAR, A. S.: Numerical Study of Two-Stage Horizontal Spray Dryers Using Computational Fluid Dynamics. En: *Drying Technology* 24 (2006), Nr. 6, p. 727–733
- [49] HUANG, Lixin ; MUJUMDAR, Arun S.: Simulation of an Industrial Spray Dryer and Prediction of Off-Design Performance. En: *Drying Technology* 25 (2007), Nr. 4, p. 703–714
- [50] HUBINGER, M. ; MEBEGALLI, F. C. ; AGUERRE, R. J. ; SUAREZ, C.: Water Vapor Adsorption Isotherms of Guava, Mango and Pineapple. En: *Journal of Food Science* 57 (1992), Nr. 6, p. 1405–1407. – ISSN 1750–3841
- [51] JAYASUNDERA, M. ; ADHIKARI, B. ; ALDRED, P. ; GHANDI, A.: Surface modification of spray dried food and emulsion powders with surface-active proteins: A review. En: *Journal of Food Engineering* 93 (2009), Nr. 3, p. 266–277
- [52] JIN, Yan ; CHEN, Xiao D.: Numerical Study of the Drying Process of Different Sized Particles in an Industrial-Scale Spray Dryer. En: *Drying Technology* 27 (2009), Nr. 3, p. 371–381
- [53] JIN, Yan ; CHEN, Xiao D.: A Three-Dimensional Numerical Study of the Gas/Particle Interactions in an Industrial-Scale Spray Dryer for Milk Powder Production. En: *Drying Technology* 27 (2009), Nr. 10, p. 1018–1027
- [54] JIN, Yan ; CHEN, Xiao D.: A Fundamental Model of Particle Deposition Incorporated in CFD Simulations of an Industrial Milk Spray Dryer. En: *Drying Technology* 28 (2010), Nr. 8, p. 960–971
- [55] JIN, Yan ; CHEN, Xiao D.: Entropy production during the drying process of milk droplets in an industrial spray dryer. En: *International Journal of Thermal Sciences* 50 (2011), Nr. 4, p. 615–625

- [56] JUMAH, R. Y. ; TASHTOUSH, B. ; SHAKER, R.R. ; ZRAIY, A.F.: Manufacturing parameters and quality characteristics of spray dried jameed. En: *Drying Technology* 18 (2000), Nr. 4-5, p. 967–984
- [57] KEITH, Masters: *Spray drying handbook*. Halsted Press, 1985
- [58] KIEVIET, F.G.: *Modeling quality in spray drying*. The Netherlands, Eindhoven University of Technology, Tesis de Grado, 1997
- [59] KURIAKOSE, Rinil ; ANANDHARAMAKRISHNAN, C.: Computational fluid dynamics (CFD) applications in spray drying of food products. En: *Trends in Food Science & Technology* 21 (2010), Nr. 8, p. 383–398
- [60] LANGRISH, T.A.G.: Characteristic drying curves for cellulosic fibres. En: *Chemical Engineering Journal* 137 (2008), Nr. 3, p. 677 – 680. – ISSN 1385–8947
- [61] LANGRISH, T.A.G.: Multi-scale mathematical modelling of spray dryers. En: *Journal of Food Engineering* 93 (2009), Nr. 2, p. 218–228
- [62] LANGRISH, T.A.G. ; KOCKEL, T.K.: The assessment of a characteristic drying curve for milk powder for use in computational fluid dynamics modelling. En: *Chemical Engineering Journal* 84 (2001), p. 69–74
- [63] LANGRISH, T.A.G. ; WILLIAMS, J. ; FLETCHER, D.F.: Simulation of the Effects of Inlet Swirl on Gas Flow Patterns in a Pilot-Scale Spray Dryer. En: *Chemical Engineering Research and Design* 82 (2004), Nr. 7, p. 821–833
- [64] LANGRISH, T.A.G. ; ZBICINSKI, I.: The effects of air inlet geometry and spray cone angle on the wall deposition rate in spray dryers. En: *Chemical engineering research and design* 72 (1994), Nr. A3, p. 420–430
