



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN



3  
2eje

**"ESTUDIO DEL TRANSPORTE SIMULTANEO DE  
CALOR Y MASA EN EL SECADO POR ASPERSION"**

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERA EN ALIMENTOS  
P R E S E N T A :  
PATRICIA CARRERA RIVA PALACIO

ASESOR: DR. JOSE LUIS ARJONA ROMAN

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1994

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLAN  
ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



Departamento de  
Exámenes Profesionales

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

Estudio del transporte simultáneo de calor y masa  
en el secado por aspersión.

que presenta la pasante: Patricia Carrera Riva Palacio  
con número de cuenta: 8754233-8 para obtener el TITULO de:  
Ingeniera en Alimentos

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 6 de Octubre de 1993

PRESIDENTE Dr. Alberto Tecante Coronel

VOCAL M. en C. Mg. Llena Vargas Ugalde

SECRETARIO Dr. José Luis Arjona Román

PRIMER SUPLENTE A. Rosalía Meléndez Pérez

SEGUNDO SUPLENTE M. en C. Ricardo P. Hernández García

4/10/94

*[Firmas manuscritas]*

**A MI MADRE:**

**Por su ejemplo, esfuerzo, amor y dedicación,  
y por todo lo que las palabras no pueden expresar.  
Gracias.**

**A LA MEMORIA DE MI PADRE.**

# INDICE GENERAL

	Página
Indice	i
Indice de figuras	ii
Indice de cuadros	iii
Nomenclatura	iv
Introducción	1
Objetivos	3
Capítulo 1 Generalidades	4
1.1 Transferencia de calor	5
1.2 Transferencia de masa	7
1.3 Teoría de secado	8
1.4 Secado por aspersión	12
Capítulo 2 Desarrollo metodológico	22
2.1 Equipo y materiales	22
2.2 Métodos	24
2.3 Desarrollo metodológico	28
Capítulo 3 Análisis de resultados	42
3.1 Primera etapa	44
3.2 Segunda etapa	48
3.3 Tercera etapa	51
3.3.1 Perfiles de temperatura y humedad	51
3.3.2 Coeficientes de transferencia de calor	61
3.3.3 Coeficientes de transferencia de masa	73
3.3.4 Evaluación de tiempos de secado	78
3.3.5 Relación de números adimensionales	83
Capítulo 4 Método de predicción de condiciones operacionales en el secado por aspersión	89
4.1 Algoritmo del método de predicción	91
4.2 Verificación del método de predicción	95
Conclusiones y recomendaciones	100
Apéndice Programa del método de predicción de condiciones operacionales en el secado por aspersión	106
Bibliografía	109

## INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Curva de humedad de equilibrio	9
2	Curva de secado	9
3	Funcionamiento de secador típico y partes que lo componen	13
4	Secador con sistema en paralelo	15
5	Secador con sistema en contra-corriente	15
6	Secador con sistema de flujo mixto	15
7	Gráfica Nu VS Re (16)	20
8	Balances de materia y energía en un secador por aspersión	20
9	Niro Atomizer serie Minor	23
10	Estructura-soporte de termopares	26
11	Cuadro metodológico Primer etapa	29
12	Cuadro metodológico Segunda etapa	30
13	Cuadro metodológico Tercer etapa	31
14	Posiciones de termopares durante el secado por aspersión de huevo	35
15	Posiciones de termopares dentro de la cámara de secado	37
16	Posiciones de termopares fuera de la cámara de secado	37
17	h de Balances	43
18	h de No. Adimensionales	43
19	Eficiencia térmica global en función de $Tg_1$	45
20	Velocidad de secado ( $dw/dt_B$ ) VS $Tg_1$	45
21	Velocidad de secado ( $dw/dt_B$ ) VS $h_B$	46
22	Velocidad de secado ( $dw/dt_N$ ) VS $h_N$	46
23	Perfil de temperaturas del secado de huevo	50
24	Coefficientes de transferencia de calor durante el secado de huevo	50
25	Perfil de temperaturas de bulbo seco para agua a 200°C	54
26	Perfil de temperaturas de bulbo seco para agua a 160°C	54
27	Perfil de temperaturas de bulbo seco para sal a 180°C	55
28	Perfil de temperaturas de bulbo húmedo para agua a 200°C	55
29	Perfil de temperaturas de bulbo húmedo para agua a 160°C	56
30	Perfil de temperaturas de bulbo húmedo para sal a 180°C	58
31	Zonas de secado en la cámara de secado	60
32	Perfil de humedades absolutas para agua a 200°C	62
33	Perfil de densidad del aire para agua a 200°C	62
34	Diferencia de entalpías para agua a 200°C	64
35	Calor puntual para agua a 200°C	64
36	Coefficientes de transferencia de calor para agua a 200°C	67
37	Velocidad de secado para agua a 200°C	67
38	Coefficientes de transferencia de masa para agua a 200°C	75
39	Coefficientes de transferencia de masa en función al balance en la gota para agua a 200°C	75
40	Distancia radial $R_{max}$	81
41	Curva de secado para sal 180°C Línea 1	81
42	Nu VS Re para los tres ensayos	85
43	Nu VS $Re^{0.5} Pr^{0.33}$ para los tres ensayos	87
44	Nu VS $Re^{0.5} Pr^{0.33}$ global	87

## INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Coefficientes $h_B$ y $h_N$ variando tensión superficial y velocidad de rotación	42
2	Resultados de análisis estadísticos para $h_B$ y $h_N$	44
3	Coefficientes de transferencia de calor para huevo variando únicamente $T_{g1}$	48
4	Coefficientes de variación para $T_g$ y $T_w$	52
5	Temperaturas promedio de bulbo seco y bulbo húmedo para agua a 200°C	52
6	Temperaturas promedio de bulbo seco y bulbo húmedo para agua a 180°C	53
7	Temperaturas promedio de bulbo seco y bulbo húmedo para sal a 180°C	53
8	Decremento de $T_g$ en algunas posiciones de la cámara de secado	57
9	Resultados de análisis estadísticos para $T_g$ y $T_w$	58
10	Intervalo de coeficientes de transferencia de calor para cada ensayo	66
11	Distribución de tamaño de las gotas esparcidas en cada ensayo	68
12	Coefficientes de transferencia de calor según Toledo	68
13	Números de Reynolds y Nusselt para cada uno de los ensayos según Leniger	69
14	Coefficientes de transferencia de calor según Leniger	70
15	Números de Nusselt según Marshall para cada ensayo	70
16	Volumen de cada grupo de gotas esparcidas	71
17	Número de gotas de cada grupo para agua y solución salina	71
18	Area total de las gotas esparcidas para agua y solución salina	72
19	Comparación de coeficientes de transferencia de calor	73
20	Intervalo de los coeficientes de transferencia de masa	77
21	Variables implicadas para la determinación del tiempo de secado en el período constante para cada ensayo	80
22	Tiempos de trayectoria y de secado para cada ensayo	80
23	Intervalo de los números adimensionales para cada ensayo	84
24	Regresión lineal de relaciones adimensionales	88
25	Parámetros a introducir en el método de predicción de condiciones operacionales	95
26	Parámetros resultantes del método de predicción de condiciones operacionales	96
27	Comparación de parámetros obtenidos mediante el programa y los obtenidos experimentalmente	97

## NOMENCLATURA

a	=	altura de apertura del disco atomizador	m
A	=	área de transferencia de calor o de masa	m <sup>2</sup>
A	=	área de la superficie del sólido	m <sup>2</sup>
A	=	área donde se determina la velocidad del aire	m <sup>2</sup>
b'	=	ancho de la hendidura anular del orificio del aire	m
c <sub>a</sub>	=	concentración de A	kg/m <sup>3</sup>
C <sub>s</sub>	=	calor húmedo	kcal/kg °C
C <sub>p</sub>	=	capacidad calorífica	kcal/kg °C
C <sub>pa</sub>	=	capacidad calorífica del aire	kcal/kg °C
C <sub>pL</sub>	=	capacidad calorífica del líquido	kcal/kg °C
C <sub>ps</sub>	=	capacidad calorífica del sólido	kcal/kg °C
d	=	diámetro del disco atomizador	m
d Q/d t	=	cantidad de calor por unidad de tiempo	kcal/h
dw/dt	=	velocidad de secado	kg/h
D	=	diámetro de la gota	m
Dc	=	diámetro de la gota cuando alcanza el contenido crítico de humedad	m
Dm	=	diámetro máximo de la gota	m
Dvs	=	sauter medio o diámetro medio de la gota	m
β	=	difusividad	m <sup>2</sup> /s
β <sub>ab</sub>	=	difusividad molecular de la molécula A en B	m <sup>2</sup> /s
g	=	constante gravitacional	m/ s <sup>2</sup>
G	=	gasto másico de alimentación	kg/h
G <sub>a</sub>	=	gasto volumétrico de alimentación	m <sup>3</sup> /h
G <sub>s</sub>	=	cantidad de aire seco	kg       aire seco/h
h	=	coeficiente de transferencia de calor	kcal/h m <sup>2</sup> °C
h <sub>B</sub>	=	coeficiente de transferencia de calor obtenido con base en balances de materia y energía	kcal/h m <sup>2</sup> °C
h <sub>N</sub>	=	coeficiente de transferencia de calor obtenido con base en números adimensionales	kcal/h m <sup>2</sup> °C
H <sub>g</sub>	=	entalpía de aire evaluada a la temperatura de bulbo seco	kcal/kg
H <sub>s</sub>	=	entalpía de sólido	kcal/kg
H <sub>w</sub>	=	entalpía de aire evaluada a la temperatura de bulbo húmedo	kcal/kg
k	=	conductividad térmica	kcal/h m °C
k <sub>a</sub>	=	conductividad térmica del aire evaluado a la temperatura de bulbo seco	kcal/h m °C
k <sub>f</sub>	=	conductividad térmica del aire evaluada a la temperatura de bulbo húmedo	kcal/h m °C
k <sub>s</sub>	=	conductividad térmica del sólido	kcal/h m °C
k	=	coeficiente de transferencia de masa	kg/m <sup>2</sup> h Pa
k <sub>c</sub>	=	coeficiente de transferencia de masa (con concentraciones)	kg/m <sup>2</sup> h Pa
L	=	perímetro mojado	m
M <sub>a</sub>	=	masa del componente a	kg
M <sub>b</sub>	=	masa del componente b	kg
M <sub>s</sub>	=	masa de sólidos secos	kg
n	=	no. de orificios del disco atomizador	
N	=	velocidad rotacional del disco atomizador	rpm

