



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Metodología de Diseño Simultáneo de Proceso y Control aplicada a un secado por atomización multiproducto para sustancias químicas naturales

Madalyd Yurani Vera Peña

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía
Medellín, Colombia

2012

Metodología de Diseño Simultáneo de Proceso y Control aplicada a un secado por atomización multiproducto para sustancias químicas naturales

Madalyd Yurani Vera Peña

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Química

Director:

I.Q., M.Sc., Ph.D. Hernán Darío Álvarez Zapata

Codirectora:

I.M., M.Sc., Ph.D. Lina María Gómez Echavarría

Línea de Investigación:

Modelamiento de Sistemas Dinámicos

Grupo de Investigación:

Grupo de investigación en Procesos Dinámicos- Kalman

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía
Medellín, Colombia
2012

Resumen

En este trabajo se desarrolló una metodología de diseño simultáneo de proceso y control para un equipo de secado por atomización multiproducto para colorantes naturales, la metodología incluye la ejecución de seis pasos. Se partió de la obtención del modelo semifísico de base fenomenológica que describe las dinámicas de temperatura, humedad de los sólidos y humedad del aire a la salida. La determinación de los parámetros del modelo, se realizó mediante datos experimentales propios y de la literatura, la validación del modelo se realizó para el estado estacionario en un secador por atomización Büchi B-290. Luego se establecieron los pareamientos de control para proceder con el análisis de controlabilidad mediante álgebra de Lie. La matriz de controlabilidad obtenida mediante álgebra de Lie, permitió determinar el volumen y las dimensiones de la cámara de secado por atomización. Con esto se logra el diseño simultáneo del proceso y su control.

Palabras clave:

Secado por atomización, diseño simultáneo de procesos, controlabilidad, álgebra de Lie, modelamiento.

Abstract

A methodology strategy was proposed for simultaneous process and control design. This strategy was developed for multiproduct spray dryer equipment. The spray dryer was employed in production of powder natural dyes. The methodology strategy involves six steps. First was obtained a Phenomenological Based Semiphysical Model (PBSM) of lumped parameters which describing the temperature and moisture dynamics. The determination of the parameters was performed by their own experimental data and literature data. The model validation was developed in a spray dryer Büchi B-290. Then, the pairing of control are established to proceed with controllability analysis using Lie Algebra. The controllability matrix obtain provides the tools to establish the design variables, in this case study to determine the volume and size of the spray drying chamber.

Keywords:

Spray dryer, simultaneous process and control design, controllability, Lie Algebra, modeling.

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Lista de figuras	X
Lista de tablas	XII
Lista de Símbolos y abreviaturas	XIII
Introducción	16
1. Hipótesis y Objetivos.....	15
1.1 Hipótesis.....	15
1.2 Objetivos	15
1.1.1 Objetivo general.....	15
1.1.2 Objetivos específicos.....	15
2. La Jagua como colorante en la industria.....	16
2.1 Generalidades de los colorantes.....	17
2.2 Generalidades de la Jagua.....	18
2.2.1 Aspectos biológicos de la especie	18
2.2.2 El árbol de la Jagua.....	18
2.2.3 Flores y fruto.	19
3. Procesos tecnológicos para la obtención de productos naturales en polvo	21
3.1 Criterios para seleccionar el método de secado.....	21
3.1.1 El modo de funcionamiento del aparato	22
3.1.2 Naturaleza del producto a secar.	22
3.1.3 La fuente de calor y el modo de transmisión del mismo	22
3.1.4 El consumo de energía.....	23
3.2 Tipos de Secadores.....	23
3.2.1 Secadores de calentamiento directo	24
3.2.2 Secadores de calentamiento indirecto	24
3.3 Liofilización (<i>Freeze-drying</i>)	25

4.	Secado por atomización.....	26
4.1	Etapas principales del proceso de secado por atomización	27
4.1.1	Atomización.....	28
4.1.2	Contacto gota atomizada –aire.....	29
4.1.3	Recuperación del Producto Seco	32
4.2	Psicrometría	33
5.	Metodología para el Diseño Simultáneo de Proceso y Control – DSPC de un equipo multiproducto de Secado por Atomización	36
5.1	Producto.....	36
5.1.1	Línea de productos o familia de productos.....	36
5.1.2	Diseño de equipos multiproducto.....	37
5.2	Revisión de la literatura sobre diseño y control de secadores por atomización	37
5.3	Propuesta metodológica de DSPyC.....	41
5.4	Modelado de Procesos.....	43
5.4.1	Tipos de modelos	43
	<i>Modelos de Caja Blanca, Físicos o Fenomenológicos.</i>	44
	<i>Modelos de caja gris o Semifísicos</i>	44
	<i>Modelos de caja negra o Empíricos.</i>	44
5.4.2	Formulación de un Modelo Semifísico de Base Fenomenológica (MSBF) del Proceso de Secado por Atomización.....	45
5.5	Selección de los pareamientos de control	45
5.5.1	Cálculo de los grados de libertad	46
5.6	Controlabilidad.....	46
5.6.1	Controlabilidad de Estado para Sistemas Lineales.....	48
	<i>Matriz de Controlabilidad de Estado para Sistemas Lineales</i>	48
	<i>Criterio de Controlabilidad- Condición de Rango</i>	48
5.6.2	Controlabilidad de Estado (CdeE) para Sistemas No Lineales.....	49
5.6.3	Controlabilidad Práctica Local de Estado (CPLdeE) para DSPyC	49
	<i>Matriz de Controlabilidad No lineal</i>	50
	<i>Criterio de Controlabilidad- Sistemas no lineales</i>	51
5.6.4	Representación del Sistema en Variables de Estado	51
5.6.5	Modelo en el Espacio de Estados.....	52

5.6.6	Forma Canónica del Sistema	53
5.7	Planteamiento de la función objetivo	54
6.	DSPyC de una cámara de secado por atomización	55
6.1	Formulación del colorante azul natural para cosméticos y alimentos.	55
6.1.1	Microencapsulación	56
6.1.2	Métodos Generales de Microencapsulación	57
6.1.3	Materiales de Encapsulación	58
6.2	Paso 1. Aplicar Metodología para Obtención de Modelos Semifísicos de Base Fenomenológica.....	59
6.2.1	Descripción verbal y diagrama de flujo de proceso complementario.	59
6.2.2	Nivel de detalle para el modelo, de acuerdo a su utilización: ¿qué preguntas contestará el modelo?	60
6.2.3	Definición de los sistemas de proceso (SdeP).....	60
6.2.4	Aplicación de principios de conservación sobre cada sistema de proceso.....	61
	Sistema de Proceso I (SdeP _I)	62
	Sistema de Proceso II (SdeP _{II})	63
6.2.5	Ecuaciones constitutivas que permiten calcular parámetros de cada uno de los Sistemas de Proceso.....	65
	Diámetro de partícula	65
	Transferencia de masa entre gotas y partículas al aire.	67
	Fracción volumétrica de gotas y partículas.....	67
	Tiempo de residencia dentro de la cámara de secado	68
	Humedad de Saturación.....	69
	Volumen húmedo.....	70
	Densidad del aire.....	70
	Velocidad de la gota y partícula	71
6.2.6	Verificar los grados de libertad del modelo	72
6.2.7	Simulación y validación del modelo de secado por atomización.....	72
	Condiciones de Operación	74
	Resultados de los ensayos en el equipo Büchi B-290 y simulación	74
6.3	Paso 2: Seleccionar las variables manipuladas y determinación del intervalo disponible 82	
6.3.1	Primer Pareamiento u_1, x_1	84

6.3.2	Segundo Pareamiento u_2, x_2	85
6.3.3	Tercer Pareamiento u_3, x_3	85
6.4	Paso 3: Análisis de Controlabilidad	86
6.4.1	Forma canónica de la ecuación que describe la dinámica de la humedad de las partículas (Ecuación 6.14)	87
6.4.2	Forma canónica de la ecuación que describe la dinámica de la humedad del aire (Ecuación 6.18)	88
6.4.3	Forma canónica de la ecuación que describe la dinámica de la temperatura del aire a la salida (Ecuación 6.21)	89
6.4.4	Análisis de controlabilidad de la cámara de secado por atomización	90
6.5	Paso 4: Primer resultado de Diseño	93
6.6	Paso 5: Cambiar de producto y obtener segundo resultado de diseño	94
6.7	Paso 6: Seleccionar las condiciones de diseño de la cámara de secado	96
6.8	Optimización en el diseño	96
6.8.1	Costo variable:	97
6.8.2	Costo fijo:	97
7.	Conclusiones y recomendaciones	100
7.1	Conclusiones	100
7.2	Recomendaciones	101
A.	Anexo: Spray Dryer Buchi B-290	102
B.	Anexo: Determinación de las propiedades físico-químicas de la muestra	105
C.	Anexo: Columnas octava y novena de la matriz de controlabilidad Wc	106
8.	Bibliografía	108

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Árbol de Jagua (Francis, 2011)	19
Figura 2-2: Fruta de Jagua a) Fruta entera b) fruta partida	20
Figura 4-3: Diagrama de flujo básico del secador por aspersion (Bylund, 1995)	26
Figura 4-4: Etapas de un proceso de secado por atomización	27
Figura 4-5: Imágenes de sistemas de atomización izquierda boquilla a presión, derecha disco rotatorio (Yanza, 2003)	29
Figura 4-6: Tipos de Flujo a) co-corriente b) contracorriente y c) combinado	30
Figura 4-7: Distintos tipos de cámaras de secado (Westergaard, 2004)	31
Figura 4-8: Unidad de secado y separación del producto a) Separación primaria b) Separación secundaria, Ciclón (Ángeles, 2009)	32
Figura 4-9: Mapa conceptual psicrometría	35
Figura 5-10: Línea de producto	37
Figura 5-11: Pasos para el diseño de un producto o proceso químico (Rivera, 2010)	40
Figura 5-12: Propuesta de Metodología DSPyC	42
Figura 5-13: Representación de un Sistema en Variables de Estado	47
Figura 6-14: Estructura general de una microcápsula (Lozano, 2009)	56
Figura 6-15: Morfología de los diferentes tipos de microcápsulas (Vehring, 2008)	57
Figura 6-16: Diagrama de Flujo del proceso de Secado por Atomización	60
Figura 6-17: Diagrama de bloques de los Sistemas de Proceso	61
Figura 6-18: Büchi mini Spray Dryer B-290, Suiza	73
Figura 6-19: Diagrama del secador Büchi mini Spray Dryer B-290, 1. Boquilla de atomización, 2. Calefacción eléctrica, 3. Cámara de secado, 4. Ciclón, 5. Filtro de salida, 6. Aspirador para generar la corriente de aire	73
Figura 6-20: Datos de temperatura de salida de la cámara de secado mediante ensayos y simulación	75
Figura 6-21: Temperatura salida cámara de secado. Rojo Datos experimentales, Azul Datos de simulación	78
Figura 6-22: Simulación de la temperatura de salida cámara de secado durante los primeros 10 segundos.	79
Figura 6-23: Simulación de la humedad en base seca de los sólidos húmedos durante los primeros 10 segundos.	79
Figura 6-24: Simulación de la humedad en base húmeda de los sólidos húmedos durante los primeros 10 segundos	80
Figura 6-25: Simulación de la humedad absoluta del aire en la salida durante los primeros 10 segundos	80

Figura 6-26:	Condiciones de controlabilidad Volumen cámara de secado primer producto	94
Figura 6-27:	Condiciones de controlabilidad Volumen cámara de secado	95
Figura 6- 28.	Optimización del diseño de la Cámara de secado por atomización	98
Figura 6-29.	Dimensiones de la cámara de secado	99
Figura A-30:	Relación altura frente a flujo volumétrico de Aire Mini Spray Dryer Büchi B-290	104
Figura A-31:	Configuración de la bomba frente al caudal.....	104
Figura A-32:	Analizador de humedad Sartorius MA-35. Izquierda equipo, derecha, muestra de colorante azul	105
Figura A-33:	Refractómetro digital portátil Atago PAL-3	105

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$w_{agua,solH}$	Fracción de agua en gotas y partículas	$\frac{kg}{kg}$	Ecuación 6.14
$w_{agua,sln}$	Fracción másica de agua en la solución alimentada	$\frac{kg}{kg}$	Ecuación 6.16
$w_{agua,solH}^c$	Humedad crítica	$\frac{kg}{kg}$	Ecuación 6.24
$w_{agua,solH}^*$	Humedad en el equilibrio	$\frac{kg}{kg}$	Ecuación 6.26
$h_{A,AireEnt}$	Humedad absoluta del aire a la entrada	$\frac{kg}{kg}$	Ecuación 6.17
$h_{A,AireHum}$	Humedad absoluta del aire a la salida	$\frac{kg}{kg}$	Ecuación 6.17
$h_{A,ASAireEnt}$	Humedad absoluta del aire a la entrada Base seca	$\frac{kg}{kg}$	Ecuación 6.21
\dot{m}_{sln}	Flujo másico de solución a secar	$\frac{kg}{s}$	Ecuación 6.14
$\dot{m}_{aireEnt}$	Flujo másico de aire en la entrada	$\frac{kg}{s}$	Ecuación 6.15
\dot{m}_3	Flujo másico de agua transferida al aire secante	$\frac{kg}{s}$	Ecuación 6.26
\dot{m}_{solH}	Flujo másico de salida de los sólidos secos.	$\frac{kg}{s}$	Ecuación 6.16
$\dot{m}_{AS,AireEnt}$	Flujo de entrada del aire	$\frac{kg}{s}$	Ecuación 6.17
$\dot{m}_{AS,AireHum}$	Flujo de salida del aire	$\frac{kg}{s}$	Ecuación 6.17
M_{sln}	Masa de solución a secar presente en un instante dado en la cámara.	$\frac{kg}{s}$	Ecuación 6.29
$M_{AS,AireHum}$	Masa de aire seco dentro de la cámara de secado	kg	Ecuación 6.17
T_{ref}	Temperatura de referencia	K	Ecuación 6.16
T_{amb}	Temperatura ambiente	K	Ecuación 6.20
T_2	Temperatura del aire en la entrada	K	Ecuación 6.20
T_3	Temperatura de transferencia de masa	K	Ecuación 6.20
T_5	Temperatura del aire húmedo a la salida	K	Ecuación 6.20
C_{Pagua}	Calor específico de agua	$\frac{J}{kgK}$	Incropera,1999 Ecuación 6.16

C_{Psol}	Calor específico estimado para la leche en polvo	$\frac{J}{kgK}$	Dalmaz, 2007 Ecuación 6.16
C_{Psln}	Calor específico de la solución		Ecuación 6.16
$C_{PAireSeco}$	Capacidad calorífica del aire seco	$\frac{J}{kgK}$	Perry, 1984 Ecuación 6.20
$C_{PAireEnt}$	Capacidad calorífica del aire a la	$\frac{J}{kgK}$	Perry, 1984 Ecuación 6.20
$C_{PAireHum}$	Capacidad calorífica del aire húmedo	$\frac{J}{kgK}$	Perry, 1984 Ecuación 6.20
C_{Pv}	Capacidad calorífica del vapor de agua	$\frac{J}{kgK}$	Incropera, 1999 Ecuación 6.20
$C_{Pagua,sln}$	Calor específico del agua en la solución	$\frac{J}{kgK}$	Ecuación 6.16
D	Difusividad	$\frac{m^2}{s}$	Ecuación 6.25
$D_{agua-aire}$	Difusividad del agua, desde la gota hasta el aire	$\frac{m^2}{s}$	Ecuación 6.25a
D_{cort}	Difusividad del agua a través de la corteza de la partícula	$\frac{m^2}{s}$	Ecuación 6.25b
C	Coficiente de arrastre	1	Ecuación 6.37
h_{cn}	Coficiente de convección natural	$\frac{J}{m^2 s K}$	Ecuación 6.20
K	coeficiente convectivo de transferencia de masa	$\frac{kg}{s}$	Ecuación 6.27
Sh	Número de Sherwood	1	Ecuación 6.27
N_{Re}	Número de Reynolds	1	Ecuación 6.37
d_p	Diámetro de partícula	m	Ecuación 6.23
d_{p0}	Diámetro de partícula inicial	m	Ecuación 6.22
V_{cs}	Volumen de la cámara de secado	m^3	Ecuación 6.29
D_c	Diámetro de la cámara de secado	m	Ecuación 6.29
h'	Altura cámara de secado	m	Ecuación 6.29
A_{cs}	Área de la cámara de secado	m	Ecuación 6.38
A_{tcs}	Área de transferencia de la cámara de secado	m	Ecuación 6.20
v_H	Volumen húmedo	$\frac{m^3}{kg}$	Ecuación 6.34
g	Gravedad	$\frac{m}{s^2}$	Ecuación 6.36
P	Presión	Pa	Presión de trabajo en la ciudad de Medellín
$v_{ter,gyp}$	Velocidad terminal de gota y partícula	$\frac{m}{s}$	Ecuación 6.36
V_{aire}	velocidad del aire	$\frac{m}{s}$	Ecuación 6.38
N	Velocidad de giro del disco rotatorio	rpm	Ecuación 6.21

d	de la boquilla aspersora Diámetro del disco rotatorio de la boquilla aspersora	m	Ecuación 6.21
n	Numero de agujeros del disco rotatorio de la boquilla aspersora	1	Ecuación 6.21
h	Díámetro de los agujeros del disco rotatorio de la boquilla aspersora	m	Birchal, et al., 2006 Ecuación 6.21

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
ε	Fracción volumétrica de gotas y partículas	1	Ecuación 6.28
λ_0	Calor latente de vaporización a la temperatura de referencia	$\frac{J}{kg}$	Ecuación 6.20
λ_{vap}	Calor de vaporización del agua	$\frac{J}{kg}$	Ecuación 6.20
τ_r	Tiempo de residencia	s	Ecuación 6.30
ρ_{agua}	Densidad del agua	$\frac{kg}{m^3}$	Ecuación 6.22
ρ_{sln}	Densidad de la solución	$\frac{kg}{m^3}$	Ecuación 6.28
ρ_{aire}	Densidad del aire	$\frac{kg}{m^3}$	Ecuación 6.35
$\rho_{solidos}$	Densidad de los sólidos	$\frac{kg}{m^3}$	Ecuación 6.13

Abreviaturas

Abreviatura	Término
DSPyC	Diseño Simultáneo del Proceso y Control
MSBF	Modelo Semifísico de Base Fenomenológica
SdeP	Sistema de Proceso
RDCS	Resultado de Diseño Cámara de Secado
FdeC	Funcional de Costo

Introducción

El diseño es tal vez la tarea central en el quehacer ingenieril. Todo diseño intenta modificar ciertas condiciones de una situación actual de modo que se pueda producir una nueva situación lo más cercana posible a la considerada ideal. Por lo tanto, el diseño contempla la búsqueda de una cierta estructura con un cierto grupo de parámetros, que bajo la estructura planteada, den un resultado cercano al esperado (Alvarez, 2012).

Se considera como situación ideal aquella que maximiza la productividad minimizando el consumo de energía. En tal sentido, el diseño de un equipo o planta en la cual realizar un proceso, implica el conocimiento de los principios y mecanismos por los que ocurren las operaciones unitarias que conforman dicho proceso. La metodología tradicional de diseño de procesos se ha basado en el uso de conocimiento heurístico de los expertos para determinar el tipo de unidades de proceso, el número y la forma de interconectarlos desde un punto de vista económicamente óptimo para lograr ciertos objetivos de producción especificados de antemano. Cuando la configuración óptima había sido seleccionada, los parámetros del proceso y el punto de operación eran evaluados mediante el uso de modelos estacionarios. Una vez que el sistema de proceso era diseñado, dimensionado y construido, los ingenieros de control se encargaban de diseñar el sistema de control más adecuado para que el proceso operase en el punto de operación calculado con el mayor rendimiento posible, en lazo cerrado. Por lo tanto el diseño de sistema de proceso y el diseño del sistema de control se realizaban de forma secuencial y sin tener en cuenta aspectos tan relevantes como la controlabilidad del sistema resultante, dando como resultado en la mayoría de los casos, plantas difíciles de controlar y poco adaptables a los futuros, y cada vez más estrictos, requerimientos de calidad (Sutil, 2011).

Tener sólo en cuenta consideraciones de diseño de un equipo hace que los equipos resultantes sean difíciles de controlar. Esto lleva a la obtención de productos que no cumplen especificaciones, a pérdidas económicas y a un desempeño deficiente del sistema. Por estas razones el diseño del sistema de control debe hacerse desde las etapas iniciales del diseño del equipo, garantizando la existencia del sistema de control adecuado para el equipo que se va a implementar (Marín, et al., 2004).

El Diseño Simultáneo del Proceso y Control (DSPyC) es una técnica de diseño en la cual las características de controlabilidad son consideradas desde las etapas iniciales de diseño, lo que permite fijar especificaciones dinámicas del sistema que facilitarán luego la operación y flexibilidad del proceso controlado. El principal objetivo del DSPyC es obtener un costo mínimo en el diseño unido a una máxima productividad a la vez que asegura un comportamiento en lazo cerrado de la planta cumpliendo todas las restricciones de seguridad y funcionamiento (máxima eficacia energética, buena operatividad respecto a flexibilidad, controlabilidad, seguridad y regulación medioambientales).

Generalmente, el uso simultáneo de la teoría de control y el procedimiento de diseño de procesos se realiza a través del concepto de controlabilidad, el cual ha cambiado mucho desde su definición original (Ochoa, 2005). Tal concepto se ha explorado desde dos diferentes perspectivas: el enfoque de la teoría de control convencional, en el cual el concepto de controlabilidad se aborda desde la perspectiva entrada - salida y el enfoque basado en la teoría de control moderna, la cual aborda la evaluación de la controlabilidad en el espacio de estados (Kalman, 1960). En este trabajo se va a estudiar este último enfoque utilizando modelos en el espacio de estados. El concepto de estado se hace dominante en el estudio de los sistemas dinámicos, es fundamental considerar que la conducta actual está influenciada por la historia previa del sistema y su comportamiento no puede por lo tanto especificarse simplemente como una relación instantánea entre conjuntos de variables de entrada y de salida. Se necesita por tanto, un conjunto adicional de variables cuyo objetivo es tomar en cuenta la historia pasada del sistema. Estas variables son las variables de estado, que representan la mínima cantidad de información que resume todo el pasado dinámico del Sistema. Por lo tanto es todo lo que se necesita conocer para poder predecir su evolución futura frente a cualquier señal de entrada que se aplique. Dicha predicción será la solución de un modelo de proceso en el espacio de estados (Alvarez, 2012).

Este documento está dividido en 7 capítulos; el Capítulo 1 contiene la hipótesis y los objetivos planteados para esta investigación. En el Capítulo 2 se encuentran las generalidades acerca de los colorantes y cómo su uso se ha ampliado a diferentes sectores industriales (cosméticos, textiles, alimenticios, automotriz, etc.). En este capítulo se habla específicamente sobre la Jagua (colorante natural a secar por atomización) sus usos, aspectos biológicos y hábitat, ya que esta es una fruta con la cual se obtiene un colorante azul natural, este colorante azul es muy importante debido a que naturalmente es difícil obtener este color y su uso puede reemplazar o disminuir el uso de colorantes sintéticos. El Capítulo 3 trata de los procesos tecnológicos para obtener productos naturales en polvo, sus ventajas, criterios para seleccionar un método de secado, la clasificación de los secadores y finalmente presenta la liofilización y el secado por atomización, como las dos tecnologías de secado más usadas para productos naturales. El Capítulo 4, comprende específicamente el secado por atomización, sus etapas y las propiedades termodinámicas de la mezcla vapor-agua, la cual es utilizada para el secado convencional. El Capítulo 5 contiene la propuesta metodológica para el diseño simultáneo de proceso y control multiproducto aplicada a un secador por atomización, empieza por definir producto y líneas de producto, luego aborda el tema de diseño de equipos multiproducto y diseño de secadores por atomización, finalmente, presenta el algoritmo para resolver la propuesta metodológica. El Capítulo 6, desarrolla la metodología planteada anteriormente para el caso de estudio. Finalmente, el Capítulo 7 presenta las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

1. Hipótesis y Objetivos

1.1 Hipótesis

Se puede aplicar la metodología de Diseño Simultáneo de Proceso y Control ya existente a un proceso de secado por atomización de productos naturales, incluyendo el concepto de multiproducto, teniendo en cuenta el concepto de controlabilidad en el espacio de estados.

1.2 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Proponer una metodología para el diseño simultáneo de proceso y control de un secador por atomización multiproducto para sustancias químicas naturales.

1.1.2 Objetivos específicos

- Describir cada una de las etapas que involucra un proceso de secado por atomización.
- Obtener un modelo matemático que describa las dinámicas principales del proceso de secado.
- Relacionar los conceptos de controlabilidad, flexibilidad, observabilidad y estabilidad con el caso de estudio.
- Complementar una metodología para el DSPyC que considere controlabilidad de estado y carácter multiproducto del proceso.
- Validar mediante simulación la metodología de DSPyC ampliada para procesos multiproducto, a través del diseño del secador propuesto.

2. La Jagua como colorante en la industria

Cualquier sector industrial está relacionado directa o indirectamente con el color, porque es parte de la percepción del producto que tiene un individuo a través de los sentidos. El color determina un estado, transmite información a los sentidos que puede ser la diferencia entre dos objetos de idéntica especificación. En la industria alimenticia, cosmética o farmacéutica el color juega un papel importante porque llega a ser un parámetro decisivo para aceptación o rechazo de un producto (Echeverri, 2004).

En los últimos años han aumentado las limitaciones al uso de colorantes sintéticos en alimentos, medicamentos y en productos cosméticos debido a su toxicidad. Son frecuentes las denuncias por el uso de colorantes no adecuados en productos de uso humano, como por ejemplo la presencia de colorantes sintéticos nocivos como *Rodamina β* y *Naranja Permanente* en labiales, o de otros colorantes no permitidos en caramelos, refrescos y gelatinas (Franco, 2004).

La revolución industrial impulsó el desarrollo de la industria alimenticia, esto a su vez provocó el aumento en la adición de colorantes para disimular la baja calidad de algunos alimentos. Existen registros históricos acerca de lesiones, incluso muertes, como resultado del uso de colorantes que resultaron ser tóxicos (Downham, 2000). Actualmente se están buscando alternativas para la obtención de colorantes naturales que puedan ser utilizados en diferentes tipos de industrias.

El uso de la vegetación ha sido, y es hasta ahora el soporte económico y socio –cultural más importante de las comunidades asentadas a lo largo del Pacífico colombiano. Se tiene evidencia que los bosques además de la madera, proporcionan otros beneficios y productos no forestales, que presentan una alternativa de aprovechamiento como las especies tropicales productoras de colorantes naturales de interés para la industria alimentaria, cosmética y textil, al tiempo que representan elementos que hacen posible el arraigo de las culturas colombianas (Klinger, 2000).

Los colorantes están presentes en casi todas las plantas. De éstos, unos son producidos directamente por la actividad fisiológica de las plantas, mientras que otros son sub-productos de transformaciones artificiales de sustancias de procedencia vegetal. Los que se encuentran ya formados en la naturaleza, suelen estar disueltos o formando depósitos granulares en las células superficiales de las plantas. Los colorantes vegetales se hayan concentrados en las vacuolas celulares de muchas plantas, en donde a su vez sin encontrarse en estado puro, se asocian con otros principios como aceites, resinas, y en particular con los taninos que son de carácter astringente (Echeverri, 2004).

En el caso particular de los colorantes azules pocas alternativas se encuentran en la naturaleza como una fuente potencial de estos colorantes. En Asia son ampliamente usados los colorantes derivados de la *Gardenia jasminoides* esta planta no es muy común en América, sin embargo se ha encontrado que los frutos de la *Genipa americana* contienen algunos de los compuestos responsables del color azul derivado de la *Gardenia jasminoides*, por lo que son una excelente alternativa para la obtención de estos colorantes (Expósito, 2010).

2.1 Generalidades de los colorantes

Los colorantes son sustancias de origen natural o sintético que se fijan en otras sustancias y las dotan de color de manera estable ante factores físicos/químicos como la luz, lavados, agentes oxidantes, etc. El color juega un papel crucial en nuestras vidas, influye significativamente en la moda, la cosmetología y los alimentos entre otros. La reacción a la apariencia de los alimentos está arraigada en los humanos a través de costumbres milenarias, por ejemplo, cuando nuestros antepasados buscaban alimentos tuvieron que aprender a evitar los tóxicos o dañados y el color era un buen indicador de su calidad (Downham, et al., 2000).

Los colorantes pueden clasificarse de acuerdo con su naturaleza en sintéticos y naturales.

- **Colorantes sintéticos:** son los obtenidos por síntesis química. Los colorantes sintéticos deben reunir una serie de características para asegurar su buen uso: ser inocuo, constituir una especie química definida y pura, tener gran poder tintóreo con el objeto de utilizar la mínima cantidad posible, y ser fácilmente incorporables al producto, ser lo más estable posible a la luz y al calor, poseer compatibilidad con los productos que deben teñir, inodoro y sinsabor, pH neutro y ser lo más económico posible.
- **Colorantes naturales:** son los que se obtienen de fuentes animales o vegetales sin procesos químicos. Los colorantes naturales se consideran en general como inocuos y consecuentemente las limitaciones específicas en su utilización son menores que las que afectan a los colorantes sintéticos. Estos colorantes tienen como desventaja notoria la complejidad con la que se encuentran en la naturaleza. Generalmente no están solos y son necesarios procesos de purificación que los hacen mucho más costosos.

Existen cuatro clases principales de colorantes de plantas, los cuales son permitidos en productos alimenticios: clorofilas, carotenoides, flavonoides y betalainas y algunos llamados misceláneos. De 2005 a 2009, el mercado mundial de colorantes naturales aumentó casi 35% en valor y se espera que el gran crecimiento venga de colores naturales y productos colorantes para alimentos. El mercado global de colorantes para alimentos representa alrededor del 67%, seguido por bebidas sin alcohol 28% y bebidas alcohólicas en un 5% (Chile Potencia Alimentaria, 2010).

Los colorantes naturales se remontan a varios miles de años en la historia. Las civilizaciones precolombinas, en América Latina, o los antiguos egipcios, sentaron las bases de algunos usos que se extendían desde la tinción textil hasta los alimentos, pasando por aplicaciones meramente cosméticas. La importancia de los colorantes de origen vegetal había decaído desde la aparición en el mercado de los colorantes sintéticos derivados del petróleo, del aluminio y del carbón. Sin embargo, actualmente se están buscando colorantes naturales como sustitutos de los artificiales debido a que en algunos países se han prohibido los colorantes de origen mineral y sintético porque, en algunos de ellos, se han encontrado indicios de efectos nocivos para la salud. En los últimos años la industria de alimentos ha reducido considerablemente la lista de

colorantes permitidos, y por el contrario ha comenzado a utilizar los colorantes naturales (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986).

El colorante azul que se obtiene de la Jagua es líquido, sin embargo, al secarlo permite disponer de un producto estable en forma de polvo y con características lo más cercanas posible al producto original. Los productos en polvo suelen ser de fácil manipulación y generalmente rápida reconstitución, ocupan menor espacio, tienen mayor vida de almacenamiento, por lo tanto su uso se hace más conveniente. En relación con su aplicación, los productos en polvo constituyen hoy en día la mejor alternativa como materia prima en la elaboración de un gran número de alimentos de consumo habitual y son reconocidos, no sólo por su composición y microestructura, sino también por las propiedades fisicoquímicas, funcionalidad, tamaño y distribución de las partículas. El método escogido para llevar a cabo el secado depende del tipo de producto en cuestión, el nivel de calidad que se desea y el costo del proceso, entre otros (Echeverri, 2004).

2.2 Generalidades de la Jagua

2.2.1 Aspectos biológicos de la especie

La Jagua es una planta que pertenece a la Familia de las Rubiaceas especie *Genipa americana* L., es conocida con los nombres comunes de (Guatemala) Irayol; (México) Maluco; (Venezuela) Caruto; (Colombia) Caruto, Jagua, Quipará o Quepará (lengua indígena de la etnia emberá); (Perú) Huito; (Bolivia) Bi. Originaria de la región noreste de América del Sur, se encuentra desde Florida, México, Centroamérica, Islas del Caribe hasta Paraguay, Argentina, Ecuador, Perú, Bolivia y Brasil. También se conoce por los nombres comunes de jagua (en español), genipa (en inglés), bois de fer (en francés) y genipapo (en portugués) (Duque, 2006).

Es una especie heliófita de bosques húmedos tropicales con precipitaciones entre 800 y 4500 mm en promedio anual, y temperatura media anual de 18 a 30 °C. Se desarrolla bien en potreros, llanos y áreas de cultivo, desde zonas inundables hasta de tierra firme. Sin embargo, se desarrolla mejor sobre suelos arcillosos, con buen contenido de nutrientes, moderadamente profundos y bien drenados. La especie tiene una distribución natural extensa, lo que se atribuye en parte a su cultivo en tiempos pre- colombinos (López, et al., 2007).

2.2.2 El árbol de la Jagua.

El árbol de jagua es caducifolio mediano, generalmente de hasta 18.28 metros de altura, con tronco de 0.61 metros de diámetro, aunque en otros lugares alcanza los 30.48 metros de altura (Figura 2-1). Se caracteriza por su tronco cilíndrico, sus ramas que surgen del tronco en círculos a distintos niveles; su corteza lisa, grisácea, con manchas blancas; sus hojas largas, agrupadas al final de las ramas; sus flores igualmente agrupadas al final de las ramas, de aproximadamente 0.46 metros de diámetro, blancas y con los pétalos extendidos cuando nuevas, tornándose luego amarillas y con los pétalos virados hacia atrás.