- [65] LEBARBIER, C. ; KOCKEL, T.K. ; FLETCHER, D.F. ; LANGRISH, T.A.G.: Experimental Measurement and Numerical Simulation of the Effect of Swirl on Flow Stability in Spray Dryers. En: *Chemical Engineering Research and Design* 79 (2001), Nr. 3, p. 260–268
- [66] LI, X ; ZBICINSKI, I.: A Sensitivity Study on CFD Modeling of Cocurrent Spray-Drying Process. En: *Drying Technology* (2005), p. 1681–1691
- [67] LIN, S ; CHEN, X: Changes in Milk Droplet Diameter During Drying Under Constant Drying Conditions Investigated Using The Glass-Filament Method. En: *Food and Bioproducts Processing* 82 (2004), p. 213–218. – ISSN 09603085
- [68] LIN, Sean Xu Q. ; CHEN, Xiao D.: Improving the Glass-Filament Method for Accurate Measurement of Drying Kinetics of Liquid Droplets. En: *Chemical Engineering*

- Research and Design* 80 (2002), p. 401–410
- [69] LO, Simon: Application of computational fluid dynamics to spray drying. En: *Le Lait* 85 (2005), Nr. 4-5, p. 7
- [70] MAHENDRAN, T: Physico-chemical properties and sensory characteristics of dehydrated guava concentrate: effect of drying method and maltodextrin concentration. En: *Tropical Agricultural Research and Extension* 13 (2011), Nr. 2
- [71] MEZHERICHER, M. ; LEVY, A. ; BORDE, I.: Droplet–Droplet Interactions in Spray Drying by Using 2D Computational Fluid Dynamics. En: *Drying Technology* (2008), Nr. 3, p. 265–282
- [72] MEZHERICHER, M. ; LEVY, A. ; BORDE, I.: Modeling of Droplet Drying in Spray Chambers Using 2D and 3D Computational Fluid Dynamics. En: *Drying Technology* 27 (2009), Nr. 3, p. 359–370
- [73] MEZHERICHER, M. ; LEVY, A. ; BORDE, I.: Spray drying modelling based on advanced droplet drying kinetics. En: *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 49 (2010), Nr. 11, p. 1205–1213
- [74] MEZHERICHER, M. ; LEVY, A. ; BORDE, I.: Theoretical Models of Single Droplet Drying Kinetics: A Review. En: *Drying Technology* 28 (2010), Nr. 2, p. 278–293
- [75] MEZHERICHER, Maksim ; LEVY, Avi ; BORDE, Irene: Multi-Scale Multiphase Modeling of Transport Phenomena in Spray-Drying Processes. En: *Drying Technology* 33 (2015), Nr. 1, p. 2–23
- [76] MUGELE, R.A. ; EVANS, H.D.: Droplet size distribution in sprays. En: *Industrial & Engineering Chemistry* 43 (1951), Nr. 6, p. 1317–1324
- [77] MUJUMDAR, Arun S.: *Handbook of Industrial Drying, Third Edition*. CRC Press, 2006. – ISBN 1574446681
- [78] NORTON, Tomás ; SUN, Da-Wen: Computational fluid dynamics (CFD) - an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. En: *Trends in Food Science & Technology* 17 (2006), Nr. 11, p. 600–620
- [79] OAKLEY, David E.: Spray Dryer Modeling in Theory and Practice. En: *Drying Technology* 22 (2004), Nr. 6, p. 1371–1402
- [80] OSORIO, Coralía ; FORERO, Diana P. ; CARRIAZO, José G.: Characterisation and performance assessment of guava (*Psidium guajava* L.) microencapsulates obtained by spray-drying. En: *Food Research International* (2010)
- [81] OZMEN, L. ; LANGRISH, T. A. G.: An Experimental Investigation of the Wall Depo-

- sition of Milk Powder in a Pilot-Scale Spray Dryer. En: *Drying Technology* 21 (2003), Nr. 7, p. 1253–1272
- [82] PASSOS, M.L. ; BIRCHAL, V.S. ; DAUD, W.R.W ; WOO, M. W. (Ed.) ; MUJUMDAR, A.S. (Ed.) ; DAUD, W.R.W. (Ed.): *Spray Drying Technology*. Vol. 1. 2010. – 37–60 p.