NAz	=	flujo molar del componente a en la dirección z	mol kg/s m <sup>2</sup>
Nu	=	número de Nusselt	
Q	=	cantidad de calor	kcal/h
p	=	presión parcial	Pa
p <sup>a</sup>	=	presión de vapor	Pa
pp	=	presión parcial evaluada a la temperatura de bulbo seco	Pa
pw	=	presión parcial evaluada a la temperatura de bulbo húmedo	Pa
P	=	presión total del sistema	Pa
Pr	=	número de Prandtl	
r	=	radio de la gota	m
r	=	radio del tubo capilar	m
rc	=	radio de la partícula seca	m
r	=	radio del disco atomizador	m
R	=	distancia radial del centro de la cámara	m
Rc	=	radio de la cámara de secado	m
Rmax	=	distancia radial que involucra el 99% de las gotas atomizadas, las cuales caen a 3 ft (91.4 cm) del atomizador	m
R10	=	distancia radial del 50% del esparcido arrojado antes de caer 10 in(25.4 cm) por abajo del disco atomizador	m
Rgg	=	distancia radial que involucra el 99% del esparcido	m
β	=	constante general de los gases	m <sup>3</sup> atm/ molkg°C
Re	=	número de Reynolds	
sf	=	cantidad de sólidos en la alimentación	%
Sc	=	número de Schmidt	
SH	=	cantidad de sólido húmedo	kg
Sh	=	número de Sherwood	
Ss	=	cantidad de sólido seco	kg
t	=	tiempo de la trayectoria de la gota a la pared de la cámara	s
t <sub>c</sub>	=	tiempo de secado en el periodo constante	s
t <sub>d</sub>	=	tiempo de secado en el periodo decreciente	s
t <sub>t</sub>	=	tiempo total de secado	s
T	=	temperatura	°C
T <sub>c</sub>	=	temperatura del aire cuando la gota alcanza la humedad crítica	°C
Tg	=	temperatura de bulbo seco	°C
Tg1	=	temperatura de entrada del aire	°C
Tg2	=	temperatura de salida del aire	°C
To	=	temperatura de referencia	°C
Ts	=	temperatura de la superficie de la gota	°C
Tss	=	temperatura del sólido	°C
Tss1	=	temperatura del sólido a la entrada del secador	°C
Tss2	=	temperatura del sólido a la salida del secador	°C
Tw	=	temperatura de bulbo húmedo	°C
U	=	coeficiente global de transferencia de calor	kcal/h m <sup>2</sup> °C
v	=	velocidad del aire	m/h
v <sub>i</sub>	=	velocidad inducida por el aire (velocidad a la salida de la cámara)	m/h
vo	=	velocidad a la que sale la gota del atomizador	m/h
vp	=	velocidad de partícula	m/h
vr	=	velocidad relativa entre aire y partícula	m/h
v/v <sub>o</sub>	=	velocidad radial	m/h
Vh	=	volumen húmedo	m <sup>3</sup> /kg