Figura 2-1: Árbol de Jagua (Francis, 2011).



La madera de jagua, la cual tiene muchos usos, es de color pardo amarillento claro, de textura pareja y moderadamente pesada (Francis, 2011). El árbol se encuentra en Colombia localizado en el Valle húmedo del Río Magdalena, Antioquia Zona de Urabá, Costa Atlántica, Valle del Río Atrato, la Amazonía, Llanos Orientales, Zona Cafetera, Cundinamarca y Boyacá (Duque, 2006).

2.2.3 Flores y fruto.

Las flores, generalmente perfumada de color amarillo claro y de buen tamaño (3.8 cm) son bisexuales, cáliz tubular campanulado verde, corola con cinco pétalos en la mitad basal de color blanco o amarillo y ligeramente perfumadas; 5 estambres y ovario bilocular. Se presentan en racimos al extremo de las ramas (Duque, 2006).

La especie produce frutos en abundancia; los árboles de 15 a 20 años de edad a veces producen de 400 a 600 frutas por año. Los árboles pueden comenzar a producir frutas de 6 a 8 años después de la etapa de plántula. Por lo general se desarrolla sólo una fruta por racimo. El fruto es una baya, ovalada con un olor fuerte característico, de 10 a 12 cm de largo por 7 a 9 cm de diámetro, pesando entre 200 y 400 g, con restos del tubo del cáliz en el ápice. El fruto inmaduro es color verde, pero está cubierto por una cutícula café (Figura 2-2 a), cuando el fruto madura se vuelve carnoso y de color café. Al hacer un corte en el fruto éste se oxida azul y mancha la piel del mismo color (Figura 2-2 b). La fruta se corta en pedazos y se sumerge en agua durante varios días para producir un refresco que algunas personas disfrutan, también se prepara jugo, jalea, helado y licor (Duque, 2006).

Figura 2-2: Fruta de Jagua a) Fruta entera b) fruta partida



El fruto contiene genipina, manitol, taninos, metilésteres, cateína, hidantoina y ácidos tánicos, tartárico y geniposídico, hidantoina, cateína, cafeína, y calcio. El fruto también posee un derivado de la genipina, que al reaccionar con proteínas produce un color azul. Es por ello que desde tiempos precolombinos se utiliza su fruto inmaduro para el pintado del cuerpo. En la actualidad, este colorante todavía se utiliza en la tinción de indumentarias y de alfarería, así como también en productos cosméticos y alimentos, constituyéndose por lo tanto en un producto de importancia a nivel industrial.

Al estado maduro, los frutos tienen alto valor nutritivo, son ricos en minerales y constituyen una buena fuente calórica. La composición química y el valor nutritivo de la pulpa de la jagua se muestra en Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Principales componentes del fruto (Duque, 2006)

Componentes	100 g de pulpa	Componentes	100 g de pulpa
Energía	55,0 - 113,0 cal	Fósforo	21,0 mg
Agua	77,06 - 83,9 g	Hierro	0,5 mg
Proteínas	1,20 - 1,26 g	Vitamina A (Retinol)	30,0 mg
Lípidos	0,10 - 0,20 g	Tiamina	0,30 - 0,63 mg
Carbohidratos	14,00 - 25,70 g	Riboflavina	0,33 mg
Fibra	1,60 - 11,80 g	Niacina	0,50 - 0,54 mg
Ceniza	0,55 - 0,80 g	Vitamina C (A. ascórbico)	1,10 mg
Calcio	69,0 mg		

3. Procesos tecnológicos para la obtención de productos naturales en polvo

El secado es la operación unitaria en la cual la remoción de un solvente (en la mayoría de los casos agua), se hace hasta alcanzar la humedad de equilibrio mediante evaporación bajo condiciones controladas (Angeles, 2009).

La deshidratación es posiblemente uno de los métodos más antiguos de conservación de alimentos. El daño térmico ocurrido en el producto durante el secado es directamente proporcional a la temperatura y al tiempo del proceso. A menudo, las altas temperaturas y tiempos prolongados de secado causan efectos adversos en la textura, color, sabor y valor nutricional de un producto (Yang, et al., 1985); (Yongsawatdigul, et al., 1996).

Las ventajas que representa el secar un producto respecto al manejo del material original son (Angeles, 2009)

- Aumentar el tiempo de vida útil del producto
- Facilitar el manejo del producto
- Reducir el espacio de almacenamiento del producto
- Reducir los costos de almacenamiento y embarque

El secado produce transformaciones físicas y químicas en el producto. Cambios físicos tales como: encogimiento, inflado, cristalización; o bien cambios químicos o bioquímicos, que pueden ser deseables o indeseables tales como: cambios de color, textura, olor (Alamilla, 2001). Estos cambios en el sabor y aroma de los productos se deben fundamentalmente a la pérdida de componentes volátiles durante el proceso de secado, y son mayores a medida que las temperaturas utilizadas y/o el tiempo de secado aumentan. Sin embargo, el uso de métodos de secado adecuados pueden conservar las mismas características al emplear temperaturas moderadas o bajas (Fito, et al., 2001).

3.1 Criterios para seleccionar el método de secado.

Hay que tomar en cuenta diversos criterios para escoger el método que mejor se adapte al secado de una sustancia (Land, 1984):

- El modo de funcionamiento del aparato
- La naturaleza y calidad del producto a secar
- La fuente de calor y el modo de transmisión del mismo
- El consumo de energía

La elección del método de secado es generalmente una situación ponderada de todos estos factores.

3.1.1 El modo de funcionamiento del aparato

El funcionamiento puede ser discontinuo o continuo. La elección depende de la importancia de la producción. Si ésta es pequeña, a menudo se escoge un funcionamiento discontinuo. Si al contrario, la producción es importante, el funcionamiento continuo es deseable y económicamente más rentable (Land, 1984) (Yanza, 2003).

3.1.2 Naturaleza del producto a secar.

La preparación, modo de manejo, fuente de calor a utilizar, modo de transmisión y concepción de los sistemas de aireación, dependen de la naturaleza del producto a secar. Puede tratarse de líquidos, pastas, materiales pulverizados, granulados, fibrosos o compactos (Land, 1984):

- Los cuerpos pastosos muy viscosos frecuentemente se laminan sobre tambores y después se desmenuzan, lo cual les confiere una textura cercana a la de los sólidos. También pueden ser tratados sobre bandas o en secadores de tornillo.
- Los sólidos pulverulentos (o susceptibles a ser triturados) son secados generalmente en secadores de banda, cilindro, lecho fluidizado, lecho móvil, transporte neumático. Si son susceptibles a aglutinación se puede diseñar una recirculación de producto seco para reducir los riesgos de aglomeración (bajo reserva de que el aumento en el tiempo de residencia puede contribuir a una degradación de los productos).
- Los productos compactos o en trozos son tratados en secadores de gabinete, en túneles de carros o banda transportadora.
- La cantidad de producto a obtener puede limitar la elección del modo de secado. Así, por ejemplo, el secado de colorantes, de productos farmacéuticos o alimenticios, debe llevarse a cabo evitando toda contaminación del producto o el someterlos a atmósferas que los puedan degradar; por ello muchos de estos productos se secan en pequeños lotes.

3.1.3 La fuente de calor y el modo de transmisión del mismo

En los secadores de convección o conducción, pueden utilizarse los fluidos calientes clásicos (vapor, agua caliente, gas de combustión) para suplir el calor necesario para la extracción de humedad. Estos fluidos circulan generalmente por chaquetas o por tubos en contacto con el material a secar (secado por conducción) o dentro de los calentadores de aire (secado por convección). Si los gases de combustión están limpios, se les puede poner en contacto directo con el material a secar. El secado por irradiación infrarroja se efectúa por medio de lámparas eléctricas o de paneles calefactores. El secado por corrientes de alta frecuencia se utiliza sobre todo cuando la calidad del producto seco es determinante (Land, 1984).

La elección de la temperatura de secado es una tarea crítica:

- Una elevada temperatura permite aumentar la velocidad de secado, pero conduce a veces a la aparición de una costra en la superficie del producto, fenómeno que dificulta la extracción de humedad.
- Una temperatura demasiado baja aumenta considerablemente el tiempo de operación.
- Algunos productos son termosensibles y no pueden ser secados a temperaturas superiores a 60°C.

El contacto entre el gas y el producto puede hacerse:

- Por secado simple: el aire circula a lo largo de la superficie del producto que está dispuesto en capas delgadas sobre las charolas, los carros o las bandas transportadoras. Esta técnica es conveniente para el secado de productos granulosos o compactos. El tiempo de residencia en el aparato puede ser fácilmente controlado.
- Por combinación de dispersión y raspado en los secadores de tambor. Esta técnica está bien adaptada para sólidos granulosos. En general, el tiempo de residencia del producto en el secador es largo.
- Por circulación del aire a través del material. Este tipo de contacto mejora considerablemente la transferencia de calor y de material, pero la pérdida de carga que sufre el gas es importante. Esta técnica es utilizada para el secado de todo tipo de sólidos (Bhandari, et al., 1993).

El tiempo de residencia de los productos es variable. El secado por conducción se emplea sobre todo para el tratamiento de líquidos, productos pastosos o sólidos que no pueden ser puestos en contacto con el aire (Masters, 1985).

3.1.4 El consumo de energía

La eficiencia energética de los secadores térmicos es baja. El objetivo del secado es arrastrar y eliminar un líquido de un producto al cual está inicialmente ligado por uniones de tipo químico (iónicas, covalentes, metálicas) o de tipo electrostático (enlaces de Van der Waals, puentes de hidrógeno), uniones que requieren un gran consumo de energía para ser rotas. El rendimiento de los secadores pocas veces sobrepasa el 60%. Es importante entonces, incluir técnicas susceptibles a economizar energía.

3.2 Tipos de Secadores.

Entre los equipos de secado más comúnmente utilizados se encuentran los secadores de tambor, secadores rotatorios, secador de túnel, secador de lecho fluidizado y secador por aspersion. De acuerdo a la clasificación de la operación de secado encontramos los siguientes tipos de equipos (Treybal, 1980):

3.2.1 Secadores de calentamiento directo

Depende del tipo de proceso (continuo o discontinuo), se encuentra la siguiente clasificación:

a) Equipos discontinuos

- Secadores de bandejas con corriente de aire.
- Secadores de lecho fluidizado.
- Secadores con circulación a través del lecho sólido.

b) Equipos continuos

- Secadores de túnel.
- Secadores neumáticos.
- Secadores ciclónicos.
- Secadores de lecho fluidizado circulante.
- Secadores de lecho vibratorio
- Secadero de lecho fluidizado.
- Secadores por atomización (o aspersion).
- Secadores de tipo turbina.
- Secadores rotatorios.

3.2.2 Secadores de calentamiento indirecto

Depende del tipo de proceso (continuo o discontinuo) se encuentra la siguiente clasificación:

a) Equipos discontinuos.

- Secadores de bandejas a vacío.
- Secadores de bandejas a presión atmosférica.
- Secadores por congelación.
-

b) Equipos continuos

- Secadores de tambor.
- Secadores con circulación a través del lecho.

Existe una alta gama de procesos tecnológicos que ofrecen la posibilidad de conservar tanto la materia prima como los subproductos garantizando su inocuidad. Entre ellos, la liofilización y el secado por aspersion permiten la obtención de productos en forma de polvo y ofrecen una alta eficiencia y la capacidad de conservar los componentes naturales presentes en estos productos (Mosquera, 2010)

3.3 Liofilización (*Freeze-drying*)

La liofilización es un proceso que requiere la congelación previa del alimento que, una vez congelado, se introduce en una cámara de vacío para que se separe el agua por sublimación. De esta manera se elimina el agua desde el estado sólido en el alimento al gaseoso en el ambiente, sin pasar por el estado líquido. Para acelerar el proceso se utilizan ciclos de congelación-sublimación con los que se consigue eliminar prácticamente la totalidad del agua libre contenida en el producto original.

En los años cuarenta se utilizó por primera vez la liofilización para la producción de plasma deshidratado y productos de sangre a mayor escala. Posteriormente, en la industria de alimentos, la liofilización se empleó por primera vez para la producción de filetes de pescado en 1951 y más tarde se introdujo en el mercado hacia los años 60 la producción de café liofilizado con gran aceptación. Esta técnica ha causado un impacto considerable en la conservación de alimentos, posicionándose como un método atractivo para ampliar la vida útil de un gran número de productos (Barbosa, et al., 2005). Los alimentos liofilizados son secos, luminosos, porosos y generalmente logran retener la forma y textura del producto original al ser reconstituidos. Así mismo, una vez envasados pueden ser almacenados durante poco más de un año y conservar la mayoría de las características físicas, químicas, biológicas y organolépticas del producto en estado original (Barbosa, et al., 2005)

Los productos que se obtienen a partir de alimentos liofilizados, en términos de textura y aroma, resultan de una mayor calidad debido a que todo el proceso de deshidratación ocurre a bajas condiciones de temperatura y presión. No obstante, considerando el bajo rendimiento en cuanto al uso de vacío, cuando se compara por ejemplo con el secado por atomización, la liofilización resulta ser una técnica altamente costosa, además de los largos periodos de tiempo que se requieren para obtener un producto en condiciones óptimas. El gasto energético involucrado en el proceso es alto teniendo en cuenta que la materia prima debe ser sometida a dos procesos, además de la energía necesaria para el manejo del agua residual (Barbosa, et al., 2005). Estos factores han limitado la expansión de su uso no sólo en la industria alimentaria sino también en el sector farmacéutico, abriendo paso a otras técnicas menos costosas y de mayor rendimiento como es el caso del secado por atomización.

En el siguiente capítulo se detalla el proceso de secado por atomización el cual es objeto de estudio de este trabajo de investigación.

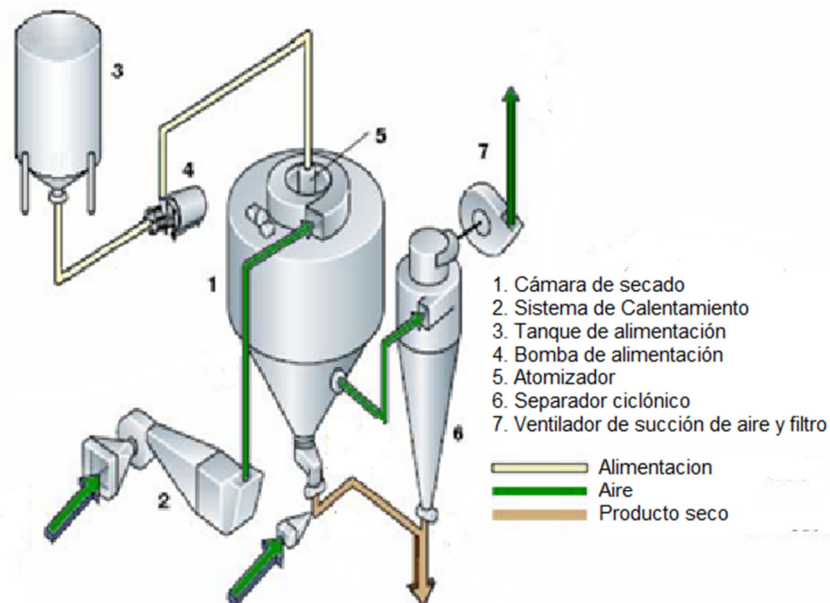
4. Secado por atomización

El secado por atomización o secado en “spray” es donde se transforma una disolución, una emulsión, una suspensión o una dispersión líquida en un producto totalmente seco y estable. El concepto de atomización fue patentado por primera vez por el científico Samuel Percy en el año 1872 (Barbosa, et al., 2005) y su aplicación industrial se encaminó a la producción de leche en polvo y detergentes por primera vez en 1920. El secado por atomización progresó durante la segunda guerra mundial a partir de la cual se ha mantenido en continua evolución. Actualmente se han desarrollado diversas aplicaciones en la mayoría de las industrias incluyendo la producción de químicos, fármacos, fragancias y pesticidas. La tecnología del secado por atomización es usada en una gran variedad de industrias, como la de alimentos, la farmacéutica y la cosmética.

A pesar de las altas temperaturas utilizadas para el secado (desde 150°C hasta 600°C), los tiempos de proceso son muy cortos comparados con otros procesos de secado, lo que hace a esta técnica más favorable en el caso de trabajar con materiales sensibles al calor.

La Figura 4-3 muestra un proceso típico de atomización. El secado comienza con el bombeo del alimento líquido a un atomizador, el cual lo esparce en finas gotas dentro de la cámara de secado. Las gotas suspendidas entran en contacto con un medio caliente, generalmente es aire, el contacto gota- aire permite la evaporación del agua y transforma las gotas en partículas secas. Finalmente, las partículas secas son extraídas de la cámara de secado.

Figura 4-3: Diagrama de flujo básico del secador por aspersion (Bylund, 1995)



Las ventajas del secado por atomización son:

- Cortos tiempos de residencia
- Tamaño y forma definido del producto
- Fácil limpieza
- Proceso continuo.
- Control de los parámetros de calidad del producto así como especificaciones concretas.
- Produce partículas relativamente uniformes, esféricas y con casi la misma proporción de compuestos sólidos que en la alimentación líquida.
- Puesto que la temperatura de funcionamiento del gas puede extenderse de 150 a 600 °C, la eficacia es comparable a la de otros tipos de secadores directos.

Las desventajas del secado por atomización son:

- Falla si se requiere un producto a granel de alta densidad.
- En general no es flexible. Una unidad diseñada para la atomización fina puede no poder producir un producto grueso, y viceversa.
- Hay una alta inversión inicial comparada a otros tipos de secadores continuos.

4.1 Etapas principales del proceso de secado por atomización

La Figura 4-4 muestra las etapas principales de un proceso de secado por atomización

- Atomización
- Mezcla de aire-producto atomizado
- Separación del producto seco con el aire humedecido.

Figura 4-4: Etapas de un proceso de secado por atomización



4.1.1 Atomización

La atomización es la operación más importante del proceso de secado. El tipo de atomizador determina no sólo la energía requerida para formar la atomización sino también el tamaño de las gotas, su uniformidad, la trayectoria y finalmente el tamaño de partícula obtenida (Mujundar, 2000). La selección del atomizador o boquilla depende de la naturaleza del alimento y de las características del producto deseado. El grado de atomización depende de las propiedades del fluido, cuando se tienen altos valores de viscosidad y tensión superficial resultan tamaños grandes de gotas con la misma cantidad de energía disponible para la atomización (Yanza, 2003). Los atomizadores más usados a nivel industrial son los atomizadores de disco rotatorio y los atomizadores de boquilla a presión de un líquido. El diseño de la cámara de secado está influenciado por el tipo de atomizador utilizado.

- Boquilla de fluido a presión.

La boquilla de fluido a presión crea la atomización como consecuencia de altas presiones que ejerce el líquido al pasar a través del orificio del boquilla. El líquido entra por la base de la boquilla tangencial y deja el orificio en forma de un cono hueco (Figura 4-5). El diámetro del orificio es generalmente pequeño, de 0.25 a 4 milímetros según la presión y la capacidad generalmente de la boquilla no excede 100 litros/h. Cuando se usa este tipo de boquillas en una torre de secado por aspersión, el compartimento de secado suele tener una relación longitud/diámetro alta.

Con este tipo de boquilla es posible producir las gotitas dentro de una gama estrecha de diámetros, y las partículas secas son generalmente esferas huecas. Las boquillas de fluido a presión no son convenientes para suspensiones altamente concentradas y materiales abrasivos debido a su tendencia a obstruir y a erosionar el orificio de la boquilla. El consumo de energía de un boquilla de presión es muy bajo en comparación con el del atomizador de disco rotatorio (Mujundar, 2000).

- Atomizadores rotatorios.

Atomizan los líquidos diseminándolos en hojas delgadas las cuales se descargan a alta velocidad desde la periferia de un disco especialmente diseñado que gira con gran rapidez. El alimento se introduce centralmente en la boquilla y es llevado hacia las paredes del disco, sale por espacios de diferentes formas como espas, barras espaciadoras o agujeros. El diámetro del orificio de atomización y las revoluciones de la rueda influyen en el tamaño de la partícula resultante (Figura 4-5). El tamaño de partícula puede ser variado cambiando la velocidad del atomizador con respecto a la velocidad periférica de la rueda. Una rueda con un diámetro grande que funciona a una velocidad fija producirá partículas pequeñas, mientras que una rueda de diámetro pequeño que funcione a la misma velocidad fija producirá partículas más grandes.

El sistema de secado con este tipo de aspersión, utiliza un compartimento de secado con una relación longitud/diámetro baja, que permite que las partículas se sequen en una dirección horizontal antes de golpear las paredes (Masters, 1985). La Tabla 4-2 compara un atomizador de disco rotatorio y un atomizador de boquilla de presión.

Figura 4-5: Imágenes de sistemas de atomización izquierda boquilla a presión, derecha disco rotatorio (Yanza, 2003)



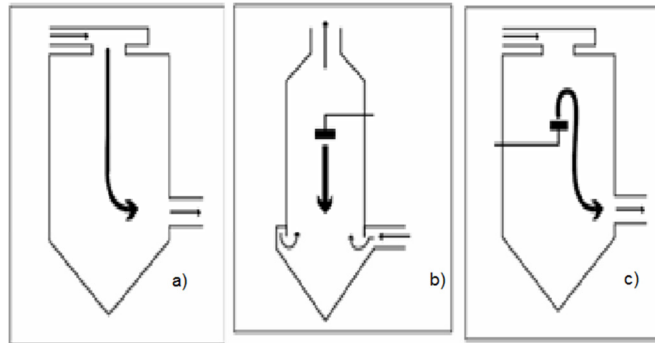
Tabla 4-2: Diferencias entre los sistemas de atomización boquilla de presión y disco rotatorio (Masters, 1985)

Atomizador tipo disco rotatorio	Atomización tipo boquilla de presión
Fácil control del tamaño de la partícula	Menor control de tamaño de partícula
Gran área de flujo	Pequeña área de flujo
Capacidad independiente de la presión de alimentación	Capacidad proporcional a la raíz cuadrada de la presión

4.1.2 Contacto gota atomizada –aire

Los equipos utilizados en secado por atomización, poseen una cámara de secado en donde llega el líquido atomizado y el aire caliente. Este compartimento tiene normalmente forma de cilindro. El diseño cilíndrico de la cámara de secado depende del tipo de atomizador empleado ya que la trayectoria de las gotas es diferente. La trayectoria de las gotas hace que la relación diámetro y altura de la cámara cambie. Normalmente la relación entre el diámetro y la altura para los discos rotatorios es de 0.6:1 hasta 1:1, mientras que en atomizadores de boquilla de presión la relación es de 1:3 hasta 1:4 (Snow, 2003). Existen actualmente tres posibilidades de configuración entre el flujo de aire y el flujo de alimento (Figura 4-6) a) co-corriente b) contra corriente c) combinado. La Tabla 4-3 presenta para los diferentes tipos de flujos los rangos de temperatura y tamaño de partículas obtenidos

Figura 4-6: Tipos de Flujo a) co-corriente b) contracorriente y c) combinado



- Flujo co-corriente: El material se atomiza en la misma dirección con la que el flujo de aire caliente pasa por el aparato. Las gotas entran en contacto con el aire caliente cuando tienen el mayor contenido en humedad. El producto se trata con cuidado debido a la rápida vaporización.
- Flujo contracorriente: El material se atomiza en dirección opuesta al flujo de aire caliente. En este caso el aire caliente va hacia arriba y el producto cae aumentando mucho su temperatura y eliminando la humedad residual. Este método solo es válido para compuestos termoestables.
- Flujo combinado: Se combinan las ventajas de ambos métodos de atomización. El producto se atomiza hacia arriba y solo permanece en la zona de aire caliente por un tiempo corto para eliminar la humedad residual. Entonces la gravedad lleva al producto a la zona más fría.

Tabla 4-3: Intervalo de temperaturas de operación y tamaño medio de partícula para diferentes tipos de arreglos de flujo en cámaras de secado (Masters, 1985).

Diseño de la cámara	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C)	Tamaño medio de partícula (µm)
Flujo paralelo	200	90	40-100
Flujo paralelo	500	100	40-100
Flujo contracorriente	750	110	40-100
Flujo contracorriente	350	125	120-200
Flujo mezclado	350	90	150-350
Flujo mezclado	220	60	200-1000

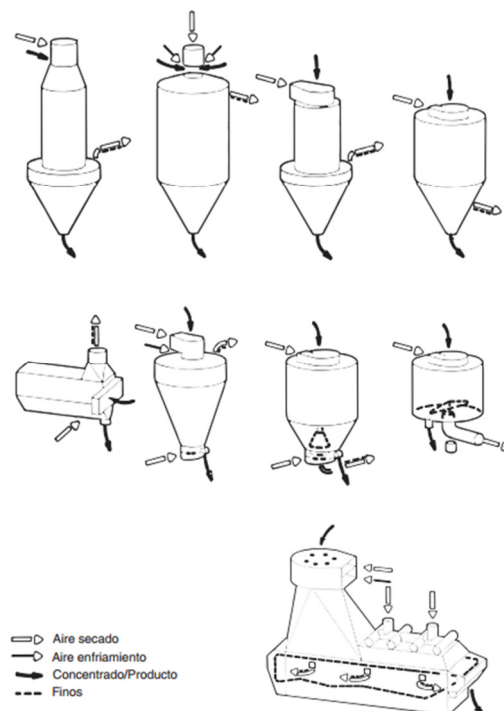
- Cámara de Secado

Existen en el mercado varios diseños de cámaras de secado. El tipo más común es la cámara cilíndrica con un cono de 40-60° para que el polvo pueda salir de la cámara por gravedad. También se ven cámaras con el fondo plano, en cuyo caso se necesita un raspador o un dispositivo aspirador para retirar el polvo de la cámara. Existen además cámaras horizontales tipo caja, que también operan con un sistema forzado (raspador o tornillo) para retirar el polvo. Los distintos tipos de cámaras de secado se muestran en la Figura 4-7.

En resumen se puede decir que las cámaras con un cono para la descarga del polvo por gravedad ofrecen la mejor flexibilidad para adaptar varios procesos de secado a la planta, como por ejemplo lechos fluidizados integrados o cintas, y así permiten las mayores posibilidades para el secado de distintos productos. La tendencia hoy es un diseño de la cámara de secado que no incluye componentes dentro de la misma que puedan obstruir el flujo de aire con los consiguientes depósitos de polvo.

La cámara de secado debe siempre tener puertas de inspección, iluminación, aperturas de sobre-presión, así como otros equipos de emergencia como por ejemplo extintores de incendio en forma de toberas de agua o de vapor. Normalmente, las cámaras de secado tienen un aislamiento, o de paneles dobles desmontables con un espacio de aire o de 80-100 mm de lana mineral, recubierta de placas de acero inoxidable o de aluminio con PVC. La ventaja de los paneles desmontables es que se permite una inspección de la cámara para detectar grietas en las paredes o un aislamiento húmedo que provoque un crecimiento de bacterias, o áreas frías en las paredes, dando lugar a la formación de depósitos.

Figura 4-7: Distintos tipos de cámaras de secado (Westergaard, 2004)



4.1.3 Recuperación del Producto Seco

La separación del producto se puede realizar primero en la base de la cámara de secado (denominada separación primaria), seguida de la recuperación de partículas más pequeñas (denominada separación secundaria). Esta separación secundaria puede darse en ciclones, filtros bolsa, separadores electrostáticos. La Tabla 4-4 presenta algunos criterios para la selección de estos separadores

Tabla 4-4: Selección del sistema de recolección de polvos (Masters, 1985)

Requerimientos	Sistema Recolectado
Bajo costo, eficiente, fácil limpieza	Ciclones
Costo medio, muy eficiente	Filtro bolsa
Grandes volúmenes de aire	Precipitador electrostático
Recuperación de productos finos	Ciclón + filtro húmedo

El separador que más se ha utilizado en la industria es el ciclón (Figura 4-8). Dentro del ciclón la fuerza centrífuga se emplea para mover las partículas hacia la pared y para separarlas del aire alrededor del eje. El aire y las partículas avanzan formando un espiral hacia abajo. De acuerdo con las fuerzas de inercia, las partículas se separan del aire al chocar con la pared del ciclón. Estos ciclones tienen un vaso de recolección en su parte inferior en donde se reciben las partículas secas, por la parte superior del ciclón sale el flujo de aire limpio que ya no contiene partículas de producto (o contiene pocas) siguiendo un sentido ascendente (Masters, 1985).

Figura 4-8: Unidad de secado y separación del producto a) Separación primaria b) Separación secundaria, Ciclón (Ángeles, 2009)



Después de describir cada una de las etapas de secado por atomización, para el diseño propuesto en este trabajo de investigación las características de la cámara de secado a diseñar de manera simultánea son:

- El atomizador es de tipo rotatorio ya que permite partículas más homogéneas y el intervalo del diámetro de gotas es mayor (Tabla 4-2).
- Los flujos de alimentación y de aire de secado entran en co-corriente a la cámara de secado por la parte superior, lo cual favorece el secado de materiales termolábiles.
- La cámara de secado es de base cónica y su separación es mediante ciclón.

Por otro lado, si la temperatura de un sólido húmedo en un gas caliente depende de la velocidad de evaporación, la clave para analizar esos tipos de secadores es la psicrometría o la relación de las mezclas gas-vapor. Las cartas psicrométricas simplifican los cálculos de cuanto calor debe agregarse y cuanta humedad se incorpora al aire. A continuación se tratarán los conceptos relacionados con la psicrometría.

4.2 Psicrometría

La psicrometría estudia las propiedades termodinámicas de mezclas de gas con vapor. En particular, la mayoría de las aplicaciones se refieren al aire húmedo, considerado como la mezcla de aire seco y vapor de agua. En los procesos en los que se hallan involucradas estas mezclas hay transferencia de masa y energía. Los objetivos de estas son: humidificación o deshumidificación del gas, enfriamiento de la mezcla o enfriamiento de líquidos. El término vapor se aplica a la sustancia que ingresa o sale de la mezcla (por cambio de fase) y gas a la/las sustancias que durante todo el proceso permanecen en ese estado y no cambian de fase (Pilatosky, 2002). La Figura 4-9, presenta un mapa conceptual sobre psicrometría.

La psicrometría resulta útil en el diseño y análisis de sistemas de almacenamiento y procesado de alimentos, diseño de equipos de refrigeración, estudio del secado de alimentos, estudios de aire acondicionado y climatización, torres de enfriamiento, y en todos los procesos industriales que exijan un fuerte control del contenido de vapor de agua en el aire (Pilatosky, 2002). Para el propósito de esta investigación, se utilizaron las ecuaciones y la carta psicrométrica de la mezcla de gas-vapor a altas temperaturas (entre 100 y 200°C). A continuación se presentan las definiciones relacionadas con el tema.

- Propiedades termodinámicas del aire

El aire es una mezcla de varios gases (oxígeno, nitrógeno, argón, dióxido de carbono y trazas de otros elementos) la cual se denomina aire seco, más una cierta cantidad de agua en forma de vapor. Por lo general el rango de presiones y temperaturas de interés para diversas aplicaciones es tan limitado que puede considerarse que el aire seco y el vapor de agua se comportan como gases ideales. Además, se considera el aire seco como si fuera un componente puro, por lo que las propiedades del aire húmedo pueden estudiarse en basados en el conocimiento de las propiedades de mezclas de gases ideales, regidas principalmente por la ley de Dalton. También se considera que la fase

gaseosa no es soluble en la fase líquida, de modo que la fase líquida no presenta gases disueltos (Treybal, 1980).

El término humedad se aplica en general a la cantidad de vapor presente en un gas. Aunque los términos vapor y gas, podrían ser equivalentes, no lo son; el gas es un estado físico en donde, por arriba de ciertas condiciones "críticas" de presión y temperatura, no puede condensarse, es decir, convertirse en líquido. Es claro que el gas por debajo las condiciones antes mencionadas podría licuarse y por lo tanto evaporarse, recibiendo el nombre de vapor. Entonces el vapor es el producto de la evaporación de un líquido (Treybal, 1980).

Humedad másica, absoluta o de saturación absoluta: es la relación entre la masa del vapor y la masa del gas contenido en la masa gaseosa. Generalmente, se expresa en lb de H₂O/lb de aire seco o gramos de H₂O/gramos de aire seco o kg de H₂O/kg de aire seco (Treybal, 1980).

$$w = \frac{m_{\text{vapor de H}_2\text{O}}}{m_{\text{aire libre de H}_2\text{O}}} = \frac{m_v}{m_a} \quad (4.1)$$

Humedad relativa o saturación relativa, Y_r . Es la relación, expresada en porcentaje, entre la presión parcial del vapor de agua en la mezcla a la temperatura T y presión total P , p_v , y la presión parcial del vapor de agua en la mezcla si ésta estuviese saturada a las mismas condiciones, p_s (Treybal, 1980).