- [83] PATEL, Bhavesh B. ; PATEL, Jayvadan K. ; CHAKRABORTY, Subhashis ; SHUKLA, Dali: Revealing facts behind spray dried solid dispersion technology used for solubility enhancement. En: *Saudi Pharmaceutical Journal* 23 (2015), Nr. 4, p. 352 – 365. – ISSN 1319–0164
- [84] PATIL, Vaibhav ; CHAUHAN, Anil K. ; SINGH, Ravi P.: Optimization of the spray-drying process for developing guava powder using response surface methodology. En: *Powder Technology* 253 (2014), p. 230 – 236. – ISSN 0032–5910
- [85] PEREA, M.J. ; PEREZ, J.J. ; TERRES, E. ; CALDERON, G. ; GARIBAY, V. ; ALAMILLA, L. ; GUTIERREZ, G.F. ; WOO, M. W. (Ed.) ; MUJUMDAR, A.S. (Ed.) ; DAUD, W.R.W. (Ed.): *Spray Drying Technology*. Vol. 1. 2010. – 197–218 p.
- [86] PHISUT, N.: Spray drying technique of fruit juice powder: some factors influencing the properties of product. 19 (2012), Nr. 4, p. 1297–1306
- [87] RANZ, W.E. ; MARSHALL, W.R.: Evaporation from droplets. En: *Chem. Eng. Prog.* 48 (1952), Nr. 3-4
- [88] ROUSTAPOUR, Omid R. ; HOSSEINALIPOUR, Mostafa ; GHOBADIAN, Barat ; MOHAGHEGH, Fazlollah ; AZAD, Neda M.: A proposed numerical–experimental method for drying kinetics in a spray dryer. En: *Journal of Food Engineering* 90 (2009), p. 20–26
- [89] ROUSTAPOUR, O.R. ; HOSSEINALIPOUR, M. ; GHOBADIAN, B.: An Experimental Investigation of Lime Juice Drying in a Pilot Plant Spray Dryer. En: *Drying Technology* 24 (2006), Nr. 2, p. 181–188
- [90] RUEDA, Antoni ; PALACIO, Juan D. ; MUÑOZ, Jaime E. ; SAAVEDRA, Raúl ; BRAVO, Enrique: Caracterización molecular del banco de germoplasma de guayaba *Psidium* spp. del centro de investigación CORPOICA-Palmira. En: *Fitotecnia Colombiana* 6 (2006), Nr. 2, p. 26–32
- [91] SALEM, A. ; AHMADLOUEDARAB, M. ; GHASEMZADEH, K.: CFD approach for the moisture prediction in spray chamber for drying of salt solution. En: *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 17 (2011), p. 527–532
- [92] SARABANDI, Khashayar ; PEIGHAMBARDOST, Seyed H. ; SHIRMOHAMMADI, Majid: Physical properties of spray dried grape syrup as affected by drying temperature and drying aids. En: *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* 7 (2014), Nr.