w	=	velocidad angular	rad/s
x	=	humedad en base húmeda	kg agua/kg sól. húmedo
X	=	humedad final	kg agua/kg sólido seco
X	=	humedad en base seca	kg agua/kg sólido seco
Xc	=	humedad crítica	kg agua/kg sólido seco
Xp	=	humedad remanente en la gota	kg agua/kg sólido seco
Xr	=	humedad removida de la gota	kg agua/kg sólido seco
Xo	=	humedad inicial	kg agua/kg sólido seco
X1	=	humedad inicial	kg agua/kg sólido seco
X2	=	humedad final	kg agua/kg sólido seco
X*	=	humedad de equilibrio	kg agua/kg sólido seco
Y	=	humedad absoluta	kg agua/kg aire seco
Yc	=	humedad del aire cuando la gota alcanza la humedad crítica	kg agua/kg aire seco
Ys	=	humedad de saturación	kg agua/kg aire seco
Yr	=	humedad relativa	%
Y'1	=	humedad inicial	kg agua/kg aire seco
Y'2	=	humedad final	kg agua/kg aire seco
z	=	distancia de transferencia	m
z	=	altura que alcanza el líquido en el capilar	m
$\gamma$	=	tensión superficial del líquido	Newton/m
$\eta$	=	eficiencia térmica global	%
$\lambda$	=	calor latente	kcal/kg
$\lambda_0$	=	calor latente evaluado a la temperatura de referencia	kcal/kg
$\lambda_w$	=	calor latente evaluado a la temperatura de bulbo húmedo	kcal/kg
$\mu$	=	viscosidad del líquido	kg/m s
$\mu_a$	=	viscosidad del aire	kg/m s
$\rho$	=	densidad del líquido	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_a$	=	densidad del aire	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_H$	=	densidad del agua	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_s$	=	densidad del sólido seco	kg/m <sup>3</sup>

## INTRODUCCION

En la conservación de los alimentos, una de las operaciones más empleadas es el secado, en el cual se reduce la actividad de agua de éstos, buscando así alargar su vida de anaquel. Dentro de los métodos de secado, uno de los más importantes es el secado por aspersión, ya que es altamente recomendable para soluciones, emulsiones y suspensiones, así como cualquier otro líquido que sea bombeable y sensible al calor.

Dentro de las ventajas que presentan los productos deshidratados mediante este proceso, se encuentran la conservación durante un tiempo mayor de sus atributos de calidad, el poder ser almacenados y transportados con mayor facilidad y menor costo evitando por ejemplo la refrigeración, y reduciendo el espacio de almacenamiento necesario, además que la operación es, en términos generales, eficaz, económica y rápida.(20, 34)

Una de las principales desventajas que presenta esta operación, es que requiere de pruebas previas para encontrar las mejores condiciones de operación con las cuales se debe realizar el secado por aspersión del fluido seleccionado.(20)

El secado por aspersión es una operación que se basa en la atomización del fluido alimentado en forma de pequeñas gotas, las cuales entran en contacto con aire caliente. Mediante este aire caliente, la humedad contenida en las gotas se evapora para finalmente obtener partículas secas. Cada una de las etapas involucradas en esta operación tienen efecto sobre las características finales del producto, tales como tamaño de las partículas, densidad, contenido de humedad, retención de aromas y sabores, etc. Es por esta razón que es de vital importancia conocer a fondo la manera en que se realiza esta operación, y los fenómenos de intercambio involucrados.

En el proceso de secado se tiene una transferencia simultánea de calor y masa entre las gotas y el aire, y esta transferencia es la que rige toda la operación. El objetivo principal de este trabajo es estudiar experimentalmente estos mecanismos de intercambio y así poder tener un mayor control sobre él.(20)

Existen varios factores que afectan la velocidad de secado, la cual determinará, aunada a otros parámetros, la eficiencia de la operación. Algunos de estos factores son los perfiles de temperatura, los perfiles de humedad, la distribución de tamaños de las gotas asperjadas, la trayectoria de las gotas, y los coeficientes de transferencia de calor y masa.

Para que el secado por aspersión sea exitoso, el tiempo de viaje de la gota hacia la pared de la cámara debe ser mayor al tiempo en el que se remueve la cantidad de agua libre que ésta posee, surgiendo de ahí la necesidad de evaluar estos tiempos.