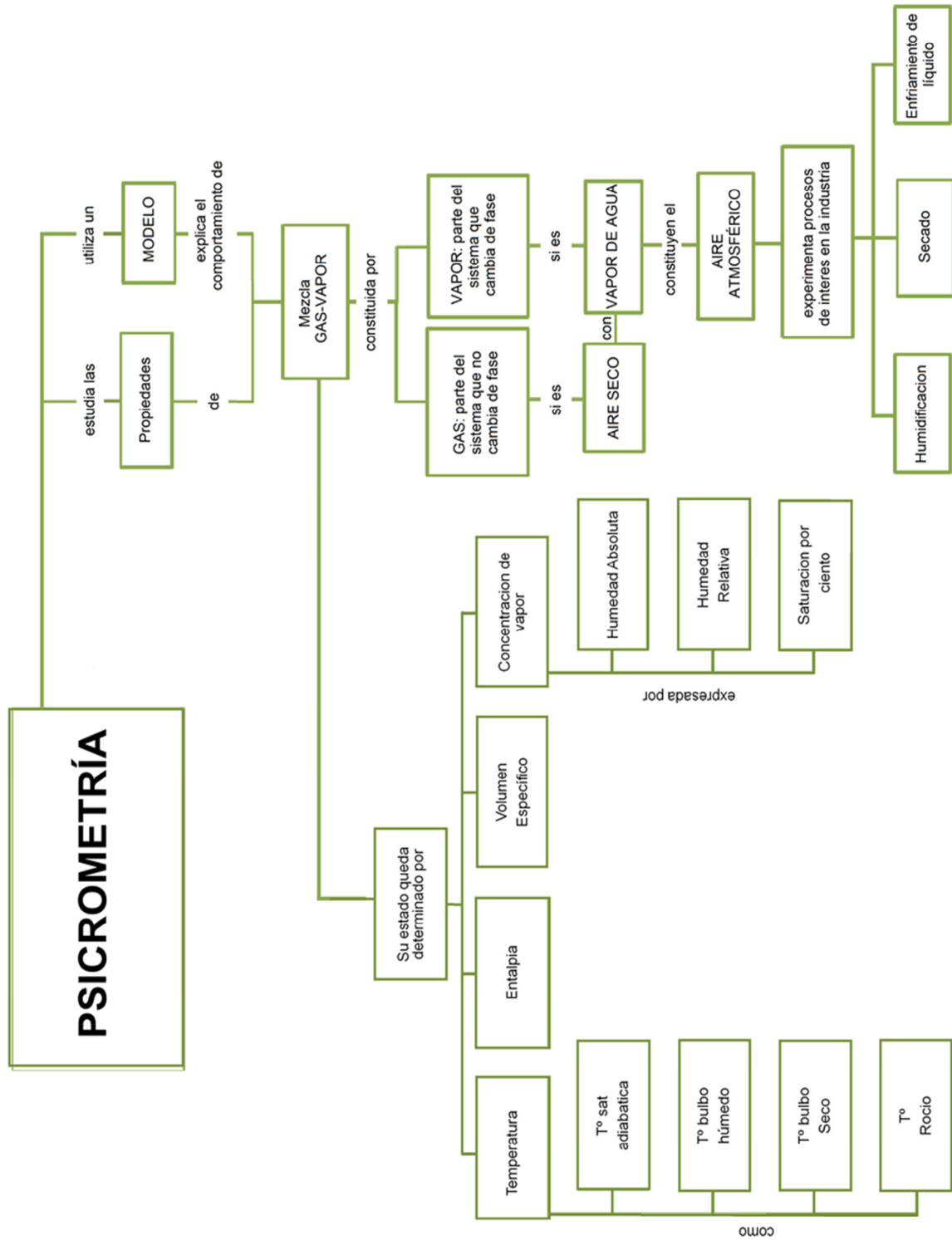
$$Y_r = \frac{p_v}{p_s} \quad (4.2)$$

Humedad porcentual o saturación porcentual, Y_p . Es la relación, expresada en porcentaje, entre la humedad absoluta molar de la mezcla a las condiciones T y P y la humedad absoluta molar de la mezcla si ésta estuviese saturada a las mismas condiciones (Treybal, 1980).

Temperatura de punto de rocío, T_r . Es la temperatura que alcanza una mezcla vapor-gas, cuando se enfría a presión constante, por debajo de la cual se forma la primera gota de vapor condensado persistiendo las condiciones de saturación (Treybal, 1980).

Temperatura de saturación adiabática. Es la temperatura alcanzada por una masa gaseosa cuando se pone en contacto en un líquido en condiciones adiabáticas. El calor latente de evaporación debe ser suministrado por el calor sensible transferido desde el aire (Treybal, 1980).

Figura 4-9: Mapa conceptual psicrometría



5. Metodología para el Diseño Simultáneo de Proceso y Control – DSPC de un equipo multiproducto de Secado por Atomización

El Diseño de equipos en Ingeniería de Procesos generalmente se lleva a cabo en estado estacionario y para un punto de operación deseado, asumiendo que siempre se puede diseñar un sistema de control que mantenga el proceso en el punto de operación y dentro de las restricciones impuestas por el diseño. Sin embargo cuando esto no se logra debido a las dinámicas del sistema, la obtención de un sistema de control adecuado requerirá grandes y costosas modificaciones del proceso y del sistema de control (Marín, et al., 2004). Además los equipos que se diseñan son para un único producto, sin considerar los beneficios (económicos, operativos, de maquila) que trae el diseñar un equipo para una familia de productos.

El objetivo principal de este trabajo es proponer una metodología para el Diseño Simultáneo de Proceso y Control, el cual asegure la controlabilidad en el espacio de estados de un equipo multiproducto. Esta metodología recopila los trabajos realizados por (Alvarez, 2012), (Ochoa, 2005), (Marín, et al., 2004), e incorpora unos pasos para hacer el diseño de un equipo multiproducto.

5.1 Producto

Resultado de un conjunto de atributos tangibles e intangibles (empaque, color, precio, calidad, marca, servicios y la reputación del vendedor) los cuales son percibidos por sus compradores (reales y potenciales) como capaces de satisfacer sus necesidades o deseos según características determinadas (Thompson, 2009).

5.1.1 Línea de productos o familia de productos

Son agrupaciones de productos, que presentan rasgos comunes en sus características, en su función principal, en los procesos de fabricación, en la tecnología, etc. La Figura 5-10 muestra un ejemplo de una línea de producto. La línea de producto permite una agrupación racional de las referencias con las que trabaja la empresa, es decir cada línea de producto puede contener varias referencias individuales, lo que corresponde a cada uno de los distintos productos que la empresa oferta en el mercado. Cambios como el color, tamaño, o incluso presentación del producto, hacen que sea una nueva referencia. La familia de productos es un conjunto de productos parecidos entre sí (línea de producto) porque cubren necesidades similares o tienen procesos de producción o canales de distribución comunes.

Figura 5-10: Línea de producto

Calid. 1					
Calid. 2					
Calid. 3					
Calid. 4					
	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Línea 4	Línea 5

5.1.2 Diseño de equipos multiproducto

El Diseño de equipos en ingeniería de procesos, generalmente se hace para un solo producto. Eventualmente, se realiza alguna modificación sobre los equipos cuando se quiere introducir un producto o una familia de productos nuevos. Sin embargo, un equipo puede ser diseñado pensando en las múltiples aplicaciones, exigencias y modos de operación que podría tener, esto resulta en la práctica, el uso de factores empíricos de sobredimensionamiento que tratan de compensar los efectos de las incertidumbres en el diseño, asumiendo que el sistema de control podría abarcar todas las dinámicas y no sólo el punto de operación sobre el cual se diseña (Puigjaner, et al., 2006).

La familia de productos tiene un modelo común, en el que el cambio de un producto a otro puede darse mediante el cambio de propiedades físico-químicas del sistema: capacidad calorífica, solubilidad, constantes cinéticas, coeficientes de transferencia de calor y, masa etc. Estas propiedades, tomadas tradicionalmente como parámetros constantes para el control del proceso, van a dejarse libres de manera que usando criterios de controlabilidad, puedan acotarse a una región en la que se garantice la repetitividad de los índices de calidad para un grupo de productos pertenecientes a la familia química estudiada, en este caso, colorantes naturales.

5.2 Revisión de la literatura sobre diseño y control de secadores por atomización

En la revisión del estado del arte sobre diseño de cámaras de secado por atomización, se encontró que en los diseños propuestos, los balances de materia y energía se hacen para el estado estacionario (Roma, 1996) (Yanza, 2003), sin mencionar el sistema de control.

Keith Masters en su libro *Spray Dryer Handbook* (Masters, 1985), realiza también los balances de materia y energía en estado estacionario, pero incluye un capítulo sobre sistema de control en donde afirma que el objetivo de control en un secador por atomización es mantener la calidad deseada del producto seco, sin importar las

perturbaciones ocurridas en la acción de secado y variaciones en el suministro de entrada. La estructura de control que presenta en su libro, consiste en controlar la temperatura de salida del aire mediante la temperatura del aire secante a la entrada. El control de la temperatura se justifica gracias a que ésta representa la calidad del producto, es decir, color, sabor, y contenido de humedad, entre otras.

Estos resultados de diseño tradicional encontrados, se deben a que en la Ingeniería de Procesos el tratamiento estático de los procesos fue muy exitoso puesto que proporcionaba al ingeniero de diseño las herramientas para seleccionar (diseñar) equipos que operaban muy cerca del Punto de Operación que se planteaba como objetivo de diseño. Dichos métodos de diseño eran el resultado de la experiencia y heurística de ingenieros expertos (de industria o académicos que realizaban investigación aplicada), en el diseño de diferentes equipos de proceso e incluso de trenes de producción completos. El diseño se realizaba para operar cerca de uno de los estados estacionarios que la literatura recomienda para tal tipo de proceso. Este procedimiento de diseño nada podía asegurar sobre la operación del proceso fuera de tal punto, ni tampoco contaba con herramientas que pronosticaran el comportamiento dinámico del proceso ante alteraciones del punto de operación por perturbaciones internas o externas (Alvarez, 2012).

La Ingeniería tiene resuelta la tarea de Diseño para el Proceso y para su Sistema de Control, de manera individual y secuencial: diseño del Proceso y luego diseño del Sistema de Control. El diseño del Proceso se realiza mayoritariamente con información estática, que no considera los cambios voluntarios de punto de operación, bien sea programado en el tiempo (en línea o seguimiento de una referencia) o programado por cambio de producto (fuera de línea o regulación por programación de planta). La manera usual de robustecer el diseño es aplicar factores de sobredimensionado (en ocasiones hasta de 30%) e instalar equipos amortiguadores, que no son más que equipos que disminuyen los cambios en las entradas al proceso. Desafortunadamente, cuando aparecen perturbaciones que los equipos amortiguadores no pueden tolerar, el Equipo así diseñado sale de operación a pesar de contar con un Sistema de Control. La aparición de tales perturbaciones se ha incrementado con la presión del mercado por reducción de costos de producción a través de materias primas de menos calidad o a incrementos en la capacidad productiva en el mismo tren de equipos. Además, la crisis energética de los años setenta del siglo XX obligó a un estudio detallado de las eficiencias energéticas de los procesos, que concluyó que los equipos amortiguadores y los sobre-diseños en los equipos principales, son la mayor fuente de ineficiencias energéticas en los procesos. Todo esto incita a buscar una manera integrada de diseñar el Proceso y su Sistema de Control (Alvarez, 2012).

Trabajos más recientes hechos por (Angeles, 2009), proponen una secuencia de cálculo que enlaza el dimensionamiento de la cámara de secado y la simulación del proceso como fenómeno físico (cambios de tamaño de gota, temperatura, trayectoria, humedad, etc.). En este caso las ecuaciones son dinámicas descritas por ecuaciones diferenciales parciales en donde realizaron estudios sobre los mecanismos microscópicos del secado y los fenómenos de transporte a nivel de gota, proponen modelos matemáticos para predecir las características del producto seco. Sin embargo, no consideran el sistema de control para el dimensionamiento.

Por otro lado, la literatura que presentan las empresas fabricantes de cámaras de secado, como *Niro Atomizer*, *Büchi*, *Spray process*, entre otras, sólo se limitan a dar

critérios de operación y las aplicaciones de estos equipos de secado para diferentes industrias, especialmente el secado de leche en polvo.

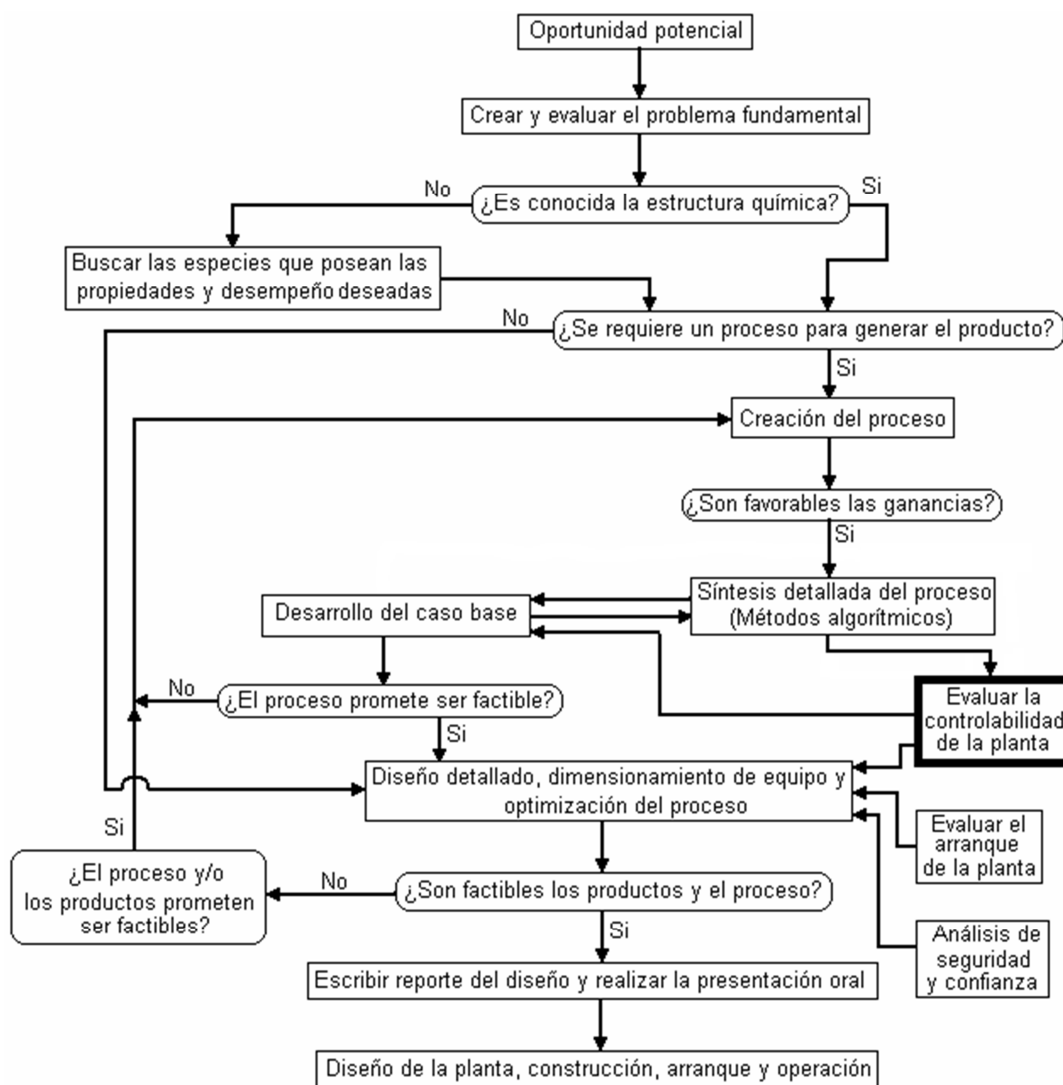
A finales de los años 60 del siglo XX, después del surgimiento de la teoría de control, se lograron avances significativos en el manejo del comportamiento dinámico de los procesos. Primero aparecieron conceptos asociados con la transición de un punto a otro en el espacio de estados del proceso, para sistemas lineales propuesto por (Kalman, 1960), estos conceptos luego fueron extendidos a sistemas no lineales por los trabajos hechos por (Hermann, et al., 1977) y (Sontag, 1998). Con tales herramientas, fue posible explorar todas las trayectorias dinámicas de las variables de estado de un Proceso, siempre que se tuviera disponible un modelo dinámico del mismo (Alvarez, 2012).

(Pérez, et al., 1995), presentan un nuevo modelo para predecir el comportamiento dinámico de una leche secada por atomización, también desarrollan y evalúan una estructura de control simple y robusto por medio de simulaciones. El nuevo modelo incluye un balance energético riguroso en la fase gaseosa, y considera el tamaño de la gota y la densidad variable. La estructura de control manipula la tasa de entrada de flujo de líquido y mide la humedad de la salida de gas. Con el objetivo de mejorar la robustez del sistema de control, proponen un control en cascada, basado en la medición del contenido de agua del sólido fuera de línea a la salida. Este sistema es capaz de controlar la humedad sólido a medida que sale del secador, a pesar de cualquier tipo de perturbación.

Los secadores por atomización *a priori* se pensarían que son equipos multiproducto ya que se han investigado para la fabricación de numerosos productos en diferentes sectores industriales. Sin embargo, los trabajos encontrados en la literatura, referentes a su uso y las aplicaciones están limitadas a la relación de los parámetros de este equipo como flujo de aire, flujo de alimento, temperatura de entrada y de salida, humedad final del producto y tiempo de residencia entre otros (Gil, et al., 2011).

La Figura 5-11 presenta un diagrama para el diseño de un producto o proceso químico, este tiene en cuenta desde la concepción de la oportunidad potencial hasta la presentación del reporte del diseño, presentación oral, diseño de la planta, construcción, arranque y operación, lo cual es muy importante cuando el diseño se hace para un nuevo producto. Esta secuencia se hace mención en este trabajo para las personas interesadas sobre el diseño de procesos ya que en los proyectos de ingeniería relacionados con nuevas plantas o equipos de procesamiento es necesario evaluar la oportunidad comercial del proyecto desde sus etapas iniciales, con el fin de saber si un proyecto es factible. La Figura 5-11 es importante en este trabajo ya que incluye la evaluación de la controlabilidad de la planta, en nuestro caso hay que aclarar que la evaluación se realizará sobre un equipo multiproducto (cámara de secado).

Figura 5-11: Pasos para el diseño de un producto o proceso químico (Rivera, 2010).



5.3 Propuesta metodológica de DSPyC

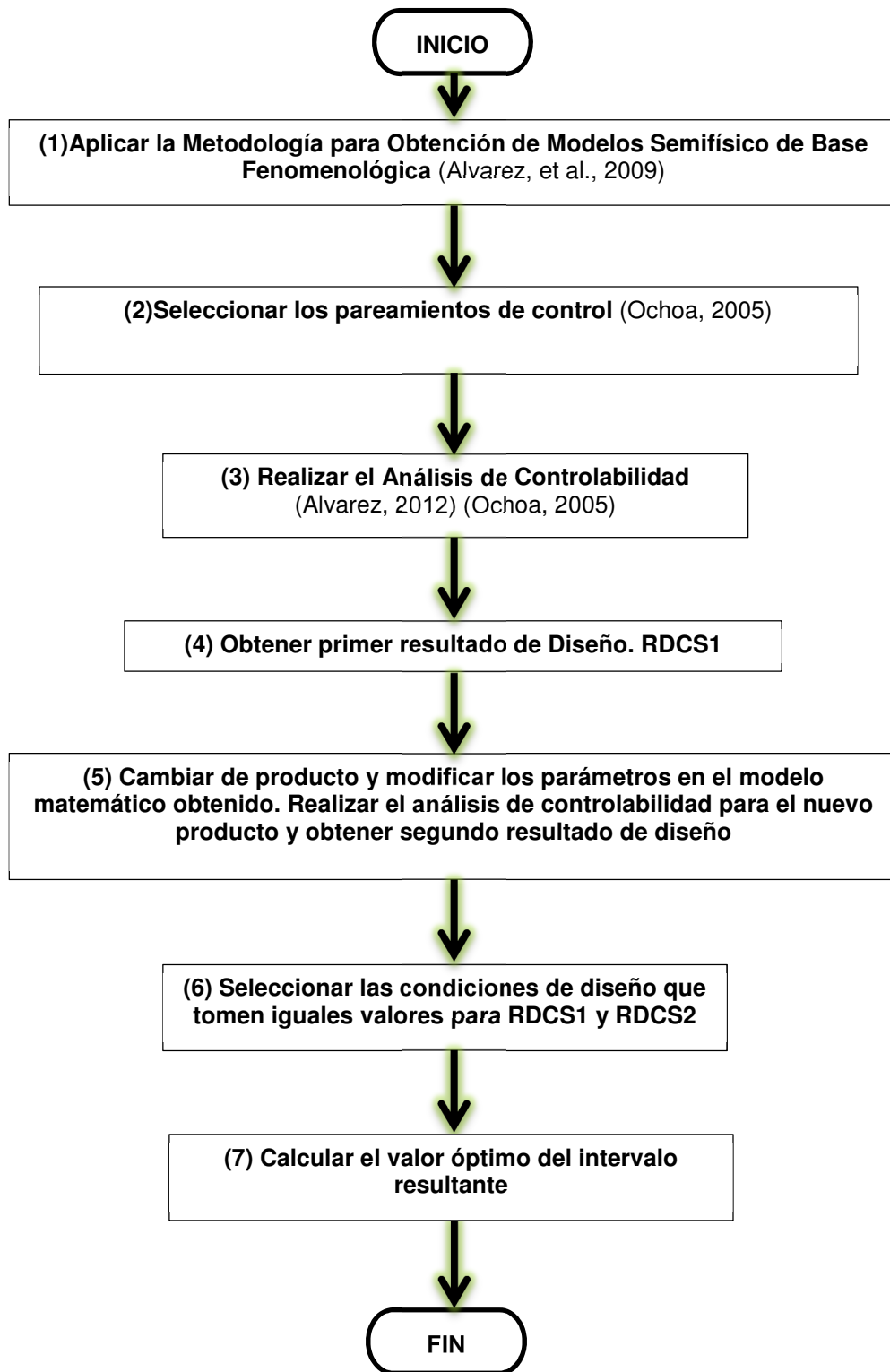
Álvarez define Diseño Simultáneo del Proceso y su Control (DSPyC): Tarea que desarrolla simultáneamente el diseño de un equipo, proceso o planta y el diseño del sistema de control para dicho equipo, proceso o planta (Álvarez, 2012).

Como se mencionó al principio de este capítulo, el principal aporte de esta propuesta metodológica y su novedad frente a otras metodologías de diseño, es incorporar dentro de una metodología ya establecida, el carácter multiproducto, garantizando el control en el espacio de estados.

El desarrollo de esta propuesta metodológica incluye la ejecución de seis pasos después de los cuales, se obtiene el diseño de la cámara de secado (Figura 5-12). El primer paso consiste en obtener el Modelo Semifísico de Base Fenomenológica que describa las dinámicas principales del proceso de estudio (paso 1), luego se seleccionan los pareamientos entre las variables manipuladas y las variables controladas (paso 2) que son importantes para realizar el análisis de controlabilidad (paso 3) con el primer producto que se va a evaluar; en el siguiente paso (paso 4) se obtienen las primeras condiciones de diseño del equipo para el primer producto (RDSC1). Una vez establecido este primer resultado, se cambia de producto, manteniendo las mismas condiciones de operación del equipo y se realiza nuevamente el análisis de controlabilidad, usando los mismos pareamientos y el mismo procedimiento para obtener la matriz de controlabilidad (paso 5). En este punto se obtiene el segundo resultado de diseño del equipo (RDSC2); luego de tener los dos resultados, se selecciona la condición de diseño mayor (paso 6), para este caso se escoge el mayor volumen que se requiera con el fin de asegurar controlabilidad de estado, este volumen debe encontrarse entre los dos resultados de diseño, es decir se hace un diagrama de venn, y finalmente, el volumen de cámara definitivo se selecciona mediante técnicas de optimización.

En las siguientes secciones se abordarán cada uno de los pasos desde el tema general y después se definirán específicamente los conceptos que se necesitan desarrollar para el logro del objetivo de diseño.

Figura 5-12: Propuesta de Metodología DSPyC



5.4 Modelado de Procesos

Un modelo es la representación matemática aproximada de un sistema, que se utiliza para reproducir y predecir su comportamiento bajo diversas condiciones. Los modelos formalizan en un lenguaje matemático el conocimiento que se tiene del sistema, en general, utilizando las leyes que rigen los diferentes fenómenos que ocurren en él (Roche, 2005).

El modelado matemático de un sistema puede enfrentarse de diferentes maneras, dependiendo del nivel de conocimiento que se posea del mismo. La manera más usual de realizar un modelo es describir matemáticamente todos los fenómenos que ocurren, por lo tanto estos fenómenos deben ser bien conocidos y comprendidos. Este tipo de modelo se denomina “fenomenológico” y permite identificar y relacionar matemáticamente, mediante parámetros numéricos, los procesos descritos por el modelo con la estructura física del sistema. Los parámetros del modelo poseen entonces un significado físico, por ejemplo: coeficientes de difusión, energías de activación, coeficientes cinéticos, etc. Sin embargo, establecer un modelo fenomenológico puede llegar a ser muy complejo. Además de la dificultad de establecer las ecuaciones del modelo, la medición correcta de los parámetros numéricos asociados a un modelo particular puede conllevar a una vasta cantidad de costosos procedimientos y puede no ser siempre posible (Roche, 2005).

La elaboración de un modelo, junto con su aplicación en la simulación, aporta una serie de ventajas a la hora de conocer y mejorar el proceso, como son (Atehortua, 2004), (Montesinos, 1998), (Bogaerts, et al., 1999):

- Caracterización y extracción de conocimiento sobre el comportamiento de un proceso.
- Diseño de experimentos.
- Diseño de sistemas de monitoreo, automatización, control y diagnóstico de fallas en un sistema.
- Determinación de condiciones óptimas de diseño de una etapa o proceso.
- Delimitación de la región de operación óptima de un sistema.
- Diseño de equipos.
- Inexistencia total o baja disponibilidad del sistema real para experimentación.
- Altos costos de las pruebas sobre el sistema real.
- Imposibilidad de operar el sistema real en regiones de riesgo.
- Tiempos de ensayo en sistema real demasiado largos (días o meses) comparado con corto tiempo de solución del modelo (segundos o minutos).

5.4.1 Tipos de modelos

De acuerdo con el grado de conocimiento del proceso implícito en el modelo se clasifican en (Alvarez, 2012), (Atehortua, 2004):

Modelos de Caja Blanca, Físicos o Fenomenológicos.

Los modelos fenomenológicos están desarrollados sobre las bases de una comprensión detallada de los fenómenos genéricos o leyes que gobiernan el comportamiento del sistema, es decir, corresponden a aquellos modelos en los cuales se tiene el conocimiento detallado de las variables involucradas en el sistema y de la comprensión de las relaciones entre ellas. La obtención del comportamiento de las dinámicas a partir de este tipo de modelos se logra generalmente por medio de las leyes de conservación (balances de masa total y por componentes, balances de energía total, balances de energía mecánica y balance de cantidad de movimiento). Estas leyes de conservación vienen acompañadas normalmente de ecuaciones auxiliares o constitutivas (ecuaciones cinéticas, termodinámicas, de relaciones de diseño, etc.) que permiten evaluar los parámetros del modelo o bien, establecer relaciones adicionales entre variables de estado.

Modelos de caja gris o Semifísicos

El modelado semi-físico es un punto intermedio entre el modelado fenomenológico y el empírico, ya que combinan los modelos de caja negra y los modelos de caja blanca. Se puede construir usando como punto de partida un modelo semilla obtenido a partir de información fenomenológica.

Existen dos maneras diferentes de obtener estos modelos de caja gris: i) Aprovechar la estructura de un modelo fenomenológico (balances de materia y energía) y establecer correlaciones empíricas para algunos parámetros que no pueden ser especificados mediante una estructura explicativa. Estos se denominan Modelos Semifísicos de Base Fenomenológica (MSBF). ii) Construir una estructura totalmente empírica, pero durante la identificación de los parámetros algunos de estos se pueden obtener a partir de conocimientos fenomenológicos. Estos se denominan semifísicos de base empírica.

Modelos de caja negra o Empíricos.

Los modelos empíricos están basados en el comportamiento específico observado del sistema. Determinados experimentalmente a partir de los datos disponibles del proceso. Resultan de la experimentación y la observación y son ampliamente usados cuando el fenómeno físico es desconocido o no está bien entendido. Su estructura es frecuentemente una caja negra que no puede ser directamente interpretada en términos de la fenomenología del sistema. Estos modelos no son derivados a partir de leyes físicas, por lo que para su elaboración debe seleccionarse alguna estructura matemática que relacione las variables a predecir con las variables medidas. Esta selección de estructura y variables es sumamente importante, ya que si no se incluye alguna variable crucial o si la relación propuesta no es adecuada, el modelo será incapaz de representar con suficiente exactitud el proceso. Un modelo de esta clase es el que se obtiene con funciones de transferencia en el dominio de Laplace. Las herramientas de control lineal usan esos los modelos para el diseño del sistema de control.

5.4.2 Formulación de un Modelo Semifísico de Base Fenomenológica (MSBF) del Proceso de Secado por Atomización

Para la obtención del MSBF se aplicó la metodología propuesta por (Alvarez, et al., 2009), que consiste en seguir los siguientes pasos

- Elaborar una descripción verbal y un diagrama de flujo de proceso que se complementen.
- Fijar un nivel de detalle para el modelo, de acuerdo con su utilización: ¿Qué preguntas contestará el modelo?
- Definir tantos Sistemas de Proceso (SdeP) sobre el proceso que se modelará como los exija el nivel de detalle y representar la relación de todos los SdeP en un diagrama de bloques.
- Aplicar el principio de conservación sobre cada uno de los sistemas de proceso.
- Seleccionar de las ecuaciones dinámicas de balance aquellas con información valiosa para cumplir con el objetivo del modelo.
- Definir para las ecuaciones dinámicas de balance esenciales, los parámetros, las variables y las constantes conocidas en cada SdeP.
- Hallar ecuaciones constitutivas que permitan calcular el mayor número de parámetros en cada SdeP.
- Verificar los grados de libertad del modelo.
- Obtener el modelo computacional o solución del modelo matemático.
- Validar el modelo para diferentes condiciones.

5.5 Selección de los pareamientos de control

La selección de los pareamientos entre las variables manipuladas y las variables controladas es fundamental debido a que en el diseño del sistema de control, este debe compensar la respuesta natural del proceso ante las perturbaciones del entorno mediante una adecuada interacción entre dichas variables.

La elección de un pareamiento apropiado permite el pleno desarrollo del sistema de control, teniendo en cuenta que:

- Las variables manipuladas y las variables controladas puedan ser medidas.
- Las variables manipuladas puedan ser fácilmente ajustadas.
- Las variables manipuladas realmente ejerzan la acción deseada sobre la variable a controlar, o dicho de otra forma, que las variables de salida presenten alta sensibilidad a los cambios en el estado del proceso.

Dos condiciones adicionales que ayudan a reducir el número de pareamientos a plantear son:

- Que la variable manipulada u_1 esté en la ecuación para el estado x_1 y que la variable manipulada u_2 esté en la ecuación del estado x_2 y así sucesivamente, dependiendo de los estados del sistema.
- Que tanto u_1 como u_2 y u_n sean manipulaciones técnicamente factibles y económicamente viables en el Proceso real (Alvarez, 2012).

5.5.1 Cálculo de los grados de libertad

Para satisfacer los objetivos de control de un proceso en un tiempo finito razonablemente corto, es necesario contar con un número de variables manipuladas igual o mayor al número de variables a ser controladas de donde se deduce que si se realiza control ya sea de los estados o de las salidas de un sistema, debe por lo menos existir la disponibilidad de un número de variables manipuladas igual al número de variables a controlar. El cumplimiento de esta condición le proporciona flexibilidad suficiente al proceso de tal manera que puedan satisfacerse los objetivos de control. Cuando el número de variables controladas es mayor que el número de variables manipuladas, el sistema se encuentra sobre-especificado y el control completo de estado queda sujeto a los puntos de equilibrio naturales del sistema, es decir, cuando se tiene un número menor de variables manipuladas que de variables controladas, la única forma de hacer control completo de estado es que los puntos de ajuste deseados sean equilibrios naturales. De otro modo, solo se logrará controlar algunos de los estados, y aunque los restantes podrán ser afectados ya sea por otros estados o por las acciones de control, no siempre podrán ser llevados a los puntos de ajuste deseados (Ochoa, 2005).

El número de Grados De Libertad (G.D.L) para el control de un sistema se define como:

$$GDL = NVM - NVC \quad (5.3)$$

Donde,

- NVM , es el Número de Variables Manipulables (acciones de control)
- NVC , es el Número de Variables a Controlar (estados o salidas)

Si $GDL < 0$, se debe introducir nuevas variables manipuladas, o bien, realizar una reducción del modelo que permita disminuir el número de estados a controlar.

5.6 Controlabilidad

La idea de control nos puede ser familiar si se piensa en el movimiento del volante del automóvil o bien al momento de girar la llave de la ducha. El resultado puede ser bueno o malo no obstante en cualquier caso el concepto de control debe reunir los siguientes cuatro elementos (Esquivel, 2007):

1. El sistema que se desea controlar.

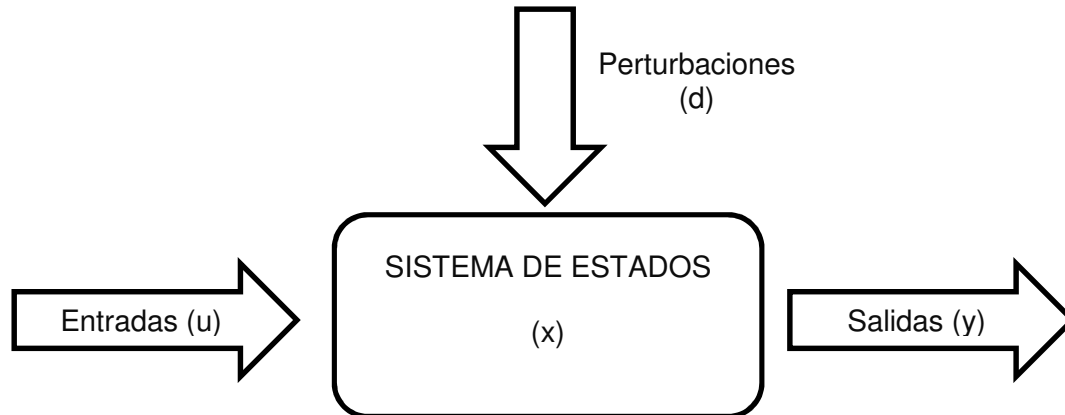
2. El objetivo de control o comportamiento que se desea lograr en el sistema. Se trata de la meta a alcanzar.