- 12, p. 928
- [93] SHAMSUDIN, Rosnah ; MOHAMED, Ibrahim O. ; YAMAN, Nor Khalillah M.: Thermophysical properties of Thai seedless guava juice as affected by temperature and concentration. En: *Journal of Food Engineering* 66 (2005), Nr. 3, p. 395 – 399. – ISSN 0260–8774
- [94] SHARMA, Sanjeev: *Spray drier simulation and air flow pattern studies*, Aston University, Tesis de Grado, 1990
- [95] SOUTHWELL, D.B. ; LANGRISH, T.A.G.: Observation of flow patterns in a spray dryer. En: *Drying Technology* 18 (2000), Nr. 3, p. 661–685
- [96] SOUTHWELL, D.B. ; LANGRISH, T.A.G.: The Effect of Swirl on Flow Stability in Spray Dryers. En: *Chemical Engineering Research and Design* 79 (2001), Nr. 3, p. 222–234
- [97] SOUTHWELL, D.B. ; LANGRISH, T.A.G. ; FLETCHER, D.F.: Process Intensification in Spray Dryers by Turbulence Enhancement. En: *Chemical Engineering Research and Design* 77 (1999), Nr. 3, p. 189–205
- [98] SOUZA, Alexandre S.: Influence of spray drying conditions on the physical properties of dried pulp tomato. En: *Ciencia e Tecnologia de Alimentos* 29(2) (2009), p. 291–294
- [99] STAFFORD, R. A. ; FAUROUX, O. ; GLASS, D. H.: Flow Visualization and Instantaneous Velocity Measurements of Spray Dryer Gas and Spray Flows Using Particle Image Velocimetry. En: *Drying Technology* 15 (1997), Nr. 6-8, p. 1661–1671
- [100] STRAATSMA, J. ; VAN HOUWELINGEN, G. ; STEENBERGEN, A. E. ; DE JONG, P.: Spray drying of food products: 1. Simulation model. En: *Journal of Food Engineering* 42 (1999), Nr. 2, p. 67–72
- [101] TAFUR REYES, Ramiro ; TORO MESA, Julio C.: Presente y futuro de la fruticultura colombiana. En: *Memorias Primer Simposio Colombiano sobre producción, agroindustria, comercialización y cadena productiva*, 2007, p. 9–22
- [102] THYBO, Pia ; HOVGAARD, Lars ; LINDELØV, Jesper S. ; BRASK, Anders ; ANDERSEN, Sune K.: Scaling Up the Spray Drying Process from Pilot to Production Scale Using an Atomized Droplet Size Criterion. En: *Pharmaceutical Research* 25 (2008), Nr. 7, p. 1610–1620. – ISSN 1573–904X
- [103] ULLUM, T. ; SLOTH, J. ; BRASK, A. ; WAHLBERG, M.: Predicting Spray Dryer Deposits by CFD and an Empirical Drying Model. En: *Drying Technology* 28 (2010), Nr. 5, p. 723–729
- [104] USUI, Hiromoto ; SANO, Yuji ; YANAGIMOTO, Yoshihiro ; YAMASAKI, Yoshito: Tur-

- bulent Flow In A Spray Drying Chamber. En: *Journal of Chemical Engineering of Japan* 18 (1985), Nr. 3, p. 243–247
- [105] VERSTEEG, H.K. ; MALALASEKERA, W.: *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education Limited, 2007. – ISBN 9780131274983
- [106] VESILIND, P.Aarne: The Rosin-Rammler particle size distribution. En: *Resource Recovery and Conservation* 5 (1980), Nr. 3, p. 275 – 277. – ISSN 0304–3967
- [107] WALTON, D. E.: The Evaporation of Water Droplets. A Single Droplet Drying Experiment. En: *Drying Technology* 22 (2004), Nr. 3, p. 431–456
- [108] WAWRZYNIAK, Pawel ; PODYMA, Marek ; ZBICINSKI, Ireneusz ; BARTCZAK, Zdzislaw ; RABAEVA, Julia: Modeling of Air Flow in an Industrial Countercurrent Spray-Drying Tower. En: *Drying Technology* (2011), p. 217–224