3. El conjunto de variables medibles o salidas. Son las propiedades del sistema que pueden ser medibles.

4. El conjunto de variables de control o entradas. Son aquellas propiedades que pueden modificarse con la intención de actuar sobre el sistema a controlar.

(Alvarez, 2012), define controlabilidad: “Característica que asegura la existencia de una secuencia finita de acciones de control u , que garantizan que puede lograrse y mantenerse cualquier valor del estado x del Proceso en un intervalo finito de tiempo $0 \leq t \leq t_1$ ”. Un sistema dinámico de control es aquel cuyo comportamiento depende del tiempo y está conformado por las siguientes variables (Figura 5-13) (Ochoa, 2005):

Figura 5-13: Representación de un Sistema en Variables de Estado



- Entradas (u): variables que afectan al proceso pero que están bajo la manipulación el diseñador. Dichas variables se denominan manipuladas; esta es la variable que se utiliza para mantener a la variable controlada en el punto de ajuste.
- Perturbaciones (d): cualquier variable que ocasiona que la variable de control se desvíe del punto de ajuste y que no pueden ser conducida. Su existencia es una de las principales causas que motiva el uso de los sistemas de control.
- Estados o variables internas (x): Reflejan la condición real del proceso. A partir del conocimiento de las variables de entrada y de los valores de las variables de estado en el tiempo actual, es posible conocer totalmente la condición del proceso y describir la dinámica de este.
- Salidas (y): Variables medidas que para la teoría de control convencional son las variables de interés o variables controladas. Se debe mantener o controlar su valor dentro de algún rango deseado. La medida de estas variables puede ser realizado por uno o más sensores.

En este capítulo se desarrollan las dos formas de proceder con el análisis de controlabilidad, es decir, sobre el sistema lineal y no lineal.

5.6.1 Controlabilidad de Estado para Sistemas Lineales

Rudolf Kalman en su trabajo "On the General Theory of Control Systems" definió el concepto de controlabilidad para un sistema lineal invariante en el tiempo como: "Habilidad de llevar el sistema desde un estado inicial hasta un estado final en un tiempo finito".

"Un estado x de una planta se dice que es controlable si existe una señal de control $u_1(t)$ definida sobre un intervalo finito $0 \leq t \leq t_1$ tal que $\Phi(t_1; x, 0) = 0$. Si cada estado es controlable, se dice que la planta es completamente controlable".

La función Φ es definida por Kalman como una función de transición o movimiento que representa la transición desde el estado inicial $x_0(t_0 = 0)$ hasta el estado final $x(t_1) = \Phi(t_1; x(t_0), t_0)$. Si el estado final $x(t_1)$ es un estado de equilibrio 0, entonces dicho estado es controlable (Ochoa, 2005) (Kalman, 1960)

Según la definición dada por (Kalman, 1960), un sistema es controlable si existen acciones de control capaces de llevar el sistema desde un estado inicial hacia un estado final en un tiempo finito.

Esta definición fue dada para sistemas lineales de la forma:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \tag{5.4}$$

Con $x \in R^n$ el vector que contiene los estados del sistema, $u \in R^m$ el vector de las entradas manipuladas y $y \in R^l$ el vector que contiene a las salidas medidas. Como su nombre lo indica, la controlabilidad se analiza en cada uno de los estados; si cada estado es controlable, se dice que la planta es completamente controlable.

Matriz de Controlabilidad de Estado para Sistemas Lineales

La matriz de Controlabilidad C_o para el Sistema Lineal de orden n descrito por la ecuación (5.29) se construye a partir de las matrices A y B según:

$$C_o = [B \ AB \ \dots \ A^{n-1}B] \tag{5.5}$$

Criterio de Controlabilidad- Condición de Rango

El Sistema Lineal de orden n descrito por la ecuación (5.4), se dice que es controlable si y solo si el rango r_{C_o} de la matriz de Controlabilidad C_o es igual al orden n del sistema. Si

el Sistema no es controlable, se dice que la diferencia $(n - r_{c_o})$ corresponde al número de modos dinámicos o dinámicas no controlables del Sistema.

5.6.2 Controlabilidad de Estado (CdeE) para Sistemas No Lineales

La definición de Controlabilidad de Estado para Sistemas No Lineales plantea un análogo del criterio de la condición de rango para la Controlabilidad propuesta por Kalman para sistemas lineales. Sin embargo, en el caso de los sistemas no lineales la verificación de la controlabilidad es más compleja que en el caso lineal y requiere incorporar otros conceptos como el de accesibilidad. Además, debe diferenciarse la Controlabilidad global y local y la Alcanzabilidad local y global. Todos estos autores basan su discusión en el sistema no lineal afín con la entrada descrito por la Ecuación 5.13. (Alvarez, 2012).

$$\dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^m u_i g_i(x); y = h(x) \quad (5.6)$$

5.6.3 Controlabilidad Práctica Local de Estado (CPLdeE) para DSPyC

En su definición, Kalman asume que la señal o acción de control $u_1(t)$ no presenta restricciones, es decir, se asume que la acción de control es no acotada y que simplemente el sistema de control podrá garantizar la ejecución de la acción de control en el intervalo $(-\infty, \infty)$. Sin embargo, siendo conscientes de que en la práctica las acciones de control están restringidas a un intervalo $[u_{min}, u_{max}]$ de acciones de control disponibles, es necesario complementar la definición original de Kalman, para definir la controlabilidad desde un punto de vista práctico (Ochoa, 2005). Kalman definió a la controlabilidad específicamente para sistemas lineales, en donde gracias al principio de superposición es válido hablar de controlabilidad global completa de estado, es decir, en todo el espacio de estados. Sin embargo, en sistemas no lineales la globalidad del concepto de controlabilidad se pierde, puesto que los sistemas no lineales no satisfacen el principio de superposición, y por lo tanto, en dichos sistemas es necesario trabajar con el concepto de controlabilidad local

(Ochoa, 2005) define la Controlabilidad local práctica como: "Un sistema es localmente controlable en la práctica en un estado de equilibrio $x = x^*$ si el estado x^* es alcanzable desde un punto inicial x_0 que pertenece a un vecindario de x^* , en un tiempo finito, empleando un conjunto de acciones de control $u(t)$ perteneciente al espacio disponible U de las acciones de control o entradas manipuladas".

Cuando se implementa un sistema de control existen aspectos que deben considerarse, como la saturación de las acciones de control, las cuales son acotadas en la práctica por la capacidad del Elemento Final de Control (EFC) o durante el diseño por cuestiones de

seguridad. En algunos casos puede ocurrir que para alcanzar un punto de operación especificado se requiera llevar al menos una de las acciones de control por fuera de su intervalo disponible, lo que satura al Elemento Final de Control (EFC), dejando al Proceso en lazo abierto.

La Controlabilidad es la suma de dos efectos: i) La posibilidad de alcanzar el estado deseado, y ii) el hecho de que el estado alcanzado pueda convertirse en un punto de equilibrio del Sistema controlado. Aunque la controlabilidad de estado se prueba en el punto de equilibrio, la CdeE nada garantiza sobre la Estabilidad para tal punto. Esto porque la Estabilidad se relaciona directamente con un controlador en particular (ya sintonizado). En consecuencia, la definición de CdeE debe completarse con restricciones que consideren que las acciones de control reales siempre están acotadas y que la característica de la no linealidad obliga a un análisis local, antes de ser utilizada como una restricción de Controlabilidad en el DSPyC en la Optimización de parámetros del Proceso (Equipo) y su Sistema de Control (Alvarez, 2012).

Matriz de Controlabilidad No lineal

Para realizar el análisis de controlabilidad, el sistema no lineal debe llevarse a la forma canónica descrita por la Ecuación 5.13. El Algebra y los corchetes de Lie brinda un marco para verificar la Controlabilidad de Sistemas No Lineales, con el Sistema dinámico representado por campos vectoriales. Las propiedades básicas de esos sistemas dependen de las interconexiones entre los diferentes campos vectoriales correspondientes a las diferentes acciones de control u_i .

La forma de la matriz de Controlabilidad para sistemas no lineales representado en su forma canónica (Ecuación 5.13) está dada por:

- *Para un sistema con única entrada ($m=1$)*

$$W_c = [g(x)ad_f g(x) \dots ad_f^{n-1} g(x)]_{n \times n} \quad (5.7)$$

Donde

- n , es el número de Estados
- $ad_f g(x)$, es la operación de los corchetes de Lie entre los campos vectoriales $f(x)$ y $g(x)$ definida como:

$$ad_f g(x) = [f, g](x) = \frac{\partial g}{\partial x} f(x) - \frac{\partial f}{\partial x} g(x) \quad (5.8)$$

Siendo

$\frac{\partial f}{\partial x}$ y $\frac{\partial g}{\partial x}$ los Jacobianos de las funciones $f(x)$ y $g(x)$ respectivamente.

- Para un sistema de múltiples entradas ($m=2,3, \dots,n$):

En este caso el término $g_i(x)$ no es un vector como en el caso de una sola variable manipulada, sino que se presenta como la suma de cada uno de los vectores $g_i(x)$ multiplicado por las entradas u_i correspondientes.

La matriz de Controlabilidad estará dada por:

$$W_c = \begin{bmatrix} g_1(x) & g_2(x) & \dots & g_m(x) & ad_f^1 g_1(x) & ad_f^2 g_2(x) & \dots \\ \dots & ad_f^m g_m(x) & ad_f^{n-1} g_1(x) & ad_f^{n-1} g_2(x) & \dots & ad_f^{n-1} g_m(x) \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Donde:

g_1, g_2, \dots, g_m son los vectores que conforman cada una de las columnas de la matriz $G(x)$. Los términos $ad_f g_1(x), ad_f g_2(x), \dots, ad_f g_m(x)$ son la operación de los corchetes de Lie mencionados en la ecuación 5.37 y los términos $ad_f^{n-1} g_1(x), ad_f^{n-1} g_2(x), \dots, ad_f^{n-1} g_m(x)$ son las operaciones de los corchetes de Lie recursivos, definidos así:

$$ad_f^0 g = g, ad_f^1 g = [f, g], ad_f^2 g = [f, [f, g]] = [f, ad_f^1 g] \quad (5.10)$$

Llegando a la forma:

$$ad_f^{n-1} g_i(x) = [f, ad_f^{n-2} g_i] \quad (5.11)$$

Criterio de Controlabilidad- Sistemas no lineales

El criterio para evaluar Controlabilidad mediante esta matriz, consiste en determinar o evaluar el determinante o el rango de la matriz de Controlabilidad (W_c) según el caso (Henson, et al., 1997), así:

- Si la matriz de controlabilidad (W_c) es cuadrada ($n \times n$, en donde $m = 1$), la condición para que el sistema sea de estado controlable es que $\det(W_c) \neq 0$.
- Si la matriz de controlabilidad (W_c) no es cuadrada ($m > 1$), la condición para que el sistema sea de estado controlable es que $\text{rango}(W_c) = n$. Esta condición se basa en la independencia lineal entre las filas (o columnas) de la matriz de Controlabilidad.

5.6.4 Representación del Sistema en Variables de Estado

Las variables de estado de un sistema dinámico son el conjunto más pequeño de variables que permiten determinar por completo el comportamiento del sistema para

cualquier tiempo $t \geq t_0$, a partir del conocimiento de dichas variables en $t = t_0$ y del conocimiento de las entradas para $t \geq t_0$ (Dutton, et al., 1997).

Si se necesitan n variables de estado para describir por completo el comportamiento de un sistema determinado, estas n variables de estado se consideran los n componentes de un vector \mathbf{x} , conocido como vector de estado. Por lo tanto, un vector de estado es aquel que determina de manera única el estado del sistema $\mathbf{x}(t)$ para cualquier tiempo $t \geq t_0$, una vez que se conoce el estado en $t = t_0$ y se especifica la entrada $\mathbf{u}(t)$ para $t \geq t_0$. El espacio de n dimensiones cuyos ejes de coordenadas están formados por los ejes x_1, x_2, \dots, x_n se denomina espacio de estados; por lo tanto, cualquier estado puede representarse mediante un punto en el espacio de estados (Ogata, 1996)

La elección de las variables de estado es libre, sin embargo, estas variables deben obedecer las siguientes reglas (Dutton, et al., 1997):

- Deben ser linealmente independientes.
- Debe existir un número suficiente de variables de estado para especificar completamente el comportamiento dinámico del sistema.
- No deben ser entradas del sistema, o combinaciones lineales de las entradas (ya que las entradas son afectadas desde fuera del sistema, y por lo tanto los estados no serían estados del propio sistema).

En algunos sistemas, los estados declarados pueden ser variables que tienen significado físico y que pueden ser medibles directamente con algún sensor, o inferidas a partir de mediciones de diferentes variables. Sin embargo, los estados también pueden ser variables abstractas que no corresponden físicamente a señales medibles, pero que son útiles, ya que permiten obtener un modelo matemático manejable y fácil de trabajar.

5.6.5 Modelo en el Espacio de Estados

La base de la teoría de control moderna es el concepto de espacio de estados. Dicha teoría parte de modelos dinámicos en el dominio del tiempo y en el espacio de estados, a diferencia de los modelos en el dominio de la transformada de Laplace o en el dominio de la frecuencia, utilizados por la teoría de control convencional. El modelamiento de procesos químicos en el espacio de estados se deriva de las leyes de conservación y de los principios fenomenológicos que rigen dichos procesos. Por tal razón, partiendo de las ecuaciones de balance es posible originar el modelo dinámico en el espacio de estados para un proceso químico, en donde generalmente los estados del sistema son variables reales representativas del proceso y con significado físico, cosa que no ocurre en algunos sistemas como por ejemplo los sistemas mecánicos o los eléctricos en donde los estados del sistema pueden ser agrupamientos de variables que carecen de tal significado. De forma general, el modelo fenomenológico de un sistema dinámico no lineal en el espacio de estados puede representarse por la siguiente forma canónica (Ochoa, 2005) (Isidori, 1995):

$$\dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i \quad (5.12)$$

$$y = h(x)$$

Donde:

- x , es el vector de estados
- y , es el vector de salidas
- u , es la entrada manipulada o acción de control. En el caso de sistemas de única entrada ($i=1$) u es un escalar y para sistemas con múltiples entradas ($i=1, 2, 3, \dots, m$), u corresponde a un vector.
- $f(x)$, es una función no lineal de los estados que se asocia con la respuesta natural del sistema (respuesta no forzada). Esta función incluye además, el efecto de las perturbaciones sobre el sistema.
- $g(x)$, es una función no lineal de los estados pero que es lineal con respecto a la entrada manipulada (sistema afín con la entrada manipulada) y se asocia con la respuesta forzada. En el caso de sistemas con única entrada, el término $g(x)$ es un vector de acciones forzantes; mientras que para el caso de múltiples entradas donde u es un vector de m entradas, $g(x)$ es una matriz de $n \times m$ componentes, donde n es el número de estados del sistema.
- $h(x)$, es una función que representa el mapeo desde el espacio de los estados hacia el espacio de las salidas.

La forma canónica presentada en la Ecuación 5.12, describe un gran número de sistemas físicos de interés en varias aplicaciones de ingeniería incluyendo claro está los sistemas lineales (Isidori, 1995).

5.6.6 Forma Canónica del Sistema

El análisis de controlabilidad para sistemas no lineales, puede realizarse bajo dos métodos diferentes: la Teoría de Conjuntos Invariantes y el Álgebra de Lie. Si bien ambas teorías se han desarrollado para sistemas continuos y para sistemas discretos, la mayoría de aplicaciones de la controlabilidad basada en Álgebra de Lie se enfocan en sistemas continuos, mientras que las aplicaciones de la controlabilidad basadas en la teoría de conjuntos invariantes se han desarrollado para sistemas discretos (Alvarez, 2012).

La forma canónica está descrita por la ecuación

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i, \quad y = h(x) \quad (5.13)$$

5.7 Planteamiento de la función objetivo

Se puede recurrir a varios índices de desempeño como funciones objetivo para la optimización del sistema, tales como funciones económicas, indicadores ambientales y cualquier otro indicador de desempeño que pueda ser expresado en función de las corrientes (caudal, composición) y del tamaño de los equipos. Un proyecto ambicioso de metodología de síntesis y diseño debiera contemplar indicadores y/o criterios técnicos o funcionales (robustez, flexibilidad y eficiencia), medioambientales (emisiones y utilización de recursos como energía, agua), económicos (costos de inversión, operativos e incidencia del costo en el usuario) y regulatorios (límites de vertido y multas). Esto requiere definir dichos indicadores y establecer métodos de peso para su jerarquización en un escenario determinado (Alasino, 2009).

Normalmente la función objetivo es una función económica en la cual se tienen en cuenta los costos de capital y los costos de operación. Los costos de capital se describen como las correlaciones entre los parámetros de diseño que caracterizan cada equipo. Los costos de operación se relacionan con los costos de los servicios industriales y fluidos de servicio necesarios para llevar a cabo la operación del equipo. Luego que se tiene configurado el Funcional de Costo (FC) y se han establecido todas las restricciones, se debe proceder a resolver el Problema de Optimización. Dicha resolución no es más que encontrar al menos un conjunto de valores para los parámetros del Equipo que garanticen el mínimo valor del FC. Todo, sin violar ninguna de las restricciones (Alvarez, 2012).

Los problemas de optimización se componen generalmente de:

- **Función objetivo:** Es la medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar (maximizar o minimizar).
- **Variables:** Representan las decisiones que se pueden tomar para afectar el valor de la función objetivo.
- **Restricciones:** Representan el conjunto de relaciones que ciertas variables están obligadas a satisfacer.

Resolver un problema de optimización consiste en encontrar el valor que deben tomar las variables para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones (Ramos, et al., 2010).

6.DSPyC de una cámara de secado por atomización

En este Capítulo se desarrolla la metodología propuesta para DSPyC, siguiendo paso a paso las etapas propuestas (Figura 5-12). El diseño se realiza para una cámara de secado por atomización de colorantes naturales.

Esta investigación se trabajó sobre una familia de productos cuyo método de producción es semejante, es decir, se diseñó una cámara de secado por atomización para la producción de dos colorantes azules el primero para uso en la industria cosmética y el segundo para uso en la industria de alimentos. Esta restricción de clasificación de los colorantes por familias, se hace de acuerdo a las GMP (*Good Manufacturing Practices*) existentes que han sido desarrolladas previamente por la Comisión Europea, (European Commission, 1999); adaptadas luego por la Comunidad Andina (Comunidad Andina, 2002) y la ISO 22716 (International Standard, 2007) y en Colombia por el decreto 60 de 2002 (Ministerio de Salud, 2002).

La familia de colorantes azules naturales si se secan en un mismo equipo, presentan una característica principal y es, que el modelo que las representa es el mismo en estructura pero diferente en cuanto a los parámetros del sistema, ya que, aunque se esté trabajando con un mismo colorante, la formulación desarrollada para alimentos y cosméticos cambian los parámetros del modelo.

La sección 6.1 de este trabajo no hace parte de la metodología de DSPyC, sin embargo, se incluye debido a la característica multiproducto (formulación de los diferentes productos) que se evaluó para realizar el diseño de la cámara de secado.

6.1 Formulación del colorante azul natural para cosméticos y alimentos.

Trabajos de investigación realizados previamente, en los cuales se secó el azul líquido en un equipo de secado por atomización, sin ningún tipo de encapsulación, presentaron dificultades técnicas ya que las muestras se pegaron a las paredes del equipo, además, tendían a caramelizarse y luego quemarse, haciendo muy difícil el secado. Este fenómeno ocurre debido a los azúcares reductores presentes, a su elevada higroscopicidad y termoplasticidad, ya que como se muestra en la Tabla 2.1, el fruto de la jagua contiene gran cantidad de azúcares.

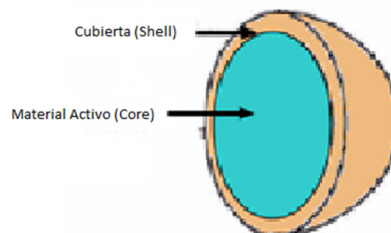
Para lograr un producto seco se investigó sobre metodologías de microencapsulación y posteriormente se realizó la búsqueda de agentes encapsulantes, para esto se consultaron artículos científicos y otros documentos especializados en esta temática, publicados en diferentes bases de datos y de diferentes editoriales como Elsevier Science, Springer, en revistas como Journal of Microencapsulation, Journal of Science Food and Agricultura, Food Hydrocolloids, Ciencia y Tecnología de Alimentos, Journal of Agricultura and Food Chemistry y Food Research Internacional.

Usando la misma tecnología de secado por atomización se desarrollaron 12 formulaciones, cada una con un factor diferenciador en la composición de la matriz encapsulante. De estas formulaciones, se seleccionaron para evaluar el equipo multiproducto, aquellas que no presentaran dentro de la formulación goma acacia pues aunque es la más citada por los trabajos de investigación, tiene un alto valor comercial (Concha, et al., 2002). Finalmente se seleccionaron dos formulaciones: la primera para uso en productos cosméticos y la segunda para uso en productos alimenticios. Debido a la confidencialidad de este trabajo de investigación existente con la empresa Ecoflora S.A.S., no se presentan detalles de las fórmulas desarrolladas.

6.1.1 Microencapsulación

La encapsulación es un proceso en el cual partículas individuales o gotas de un material activo (core) se rodean por una cubierta (shell) para producir capsulas. La microencapsulación tiene el mismo principio que la encapsulación con la diferencia del tamaño de partícula resultante (rango de micras), conocidas como microcápsulas (Figura 6-14). La microencapsulación es una técnica que se ha aplicado para preservar y/o proteger numerosos ingredientes. Puede considerarse una forma especial de empaquetar materiales sólidos, líquidos y gaseosos en miniatura. El material en particular puede ser cubierto de manera individual para protegerlo del ambiente, de la reacción con otros compuestos o para impedir que sufran reacciones de oxidación debido a la luz o al oxígeno. Permite proteger del ambiente a sustancias sólidas o líquidas, divididas en pequeñas partículas o gotas (fase interna), recubriéndolas con una película llamada pared o matriz. (López, 2010).

Figura 6-14: Estructura general de una microcápsula (Lozano, 2009)



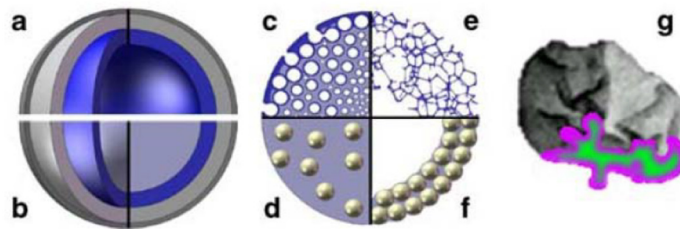
Existen diferentes tipos de microcápsulas, que según su estructura las podemos clasificar como: microcápsulas de sistema reservorio o capsular y microcápsulas en sistema matricial:

- Sistema reservorio o capsular: el material activo se encuentra incluido en una especie de reservorio, puede ser de naturaleza líquida o sólida, el cual se haya envuelto por una fina película del material de recubrimiento. En la Figura 6-15 puede observarse el caso de una partícula con el interior lleno (Figura 6-15a), o bien con el interior parcialmente vacío creando una microcápsula hueca (Figura 6-15b).
- Sistema matricial: el material activo se encuentra altamente disperso en la matriz polimérica. En este caso, se puede tener una estructura en forma de espuma en donde el material activo se encuentre repartido en toda la microcápsula y la cubierta

o bien permanece intacta (Figura 6-15c) o bien en una estructura abierta en forma de red (Figura 6-15e).

También existen microcápsulas en las que el material activo está disperso en la matriz que sirve como cubierta, tanto como esfera llena (Figura 6-15d) como en la periferia (Figura 6-15f). La forma de las microcápsulas podrá ser esférica o bien presentar una forma irregular (Figura 6-15g).

Figura 6-15: Morfología de los diferentes tipos de microcápsulas (Vehring, 2008)



6.1.2 Métodos Generales de Microencapsulación

Para preparar las microcápsulas hay numerosas técnicas, y se ha sugerido que podrían identificarse más de 200 métodos en la literatura de patentes (Magdassi, 1996) (Brazel, 1999) (Yáñez, et al., 2005) (Yousefi, et al., 2011). No obstante algunos autores clasifican a los métodos de encapsulación en:

- Procesos químicos: polimerización interfacial, gelificación iónica, incompatibilidad polimérica, inclusión molecular
- Procesos fisicoquímicos: Coacervación simple o compleja y atrapamiento en liposomas.
- Procesos físicos: Secado por aspersion y la encapsulación por lecho fluidizado

La selección del método de microencapsulación estará en función del presupuesto, los costos, las propiedades del material a encapsular, el tamaño deseado de las microcápsulas, la aplicación y de los mecanismos de liberación (Pedroza, 2002)

De las técnicas de microencapsulación mencionadas anteriormente, se seleccionó la microencapsulación mediante secado por atomización ya que además de obtener un producto en polvo, el material de interés (en este caso el colorante azul), se encapsula dentro de una matriz, logrando mejoras en el producto final (ej. Transporte, al retirar el agua el producto pesa menos; envase y almacenamiento, al trabajar con sólidos y no

líquidos ocupa un menor volumen y al estar sólido no existirán derrames; mayor tiempo de vida útil y menor contaminación, al disminuir la actividad acuosa).

Para efectuar la microencapsulación mediante secado por atomización, el material de recubrimiento se disuelve en un disolvente apropiado y en esta disolución se dispersa la sustancia, sólida o líquida, que va a servir como material activo. La dispersión, en estado líquido, preparada en estas condiciones, se suele introducir en la cámara de secado en donde se atomiza en una corriente de aire caliente que proporciona el calor de evaporación requerido para la separación del disolvente. Cuando el disolvente se evapora, el material de recubrimiento envuelve las partículas. Una de las grandes ventajas de este proceso, en comparación con otros métodos de microencapsulación, además de su simplicidad, es que es apropiado para materiales muy volátiles y sensibles al calor, aunque el aire caliente introducido alcanza una temperatura que oscila entre 100 y 200 °C. A pesar de la temperatura relativamente alta del aire, las gotas del líquido atomizado se calientan solo hasta 40 °C debido a la corta duración del secado (fracciones de segundo), lo que evita la degradación del producto, ya que a pesar del aporte de aire caliente, este sustrae calor por la vaporización del disolvente (Miravet, 2009), (Lozano, 2009).

6.1.3 Materiales de Encapsulación

Existe una amplia variedad de materiales que pueden ser usados para encapsular ingredientes alimentarios, donde se incluyen aceites hidrogenados, ceras, maltodextrinas, almidones y gomas. Algunos de los más efectivos son los aceites hidrogenados como el aceite de palma, algodón y soya, que son excelentes formadores de películas capaces de cubrir las partículas individuales, proporcionando una encapsulación uniforme (Yáñez, et al., 2005)

Los almidones modificados, las maltodextrinas y las gomas son empleados como acarreadores o materiales pared debido a sus características de viscosidad, solubilidad y emulsificación. El material a encapsular es homogenizado con el acarreador; la mezcla es alimentada al secador por aspersion y se atomiza por medio de una boquilla o disco finalmente las cápsulas son colectadas después de la separación con el aire en un depósito recolector (Yáñez, et al., 2005).

Desarrollos recientes se han hecho con nuevos acarreadores, incluyendo coloides y gomas naturales, para la obtención de mezclas que permitan incrementar la retención de compuestos volátiles y la vida de anaquel de las microcápsulas. Se ha conseguido la retención de aceites esenciales de naranja y disminuido su oxidación al usar goma arábica. Algunos tipos de encapsulantes se describen en la tabla 6-5 (Yáñez, et al., 2005).

Estos encapsulantes deben tener la capacidad de proporcionar una emulsión estable durante el proceso de secado por aspersion y tener muy buenas propiedades de formación de película para proveer una capa que proteja al ingrediente activo de la oxidación (Calvo, 2010).

Tabla 6-5: Tipos de encapsulantes utilizados

Carbohidratos	Gomas	Celulosas	Lípidos	Proteínas	Materiales inorgánicos
Almidón y derivados	Arábica	Carboximetil celulosa	Ceras	Gelatina	Sulfato de Calcio
Maltodextrinas	Mezquite	Metilcelulosa	Parafinas	Proteína de soya	Silicatos
Jarabes de maíz	Alginato de sodio	Etilcelulosa	Grasas	Caseinatos	Carbonato de Calcio
Dextranos	Agar	Acetilcelulosa	Acido esteárico	Suero de Leche	
	Carragenina		Tristearina	Zeína	

6.2 Paso 1. Aplicar Metodología para Obtención de Modelos Semifísicos de Base Fenomenológica.

A continuación se desarrolla la metodología para la obtener el MSBF

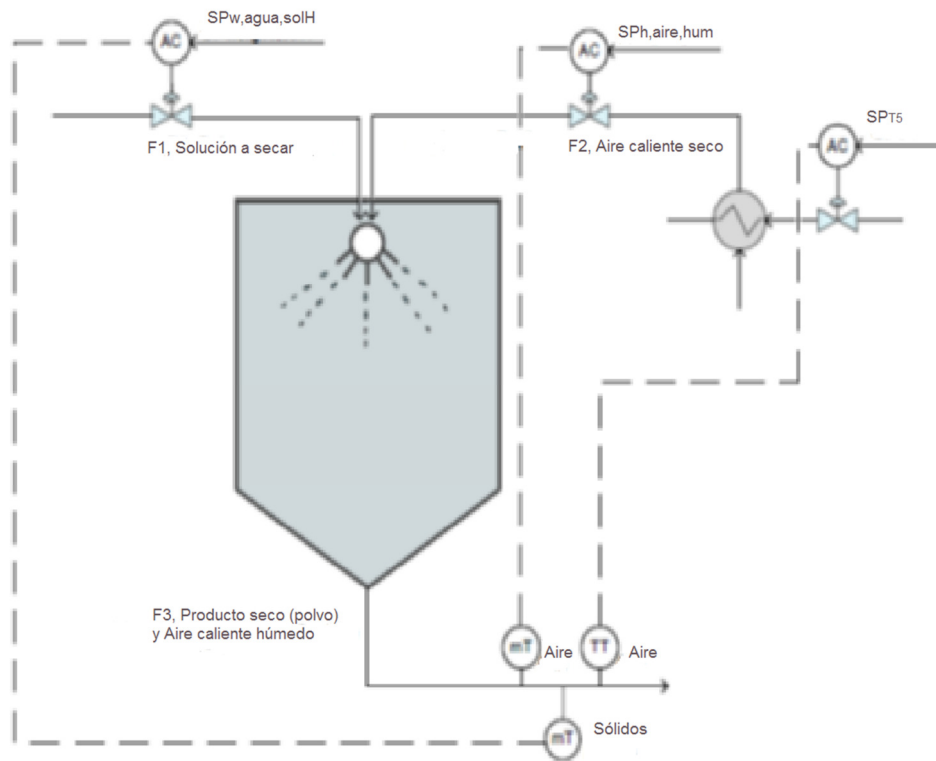
6.2.1 Descripción verbal y diagrama de flujo de proceso complementario.

Dos corrientes ingresan en co-corriente a una torre de secado por atomización: la primera corriente, F_1 , es bombeada desde un tanque agitado con calentamiento y contiene la sustancia a secar. La segunda corriente, F_2 , contiene aire como gas secante el cual es calentado a través de un intercambiador de calor.

Ambas corrientes pasan por un atomizador de discos rotatorio donde la corriente F_1 se convierte en finas gotas. La temperatura de estas gotas se incrementa al ponerse en contacto con la corriente de gas caliente (F_2). Bajo estas condiciones, las gotas sufren un aumento de energía que necesitan para perder humedad. El equilibrio se alcanza cuando la mezcla de solución - gas llegue a la temperatura de bulbo húmedo del aire, que corresponde a la temperatura de equilibrio del aire y agua. Este fenómeno ocurre en un intervalo de tiempo muy corto (del orden de segundos) debido a la superficie para la transferencia de masa que poseen las gotas.

Las partículas secas y el aire húmedo salen por la corriente F_3 , siendo separadas y recolectadas posteriormente por un ciclón. Este proceso es continuo y no presenta reacción química. La Figura 6-16 representa la descripción del proceso.

Figura 6-16: Diagrama de Flujo del proceso de Secado por Atomización



6.2.2 Nivel de detalle para el modelo, de acuerdo a su utilización: ¿qué preguntas contestará el modelo?

El MSBF que se desarrolla en este trabajo pretende contestar las siguientes preguntas:

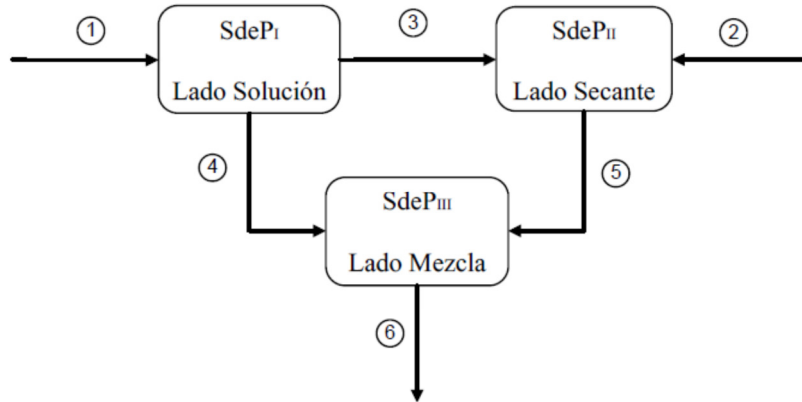
- Hacer un seguimiento a la evolución de las variables del proceso en el tiempo, de modo que se pueda determinar el comportamiento de las mismas.
- Manejar un nivel de detalle de escala macroscópica, conduciendo a un modelo de parámetros concentrados, que facilite el desarrollo de los esquemas de control, evitando así el uso de ecuaciones diferenciales parciales.
- Para efectos prácticos, el modelo será llevado a la forma canónica presentada para realizar el análisis de controlabilidad del proceso mediante Álgebra de Lie, y posteriormente hallar los rangos para los cuales la variable de diseño (Volumen de la Cámara de secado), permite conservar ésta característica.

6.2.3 Definición de los sistemas de proceso (SdeP)

Con el fin de realizar el análisis del proceso de secado, se definen los sistemas de proceso necesarios para cumplir con el nivel de detalle antes mencionado. La cámara de secado no posee separaciones físicas por lo tanto, se opta por elegir los sistemas de procesos tomando las diferentes fases y sus interacciones.

La Figura 6-17 presenta un diagrama de bloques en el que se definen los tres sistemas de proceso que serán usados para la obtención del modelo, a través de balances de materia y energía.

Figura 6-17: Diagrama de bloques de los Sistemas de Proceso



El primer sistema de proceso ($SdeP_I$) está constituido por la fase líquida, que corresponde a la solución a secar que entra a la torre (corriente 1). Dicha solución, contiene los sólidos a secar, encapsulados en una matriz. De éste sistema de proceso salen dos corrientes: la primera corriente corresponde a la transferencia de masa hacia el $SdeP_{III}$ (corriente 3) y la segunda corriente representa los sólidos secos que salen de la cámara. Estos últimos se denominan sólidos secos pero aún conservan cierta humedad.

El segundo sistema de proceso ($SdeP_{II}$) constituye la fase gaseosa, contiene toda la información respecto a la evolución del aire del sistema. A éste sistema de proceso ingresan dos corrientes; la primera corriente corresponde al aire con el cual se va a secar la solución (corriente 2) y la segunda corriente (corriente 3) proviene del $SdeP_I$, del sistema de proceso dos, sale la corriente 5 la cual corresponde al aire húmedo luego de realizar el secado.

El tercer sistema de proceso ($SdeP_{III}$) representa la mezcla entre las corrientes de sólidos secos (corriente 4) y aire húmedo (corriente 5) provenientes de los $SdeP_I$ y $SdeP_{II}$ respectivamente; la transferencia de masa que da lugar a la desecación de los sólidos y la humidificación del aire toma lugar en un sólo espacio físico con una sola corriente de salida (corriente 6).

6.2.4 Aplicación de principios de conservación sobre cada sistema de proceso.

El modelo fenomenológico desarrollado a partir de los balances de masa y energía, está sujeto a las siguientes suposiciones:

- Las propiedades físicas como densidades de la solución, del sólido seco y del agua son constantes.
- El aire caliente y la solución de entrada son alimentados continuamente en la parte superior de la torre de secado a tasas uniformes.
- La fase gaseosa formada de aire y vapor, se comportan como una mezcla ideal y los flujos dentro de la torre de secado como mezcla perfecta.
- La suspensión se atomiza correctamente formando gotas esféricas, homogéneas y uniformes y no interactúan entre sí.
- El calor fluye desde el aire caliente hasta las gotas o partículas y los gradientes de temperatura dentro de las partículas son insignificantes.
- No existe etapa de sobrecalentamiento, por lo tanto la temperatura superficial de la gota se mantiene constante e igual a la temperatura de bulbo húmedo
- Debido a la turbulencia y a la mezcla de gases, las condiciones de desecación son uniformes en todos los puntos de la cámara, excepto en la zona inmediata de la entrada del gas y la atomización del rocío.
- La humedad relativa del aire a la salida de la cámara debe ser menor o igual que la humedad relativa del aire en equilibrio con la humedad deseada del producto, de tal forma que no humedezca al producto.
- Las ecuaciones que involucren los términos de cantidad de humedad ya sea en la solución a secar o en el aire, se trata de humedad en base seca.

Sistema de Proceso I (SdeP_I)

- **Balance de materia.**

Este sistema de proceso presenta comportamientos dinámicos debido a los cambios decrecientes en la humedad presente en la solución alimentados al sistema. Dicho cambio en la humedad ocurre por la interacción de la solución entrante con el aire. Es así como se hace necesario realizar el balance de masa para la humedad de las gotas y otro que proporcione información de la evolución de los flujos.

$$\frac{dw_{agua,solH}}{dt} = \frac{1}{M_{sln}} (\dot{m}_{sln} w_{agua,sln} - \dot{m}_3 - \dot{m}_{solH} w_{agua,solH}) \quad (6.14)$$

$$\frac{dM_{tot}^I}{dt} = \dot{m}_{sln} - \dot{m}_3 - \dot{m}_{solH} \quad (6.15)$$

Donde,

- $w_{agua,solH}$, representa la humedad de los sólidos luego del contacto con el aire secante, cuyo valor inicial corresponde a $w_{O,agua,solH} = w_{agua,sln}$.
- \dot{m}_{sln} , flujo másico de solución a secar.
- \dot{m}_3 , flujo másico de agua transferida al aire secante.
- \dot{m}_{solH} , flujo másico de salida de los sólidos secos.
- M_{sln} , masa de solución a secar presente en un instante dado en la cámara.

Si consideramos que no hay acumulación de materia, la segunda ecuación pasa de ser diferencial a convertirse en algebraica.

$$\dot{m}_{solH} = \dot{m}_{sln} - \dot{m}_3 \quad (6.16)$$

▪ **Balance de energía**

El balance de energía brinda el cambio de temperatura que sufren los sólidos desde su entrada, su desecación y finalmente la salida del sistema.

$$\begin{aligned} \frac{dT_4}{dt} = \frac{1}{M_{sln} C_{Psln}} \dot{m}_{sln} \int_{T_{ref}}^{T_2} [w_{agua,sln} C_{Pagua,sln} + (1 - w_{agua,sln})(C_{Psol})] dT \\ - \dot{m}_3 \int_{T_{ref}}^{T_3} C_{P,agua} dT - \dot{m}_{solH} \int_{T_{ref}}^{T_4} [w_{agua,solH} C_{Pagua} + (1 \\ - w_{agua,solH})(C_{Psol})] dT \end{aligned} \quad (6.17)$$

Donde,

- T_{ref} , temperatura de referencia para el cálculo de las entalpías
- C_{Pagua} , calor específico de agua
- C_{Psol} , calor específico estimado para el sólido
- $C_{Pagua,sln}$, calor específico de agua en la solución, el valor es igual el Cp agua
- C_{Psln} , calor específico de la solución
- $w_{agua,solH}$, fracción de agua en gotas y partículas
- $w_{agua,sln}$, fracción másica de agua en la solución alimentada

Sistema de Proceso II (SdeP_{II})

▪ **Balance de materia**

El comportamiento dinámico del SdeP_{II} se da debido a la transferencia de masa correspondiente a la capacidad que tiene el aire de extraer la humedad a la solución, es decir, hay un aumento en la humedad absoluta del aire dentro de la cámara, así:

$$\frac{dh_{A,AireHum}}{dt} = \frac{1}{M_{AS,AireHum}} [\dot{m}_{AS,AireEnt} h_{A,AireEnt} + \dot{m}_3 - \dot{m}_{AS,AireHum} h_{A,AireHum}] \quad (6.18)$$

Donde,

- $h_{A,AireEnt}$ y $h_{A,AireHum}$, corresponden a la humedad absoluta del aire a la entrada y a la salida del sistema respectivamente.
- $\dot{m}_{AS,AireEnt}$ y $\dot{m}_{AS,AireHum}$, corresponden a los flujos másicos de entrada y de salida del aire del SdeP_{II} respectivamente.

- $M_{AS,AireHum}$, masa de aire seco dentro de la cámara de secado. Ésta se asume aproximadamente constante puesto que la cantidad de agua por kg de aire seco es muy baja. Además, nótese que $M_{AS,AireHum} = M_{AS,AireEnt}$

Un balance de materia sobre los flujos de entrada y salida del SdeP_{II} llevan a la siguiente relación:

$$\frac{dM_{tot}^I}{dt} = \dot{m}_{AS,AireEnt} + \dot{m}_3 - \dot{m}_{AS,AireHum} \quad (6.19)$$

Finalmente, al no darse acumulación de materia dentro del sistema se tiene:

$$\dot{m}_{AS,AireHum} = \dot{m}_{AS,AireEnt} + \dot{m}_3 \quad (6.20)$$

▪ **Balance de energía**

Los cambios en la temperatura del aire luego de humidificarse con el agua que se extrae de los sólidos pueden determinarse con un balance energético de la forma:

$$\begin{aligned} \frac{dT_5}{dt} = \frac{1}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} & \dot{m}_{AS,AireEnt} [C_{PAireEnt}(T_2 - T_{ref}) \\ & + h_{A,ASAirEnt} [C_{PAireHum}(T_2 - T_{ref})] + \lambda_0] \\ & - \dot{m}_{AS,AireHum} [C_{PAireHum}(T_5 - T_{ref}) \\ & + h_{A,ASAirHum} [C_{Pv}(T_5 - T_{ref})] + \lambda_0] + \dot{m}_3 [a(T_3 - T_{ref}) + \frac{1}{2}b(T_3 \\ & - T_{ref})^2 + \frac{1}{3}c(T_3 - T_{ref})^3 + \frac{1}{4}d(T_3 - T_{ref})^4 + \frac{1}{5}e(T_3 - T_{ref})^5] \\ & - [hcn A_{tcs}(T_5 - T_{amb})] \end{aligned} \quad (6.21)$$

Donde,

- $C_{PAireSeco}$, capacidad calorífica del aire seco (Perry, 1984)
- $C_{PAireEnt}$, capacidad calorífica del aire a la entrada (Perry, 1984).
- $C_{PAireHum}$, capacidad calorífica del aire húmedo (Perry, 1984).
- C_{Pv} , capacidad calorífica del vapor de agua (Incropera, 1999).
- λ_0 , calor latente de vaporización a la temperatura de referencia
- T_2 , temperatura del aire en la entrada.
- T_3 , temperatura de transferencia de masa.
- T_5 , temperatura del aire húmedo a la salida
- T_{ref} , temperatura de referencia
- T_{amb} , temperatura ambiente

- $h_{A,ASaireEnt}$, humedad absoluta del aire a la entrada, depende del proceso previo de calentamiento
- hcn , coeficiente de convección natural
- A_{tcs} , área transversal de la cámara de secado

La capacidad calorífica de la corriente de transferencia de humedad entre los sistemas de proceso I y II, se obtiene por la característica polinómica de la capacidad calorífica con la temperatura, reportada en varias fuentes en la literatura. Los coeficientes de este polinomio son:

$$\begin{aligned}
 a &= 1,82964 * 10^1 \\
 b &= 4,721180 * 10^{(-1)} \\
 c &= -1,33878 * 10^{(-3)} \\
 d &= 1,31424 * 10^{(-6)} \\
 e &= 4,30228 * 10^{(-12)}
 \end{aligned}$$

Las ecuaciones 6.14, 6.18 y 6.21 representan la estructura dinámica del proceso; con estas ecuaciones se desarrollará más adelante el análisis de controlabilidad.

6.2.5 Ecuaciones constitutivas que permiten calcular parámetros de cada uno de los Sistemas de Proceso.

Diámetro de partícula

El diámetro de partícula inicial d_{p0} es condicionado por el diseño del atomizador y el alimento que entra a la torre. En el caso de un disco atomizador rotatorio, una ecuación empírica (Masters, 1985) ofrece la mejor forma de calcular el diámetro medio de una gota (en μm) en secadores por atomización industriales. Esta expresión es para flujo en co-corriente (Masters, 1985) (Birchal, et al., 2006)

$$d_{p0} = \left(\frac{1,4 * 10^4 (M_L)^{0,24}}{(Nd)^{0,83} (nh)^{0,12}} \right) \quad (6.22)$$

Donde,

M_L , tasa de masa líquida alimentada

N , velocidad del disco atomizador

d , diámetro del disco atomizador

n , número de agujeros que tiene el disco.

h , diámetro de los agujeros del disco.

$$d_p = \left(d_{p0}^3 - \frac{6\dot{m}_{sln}(1 - w_{agua,sln})(w_{agua,sln} - \theta)}{\pi\rho_{agua}} \right)^{1/3} \quad (6.23)$$

Donde,

- d_{p0} , diámetro de partícula inicial
- \dot{m}_{sln} , flujo másico de solución a secar
- $w_{agua,sln}$, fracción másica de agua en la solución alimentada humedad de la solución alimentada
- ρ_{agua} , densidad del agua

En esta última expresión θ , está dada por la condición de operación, asociada a la humedad de la partícula (gota) en el tiempo, de acuerdo con el balance de materia que se realizó en el SdeP_i:

$$\theta = w_{agua,solH} \text{ Cuando } w_{agua,solH} > w_{agua,solH}^c \quad (6.24-a)$$

ó

$$\theta = w_{agua,solH}^c \text{ Cuando } w_{agua,solH} \leq w_{agua,solH}^c \quad (6.24-b)$$

Donde,

- $w_{agua,solH}$, fracción de agua en gotas y partículas
- $w_{agua,solH}^c$, humedad crítica, punto donde la curva de secado cambia de pendiente, pues pasa a la etapa lenta del proceso de secado

Así mismo, el coeficiente de difusión en la ecuación para el coeficiente de transferencia de masa cambia de acuerdo a la misma condición de operación anterior, es decir,

$$D = D_{agua-aire} \text{ cuando } w_{agua,solH} > w_{agua,solH}^c \quad (6.25-a)$$

ó

$$D = D_{cort} \text{ cuando } w_{agua,solH} \leq w_{agua,solH}^c \quad (6.25-b)$$

Donde,

D , difusividad

$D_{agua-aire}$, difusividad del agua, desde la gota hasta el aire

D_{cort} , difusividad del agua a través de la corteza de la partícula

Transferencia de masa entre gotas y partículas al aire.

Uno de los parámetros más importantes a determinar es la transferencia de masa entre los SdeP_I y SdeP_{II}. Dicha transferencia puede ser vista como un flujo, \dot{m}_3 , que va desde la solución al aire secante. Para formular esta transferencia de masa la literatura entrega ecuaciones muy detalladas, que para su posterior uso en el análisis de control no resultan útiles. Por tal motivo, se recurre al formalismo tradicional usado en transferencia: fuerza impulsora, resistencia y flujo neto. En este caso, la transferencia de masa se formula como una función del coeficiente de global de transferencia de masa y una fuerza impulsora. Dicha fuerza impulsora puede verse como la diferencia entre la humedad que inicialmente contienen los sólidos y la mínima humedad que estos pueden contener, incluso después del proceso de desecación, denominada la humedad en el equilibrio.

$$\dot{m}_3 = K(w_{agua,solH} - w^*_{agua,solH}) \quad (6.26)$$

Donde,

- \dot{m}_3 , flujo másico de agua transferida al aire secante
- K , coeficiente convectivo de transferencia de masa
- $w_{agua,solH}$, fracción de agua en gotas y partículas
- $w^*_{agua,solH}$, humedad en el equilibrio

Para la estimación el coeficiente convectivo de transferencia de masa el número de Sherwood se suponen igual a 2,0 (Birchal, et al., 2006) (Yanza, 2003) (Angeles, 2009) debido a que la velocidad relativa entre las partículas de sólidos húmedos y el gas es cercana a cero.

$$K = Sh\left(\frac{D}{d_p}\right) \quad (6.27)$$

Donde,

- K , coeficiente convectivo de transferencia de masa
- Sh , número de Sherwood
- D , difusividad
- d_p , diámetro de partícula

Fracción volumétrica de gotas y partículas

Por otro lado, recordando el balance de materia del SdeP_I, el término M_{sln} es la masa de solución a secar presente en un instante dado en la cámara. En este instante dado, la cámara contiene gotas atomizadas, partículas secas y aire secante presentes, por lo que se hace necesario conocer que porción de la cámara contiene tan sólo solución

atomizada en gotas, en relación al volumen total de la cámara. En este texto denominaremos fracción volumétrica de gotas y partículas, ε , a dicha porción:

$$\varepsilon = \frac{\left(\dot{m}_{sln} \frac{\tau_r}{\rho_{sln}}\right)}{0.7854 D_c^2 (h' + 0.2886 D_c)} \quad (6.28)$$

Donde,

- ε , fracción volumétrica de gotas y partículas, respecto al volumen total de la cámara
- \dot{m}_{sln} , flujo másico de solución a secar
- τ_r , tiempo de residencia
- ρ_{sln} , densidad de la solución
- D_c , diámetro de la cámara de secado
- h' , altura cámara de secado

En la ecuación (6.28), el numerador representa el volumen ocupado por las gotas atomizadas, una relación entre el producto del flujo másico de solución y el tiempo de residencia que este tiene dentro de la cámara, con la densidad de la solución. El denominador representa el volumen V_{cs} . Así, finalmente se tiene que

$$M_{sln} = \rho_{sln} \varepsilon V_{cs} \quad (6.29)$$

Donde,

- M_{sln} , masa de solución presente en un instante dado de la cámara de secado
- ρ_{sln} , densidad de la solución
- ε , fracción volumétrica de gotas y partículas
- V_{cs} , volumen de la cámara de secado

Para una cámara de secado de base cónica y ángulo de 60° , el volumen de la cámara de secado, V_{cs} , se expresa de la siguiente forma (Masters, 1985)

$$V_{cs} = 0.7854 D_{cs}^2 (h' + 0.2886 D_{cs}) \quad (6.30)$$

Donde,

- V_{cs} , volumen de la cámara de secado
- D_c , diámetro de la cámara de secado
- h' , altura cámara de secado

Tiempo de residencia dentro de la cámara de secado

Las cámaras de secado se diseñan para manejar un volumen de aire que tenga suficiente capacidad para secar las gotas asperjadas y para proveer un tiempo de

residencia del aire suficiente para obtener las partículas con el nivel de humedad deseado. Las velocidades de secado iniciales son muy altas en el primer período de secado cuando la mayor parte de humedad se evapora en intervalos de tiempo muy cortos, pero durante el segundo período, las velocidades disminuyen considerablemente y se requiere más tiempo para llevar el producto a la humedad deseada (Masters, 1985).

El tiempo mínimo de residencia del producto dentro del secador puede considerarse como el tiempo medio de residencia del aire. El tiempo de residencia está dado por la relación entre la altura de la cámara de secado y la velocidad del aire dentro de la cámara.

Teniendo en cuenta una de las suposiciones que realiza el modelo, el tiempo de residencia de partículas y gotas atomizadas es igual al tiempo de residencia del gas secante. Se tiene entonces que para éste es de

$$\tau_r = \frac{h'}{V_{aire}} \quad (6.31)$$

Donde,

- τ_r , tiempo de residencia
- h' , altura de la cámara de secado
- V_{aire} , velocidad superficial del aire

Humedad de Saturación

Otro parámetro que es importante determinar para la solución del modelo es la humedad en la saturación. La humedad de saturación determina el punto final de la desecación, basándose en la premisa de que una cantidad de aire saturado no puede recibir más humedad y por lo tanto se tornará inútil dentro de la cámara. Para estipular este parámetro fue necesario realizar un cálculo de tanteo donde se tuviera en cuenta la humedad y la temperatura de saturación. Con datos experimentales (Perry, 1963) se obtuvieron dos aproximaciones matemáticas, la primera una regresión lineal de la forma:

$$Y_{satLR} = \frac{1}{2187} (T_5 - T_{sat} + h_{A,AireEnt}) \quad (6.32)$$

La segunda ecuación es una aproximación exponencial a la línea de saturación adiabática:

$$Y_{satCE} = 0.001e^{0.0032(T_{sat}-273.15)1.8+32} \quad (6.33)$$

Donde,

- T_5 , temperatura del aire húmedo a la salida
- T_{sat} , temperatura de saturación
- $h_{A,AireEnt}$, humedad absoluta del aire a la entrada

El tanteo usa estas dos aproximaciones para encontrar el punto donde las curvas descritas se interceptan, así este punto indica la temperatura y la humedad de saturación del aire con el cual se lleva a cabo la desecación. El calor de vaporización del agua es determinado al conocer la temperatura de saturación. Usando, datos experimentales reportados en la literatura (Perry, 1963) se tiene que:

$$\lambda_{vap} = 356.9471 \left(\frac{1}{374 - (T_{sat} - 273.15)} \right)^{-0.32843} \quad (6.34)$$

Volumen húmedo

El volumen húmedo de la mezcla vapor-gas es el volumen de masa unitaria de gas seco y de su vapor acompañante a la temperatura y presión dominantes. Para una mezcla de humedad absoluta Y' , se define el volumen húmedo como (Treybal, 1980)

$$v_H = (0.00283 + 0.00456 h_{A,AireHum})(t_5) \quad (6.35)$$

Donde,

- v_H , volumen húmedo
- $h_{A,AireHum}$, humedad absoluta del aire a la salida
- t_5 , temperatura del gas (aire) a la salida

Densidad del aire

La densidad de la mezcla aire-agua se calcula como sigue (Treybal, 1980)

$$\rho_{aire} = \frac{1 + h_{A,AireHum}}{v_H} \quad (6.36)$$

Donde,

- ρ_{aire} , densidad de la mezcla aire- agua, a un tiempo t dado
- $h_{A,AireHum}$, humedad absoluta del aire
- v_H , volumen húmedo de la mezcla aire-agua

Velocidad de la gota y partícula

En la mayor parte del proceso las partículas se mueven en función de la velocidad del aire o a velocidades similares. La gota sale del disco atomizador rotatorio a altas velocidades, cuando se pone en contacto con el aire desacelera (debido a la fricción con el aire), a partir de ese momento la gota se mueve a la misma velocidad que el aire. Para determinar la velocidad de las gotas y partículas, se calcularon la velocidad del aire y la velocidad terminal de la gota o partícula descrita en (Perry, 1963), el valor que adoptó la velocidad de la gota y partícula fue el mayor valor entre estas dos.

- *Velocidad terminal de la gota o partícula*

Una partícula cayendo bajo la acción de la gravedad se acelerará hasta que la fuerza de arrastre se equilibre con la fuerza gravitacional, después de esto seguirá cayendo a una velocidad constante conocida como velocidad terminal:

$$v_{ter,gyp} = \sqrt{\frac{4 g dp (\rho_{stn} - \rho_{aire})}{3 \rho_{aire} C}} \quad (6.37)$$

Donde,

- $v_{ter,gyp}$, velocidad terminal de gota y partícula
- g , gravedad
- dp , diámetro de partícula
- ρ_{part} , densidad de la solución
- ρ_{aire} , densidad del aire

Para la región intermedia ($0.3 < N_{Re} < 1000$) la relación del coeficiente de arrastre para esferas es,

$$C = \frac{18.5}{N_{Re}^{0.6}} \quad (6.38)$$

Donde,

- C , coeficiente de arrastre
- N_{Re} , número de Reynolds

La velocidad superficial del aire viene dada por la siguiente expresión:

$$V_{aire} = \left(\frac{\dot{m}_{aireEnt} / \rho_{aire}}{(1 - \varepsilon) A_{cs}} \right) \quad (6.39)$$

Donde,

- V_{aire} , velocidad del aire
- A_{cs} , área de la cámara de secado

6.2.6 Verificar los grados de libertad del modelo

Sabemos que $GL = \# \text{ ecuaciones} - \# \text{ incógnitas}$. El modelo Semifísico de base Fenomenológica consta de tres ecuaciones diferenciales, dos provenientes de los balances de materia sobre los Sistemas de Proceso I y II y la tercera aquella que describe el balance de energía efectuado sobre el Sistema de Proceso II. El modelo tiene tres incógnitas: el cambio en el tiempo de la humedad de la muestra a secar, $w_{agua,solH}$; el cambio en la saturación del aire, $h_{A,AireHum}$ y la temperatura de salida del aire, T_5 . Los demás datos de flujos máscicos, temperaturas, contenido de humedad, capacidades caloríficas y demás son variables externas que no se cuentan como incógnitas. Por lo anterior el modelo cumple $GL=0$ y es coherente.

6.2.7 Simulación y validación del modelo de secado por atomización

La simulación consiste en encontrar las soluciones analíticas o numéricas de un modelo matemático, y permite verificar el comportamiento del modelo en cuestión. La simulación es la base de la etapa de “validación” en la cual se evalúan sistemáticamente las bondades del modelo ante diferentes entradas en función de su error respecto al comportamiento real del sistema ante las mismas entradas. Para ello se utilizan conjuntos de datos de “prueba” o de “validación” y se calculan los errores de predicción, o un error generalizado promedio, o bien se visualiza la habilidad del modelo para predecir. Esta última prueba permite una mejor comprensión de la calidad de la predicción del modelo, pues compara gráficamente las simulaciones con la respuesta real del sistema (Hangos, et al., 2001).

El proceso de validación mide qué tan bueno es el nuevo modelo formulado y en qué situaciones. Para determinar esta cuestión es necesario responder a las siguientes preguntas (Ljung, et al., 1997):

- 1) ¿El modelo se acerca a los datos reales del sistema?
- 2) ¿Es el modelo suficientemente bueno para el propósito que fue diseñado?

La primera pregunta conduce a la comparación o “validación” de los resultados de simulación del modelo respecto al comportamiento real del sistema. Estas comparaciones pueden ser gráficas y/o basadas en el error entre los datos simulados y los datos reales.

Para responder la segunda pregunta se debe verificar si el modelo es capaz de predecir el comportamiento dinámico de la temperatura de salida de la cámara de secado por atomización

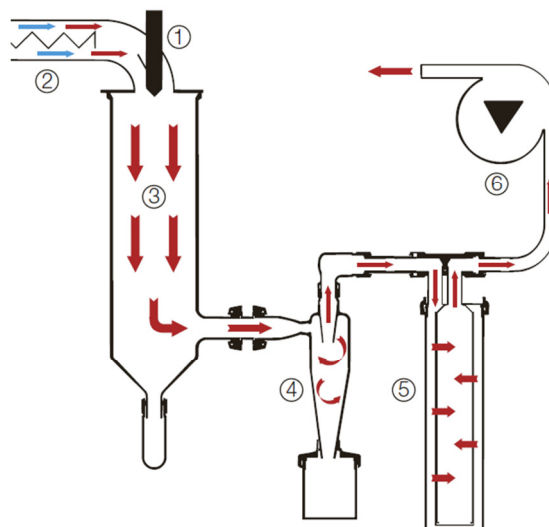
Para la solución del sistema de ecuaciones diferenciales de los modelos que describen la temperatura de secado, la humedad del aire a la salida y la humedad final del sólido, se utilizó el método de integración numérica de Euler en Matlab por su simplicidad y facilidad de comprensión. Como el modelo propuesto en este trabajo es de tipo fenomenológico tiene validez completa en todo el espacio de estado del proceso.

La validación del modelo se realizó utilizando el equipo de secado de laboratorio mini spray dryer Büchi B-290, los datos técnicos del equipo se presentan en el anexo B. La Figura 6-18 muestra una foto del equipo y la Figura 6-19 representa un diagrama del equipo de secado. La muestra en estado líquido, se procesó en la cámara de secado con aire caliente. El aire caliente proporcionó el calor de evaporación requerido para la separación del disolvente y finalmente la microencapsulación ocurrió debido al recubrimiento de la matriz que envuelve las partículas.

Figura 6-18: Büchi mini Spray Dryer B-290, Suiza



Figura 6-19: Diagrama del secador Büchi mini Spray Dryer B-290, 1. Boquilla de atomización, 2. Calefacción eléctrica, 3. Cámara de secado, 4. Ciclón, 5. Filtro de salida, 6. Aspirador para generar la corriente de aire



Las dimensiones de la cámara de secado del equipo de secado por atomización Büchi son:

- Altura 50 cm
- Diámetro 18 cm

Condiciones de Operación

La Tabla 6-6, presenta las condiciones de operación del equipo de secado, para la validación del modelo. Las conversiones del equipo Büchi B-290 tanto del flujo de aire como del flujo de alimentación se encuentran en el Anexo A.

Tabla 6-6: Condiciones de operación para el secado de la muestra azul.

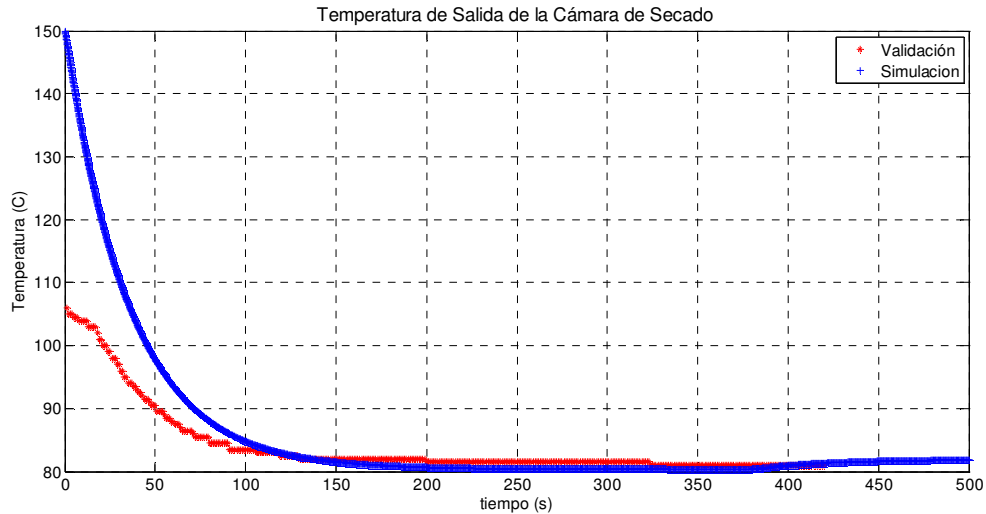
Descripción	Unidades	Valor
Temperatura de Entrada	°C	150
Bombeo	%	30
Flujo másico de entrada muestra	kg/s	$1.98e^{-4}$
Flujo másico de entrada aire	kg/s	$1.378e^{-4}$
Aspiración	%	85

Resultados de los ensayos en el equipo Büchi B-290 y simulación

La simulación se llevó a cabo utilizando el modelo desarrollado inicialmente (el cual no tenía en cuenta el coeficiente de convección natural, ni la velocidad terminal de gotas y partículas). Los datos utilizados fueron los mismos datos de operación que se emplearon en los ensayos de laboratorio, usando equipo de secado Büchi B-290 (tabla 6-6). La Figura 6-20, presenta la dinámica de temperatura de salida de la cámara de secado, en azul se encuentra el resultado para la simulación obtenida, en rojo se encuentra los datos experimentales de uno de los ensayos de secado.

Durante los primeros 80 segundos los resultados difieren entre los datos experimentales y los valores de la simulación, ya que el procedimiento de operación del equipo (ver Anexo A), indica que antes de procesar la muestra, es necesario estabilizar la cámara de secado con agua destilada, hasta que la temperatura de salida se encuentre en un mismo valor, después del cual se detiene la alimentación del agua destilada y se procesa la muestra, por lo tanto la temperatura de salida inicial es diferente a la del modelo, ya que el modelo no tiene en cuenta esta restricción operativa.

Figura 6-20: Datos de temperatura de salida de la cámara de secado mediante ensayos y simulación



El único valor que se puede obtener en tiempo real (o en línea) en el equipo de secado por atomización es la temperatura de salida (Figura 6-20). Otro valor medible experimentalmente pero en laboratorio (fuera de línea), es la humedad final del producto seco. Los resultados se presentan en la Tabla 6-7. La metodología para la determinación de la humedad se encuentra en el anexo B.

Tabla 6-7: Humedad final de los sólidos

	Datos experimentales	Modelo
Humedad sólidos %	9.57	10.36

La diferencia entre el valor de humedad de los sólidos de los datos experimentales y el modelo es del 7.62%. El valor obtenido en el modelo corresponde a una condición impuesta desde el principio para la humedad de los sólidos en el equilibrio, es decir, la transferencia de masa entre las gotas y el aire llega a su estado estacionario cuando se retira el 10% del contenido de humedad de los sólidos inicial. La humedad final por lo tanto se puede ajustar en este modelo, de acuerdo a la cantidad de humedad final del sólido que se requiera.

La Tabla 6-9 presenta los resultados obtenidos de la simulación de la cámara de secado, al analizar los resultados, podemos observar que el tiempo de residencia es de 76.77 segundos. Este tiempo es prolongado si se considera el tiempo de residencia como la relación entre la altura de la cámara y la velocidad del aire dentro de la cámara de secado (6.31), además, como se presentó en el Capítulo 4 el tiempo de residencia en estos equipos es del orden de segundos. Por lo tanto se realizó un ajuste en el modelo sobre la velocidad de las gotas y partículas, incluyendo la restricción de esta velocidad, al tomar el mayor valor entre la velocidad terminal (ecuación 6.37) y la velocidad del aire (ecuación 6.39). También se adicionó al modelo un término para las pérdidas de calor debido al coeficiente de convección natural.