- [109] WOO, Meng W. ; DAUD, Wan Ramli W. ; MUJUMDAR, Arun S. ; TALIB, Meor Zainal M. ; HUA, Wu Z. ; TASIRIN, Siti M.: Comparative study of droplet drying models for CFD modelling. En: *Chemical Engineering Research and Design* 86 (2008), Nr. 9, p. 1038–1048
- [110] WOO, Meng W. ; DAUD, Wan Ramli W. ; MUJUMDAR, Arun S. ; WU, Zhong H. ; MEOR TALIB, Meor Z. ; TASIRIN, Siti M.: CFD Evaluation of Droplet Drying Models in a Spray Dryer Fitted with a Rotary Atomizer. En: *Drying Technology* 26 (2008), Nr. 10, p. 1180–1198
- [111] WOO, Meng W. ; DAUD, Wan Ramli W. ; TASIRIN, Siti M. ; TALIB, Meor Zainal M.: Amorphous particle deposition and product quality under different conditions in a spray dryer. En: *Particuology* 6 (2008), Nr. 4, p. 265 – 270
- [112] WOO, Meng W. ; WAN DAUD, Wan R. ; TASIRIN, Siti M. ; TALIB, Meor Zainal M.: Effect of Wall Surface Properties at Different Drying Kinetics on the Deposition Problem in Spray Drying. En: *Drying Technology* 26 (2007), Nr. 1, p. 15–26
- [113] WOO, M.W. ; CHE, L.M. ; DAUD, W.R.W. ; MUJUMDAR, A.S. ; CHEN, X.D.: Highly swirling transient flows in spray dryers and consequent effect on modeling of particle deposition. En: *Chemical Engineering Research and Design* (2012), Nr. 0
- [114] WOO, M.W. ; HUANG, L.X. ; MUJUMDAR, A.S. ; DAUD, W.R.W. ; WOO, M. W. (Ed.) ; MUJUMDAR, A.S. (Ed.) ; DAUD, W.R.W. (Ed.): *Spray Drying Technology*. Vol. 1. 2010. – 37–60 p.
- [115] WOO, M.W. ; ROGERS, S. ; LIN, S.X.Q. ; SELOMULYA, C. ; CHEN, X.D.: Numerical probing of a low velocity concurrent pilot scale spray drying tower for mono-disperse

- particle production – Unusual characteristics and possible improvements. En: *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 50 (2011), Nr. 4, p. 417 – 427
- [116] WOO, M.W. ; ROGERS, S. ; SELOMULYA, C. ; CHEN, X.D.: Particle drying and crystallization characteristics in a low velocity concurrent pilot scale spray drying tower. En: *Powder Technology* In Press, Accepted Manuscript (2011)
- [117] ZAINAL, B.S. ; RAHMAN, R. A. ; ARIFF, A.B. ; SAARI, B.N. ; ASBI, B.A.: Effects of temperature on the physical properties of pink guava juice at two different concentrations. En: *Journal of Food Engineering* 43 (2000), Nr. 1, p. 55 – 59. – ISSN 0260–8774
- [118] ZBICINSKI, I.: Development and experimental verification of momentum, heat and mass transfer model in spray drying. En: *The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal* 58 (1995), Nr. 2, p. 123–133
- [119] ZBICINSKI, I. ; GRAD, J. ; STRUMILLO, C.: Effect of Turbulence on Heat and Mass Transfer in the Atomization Zone. En: *Drying Technology* 14 (1996), Nr. 2, p. 231–244
- [120] ZBICINSKI, Ireneusz ; PIATKOWSKI, Marcin: Spray Drying Tower Experiments. En: *Drying Technology* 22 (2004), Nr. 6, p. 1325–1349
- [121] ZBICISKI, Ireneusz ; LI, Xuanyou: Conditions for Accurate CFD Modeling of Spray-Drying Process. En: *Drying Technology* 24 (2006), Nr. 9, p. 1109–1114
- [122] ZHANG, Cai H. ; HUANG, Li X. ; WANG, Chun P. ; MUJUMDAR, Arun S.: Experimental and Numerical Investigation of Spray-Drying Parameters on the Dried Powder Properties of Ginkgo biloba Seeds. En: *Drying Technology* 28 (2010), Nr. 3, p. 380–388