Al revisar el balance teórico de transferencia de masa entre la solución a secar y el aire, y compararlo con el modelo, este balance no se cumple, ya que la cantidad de aire requerido para que el producto salga con la humedad deseada es mayor. Si el flujo másico de aire a la entrada es de $1.378e^{-4}$ (kg/ s) con una humedad absoluta del 3%, y la humedad absoluta del aire a la salida es de 4.31% la cantidad de agua que se transfiere al aire es de $1.8 e^{-6}$ (kg agua/ s), mientras que la cantidad de agua retirada de las gotas atomizadas es de $1.318 e^{-4}$ (kg agua/ s). Revisando el estado del arte la relación entre el flujo de aire y el flujo de solución a secar en un rango de temperatura entre 150– 215 °C, la proporción de aire está entre 10 y 100 veces mayor que la solución a secar, dependiendo de la temperatura de bulbo seco de entrada del aire (Tabla 6-8).

(Nonhebel, et al., 2002), indica que los fabricantes de equipos patentados de secado por atomización tienen métodos con dudosa garantía para el cambio de escala de los equipos en un factor lo suficientemente grande como para pasar de pruebas de laboratorio al diseño de un equipo de tamaño industrial. Este autor finalmente concluye que la experiencia en secadores de laboratorio puede ser comúnmente hecha para indicar la posibilidad de secar por atomización una sustancia determinada. Siempre recomienda antes de tomar una decisión acerca de una instalación de este tipo, llevar a cabo experiencias en un equipo de secado de tamaño lo más parecido al deseado en escala industrial.

Tabla 6-8: Relación entre flujo de aire y flujo de alimentación en cámaras de secado a diferentes temperaturas

Flujo Aire (kg/s)	Flujo Solución (kg/s)	Temperatura entrada BS (°C)	Referencia
17.5	1.39	185	(Straatsma, et al., 1999)
18.9	1.7	215	(Oakley, 2004)
0.183	$1.25 e^{-3}$	147	(Pérez, et al., 1995)
0.041	$5.6 e^{-4}$	180	(Birchal, et al., 2006)

Otro aspecto importante es el equipo de secado por atomización Büchi B-290, el cual tiene patentado un mecanismo que pulveriza el agua, con lo cual se puede arrastrar agua en forma de micro-gotas por encima de la saturación del aire, es decir, no sólo utiliza la psicrometría para retirar el agua de la muestra. Este mecanismo no es el más común en diseño de cámaras de secado por lo tanto, no se considera en el modelo de esta tesis, que pretende ser un modelo general. El secador Büchi, por lo tanto, no es válido para escalar un proceso de secado tradicional, aunque en la literatura se ha reportado su uso en varias investigaciones, es posible con este equipo verificar las condiciones de operación que se obtienen al realizar los ensayos experimentales como la temperatura y la humedad final de la partícula (sólidos húmedos), también puede ser utilizado como una herramienta que identifica rápidamente si el producto a secar es termolábil y realizar estudios de estabilidad cuando se quieren probar diferentes tipos de encapsulantes. Sin embargo, las condiciones de operación del equipo Büchi, no son escalables a menos que se trabaje en el escalado de esta línea de atomizadores, ya que en este trabajo, para el

diseño de la cámara de secado propuesta, el criterio de dimensión se calcula con la cantidad de agua a retirar y se realiza mediante psicrometría.

Tabla 6-9: Resultados de la simulación de la cámara de secado.

Descripción	Símbolo	Valor	Unidades
Tiempo de residencia	τ_r	76.77	s
Humedad del aire a la salida	$h_{A,AireHum}$	$4.32 e^{-2}$	kg vapor/ kg aire seco
Coeficiente global de transferencia de masa	K	$3.9 e^{-3}$	kg/s
Flujo másico de sólidos húmedos		$6.627 e^{-005}$	kg/s

Es muy importante que el balance de masa para la transferencia de agua entre el gas y las partículas esté correcto, ya que el tamaño de todos los componentes del sistema puede determinarse en base al flujo de gas. Esto permite calcular de forma directa el volumen de la cámara de secado que es finalmente la variable de diseño.

Al hacer los cálculos del aire necesario para la evaporación del agua deseada (para que se cumpla el balance) es necesario aumentar el flujo de aire hasta $9.73 e^{-3}$ (kg aire/ s). Después de realizar los ajustes correspondientes al modelo desarrollado en este trabajo, se simuló nuevamente la cámara de secado por atomización. Los valores utilizados se encuentran en la Tabla 6-10, para la determinación de los grados Brix y densidad usados en el modelo, la metodología se encuentra en el Anexo B. Las dinámicas de temperatura, humedad de los sólidos y humedad del aire a la salida se desarrollaron con las ecuaciones 6.21, 6.14 y 6.18 respectivamente.

Tabla 6-10: Condiciones iniciales y de operación del modelo de cámara de secado

Descripción	Unidades	Valor
Temperatura de Entrada	°C	150
Flujo másico de entrada muestra	kg/s	$1.98 e^{-4}$
Flujo másico de entrada aire	kg/s	$9.73 e^{-3}$
Fracción másica de agua en la solución	%	70
Densidad de la solución	kg/m ³	1320
Densidad de los sólidos húmedos	kg/m ³	550
Densidad del agua	kg/m ³	1000

Presión de trabajo	Pa	101325
--------------------	----	--------

Las Figura 6.21, presenta la evolución de la dinámica de temperatura. En este caso, la temperatura del aire disminuye rápidamente al ceder calor a la gota para evaporar su humedad. Cuando la gota ha quedado con la humedad final deseada, la temperatura del aire permanece constante al no ceder más calor.

A diferencia del secado en el equipo Büchi B-290, el tiempo en el cual la cámara de secado llega al estado estacionario es rápido (5 segundos aproximadamente) debido al flujo de aire en la cámara de secado, el cual se calculó para que se cumpliera el balance de masa, además la velocidad con la cual se realiza la transferencia de masa entre las gotas y el aire, depende directamente de la superficie interfacial expuesta entre las dos fases (gas y gotas). Finalmente las temperaturas en el estado estacionario son iguales tanto para la simulación como el modelo, por lo tanto la validación se realizó en el estado estacionario del modelo.

La Figura 6-22 es la misma gráfica de temperatura expuesta en la Figura 6-21, simulada durante los primeros 10 segundos del secado, en esta gráfica se puede apreciar que la tendencia de la curva de la simulación es igual a la presentada por los datos experimentales, comenzando con una rápida disminución de la temperatura y cuando llega a su estado estacionario permanece constante. Sin embargo, el tiempo en el cual llega al estado estacionario es más rápido, por la diferencia en el flujo de aire en la entrada de la cámara de secado.

Figura 6-21: Temperatura salida cámara de secado. Rojo Datos experimentales, Azul Datos de simulación

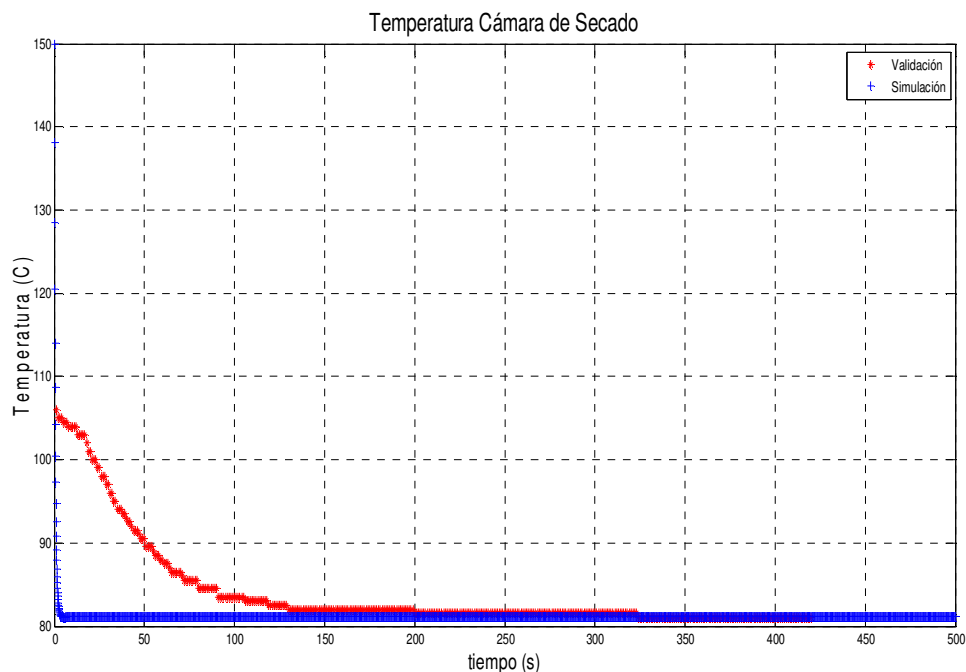


Figura 6-22: Simulación de la temperatura de salida cámara de secado durante los primeros 10 segundos.

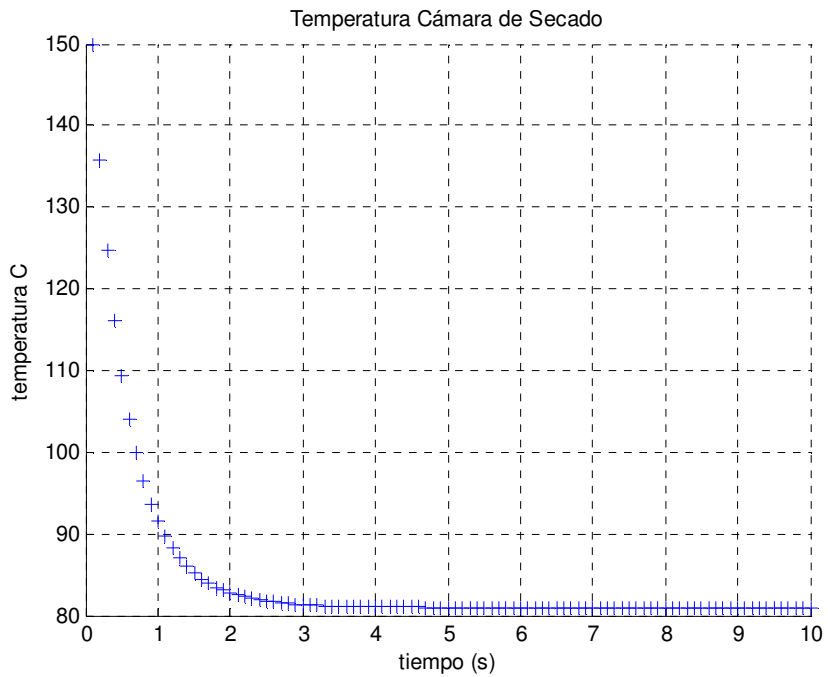


Figura 6-23: Simulación de la humedad en base seca de los sólidos húmedos durante los primeros 10 segundos.

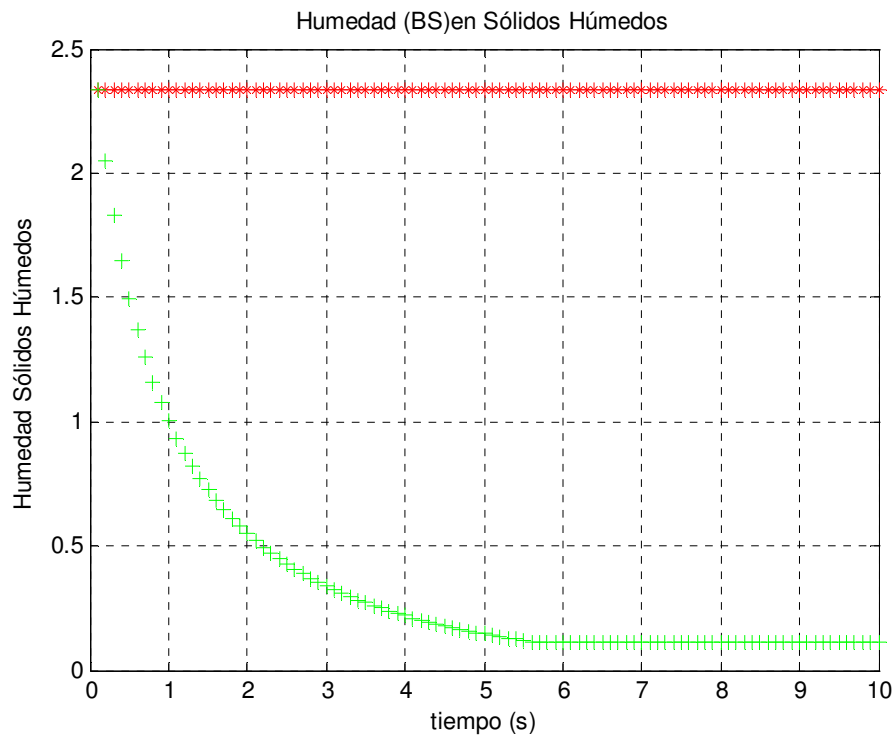


Figura 6-24: Simulación de la humedad en base húmeda de los sólidos húmedos durante los primeros 10 segundos

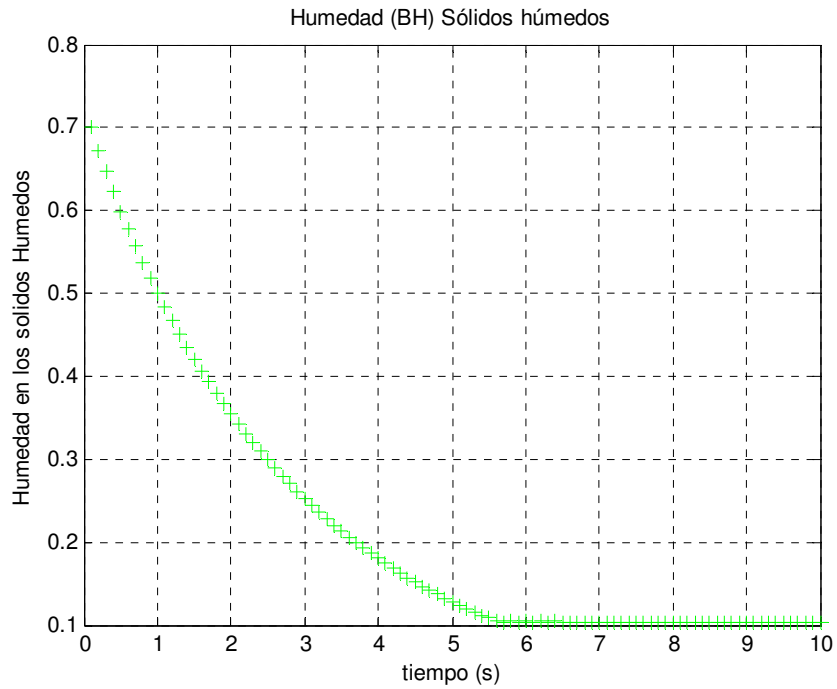
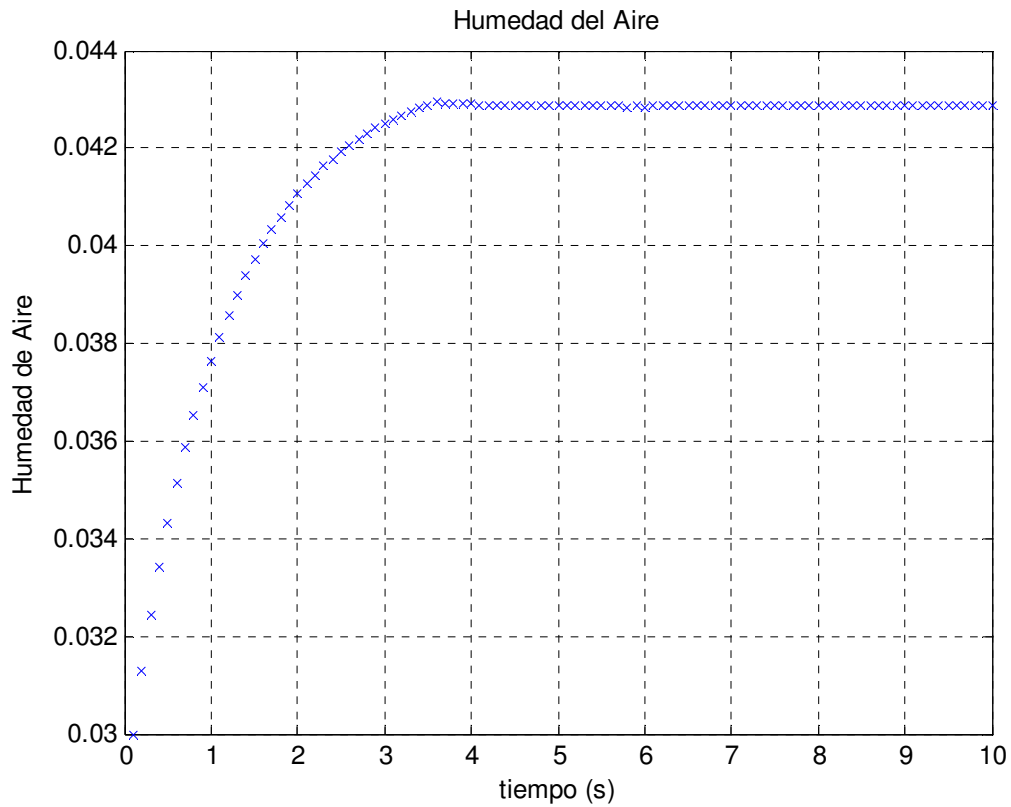


Figura 6-25: Simulación de la humedad absoluta del aire en la salida durante los primeros 10 segundos



Las Figuras 6.23 y 6.24 presentan la humedad final de los sólidos húmedos (partículas en base seca y húmeda respectivamente). Al igual que en el primer modelo desarrollado en esta tesis en donde se ingresaron los mismos valores de operación que en el equipo de secado Büchi B-290, la humedad final de los sólidos fue del 10.36%, sin embargo, al realizar el ajuste en la velocidad de las gotas y partículas y al aumentar el flujo del aire conservando la misma temperatura (150°C), el tiempo de residencia dentro de la cámara fue de 1.27 segundos (Tabla 6-11), lo cual es similar para los procesos descritos por (Birchal, et al., 2006), (Mosquera, 2010) (Ángeles, 2009).

Finalmente la Figura 6-25, presenta la dinámica de la humedad del aire a la salida, aunque esta simulación no cuenta con las herramientas para la medición de datos experimentales, en la Figura 6.25 se puede apreciar cómo es el comportamiento del aire después de haber ingresado a la cámara de secado, la humedad absoluta inicial del aire fue de 0.03 (kg vapor/kg aire seco) y al llegar al estado estacionario llegó hasta un valor de 0.0429 (kg vapor/kg aire seco) esto indica que el aire bajo esas condiciones de presión y temperatura pudo retirar 0.0129 kilogramo agua por cada kilogramo de aire seco, al multiplicar por el flujo de entrada de aire seco, se obtiene la cantidad de agua que retira el aire de las gotas atomizadas (Tabla 6-11).

Tabla 6-11: Resultados de la simulación de la cámara de secado.

Descripción	Símbolo	Valor	Unidades
Tiempo de residencia	τ_r	1.27	s
Humedad del aire a la salida	$h_{A,AireHum}$	4.29 e-002	kg vapor/ kg aire seco
Coeficiente global de transferencia de masa	K	3.9 e-003	
Flujo másico de sólidos húmedos		6.627 e-005	kg/s
Humedad final de los sólidos húmedos		10.36	%

La validación del modelo, aunque se hizo con un equipo de laboratorio, la estructura del modelo es la misma, ya que proviene de balances de materia y energía. Por otro lado es los coeficientes de transferencia de masa son pocos sensibles a los cambios de volumen trabajados en este tipo de procesos.

Hasta este punto, se desarrolló el modelo semifísico en base fenomenológica para una torre de secado por atomización, donde se muestran las ecuaciones en el dominio del tiempo, que rigen la dinámica del proceso. A partir de este momento, será tratado como un sistema de control.

En primer lugar, es necesario seleccionar los pareamientos entre las variables manipuladas y las variables controladas con el fin de obtener la Estructura del Sistema

de Control. Dicha selección puede realizarse sin considerar que un pareamiento dado pueda afectar la controlabilidad del proceso. O por el contrario, se puede realizar el pareamiento con la idea de que un buen pareamiento es aquel que garantiza un proceso controlable (Alvarez, 2012).

6.3 Paso 2: Seleccionar las variables manipuladas y determinación del intervalo disponible

Para facilitar el análisis de controlabilidad, que será planteado en la sección 6.4, la selección de las estrategias de control se realizó de forma secuencial, comenzando por una revisión de la literatura, obteniendo los pareamientos propuestos por varios autores en trabajos realizados que se enfocan en el desarrollo de estructuras de control para torres de secado por atomización y finalizando con un análisis cualitativo del modelo propuesto, que permita identificar las variables manipuladas dentro de las dinámicas del proceso.

(Masters, 1985) afirma que el objetivo de control en un secador por atomización es mantener la calidad deseada del producto seco, sin importar las perturbaciones ocurridas en la acción de secado y variaciones en el suministro de entrada. La estructura de control propuesta consiste en controlar la temperatura de salida del aire mediante la temperatura del aire secante a la entrada. El control de la temperatura se justifica gracias a que esta representa la calidad del producto, es decir, color, sabor, y contenido de humedad, entre otras.

Este pareamiento, puede ser aplicado al modelo semifísico de base fenomenológica descrito, ya que la ecuación que rige la dinámica de la temperatura (6.21) permite que se implemente como variable manipulada la temperatura del aire a la entrada.

El único inconveniente que se percibe es el hecho que sólo se controle la temperatura de la salida, pues algunos autores como (Pérez, et al., 1995) plantean que al ejercer control únicamente sobre la temperatura, no se garantiza el control sobre la humedad.

(Pérez, et al., 1995) en su trabajo plantean dos pareamientos:

- El contenido de agua en el sólido de salida es controlado con el flujo de alimento a la entrada.
- La temperatura de salida del sólido es controlada con la temperatura del aire de entrada.

Esta propuesta brinda una clara orientación hacia los posibles pareamientos cualitativos del modelo propuesto, debido a que es viable implementar dicha propuesta desde el punto de vista práctico. Las variables a controlar seleccionadas por estos autores, son de

gran importancia, pues permiten obtener una buena calidad del producto final, que es precisamente la parte fundamental de cualquier trabajo de control.

(Nava, et al., 2002), proponen una estrategia de control cuya variable manipulada es el flujo de aire de entrada, para realizar el control sobre la humedad del producto a la salida. Es razonable el pareamiento propuesto, gracias a que el aire actúa como medio secante, lo que permite llevar a cabo el control sobre la humedad. Esta estructura de control no puede ser implementada en el modelo descrito en el capítulo anterior, debido a que la ecuación que rige la dinámica de la humedad no contiene el término del flujo de aire a la entrada, lo cual representa un problema en el desarrollo cualitativo del pareamiento como se verá mas adelante.

Otro inconveniente que se evidencia en la estructura de control de (Nava, et al., 2002) es la falta del control de temperatura, pues los productos que se pretenden secar en este caso, son termolábiles, es decir, presentan una gran sensibilidad a altas temperaturas, lo que dificulta garantizar una buena calidad final del producto.

A pesar de que la estructura de control propuesta trata de abordar el control de toda la dinámica de proceso, existen casos en los cuales un solo pareamiento no permite establecer todas las relaciones entre las dinámicas del proceso, y por tanto se podría llegar a un análisis de controlabilidad incompleto. A pesar de que el control de la humedad del producto final sea el fundamento de cada uno de los trabajos realizados, cada autor implementa sus propias estrategias, dependiendo del modelo que haya desarrollado y de las necesidades. Es así como (Allen, et al., 1994) afirman que la variable que más afecta las propiedades finales del polvo es la distribución del tamaño de partícula. De esta forma proponen un pareamiento que consiste en manipular la distribución del tamaño de gota saliendo del atomizador, para controlar las propiedades del polvo, ya sea afectando las condiciones de secado de las gotas o el tamaño final de la partícula seca.

De acuerdo al modelo semifísico de base fenomenológica propuesto en este trabajo, la manipulación del tamaño de gota a la salida del atomizador no es muy relevante para el control de la humedad y la temperatura, aunque si influye en el tamaño de partícula final. Por esta razón no se considera importante incluirlo dentro de los pareamientos.

(Shabde, et al., 2007) Plantean que los fenómenos principales en la operación de secado por atomización están dados por:

- I. La atomización del líquido de alimentación
- II.El secado de las gotas una vez se han formado
- III.El movimiento de la gota para modelar el proceso

Basados en esta afirmación, proponen dos estructuras de control:

- El tamaño de partícula del producto es controlado por el tamaño de gota a la entrada.
- El contenido de humedad final del producto es controlado con la tasa de alimento de aire

El control del tamaño de partícula final es importante realizarlo, pero debido a la estructura del modelo no es posible realizar el pareamiento tamaño de gota-tamaño de partícula. En cuanto al segundo pareamiento propuesto por (Shabde, et al., 2007), anteriormente se explicó que el modelo no podía ser adaptado para esta estructura de control.

Finalmente, es importante mencionar que existe discrepancia entre las afirmaciones planteadas por diferentes autores frente a los pareamientos que se proponen, pues hay quienes opinan que la mayoría de sistemas de control automático de los secadores por atomización incluyen el control de la temperatura del aire de salida, sin embargo se ha mostrado que esto no asegura un adecuado control del objetivo principal, es decir, el contenido de agua en el sólido (Pérez, et al., 1995). Pero existen quienes afirman que la temperatura a la salida del sistema representa la calidad del producto, es decir, mediante esta se puede controlar el color, el sabor y el contenido de humedad del producto seco (Masters, 1985).

6.3.1 Primer Pareamiento u_1, x_1

Teniendo en cuenta las condiciones mencionadas anteriormente y el Modelo Semifísico de Base Fenomenológica planteado, las variables que pueden ejercer una acción de control sobre la humedad de la partícula a la salida ($w_{agua,solH}$) serían:

- La humedad inicial de la solución ($w_{agua,sln}$)
- El flujo másico de la solución a secar (\dot{m}_{sln})

En primer lugar se establece que $w_{agua,sln}$ es un parámetro que no puede ser manipulado fácilmente una vez se haya establecido; mientras que \dot{m}_{sln} permite ser medido y manipulado de forma más sencilla, además éste último parámetro influye notablemente sobre la humedad final de los sólidos. La Tabla 6-12, presenta el primer pareamiento establecido

Tabla 6-12: Primer pareamiento establecido para el sistema de control

Tipo de Variable	Símbolo	Nombre	Símbolo
Variable manipulada	u_1	Flujo másico de la solución a secar	\dot{m}_{sln}
Variable controlada	x_1	Humedad de la partícula a la salida	$w_{agua,sln}$

Es importante destacar que los autores (Pérez, et al., 1995) afirman que éste pareamiento permite obtener una buena calidad del producto final.

6.3.2 Segundo Pareamiento u_2, x_2

Las variables que pueden ejercer control sobre el segundo estado $h_{A,AireHum}$ son:

- La humedad del aire a la entrada ($h_{A,AireEnt}$)
- El flujo de aire a la entrada ($\dot{m}_{AS,AireEnt}$)

Para este caso, se toma $\dot{m}_{AS,AireEnt}$ como variable de control, debido a que puede manipularse más fácilmente que $h_{A,AireEnt}$, además, debido a los requerimientos del proceso, es más importante poder variar el flujo de aire a la entrada que su humedad, gracias a que el primero influye en mayor medida sobre el secado de la mezcla.

Aunque en la literatura revisada no se mencione explícitamente éste pareamiento, es importante tenerlo en cuenta a la hora de realizar el análisis de controlabilidad para asegurar que dicho análisis se haga de forma completa. La Tabla 6-13, presenta el segundo pareamiento establecido

Tabla 6-13: Segundo pareamiento establecido para el sistema de control

Tipo de Variable	Símbolo	Nombre	Símbolo
Variable manipulada	u_2	Flujo de aire a la entrada	$\dot{m}_{AS,AireEnt}$
Variable controlada	x_2	Humedad del aire a la salida	$h_{A,AireHum}$

6.3.3 Tercer Pareamiento u_3, x_3

Dado que la temperatura de salida determina el contenido de humedad en el producto final y afecta considerablemente la calidad de los productos termolábiles, la temperatura debe ser controlada y modulada respecto a otros cambios en el sistema. Las variables que pueden ejercer control sobre el tercer estado T_5 son:

- Flujo de aire a la entrada $\dot{m}_{AS,AireEnt}$
- Temperatura del aire a la entrada T_2
- Humedad absoluta del aire a la entrada $h_{A,AS,AireEnt}$

El flujo de aire a la entrada se descarta porque fue seleccionada como variable de control para el estado x_2 , debido a que tiene mayor influencia sobre este.

En cuanto a $h_{A,ASaireEnt}$, se establece que no influye de forma considerable sobre el estado x_3 , por lo que se descarta. En el caso sencillo la temperatura de salida controla el suministro de calor a la alimentación por medio de la temperatura de entrada, mientras se mantiene el flujo de alimentación constante, por lo tanto, la variable manipulada seleccionada es T_2 porque es fácil de medir y manipular, y tiene una gran influencia sobre el valor de la temperatura final del aire. La Tabla 6-14, presenta el tercer pareamiento establecido.

Tabla 6-14: Tercer pareamiento establecido para el sistema de control

Tipo de Variable	Símbolo	Nombre	Símbolo
Variable manipulada	u_3	Temperatura del aire a la entrada	T_2
Variable controlada	x_3	Temperatura del aire a la salida	T_5

Según la literatura, este es un pareamiento de gran importancia sobre el proceso de secado, pues el autor (Masters, 1985) además de proponerlo, afirma que el control de la temperatura se justifica gracias a que esta representa la calidad del producto, es decir, color, sabor, y contenido de humedad, entre otras.

Con los anteriores pareamientos, podemos calcular los grados de libertad para el control: el sistema cuenta con tres estados a controlar y con tres variables manipuladas, los grados de libertad serían

$$GDL = 3 - 3 = 0 \quad (6.40)$$

Como puede observarse en la Ecuación 6.40 este sistema cuenta con un número de variables manipuladas igual al número de estados.

6.4 Paso 3: Análisis de Controlabilidad

En esta sección se desarrolló una de las partes fundamentales de este trabajo, que permite establecer si la cámara de atomización descrita por el modelo planteado anteriormente es controlable y dentro de cuáles intervalos. El análisis de controlabilidad se desarrolla para el sistema no lineal el cual representa una mejor aproximación al comportamiento del proceso. Finalmente, el modelo se presenta en la forma canónica que permite desarrollar el Álgebra de Lie. A continuación se expresa el modelo en términos de las variables de control, es decir, las variables manipuladas y las variables controladas, que fueron seleccionadas en el paso 2 de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \frac{dw_{agua,solH}}{dt} , & u_1 &= \dot{m}_{sln} \\ \dot{x}_2 &= \frac{dh_{A,AireHum}}{dt} , & u_2 &= \dot{m}_{AS,AireEnt} \\ \dot{x}_3 &= \frac{dT_3}{dt} , & u_3 &= T_2\end{aligned}\quad (6.41)$$

Es así como las ecuaciones dinámicas de balance mostradas en (6.14), (6.18) y (6.21) quedarán descritas como se muestra a continuación en variables de control:

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{M_{sln}} (u_1 w_{agua,sln} - \dot{m}_3 - \dot{m}_{solH} x_1) \quad (6.42)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{M_{AS,AireHum}} [u_2 h_{A,AireEnt} + \dot{m}_3 - \dot{m}_{AS,AireHum} x_2] \quad (6.43)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_3 &= \frac{1}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} u_2 [C_{PAireEnt} (u_3 - T_{ref}) \\ &+ h_{A,AS,AireEnt} [C_{PAireHum} (u_3 - T_{ref})] + \lambda_0] \\ &- \dot{m}_{AS,AireHum} [C_{PAireHum} (x_3 - T_{ref}) + x_2 [C_{Pv} (x_3 - T_{ref})] + \lambda_0] \\ &+ \dot{m}_3 [a(T_3 - T_{ref}) + \frac{1}{2} b(T_3 - T_{ref})^2 + \frac{1}{3} c(T_3 - T_{ref})^3 + \frac{1}{4} d(T_3 \\ &- T_{ref})^4 + \frac{1}{5} e(T_3 - T_{ref})^5] - [hcn A_{tcs} (x_3 - T_{amb})\end{aligned}\quad (6.44)$$

Para obtener la forma canónica, se deben separar las variables manipuladas y las variables controladas para obtener las funciones $f(x)$ y $g(x)$, con el fin de observar las interdependencias entre las mismas y de este modo, analizar cómo influyen en el sistema.

El análisis de controlabilidad se realiza utilizando las ecuaciones diferenciales que describen las dinámicas del proceso de manera completa; lo cual implica llevar las tres ecuaciones diferenciales a la forma canónica.

6.4.1 Forma canónica de la ecuación que describe la dinámica de la humedad de las partículas (Ecuación 6.14)

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{M_{sln}} (u_1 w_{agua,sln} - K (w_{agua,solH} - w_{agua,solH}^*) - \dot{m}_{solH} x_1) \quad (6.45)$$

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{M_{sln}} \left(-K (w_{agua,solH} - w^*_{agua,solH}) - \dot{m}_{solH} x_1 \right) + \frac{w_{agua,sln}}{M_{sln}} u_1 \quad (6.46)$$

Rápidamente se llega a la expresión deseada, pues se puede establecer una plena identificación entre las funciones $f(x)$ y $g(x)$:

$$f_1(x) = \frac{1}{M_{sln}} \left(-K (x_1 - w^*_{agua,solH}) - \dot{m}_{solH} x_1 \right) \quad (6.47)$$

$$g_1(x) = \begin{bmatrix} \frac{w_{agua,sln}}{M_{sln}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.48)$$

6.4.2 Forma canónica de la ecuación que describe la dinámica de la humedad del aire (Ecuación 6.18)

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{M_{AS,AireHum}} [u_2 h_{A,AireEnt} + K (x_1 - w^*_{agua,solH}) - \dot{m}_{AS,AireHum} x_2] \quad (6.49)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{M_{AS,AireHum}} [K (x_1 - w^*_{agua,solH}) - \dot{m}_{AS,AireHum} x_2] + \frac{h_{A,AireEnt}}{M_{AS,AireHum}} u_2 \quad (6.50)$$

Separando las funciones $f(x)$ y $g(x)$ se obtiene la expresión en la forma canónica

$$f_2(x) = \frac{1}{M_{AS,AireHum}} [K (x_1 - w^*_{agua,solH}) - \dot{m}_{AS,AireHum} x_2] \quad (6.51)$$

$$g_2(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{h_{A,AireEnt}}{M_{AS,AireHum}} \\ \frac{\lambda_0}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} - \frac{h_{A,ASAireEnt} C_{PAireHum} T_{ref}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} - \frac{C_{PAireEnt} T_{ref}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} \end{bmatrix} \quad (6.52)$$

6.4.3 Forma canónica de la ecuación que describe la dinámica de la temperatura del aire a la salida (Ecuación 6.21)

Para simplificar la expresión, se denota la entalpía de la corriente 3 como H_3 debido a que no depende de ninguna de las variables que afectan la forma canónica

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 = & \frac{1}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} u_2 [C_{PAireEnt} (u_3 - T_{ref}) \\ & + h_{A,ASAireEnt} [C_{PAireHum} (u_3 - T_{ref})] + \lambda_0] \\ & - \dot{m}_{AS,AireHum} [C_{PAireHum} (x_3 - T_{ref}) + x_2 [C_{Pv} (x_3 - T_{ref})] + \lambda_0] \\ & + K (x_1 - w^*_{agua,solH}) H_3 - [hcn A_{tcs} (x_3 - T_{amb})] \end{aligned} \quad (6.53)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 = & \frac{C_{PAireEnt}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} u_2 u_3 - \frac{C_{PAireEnt} T_{ref}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} u_2 \\ & + \frac{h_{A,ASAireEnt} C_{PAireHum}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} u_2 u_3 - \frac{h_{A,ASAireEnt} C_{PAireHum} T_{ref}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} u_2 \\ & + \frac{\lambda_0}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} u_2 \\ & - \dot{m}_{AS,AireHum} [C_{PAireHum} (x_3 - T_{ref}) + x_2 [C_{Pv} (x_3 - T_{ref})] + \lambda_0] \\ & + K (x_1 - w^*_{agua,solH}) H_3 - [hcn A_{tcs} (x_3 - T_{amb})] \end{aligned} \quad (6.54)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 = & -\dot{m}_{AS,AireHum} [C_{PAireHum} (x_3 - T_{ref}) + x_2 [C_{Pv} (x_3 - T_{ref})] + \lambda_0] + K (x_1 \\ & - w^*_{agua,solH}) H_3 - [hcn A_{tcs} (x_3 - T_{amb})] \\ & + \left(\frac{C_{PAireEnt}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} + \frac{h_{A,ASAireEnt} C_{PAireHum}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} \right) u_2 u_3 \\ & + \left(\frac{\lambda_0}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} - \frac{h_{A,ASAireEnt} C_{PAireHum} T_{ref}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} \right. \\ & \left. - \frac{C_{PAireEnt} T_{ref}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} \right) u_2 \end{aligned} \quad (6.55)$$

La separación de la funciones $f(x)$ y $g(x)$ para este caso no es trivial, debido a la complejidad de la ecuación, además es necesario realizar un cambio de variable

$$u_3^* = u_2 u_3 \quad (6.56)$$

Al realizar este cambio de variable, se presenta un carácter fuertemente acoplado entre u_3^* y u_2 . Para poder ejercer la acción de control u_2 nunca puede ser cero, es decir

siempre debe haber un flujo de aire a la entrada. Para poder calcular u_3 , se toma el valor de u_3^* dado por el controlador y se despeja de la Ecuación 6.56.

La forma canónica de la dinámica de la temperatura del aire a la salida finalmente queda:

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 = & -\dot{m}_{AS,AireHum} [C_{PAireHum} (x_3 - T_{ref}) + x_2 [C_{Pv} (x_3 - T_{ref})] + \lambda_0] + K (x_1 \\ & - w^*_{agua,solH}) H_3 - [hcn A_{tcs} (x_3 - T_{amb}) \\ & + \left(\frac{C_{PAireEnt}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} + \frac{h_{A,ASAireEnt} C_{PAireHum}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} \right) u_3^* \\ & + \left(\frac{\lambda_0}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} - \frac{h_{A,ASAireEnt} C_{PAireHum} T_{ref}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} \right. \\ & \left. - \frac{C_{PAireEnt} T_{ref}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} \right) u_2 \end{aligned} \quad (6.57)$$

Para este caso las funciones que se obtienen son:

$$\begin{aligned} f_3(x) = & -\dot{m}_{AS,AireHum} [C_{PAireHum} (x_3 - T_{ref}) + x_2 [C_{Pv} (x_3 - T_{ref})] + \lambda_0] + K (x_1 \\ & - w^*_{agua,solH}) H_3 - [hcn A_{tcs} (x_3 - T_{amb})] \end{aligned} \quad (6.58)$$

$$g_3(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ + \left(\frac{C_{PAireEnt}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} + \frac{h_{A,ASAireEnt} C_{PAireHum}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} \right) \end{bmatrix} \quad (6.59)$$

6.4.4 Análisis de controlabilidad de la cámara de secado por atomización

El análisis de controlabilidad se desarrolló mediante Álgebra de Lie, ya que el sistema con el cual se trabajó es no lineal. Para evaluar la controlabilidad del sistema, se transformaron las ecuaciones en variables de estado según la forma canónica descrita por la ecuación:

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ f_3(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{agua,sln} \\ M_{sln} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \\
&+ \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{h_{A,AireEnt}}{M_{AS,AireHum}} \\ \lambda_0 \\ \frac{h_{A,ASAireEnt} C_{PAireHum} T_{ref}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} - \frac{C_{PAireEnt} T_{ref}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} \end{bmatrix} u_2 \quad (6.60) \\
&+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \left(\frac{C_{PAireEnt}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} + \frac{h_{A,ASAireEnt} C_{PAireHum}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} \right) \end{bmatrix} u_3^*
\end{aligned}$$

El análisis de controlabilidad se realiza por medio de la matriz de controlabilidad W_c descrita en la Ecuación 5.9, la cual es usada para sistemas no lineales.

Esta propuesta de diseño simultáneo se basa en la metodología propuesta por los autores (Ochoa, 2005 y Álvarez, 2011), en este caso, sólo se utilizó el criterio de rango de la matriz de controlabilidad W_c , para este trabajo no se probó Observabilidad en detalle.

Al evaluar el rango de la matriz de controlabilidad (independencia lineal de filas para el sistema con múltiples variables manipuladas), se encuentran las condiciones de no controlabilidad, por lo tanto, aquellos parámetros de diseño que no cumplan la condición hallada determinará las dimensiones las cuales harán el sistema controlable.

La manipulación matemática que se debe realizar sobre las ecuaciones es muy compleja, por lo tanto se utiliza una ayuda computacional. Para obtener la Matriz de Controlabilidad se utiliza el programa Matlab® R2008a, haciendo uso del comando “syms”, que permite desarrollar dicha matriz de forma simbólica.

A continuación se presentan las columnas de la matriz de controlabilidad W_c , la octava y la novena columna se presentan en el Anexo C dada su extensión.

Primera columna

$$c_1 = \begin{bmatrix} W_{agua,sln} \\ M_{sln} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Segunda columna

$$c_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{h_{A,AireEnt}}{M_{AS,AireHum}} \\ \frac{\lambda_0 - C_{PAireEnt} * T_3 - h_{A,AireEnt} * C_{PAireHum} * T_3}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} \end{bmatrix}$$

Tercera columna

$$c_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{C_{PAireEnt} + h_{A,AireEnt} * C_{PAireHum}}{M_{AS,AireHum} C_{PAireSeco}} \end{bmatrix}$$

Cuarta columna

$$c_4 = \begin{bmatrix} \frac{1}{Msln^2 * w_{agua,sln} * K} + \frac{1}{Msln^2 * w_{agua,sln} * \dot{m}_{solH}} \\ -1 \\ \frac{M_{AS,AireHum} * K * w_{agua,sln}}{Msln} \\ \frac{-K * H_3 * w_{agua,sln}}{Msln} \end{bmatrix}$$

Quinta columna

$$c_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M_{aire_{seco}^2}} * mp_{aire_{sal}} * h_{aire_{en}} \\ -C_{pv} * \frac{h_{aire_{ent}}}{M_{aire_{seco}}} * x_3 + C_{pv} * \frac{h_{aire_{ent}}}{M_{aire_{seco}}} * Tref + \frac{1}{C_{paire_{seco}}} * mp_{aire_{sal}} * C_{PAireHum} * \lambda_0 \\ -\frac{1}{C_{paire_{seco}}} * mp_{aire_{sal}} * C_{PAireHum} * C_{paire_{ent}} * Tref - \frac{1}{C_{paire_{seco}}} * mp_{aire_{sal}} * C_{PAireHum}^2 * h_{aire_{ent}} * Tref \\ -\frac{1}{C_{paire_{seco}}} * x_2 * C_{pv} * \lambda_0 + \frac{1}{C_{paire_{seco}}} * x_2 * C_{pv} * C_{paire_{ent}} * Tref \\ + \frac{1}{C_{paire_{seco}}} * x_2 * C_{pv} * h_{aire_{ent}} * C_{PAireHum} * Tref + \frac{1}{C_{paire_{seco}}} * hcn * A_{trans_{cs}} * \lambda_0 \\ -\frac{1}{C_{paire_{seco}}} * hcn * A_{trans_{cs}} * C_{paire_{ent}} * Tref - \frac{1}{C_{paire_{seco}}} * hcn * A_{trans_{cs}} * h_{aire_{ent}} * C_{PAireHum} * Tref \end{bmatrix}$$

Sexta columna

$$c_6 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{Cp_{aireseco}} * \frac{M_{aireseco}}{Cp_{aireseco}} * mp_{airesal} * Cp_{airehum} * Cp_{aireent} + \frac{1}{Cp_{aireseco}} * mp_{airesal} * Cp_{airehum}^2 * h_{aireent} \\ - \frac{1}{Cp_{aireseco}} * \frac{M_{aireseco}}{Cp_{aireseco}} * x2 * Cp_v * Cp_{aireent} - \frac{1}{Cp_{aireseco}} * \frac{M_{aireseco}}{Cp_{aireseco}} * x2 * Cp_v * h_{aireent} * Cp_{airehum} \\ + \frac{1}{Cp_{aireseco}} * \frac{M_{aireseco}}{Cp_{aireseco}} * hcn * A_{transcs} * Cp_{aireent} + \frac{1}{Cp_{aireseco}} * \frac{M_{aireseco}}{Cp_{aireseco}} * hcn * A_{transcs} * h_{aireent} * Cp_{airehum} \end{bmatrix}$$

Séptima columna

$$c_7 \begin{bmatrix} \frac{1}{Msln^3} * w_{agua_sln} * K^2 + \frac{2}{Msln^3} * K * w_{agua_sln} * mp_{solH} + \frac{1}{Msln^3} * w_{agua_sln} * mp_{solH}^2 \\ - \frac{1}{M_{aireseco}} * \frac{K^2}{Msln^2} * w_{agua_sln} - \frac{1}{M_{aireseco}} * \frac{K}{Msln^2} * w_{agua_sln} * mp_{solH} - \frac{1}{M_{aireseco}^2} * mp_{airesal} * K * \frac{w_{agua_sln}}{Msln} \\ - K^2 * \frac{H3}{Msln^2} * w_{agua_sln} - K * \frac{H3}{Msln^2} * w_{agua_sln} * mp_{solH} \\ + \frac{Cp_v}{M_{aireseco}} * K * \frac{w_{agua_sln}}{Msln} * x3 - \frac{Cp_v}{M_{aireseco}} * K * \frac{w_{agua_sln}}{Msln} * Tref \\ - K * H3 * \frac{w_{agua_sln}}{Msln} * mp_{airesal} * Cp_{airehum} \\ + K * H3 * \frac{w_{agua_sln}}{Msln} * x2 * Cp_v - K * H3 * \frac{w_{agua_sln}}{Msln} * hcn * A_{transcs} \end{bmatrix}$$

6.5 Paso 4: Primer resultado de Diseño

El cálculo de la cámara de secado, se hace considerando que el equipo trabajará 48 semanas al año y tres turnos de 8 horas cada uno por día, por lo tanto el flujo volumétrico de alimentación será:

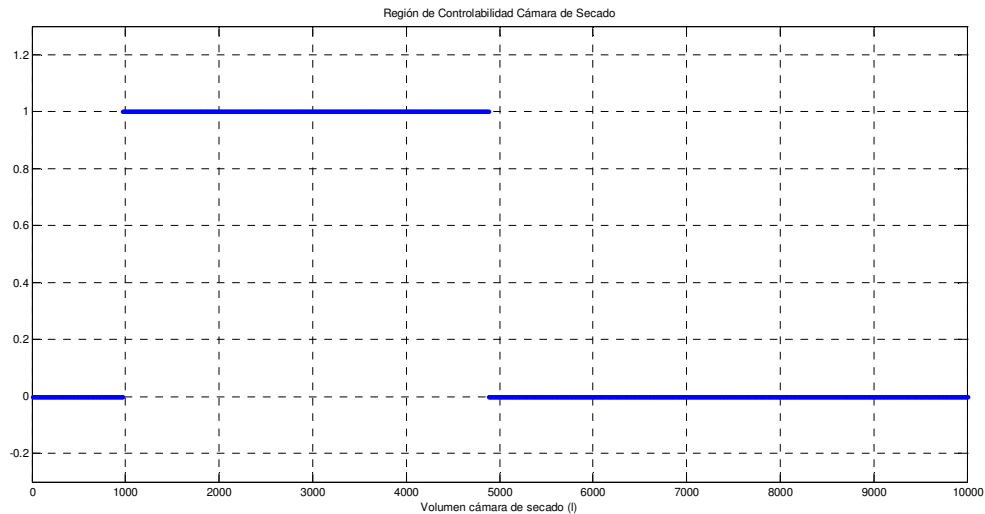
$$F_{nom} = \frac{Producción}{\rho_{sln}} = \frac{570 \text{ ton/año}}{1320 \text{ kg/m}^3} = \frac{1.96 \cdot 10^{-2} \text{ kg/s}}{1320 \text{ kg/m}^3} = 1.48 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (6.61)$$

Con el fin de encontrar diferencias de diseño entre los productos a secar, se tiene en cuenta que los parámetros de operación de la cámara de secado se mantienen constantes (temperatura de entrada, flujo de alimentación y aire), y la diferencia se obtiene al cambiar los parámetros del producto (densidad, capacidad calorífica, diámetro de partícula).

Luego de ejecutar el código, se obtiene la matriz W_c de dimensión 3x9; dado que la matriz de controlabilidad no es cuadrada, se procede a verificar que su rango sea

completo. Con ayuda del comando $rank(W_c)$ de Matlab® R2008a, se obtiene que el rango de la matriz es 3, lo cual significa que es de rango completo, de donde se deduce que sus componentes son linealmente independientes. Sin embargo, como el objetivo de este trabajo es determinar las dimensiones de la cámara de secado en los cuales se asegure controlabilidad del sistema, se variaron los volúmenes de dicha cámara desde 0.01 hasta 10 m³. La Figura 6.26 presenta los volúmenes en los cuales se puede asegurar controlabilidad de estado para la cámara de secado con el primer producto. Los volúmenes de cámara cuyo valor encuentren en 0, son los valores de no controlabilidad y los volúmenes de cámara que se encuentren en 1 corresponden a la región de controlabilidad, por lo tanto, el intervalo de volumen en el cual se asegura controlabilidad para el primer producto desarrollado se encuentra entre 0.97 y 4.88 m³.

Figura 6-26: Condiciones de controlabilidad Volumen cámara de secado primer producto



6.6 Paso 5: Cambiar de producto y obtener segundo resultado de diseño

El segundo producto con el cual se va a determinar el volumen de la cámara de secado, fue seleccionado teniendo en cuenta las condiciones límites entre las características del colorante azul que afectan la matriz de controlabilidad, estos parámetros son: densidad de la solución, densidad de los sólidos y diámetro de las partículas. La densidad de la solución depende de los porcentajes de la formulación de cada uno de los componentes, la densidad de los sólidos depende de la humedad de los sólidos final deseada y el diámetro de partícula finalmente afectara la solubilidad del producto.

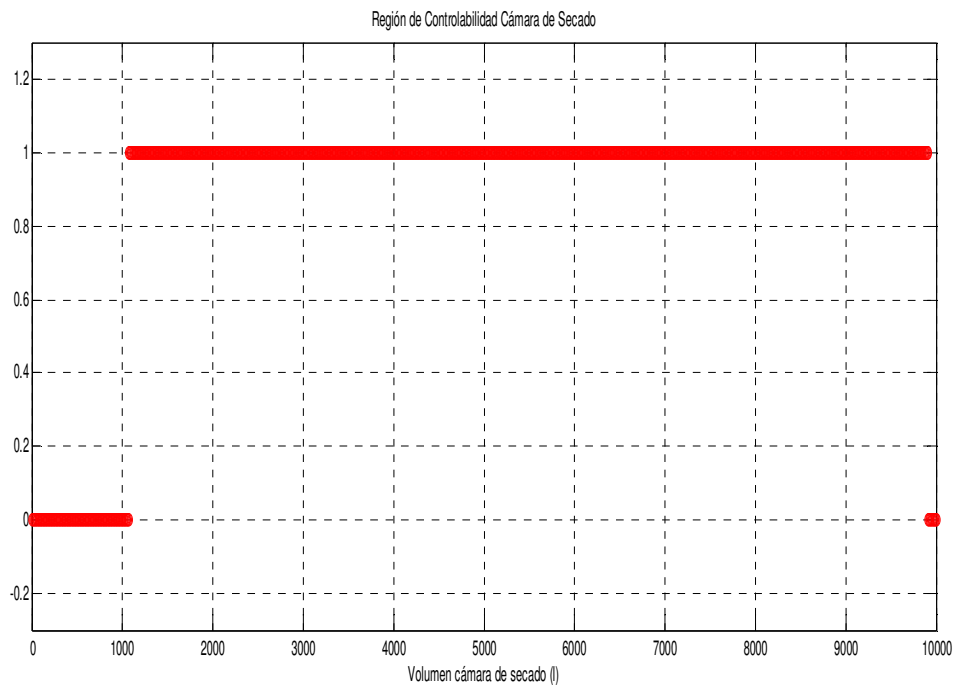
Como se explicó en la Sección 6.1, el ingrediente activo es el colorante azul natural y la diferencia entre los productos radica en la matriz encapsulante, los rangos aceptables para trabajar en la cámara de secado se presentan en la Tabla 6.15.

Tabla 6-15: Características físicas de los productos obtenidos mediante secado por atomización segundo producto.

Parámetro	Formulación 1	Formulación 2
Densidad de la solución a secar	1082 kg/m ³	1400 kg/m ³
Densidad de los sólidos húmedos	300 kg/m ³	700 kg/m ³
Diámetro de partícula (sólidos húmedos)	30 μm	150 μm

En este caso, también se varió el volumen de la cámara de secado entre 0.01 y 10 m³ con el fin de encontrar las condiciones de diseño deseadas. La Figura 6.27 presenta los volúmenes obtenidos para la segunda formulación, los valores que se encuentren en 0 significan los volúmenes en los cuales no es controlable la cámara, mientras que los valores que se encuentren en 1 representan el intervalo en el cual se hace que el volumen de cámara de secado sea controlable, en este caso los volúmenes deseados se encuentran entre 1.04 y 9.57 m³.

Figura 6-27: Condiciones de controlabilidad Volumen cámara de secado



6.7 Paso 6: Seleccionar las condiciones de diseño de la cámara de secado

En este paso ya se conocen los resultados de diseño de la cámara de secado para ambos productos, sin embargo, como los volúmenes no son los mismos, es necesario establecer cuál van a ser el intervalo definitivo para el diseño de la cámara de secado. Con el fin de lograr este propósito, se seleccionan los valores comunes en ambos resultados, es decir, los volúmenes que coinciden en ambos resultados de diseño los cuales son desde 1.04 m^3 hasta 4.88 m^3 .

Nótese que en este resultado de diseño fue muy importante establecer una familia de productos, ya que para obtener las dimensiones de la cámara de secado, se variaron las condiciones de las sustancias como su densidad, tamaño de partícula, viscosidad, etc., en el caso de trabajar con sustancias que no pertenezcan a una misma familia, probablemente las dos regiones controlables de los productos no se interceptarían y sería necesario un diseño para cada producto.

La relación entre altura y diámetro de la cámara de secado según Keith Masters (Masters, 1985), es de $1/0.6$, altura/diámetro respectivamente. La ecuación 6.30, se utiliza para el cálculo del volumen de la cámara de secado. La Tabla 6-16, presenta los resultados de diámetro y altura para los volúmenes máximos y mínimos seleccionados. Sin embargo, este resultado debe ser optimizado ya que como existe una región en la cual se puede asegurar controlabilidad, es necesario determinar cuál es el volumen óptimo para el diseño de la cámara de secado por atomización.

Tabla 6-16: Condiciones de los productos mediante secado por atomización segundo producto.

Volumen (m^3)	Diámetro (m)	Altura (m)
1.04	0.87	1.45
4.88	1.47	2,45

6.8 Optimización en el diseño

Para realizar la optimización debe formularse un Funcional de Costo (FC) que incluye el costo variable y el costo fijo (Ecuación 6.62). El costo fijo incluye la potencia necesaria, el calentamiento de aire y la mano de obra y supervisión, mientras que el costo variable incluye el costo del reactor.

$$\text{Costo } (c) = \text{costo variable} + \text{costo fijo} \quad (6.62)$$

6.8.1 Costo variable:

Para calcular el costo variable se necesita conocer las relaciones geométricas de la cámara de secado por atomización, la relación entre altura y diámetros es de,

$$h' = 1.5 D_c \quad (6.63)$$

$$D_{co} = \frac{D_c}{10} \quad (6.64)$$

$$h_{co} = \left(\frac{D_c - D_{co}}{2} \right) \operatorname{tg} 60^\circ \quad (6.65)$$

$$h_{ci} = h' - h_{co} \quad (6.66)$$

El costo de la cámara de secado, puede calcularse mediante la expresión

$$C_{cs} = 1780 h'^{0.87} * D_c^{1.23} \quad (6.67)$$

El material de construcción es acero inoxidable con calibre 16, el precio por m^2 es de 130 dólares $\frac{US\$130}{m^2}$.

6.8.2 Costo fijo:

El costo del proceso de secado por atomización, varía grandemente con el tipo de material de alimentación, a continuación se mencionan los costos operativos de este equipo (Nonhebel, et al., 2002):

- Potencia necesaria

Se puede realizar una primera aproximación, un consumo de 5 kW por cada 1000 m^3/h de aire que entran al secador. Esta estimación no incluye la potencia consumida por los sistemas de transporte del producto.

- Calentamiento del aire

El costo depende de la forma seleccionada para calentar el aire (vapor, gas, electricidad, fuel oil, etc). El calor requerido se calcula teniendo en cuenta el caudal de agua a evaporar y la temperatura de entrada y salida de la cámara de secado.

- Mano de obra y supervisión

Las principales funciones de un operador para este equipo son:

- (a) Arranque y parada del secador.
- (b) Probar el correcto funcionamiento del atomizador, el control de temperatura y demás instrumentos.
- (c) Limpieza periódica del equipo.

La optimización consistió en minimizar una función de costo, de tal forma que las variables de la función estén sujetas a una serie de restricciones:

Las restricciones para la optimización fueron:

- La altura y el diámetro son mayores a cero.
- La altura es mayor al diámetro

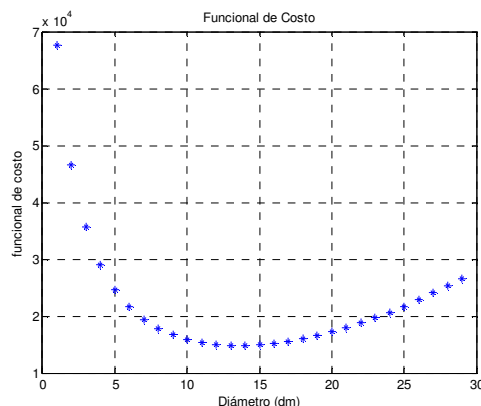
Finalmente el funcional de costo queda expresado mediante la ecuación

$$FC = 1780 h^{0.87} * D_c^{1.23} + \alpha \frac{1}{33.75 D_c + 0.6627} \quad (6.68)$$

La expresión $\frac{1}{33.75 D_c + 0.6627}$, hace referencia a la eficiencia del equipo, la cual indica qué tanto se logra el objetivo de productividad, ya que podría inicialmente pensarse que el diseño óptimo (en términos de \$ por material de construcción utilizado) es el menor tamaño, en cambio, si se compensa con un factor de productividad, el mejor diseño considerará los volúmenes en los cuales se asegure controlabilidad y que además minimicen el funcional de costo. La optimización se llevó a cabo en dos programas: el primero fue Matlab®, utilizando la función fmincon, esta función es una minimización con restricciones, en donde se encuentra el mínimo de una función no lineal de varias variables con restricciones. El segundo programa utilizado fue el complemento Solver de Microsoft Excel, con el método de resolución “GRG Nonlinear” para problemas de Solver no lineales suavizados.

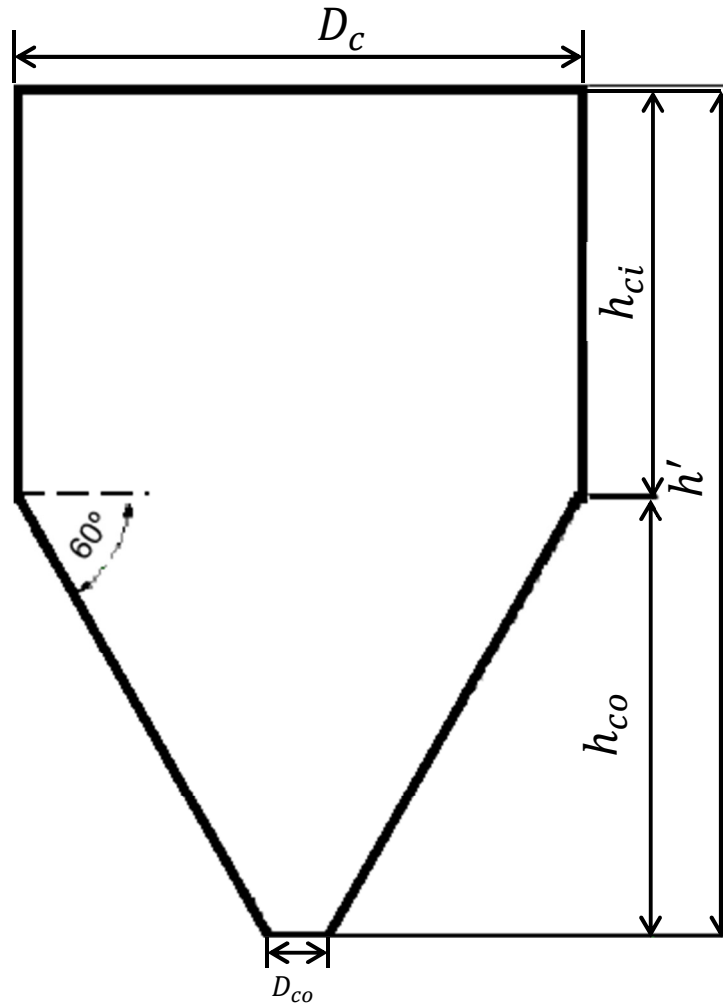
La Figura 6.28 presenta el resultado de la optimización. Para este trabajo de investigación el diámetro y la altura óptimos de diseño es de 1.4 m y 2.33 m respectivamente. Finalmente la Figura 6-29 presenta el diagrama de una torre de secado por atomización.

Figura 6- 28. Optimización del diseño de la Cámara de secado por atomización



La Figura 6-29, presenta la forma de la cámara de secado para las especificaciones dadas en el Capítulo 4,

Figura 6-29. Dimensiones de la cámara de secado



7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

El uso del modelo semifísico de base fenomenológica del secado por atomización planteado en este trabajo permitió una vez validado el modelo para el estado estacionario, minimizar la cantidad de ensayos de laboratorio posteriores, reduciendo el gasto de recursos materiales y tiempos de proceso. Al analizar los resultados de las simulaciones se puede concluir que el modelo propuesto representa el comportamiento del proceso de secado por atomización.

Al realizar el procedimiento de diseño simultáneo de proceso y control de la cámara de secado por atomización se pudo obtener las dimensiones en las cuales se aseguró controlabilidad de estado para este proceso, al hallar los intervalos de controlabilidad del volumen de la cámara de secado, bajo ciertas condiciones de operación que permitieron el secado con grado de humedad del producto dado. Se resalta la importancia de realizar el Análisis de Controlabilidad cuando se pretende llevar a cabo el diseño de un equipo, para garantizar las regiones en las cuales ésta es controlable.

El análisis de controlabilidad se desarrolló con todas las ecuaciones diferenciales obtenidas en el modelado, para garantizar que ninguna de las dinámicas presentes en el sistema pudiera hacer que el sistema fuera no controlable. Además, dado que dicha herramienta se utiliza en sistemas no lineales, es posible obtener resultados válidos para una amplia región en el espacio de estados, y no en un solo punto como es el caso de un modelo lineal.

Se lograron obtener dos productos para diferentes sectores industriales, utilizando diferentes matrices para su uso en cosméticos y alimentos, la incorporación de agentes antioxidantes entre los ingredientes de la membrana ayudan a mantener la composición química y al trabajar en productos cosméticos ayudará a la estabilidad y mayor vida útil del mismo.

A pesar de la importancia del tamaño de la partícula en éste tipo de secado, no fue posible realizar el control sobre dicho parámetro, dado que no se pudo llevar su ecuación a la forma canónica, por su complejidad matemática, que se debe principalmente a que es una ecuación empírica.

Los valores en los cuales se pierde controlabilidad son los valores extremos, es decir para una determinada producción del colorante azul, según lo establecido en producción, valores muy pequeños o muy grandes de volúmenes hacen que pierda controlabilidad y mediante la metodología desarrollada se lograron obtener los volúmenes y posteriormente las dimensiones de la cámara óptimos del objeto de investigación.

La optimización desarrollada permitió obtener los valores de diseño de la cámara de secado con los cuales se minimice la función objetivo y se maximice la eficiencia de este equipo.

7.2 Recomendaciones

Para logra una mayor efectividad en el proceso de secado se recomienda realizar ensayos experimentales y determinar cuál es el máximo valor de temperatura de secado que no afecta la calidad del producto, ya que en este trabajo sólo se evaluó a 150 °C.

Se recomienda incorporar los equipos auxiliares para evaluar el diseño integrado de toda una planta de secado por atomización en el cual se incluya los ventiladores, el intercambiador de calor, la bomba de alimentación y finalmente el ciclón.

A. Anexo: Spray Dryer Buchi B-290

Tabla A-17: Datos técnicos del Spray Dryer Büchi B-290

Potencia	2900 W
Tensión de alimentación	200/230 V, 50-60 Hz
Rendimiento de evaporador	1 l/h H ₂ O, mayor para disolventes orgánicos
Regulación del motor	Convertidor de frecuencia
Máxima temperatura de entrada	220 °C
Potencia de calefacción	2300 W
Regulación de la calefacción	PT-100, Fuzzy logic, precisión +/- 3°C
Gas de pulverización	Aire comprimido o nitrógeno, 200-1000 l/h, 5-8 bar
Diámetro de la tobera	1,4mm y 1,5 mm diámetro
Tiempo medio de residencia	1,0-1,5 s
Rango de diámetro de la partícula	1-25 µm
Materiales en contacto con la solución	Acero inoxidable resistente al ácido, 3,3 vidrio de borosilicato, FPM, Silicona
Dimensiones	60x 50 x 110 cm
Peso	48 kg

- Procedimiento de Operación del Equipo de Secado BÜCHI B-290

A continuación se describe el procedimiento de funcionamiento del equipo de secado:

- a) Encender el interruptor principal del equipo
- b) Encender el compresor que suministra el caudal de aire de atomización y seleccionar en el equipo con el rotámetro el caudal elegido. En el anexo D se encuentra la tabla de conversión para el caudal de aire.
- c) Introducir la manguera de alimentación de la muestra en un vaso de precipitado con agua destilada.
- d) Poner en marcha la aspiración en el valor seleccionado.
- e) Seleccionar la temperatura del aire de entrada del proceso y poner en marcha la calefacción.
- f) Esperar que el equipo alcance la temperatura deseada.
- g) Ajustar el caudal de alimentación en el valor deseado y encender a bomba peristáltica con el agua destilada. En el anexo D se encuentra la tabla de conversión de la bomba peristáltica.
- h) Observar la temperatura de salida y esperar a que se alcance un valor estable.
- i) Alcanzado el estado estacionario, detener el bombeo con agua destilada y colocar la manguera de alimentación en la muestra a secar, encender nuevamente la bomba.
- j) El proceso de atomización y secado se inicia, y el polvo comienza a aparecer en el recipiente recolector.
- k) Una vez se ha procesado la muestra, detener el flujo de alimentación, detener el calentamiento de la cámara de secado, esperar hasta que la temperatura llegue a 30 °C.

- l) Apagar la aspiración y a abrir el recipiente recolector. Con la ayuda de un pincel o una espátula recoger todo el polvo que se encuentra adherido en el interior del ciclón y en la tapa metálica de la parte inferior del ciclón.
- m) Recolectar la muestra en polvo obtenida y guardarla papel aluminio, etiquetar y almacenarlo en un desecador para su posterior análisis de humedad en el laboratorio.

- Tablas de conversión para parámetros

El manual de operación del equipo de laboratorio mini spray dryer Büchi B-290, presenta las tablas de conversión para el flujo de alimento y para el flujo de aire a la entrada.

- a) Medidor de flujo de paso de aire pulverizado (rotámetro)

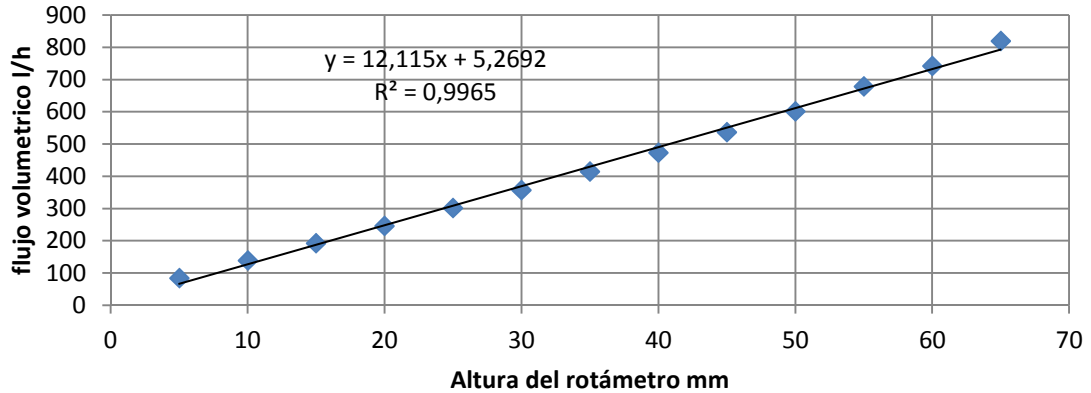
El rotámetro es un indicador para el flujo de gas pulverizado. La Tabla A-17 aporta una correlación entre la altura y el volumen de paso indicados y la Figura A-31 muestra la gráfica de la relación entre la altura del rotámetro y el caudal de aire.

Tabla A-18: Relación altura frente a flujo volumétrico de Aire Mini Spray Dryer Büchi B-290

Altura (mm)	litros/hora
5	84
10	138
15	192
20	246
25	301
30	357
35	414
40	473
45	536
50	601
55	678
60	742
65	819

Figura A-30: Relación altura frente a flujo volumétrico de Aire Mini Spray Dryer Büchi B-290

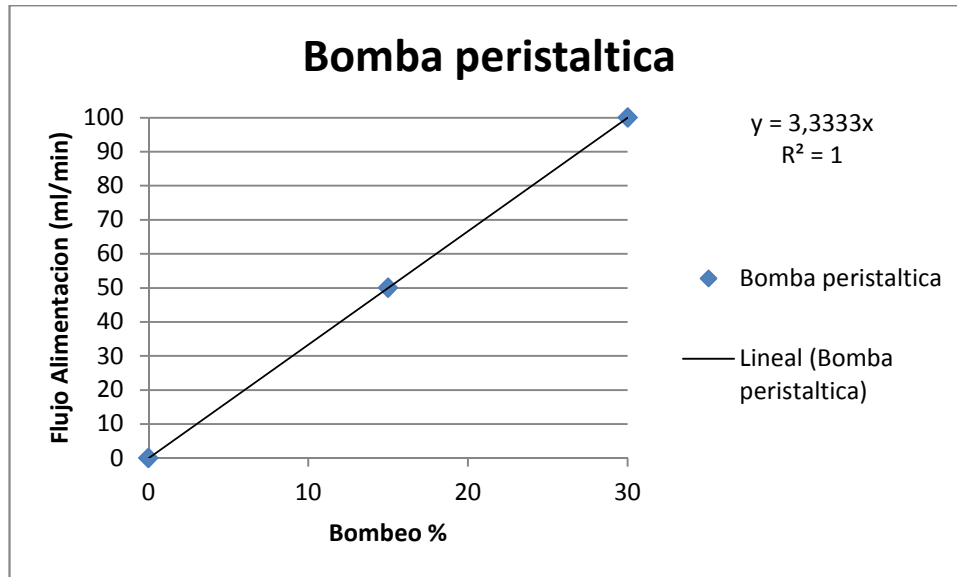
Flujo de Aire Cámara de Secado



Bomba Peristáltica

La bomba peristáltica se puede ajustar a tubos de diámetros interiores y exteriores diferentes. El flujo absoluto varía dependiendo del diámetro de los tubos. El diagrama expone la correlación para el tubo de silicona 2/4 estándar.

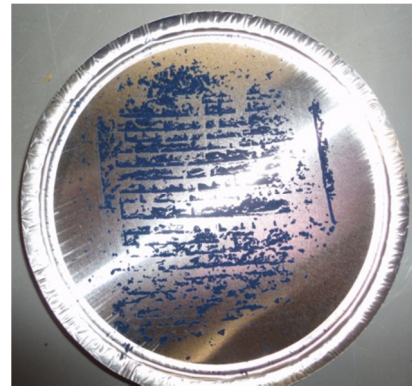
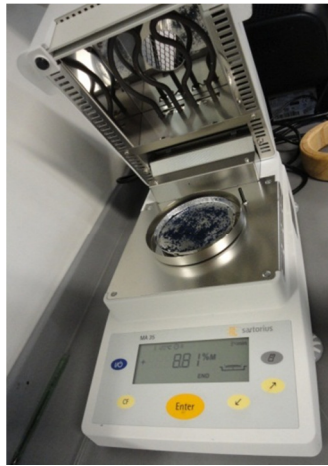
Figura A-31: Configuración de la bomba frente al caudal



B. Anexo: Determinación de las propiedades físico-químicas de la muestra

La cuantificación de humedad se realizó por el método N° 23.003 (AOAC , 1995). La humedad y los sólidos totales se midieron utilizando un analizador de humedad electrónico marca Sartorius MA-35 (Figura A-33). Se toman 2 gramos de muestra, se introducen dentro de la cámara de muestra, se ajusta la temperatura de calentamiento a 120 °C, y se registra el valor de humedad y sólidos totales cuando el equipo registre el peso constante de la muestra.

Figura A-32: Analizador de humedad Sartorius MA-35. Izquierda equipo, derecha, muestra de colorante azul



La medida de sólidos solubles totales de la muestra líquida de colorante azul, se realizó utilizando un refractómetro digital portátil marca Atago PAL-3 (Diseño de rango completo (0.0 - 93.0% Brix). Se coloca una pequeña cantidad de muestra líquida en el campo del refractómetro y se lee sobre una escala de 0 a 32 °brix (Figura A-34). La densidad se calculó de forma indirecta, midiendo la masa y el volumen por separado y posteriormente realiza el cálculo teniendo en cuenta la Ecuación A.1.

$$\delta = \frac{m(kg)}{v(m^3)} \quad A.1$$

Figura A-33: Refractómetro digital portátil Atago PAL-3



C. Anexo: Columnas octava y novena de la matriz de controlabilidad W_c

Octava columna

ans =

0

$1/M_{\text{aire_seco}}^3 \cdot mp_{\text{aire_sal}}^2 \cdot h_{\text{aire_ent}}$

$-Cp_v \cdot h_{\text{aire_ent}} / M_{\text{aire_seco}} \cdot Tamb - Cp_v \cdot h_{\text{aire_ent}} / M_{\text{aire_seco}} \cdot \lambda_0 -$
 $1/M_{\text{aire_seco}}^2 / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot Cp_v \cdot Cp_{\text{aire_ent}} \cdot Tref \cdot mp_{\text{aire_sal}} \cdot x_2 + 1/M_{\text{aire_seco}}^2 /$
 $Cp_{\text{aire_seco}} \cdot Cp_v \cdot h_{\text{aire_ent}} \cdot Cp_{\text{aire_hum}} \cdot Tref \cdot K \cdot x_1 -$
 $1/M_{\text{aire_seco}}^2 / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot Cp_v \cdot h_{\text{aire_ent}} \cdot Cp_{\text{aire_hum}} \cdot Tref \cdot K \cdot w_{\text{agua_solH_eq}}$
 $- 1/M_{\text{aire_seco}}^2 / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot Cp_v \cdot h_{\text{aire_ent}} \cdot Cp_{\text{aire_hum}} \cdot Tref \cdot mp_{\text{aire_sal}} \cdot x_2 -$
 $Cp_v \cdot h_{\text{aire_ent}} / M_{\text{aire_seco}} \cdot K \cdot H_3 \cdot x_1 + Cp_v \cdot h_{\text{aire_ent}} / M_{\text{aire_seco}} \cdot K \cdot H_3 \cdot w_{\text{agua_solH_eq}}$
 $1/M_{\text{aire_seco}}^2 / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot Cp_v \cdot \lambda_0 \cdot K \cdot x_1 + 1/M_{\text{aire_seco}}^2 / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot Cp_v \cdot \lambda_0 \cdot K \cdot w_{\text{agua_solH_eq}}$
 $+ 1/M_{\text{aire_seco}}^2 / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot Cp_v \cdot \lambda_0 \cdot mp_{\text{aire_sal}} \cdot x_2 + 1/M_{\text{aire_seco}}^2 / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot Cp_v \cdot Cp_{\text{aire_ent}} \cdot Tref \cdot K \cdot x_1 -$
 $1/M_{\text{aire_seco}}^2 / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot Cp_v \cdot Cp_{\text{aire_ent}} \cdot Tref \cdot K \cdot w_{\text{agua_solH_eq}} -$
 $2 \cdot mp_{\text{aire_sal}} \cdot Cp_{\text{aire_hum}}^2 / M_{\text{aire_seco}} / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot hcn \cdot A_{\text{trans_cs}} \cdot h_{\text{aire_ent}} \cdot Tref +$
 $x_2^2 \cdot Cp_v^2 / M_{\text{aire_seco}} / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot \lambda_0 -$
 $x_2^2 \cdot Cp_v^2 / M_{\text{aire_seco}} / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot h_{\text{aire_ent}} \cdot Cp_{\text{aire_hum}} \cdot Tref -$
 $2 \cdot x_2^2 \cdot Cp_v / M_{\text{aire_seco}} / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot hcn \cdot A_{\text{trans_cs}} \cdot \lambda_0 + 2 \cdot x_2^2 \cdot Cp_v / M_{\text{aire_seco}} /$
 $Cp_{\text{aire_seco}} \cdot hcn \cdot A_{\text{trans_cs}} \cdot Cp_{\text{aire_ent}} \cdot Tref + 2 \cdot x_2^2 \cdot Cp_v / M_{\text{aire_seco}} / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot$
 $hcn \cdot A_{\text{trans_cs}} \cdot h_{\text{aire_ent}} \cdot Cp_{\text{aire_hum}} \cdot Tref + hcn \cdot A_{\text{trans_cs}} \cdot Cp_v \cdot h_{\text{aire_ent}} / M_{\text{aire_seco}} \cdot$
 $Tref -$
 $Cp_v / M_{\text{aire_seco}}^2 \cdot mp_{\text{aire_sal}} \cdot h_{\text{aire_ent}} \cdot x_3 + Cp_v / M_{\text{aire_seco}}^2 \cdot mp_{\text{aire_sal}} \cdot h_{\text{aire_ent}} \cdot Tref +$
 $mp_{\text{aire_sal}}^2 \cdot Cp_{\text{aire_hum}}^2 / M_{\text{aire_seco}} / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot \lambda_0 -$
 $mp_{\text{aire_sal}}^2 \cdot Cp_{\text{aire_hum}}^2 / M_{\text{aire_seco}} / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot Cp_{\text{aire_ent}} \cdot Tref -$
 $mp_{\text{aire_sal}}^2 \cdot Cp_{\text{aire_hum}}^3 / M_{\text{aire_seco}} / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot h_{\text{aire_ent}} \cdot Tref -$
 $2 \cdot mp_{\text{aire_sal}} \cdot Cp_{\text{aire_hum}} / M_{\text{aire_seco}} / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot x_2 \cdot Cp_v \cdot \lambda_0 + 2 \cdot mp_{\text{aire_sal}} \cdot$
 $Cp_{\text{aire_hum}} / M_{\text{aire_seco}} / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot x_2 \cdot Cp_v \cdot Cp_{\text{aire_ent}} \cdot Tref + 2 \cdot mp_{\text{aire_sal}} \cdot$
 $Cp_{\text{aire_hum}}^2 / M_{\text{aire_seco}} / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot x_2 \cdot Cp_v \cdot h_{\text{aire_ent}} \cdot Tref + 2 \cdot mp_{\text{aire_sal}} \cdot Cp_{\text{aire_hum}} /$
 $M_{\text{aire_seco}} / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot hcn \cdot A_{\text{trans_cs}} \cdot \lambda_0 -$
 $2 \cdot mp_{\text{aire_sal}} \cdot Cp_{\text{aire_hum}} / M_{\text{aire_seco}} / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot hcn \cdot A_{\text{trans_cs}} \cdot Cp_{\text{aire_ent}} \cdot Tref +$
 $hcn^2 \cdot A_{\text{trans_cs}}^2 / M_{\text{aire_seco}} / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot \lambda_0 -$
 $hcn^2 \cdot A_{\text{trans_cs}}^2 / M_{\text{aire_seco}} / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot Cp_{\text{aire_ent}} \cdot Tref -$
 $hcn^2 \cdot A_{\text{trans_cs}}^2 / M_{\text{aire_seco}} / Cp_{\text{aire_seco}} \cdot h_{\text{aire_ent}} \cdot Cp_{\text{aire_hum}} \cdot Tref$

Novena columna

0

0

-

$1/M_{\text{aire_seco}}^2/Cp_{\text{aire_seco}}*Cp_v*Cp_{\text{aire_ent}}*K*x1+1/M_{\text{aire_seco}}^2/Cp_{\text{aire_seco}}*Cp_v*Cp_{\text{aire_ent}}*K*w_{\text{agua_sol}}H_{\text{eq}}+1/M_{\text{aire_seco}}^2/Cp_{\text{aire_seco}}*Cp_v*Cp_{\text{aire_ent}}*mp_{\text{aire_sal}}*x2-$

$1/M_{\text{aire_seco}}^2/Cp_{\text{aire_seco}}*Cp_v*h_{\text{aire_ent}}*Cp_{\text{aire_hum}}*K*x1+1/M_{\text{aire_seco}}^2/Cp_{\text{aire_seco}}*Cp_v*h_{\text{aire_ent}}*Cp_{\text{aire_hum}}*K*w_{\text{agua_sol}}H_{\text{eq}}+1/M_{\text{aire_seco}}^2/Cp_{\text{aire_seco}}*Cp_v*h_{\text{aire_ent}}*Cp_{\text{aire_hum}}*mp_{\text{aire_sal}}*x2+mp_{\text{aire_sal}}^2*Cp_{\text{aire_hum}}^2/M_{\text{aire_seco}}/Cp_{\text{aire_seco}}*Cp_{\text{aire_ent}}+mp_{\text{aire_sal}}^2*Cp_{\text{aire_hum}}^3/M_{\text{aire_seco}}/Cp_{\text{aire_seco}}*h_{\text{aire_ent}}-$

$2*mp_{\text{aire_sal}}*Cp_{\text{aire_hum}}/M_{\text{aire_seco}}/Cp_{\text{aire_seco}}*x2*Cp_v*Cp_{\text{aire_ent}}-$

$2*mp_{\text{aire_sal}}*Cp_{\text{aire_hum}}^2/M_{\text{aire_seco}}/Cp_{\text{aire_seco}}*x2*Cp_v*h_{\text{aire_ent}}+2*mp_{\text{aire_sal}}*Cp_{\text{aire_hum}}/M_{\text{aire_seco}}/Cp_{\text{aire_seco}}*hcn*A_{\text{trans_cs}}*Cp_{\text{aire_ent}}+2*mp_{\text{aire_sal}}*Cp_{\text{aire_hum}}^2/M_{\text{aire_seco}}/Cp_{\text{aire_seco}}*hcn*A_{\text{trans_cs}}*h_{\text{aire_ent}}+x2^2*Cp_v^2/M_{\text{aire_seco}}/Cp_{\text{aire_seco}}*Cp_{\text{aire_ent}}+x2^2*Cp_v^2/M_{\text{aire_seco}}/Cp_{\text{aire_seco}}*h_{\text{aire_ent}}*Cp_{\text{aire_hum}}-$

$2*x2^2*Cp_v/M_{\text{aire_seco}}/Cp_{\text{aire_seco}}*hcn*A_{\text{trans_cs}}*Cp_{\text{aire_ent}}-$

$2*x2^2*Cp_v/M_{\text{aire_seco}}/Cp_{\text{aire_seco}}*hcn*A_{\text{trans_cs}}*h_{\text{aire_ent}}*Cp_{\text{aire_hum}}+hcn^2*A_{\text{trans_cs}}^2/M_{\text{aire_seco}}/Cp_{\text{aire_seco}}*Cp_{\text{aire_ent}}+hcn^2*A_{\text{trans_cs}}^2/M_{\text{aire_seco}}/Cp_{\text{aire_seco}}*h_{\text{aire_ent}}*Cp_{\text{aire_hum}}$

8. Bibliografía

- Alamilla, L. 2001.** *Aspectos sobre el Uso de Secadores por Aspersión.* México : Documento Predoctoral. ENCB-IPN, 2001. pág. 81.
- Alasino, Noelia. 2009.** *Síntesis y Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.* Santa Fé : Tesis de Doctorado en Ingeniería Química. Universidad Nacional del Litoral. Facultad de Ingeniería Química, 2009.
- Allen, R y Bakker, H. 1994.** *Spray Dryer Control Based on Online Particle Size Analysis.* s.l. : Chemical Engineering Research and Design, 1994. págs. 251-254. Vol. 72 (A2).
- Alvarez, H. 2012.** *Introducción al Diseño Simultáneo de Proceso y Control. La Controlabilidad de Estado como Restricción.* España : Académica Española, 2012. pág. 220. 978-3-8465-7538-3.
- Alvarez, H, y otros. 2009.** *Metodología para la Obtención de Modelos SEMifísicos de Base Fenomenológica Aplicada a una Sulfitadora de Jugo de Caña de Azúcar.* s.l. : Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 2009. Vol. 6 (3). 1697-7912.
- Ángeles, L. 2009.** *Dimensionamiento y Simulación de un Secador por Aspersión de Nivel Piloto.* México : . Tesis de Maestría en Ciencias en Bioprocesos. México D.F. Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología., 2009.
- AOAC . 1995.** *Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of Analysis.* Washintong D.C : s.n., 1995. págs. 1058-1059.
- Atehortua, P. 2004.** *Modelado del Proceso de Producción de δ -endotoxinas de *Bacillus thuringiensis* en un Reactor Discontinuo Alimentado a Pulsos con Retención Celular Completa.* Medellín. Universidad Nacional de Colombia : Tesis de Maestría en Ingeniería Química, 2004.
- Barbosa, G, y otros. 2005.** *Food powders: physical properties, processing and functionality.* New York : Kluwer Academic, 2005.
- Bhandari, B, y otros. 1993.** *Spray drying of concentrated fruit juices.* 1993. págs. 1081-1092. Vol. 11 (5).
- Birchal, V, y otros. 2006.** *Spray Dryers: Modeling and Simulation.* s.l. : Drying Technology, 2006. págs. 359-371. Vol. 24 (3).
- Bogaerts, P, y otros. 1999.** *A New Training Method for Hybrid Models of Bioprocesses.* s.l. : Bioprocess Engineering, 1999. Vol. 21.

- Brazel, C. 1999.** *Microencapsulation: Offering solutions for the food industry.* s.l. : Cereal Foods World, 1999.
- Bylund, G. 1995.** *Milk Powder In: Dairy Processing Handbook.* Suecia : Tetra Pack Processing System AB, 1995.
- Calvo, P., Lozano, M., Hernández, T., Sánchez, J. y González, D. 2010.** *Microencapsulation of monovarietal extra-virgin olive oil: Influence of wall material in the microencapsulation process by spray dry.* Austria : European Journal of Lipid Science and Technology, 2010. Vol. 112 (8).
- Chile Potencia Alimentaria. 2010.** *Tendencias mundiales en colorantes.* s.l. : Revista Chile Potencia Alimentaria, 2010.
- Comunidad Andina. 2002.** Decisión No. 516 "Amortización de Legislaciones en Materia de Productos Cosméticos". 2002.
- Concha, J, Guevara, A y Araujo, M. 2002.** *Obtención de Polvo de Papaya de Monte (Carica Pubescens) por Atomización.* Valencia : Universidad de Carabobo, 2002. Vol. 9 (001).
- Dawson, T. 2009.** *Biosynthesis and synthesis of natural colours.* s.l. : Coloration Technology, 2009. Vol. 125 (2).
- Downham, A y Collins, P. 2000.** *Colouring our foods in the last and next millennium.* s.l. : International Journal of Food Science & Technology, 2000. Vol. 35 (1).
- Downham, A., Collins, P. 2000.** *Colouring our foods in the last and next millennium.* s.l. : International Journal of Food Science and Technology, 2000. Vol. 35.
- Duque, V. 2006.** *Plan de Manejo General de Áreas Silvestres para la Producción de frutos de Jagua o Huito (Genipa Americana)- Comunidades Negras de Vigía del Fuerte y Bojayá, en la zona del Atrato Medio, Ecoregión del Pacífico Colombiano.* Medellín : Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2006.
- Dutton, K, Thompson, S y Barraclough, B. 1997.** *The Art of Control Engineering.* s.l. : Prentice Hall, 1997.
- Echeverri, J., Salazar, D. 2004.** *Adaptación tecnológica de un proceso en escala planta piloto para obtener el Colorante de la Jagua (Genipa Americana).* Medellín : Universidad EAFIT, 2004.
- Esquivel, A. 2007.** *Análisis de Observabilidad y Controlabilidad para Sistemas Diferenciales Planos. Aplicación a un Sistema de Oscilaciones de Calcio.* s.l. : Universidad Autónoma Metropolitana. Maestría en Ciencias de la Computación, 2007. pág. 107.

European Commission. 1999. Draft Document "Cosmetic good Manufacturing Practices". [aut. libro] DG III European Commission. 1999.

Expósito, Ruth. 2010. *Quitosano, un Biopolímero con Aplicaciones en Sistemas de Liberación Controlada de Fármacos*. Madrid : Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Biológicas, 2010.

Fito, P, y otros. 2001. *Introducción al Secado de Alimentos por Aire Caliente*. Valencia : Universidad Politécnica de Valencia, 2001.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1986. *Food and Fruit-bearing forests species: Examples from Latin America*. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986.

Francis, J. 2011. US FOREST SERVICE. *Genipa americana L. Jagua, genia*. [En línea] 2011. [Citado el: 25 de 10 de 2011.] <http://fs.fed.us/global/iitf/Genipaamericana.pdf>.

Franco, M. 2004. *Caracterización parcial del pigmento rojo del fruto de la Jiotilla (Escontria chiotilla); una cactácea subexplotada*. Mexico D.F. : Tesis de Maestría en Biotecnología. Universidad Autónoma Metropolitana, 2004. pág. 103.

Gibbs, B., Kermasha, S., Alli, I., Mulligan, C. 1999. *Encapsulation in the food industri: A review*. s.l. : International J. Food Sciences and Nutrition, 1999. Vol. 50.

Gil, M, y otros. 2011. *Secado por aspersión: una alternativa para la conservación de los compuestos bioactivos y aromáticos del extracto de ajo (Allium sativum L.)*. s.l. : Revista Lasallista de investigación, 2011. Vol. 8 (4).

Gil, M., Alzate, L., Sanchez, A. y Millán, L. 2011. *Secado por aspersión: una alternativa para la conservación de los compuestos bioactivos y aromáticos del extracto de ajo (Allium sativum L.)*. s.l. : Revista Lasallista de investigación, 2011. Vol. 8 (2).

Hangos, K y Cameron, I. 2001. *Process Modelling and Model Análisis*. UK : Academic Press, 2001. pág. 543. Vol. 4.

Henson, M y Seborg, D. 1997. *Nonlinear Systems Theory. In: Nonlinear Process Control*. s.l. : Prentice Hall, 1997. págs. 111-147.

Hermann, R y Krener , A. 1977. *Nonlinear controllability and observability*. s.l. : IEEE Transactions on, 1977. Vols. AC-22 (5).

International Standart . 2007. ISO 22716, primera edicion. 2007.

Isidori, A. 1995. *Nonlinear Control Systems*. s.l. : Prentice Hall, 1995.

Kalman, R. 1960. *On the general theory of control systems*. s.l. : Proceedings of First IFAC World Congress, 1960.

- Klinger, W. 2000.** *Estudio de las Especies Promisoras Productoras de Colorantes en el Trapecio Amazónico.* Bogotá : Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Centro de Investigación y Desarrollo Científico, 2000.
- Land, C. 1984.** *Selection of Industrial Dryes.* 1984. págs. 53-61. Vol. 91 (5).
- Ljung, L y Glad, T. 1997.** *Modeling of dynamic systems.* s.l. : Prentice Hall, 1997.
- López, D. 2010.** *Microencapsulation of oily substances by spray drying.* La Habana : Revista Cubana de Farmacia, 2010. Vol. 44 (3).
- López, R, y otros. 2007.** *Fichas de Especies no Maderables del Corregimiento de Tarapacá.* Amazonas : s.n., 2007.
- Lozano, M. 2009.** *Obtención de Microencapsulados Funcionales de Zumo de Opuntia stricta Mediante Secado por Atomización.* Cartagena : Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Tesis de Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Química Industrial, 2009. pág. 68.
- Magdassi, S., Vinetsky, Y. 1996.** *Microencapsulation of oil-in-water emulsions by proteins.* New York : s.n., 1996.
- Marín, H, Munoz, D y Taborda, J. 2004.** *Evaluación y Análisis de Controlabilidad para la Operación Unitaria Intercambio Calórico como una Aproximación a la Integración Diseño-Control.* Medellín : Tesis de Grado Ingeniería Química e Ingeniería de Control. Universidad Nacional Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Procesos y Energía, 2004. pág. 135.
- Masters, K. 1985.** *Spray drying Handbook.* London : Longman Scientific & Technical, 1985. 0-7114-5805-7.
- Melo, C. 1971.** *Estado Dentrológico e Determinação das Características Físicas e Mecánicas do Genipapo — Genipa americana L.* s.l. : Brasil Floristal, 1971.
- Ministerio de Salud. 2002.** aplicación del Sistema de Análisis de Peligros y Puntos de Control Crítico- Haccp en las fábricas de alimentos y se reglamenta el proceso de certificación. *Decreto Número 60 de 2002.* Bogotá : s.n., 2002.
- Miravet, G. 2009.** *Secado por Atomización de zumo de granada.* Cartagena : Universidad Politécnica de Cartagena. Maestría en ingeniería Ambiental y Procesos Químicos y Biotecnológicos, 2009. pág. 152.
- Montesinos, J. 1998.** Modelización de Procesos Biológicos. [aut. libro] F, López, J. Godia. *Ingeniería Bioquímica.* España : Síntesis, 1998.
- Mosquera, L. 2010.** *Influencia de la Humedad y de la Adición de Solutos (Maltodextrina o Goma Arábiga) en las Propiedades Físicoquímicas de Borojé y Fresa en Polvo.*

Valencia : Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Tecnología de Alimentos, 2010. pág. 219.

Mujundar, A. 2000. Dryers for particle solids, slurries and sheet-form materials. *Practical Guide to Industrial Drying: Equipment and New Developments*. Thailand : Devahastin S, 2000, págs. 37-61.

Nations, Food and Agriculture Organization of the United. 1986. *Food and Fruit-bearing forest species: Examples from Latin America*. Rome : Food and Agriculture Organization of the United nations, 1986.

Nava, J, y otros. 2002. *Robustness of a proportional-integral with feedforward action control in a plant pilot spray dryer*. s.l. : Chemical Engineering Journal, 2002. págs. 47-51. Vol. 86 (1).

Nonhebel, G y Moss, A. 2002. *El secado de los sólidos en la industria química*. s.l. : Reverté, 2002.

Oakley, D. 2004. *Spray Dryer Modeling in Theory and Practice*. UK : Drying Technology, 2004. págs. 1371-1402. Vol. 22 (60).

Ochoa, S. 2005. *Metodología para la Integración Diseño- Control en el Espacio de Estados*. Medellín : Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Procesos y Energía, 2005. pág. 162.

Ogata, K. 1996. *Sistemad de Control en Tiempo Discreto*. Segunda Edición. Mexico : Prentice Hall, 1996. págs. 293-350.

Pedroza, R. 2002. *Alimentos Microencapsulados: Particularidades de los Procesos para la Microencapsulación de Alimentos para Larvas de Especies Acuicolas*. Mexico : s.n., 2002.

Pérez, J y Farías, F. 1995. *Modelling and control of a spray dryer: a simulation study*. s.l. : Food Control, 1995. págs. 219-227. Vol. 6 (4).

Perry, J. 1963. *Chemical Engineers Handbook*. Fourth edition. s.l. : Mc. Graw Hill, 1963.

Pilatowsky, I. 2002. PSICROMETRÍA, METODOS DE HUMIDIFICACION Y DEHUMIDIFICACION Y SUS APLICACIONES EN EL DISEÑO ARQUITECTÓNICO. Guadalajara : Universidad Nacional Autónoma de Mexico. Centro de Investigación en Energía, 2002.

Puigjaner, L, y otros. 2006. Diseño y Planificación de la Producción de Plantas Flexibles. *Estrategias de Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos*. Madrid : Síntesis, 2006, pág. 383.

Ramos, A, y otros. 2010. *Modelos matemáticos de optimización*. Madrid : Universidad Pontificia Icai, 2010.

Rivera, M. 2010. [En línea] Universidad Iberoamericana Ciudad de México, 2010. [Citado el: 15 de 02 de 2010.] http://200.13.98.241/~martin/dip/tareas/sesion_1.pdf.

Roche, O. 2005. *Modelado Matemático de la Célula Cardíaca*. Universidad Simón Bolívar : Tesis Doctoral en Ingeniería, 2005.

Roma, L. 1996. *Diseño de una Torre de Secado por Asperción (Spray Dryer)*. Guatemala : Universidad de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1996. pág. 84.

Shabde, V y Hoo, K. 2007. *Designing an Optimum Controller for a Spray Drying Process that Produces Micro-particles*. s.l. : Control Applications, IEEE Multi-conference on Systems and Control, 2007. págs. 868-873.

Snow, R. 2003. *Spray Dryers. A Guide to Performance Evaluation*. New York : American Institute of Chemical Engineers, 2003.

Sontag, E. 1998. *Mathematical control theory*. New York : Springer, 1998.

Straatsma, J, y otros. 1999. *Spray drying of food products: 1. Simulation model*. s.l. : Journal of Food Engineering , 1999. págs. 67-72. Vol. 42.

Sutil, M. 2011. *Diseño Simultáneo de Procesos y Sistemas de Control Predictivo Mediante Indices de Controlabilidad Basados en Normas*. Salamanca : Tesis de Doctorado. Universidad de Salamanca, 2011.

Thies, C. 1996. *A survey of Microencapsulation processes*. New York : s.n., 1996.

Thompson, I. 2009. promonegocios. [En línea] 2009. [Citado el: 27 de 04 de 2012.] <http://www.promonegocios.net/mercadotecnia/producto-definicion-concepto.html>.

Treybal, R. 1980. *Mass- Transfer Operations*. s.l. : McGraw-Hill, 1980. 0-07-065176-0.

Vehring, R. 2008. *Pharmaceutical Particle Engineering via Spray Drying*. s.l. : Pharmaceutical Research, 2008. pág. 1022. Vol. 25 (5).

Westergaard, V. 2004. *Tecnología de la Leche en Polvo. Evaporación y Secado por Atomización*. Copenhague : Niro A/S, 2004. pág. 349.

Yáñez, J, y otros. 2005. *Aplicaciones Biotecnológicas de la Microencapsulación*. Mexico : Mundo Alimentario, 2005. págs. 24-30.

Yang, C y Atallah, W. 1985. *Effect of 4 drying methods on the quality of intermediate moisture lowbush blueberries*. 1985. págs. 1233-1237. Vol. 50 (5).

Yanza, E. 2003. *Diseño de un Secador Por Atomización a Nivel Piloto para Jugo Concentrado de Tomate de Árbol*. Manizales : Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Facultad De Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Química, 2003.

Yongsawatdigul, J y Gunasekaran, S. 1996. *Microwave-vacuum drying of cranberries 2 Quality evaluation.* 1996. págs. 145-146. Vol. 20 (2).

Yousefi , S, Emam-Djomeh , Z y Mousavi, S. 2011. *Effect of carrier type and spray drying on the physicochemical properties of powdered and reconstituted pomegranate juice (Punica Granatum L.).* s.l. : Journal Food Science Technology, 2011. págs. 677–684. Vol. 48(6).