Para conocer los tiempos de secado es necesario conocer el coeficiente de transferencia de calor, el cual ha sido el motivo de diversas investigaciones de las cuales han resultado diferentes relaciones y ecuaciones que lo definen. Sin embargo, todas han sido establecidas bajo ciertas consideraciones que en su mayoría, las convierten en expresiones idealizadas. Esto es causa de la dificultad que presenta el estudio del fenómeno, dadas las condiciones en las que se realiza, es decir, tiempos de décimas de segundo, gotas con diámetros de micras y la hermeticidad de la cámara de secado. Así, en este trabajo se proponen algunos métodos para evitar, al máximo posible, estas limitaciones propias de la operación.

Ahora bien, diversos parámetros de índole compleja se encuentran involucrados en el secado por aspersión, tales como las características propias del fluido que se desea alimentar, las características propias del secador, y las variables de operación, sin perder de vista las características deseadas sobre el producto final. Dentro de las variables de operación se encuentran la temperatura de entrada del aire, el gasto volumétrico de alimentación, el gasto de aire seco, la velocidad del aire, y las características del sistema de atomización empleado. Conociendo el efecto de cada uno de los parámetros mencionados sobre los tiempos de secado, los tiempos de viaje y la distribución de tamaño de las gotas es posible desarrollar un método de predicción de las mejores condiciones de operación con las que se deba realizar el secado por aspersión.

## OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo fue estudiar experimentalmente el transporte simultáneo de calor y masa durante el proceso de secado por aspersión de un fluido, que permitiera finalmente proponer un método de predicción de las condiciones operacionales recomendadas para el secado por atomización de cualquier fluido.

Los objetivos particulares fueron:

- a) Analizar la transferencia de calor y masa dentro de un secador por aspersión.

Para realizar este objetivo se dividió el trabajo en tres etapas. Dentro de la primera se estudió experimentalmente el efecto que tiene la velocidad de rotación del disco atomizador ( $N$ ), la tensión superficial ( $\gamma$ ), y la temperatura de entrada del aire ( $T_{g1}$ ) sobre el coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ), la velocidad de secado ( $dw/dt$ ) y la eficiencia térmica global ( $\eta$ ) en el período de velocidad constante durante el secado por aspersión de una solución salina.

Dentro de la segunda etapa se trabajó sobre el efecto del diámetro de partícula ( $D$ ), temperatura de entrada del aire ( $T_{g1}$ ), y velocidades relativas aire-partícula ( $v_r$ ) sobre la transferencia de calor y masa durante el secado por aspersión de huevo, mediante modelización para encontrar la relación entre los tiempos de secado del modelo y en el secador por aspersión.

Y la última etapa se enfocó al análisis de los perfiles de temperatura, humedad, y coeficientes de transferencia de calor y masa dentro de la cámara de secado.

- b) Comprobar la existencia de los dos períodos de secado (de velocidad constante y decreciente), en la deshidratación por atomización.
- c) Proponer un método para predecir las condiciones operacionales del secado por aspersión de un alimento, con base en resultado del análisis realizado.

# CAPITULO 1

## GENERALIDADES

En las industrias de proceso existen muchas semejanzas en cuanto a la forma en que los materiales de alimentación se modifican para obtener los materiales finales de productos químicos o biológicos. Es posible clasificar estos procesos químicos, físicos o biológicos, en una serie de etapas individuales y diferentes conocidas como operaciones unitarias.

Las operaciones unitarias estudian principalmente la transferencia y los cambios de energía, flujos y cambios de materiales que se llevan a cabo por medios físicos y/o fisicoquímicos. Algunas operaciones unitarias son por ejemplo el secado, la evaporación, la destilación, la absorción, la extracción líquido-líquido, y las separaciones mecánico-físicas entre otras (12). Sin embargo, muchas de estas operaciones unitarias tienen ciertos principios básicos comunes, por lo tanto, es conveniente establecer una clasificación más fundamental de los procesos de transporte.

La clasificación de los procesos fundamentales de transporte es la siguiente (12):

1. **Transferencia de momento:** se refiere a la que se presenta en los materiales en movimiento, como en operaciones unitarias de flujo de fluidos y sedimentación, entre otras.
2. **Transferencia de calor:** se refiere al flujo de calor de un lugar a otro, como en operaciones unitarias tales como secado y evaporación, entre otras.
3. **Transferencia de masa:** se refiere a la que se presenta el transporte de masa de una fase a otra fase diferente; el mecanismo básico es el mismo ya sea que las fases sean gaseosas, sólidas o líquidas, como en operaciones unitarias tales como destilación, secado y absorción, entre otras.

Existen varios principios elementales de ingeniería, técnicas matemáticas y leyes de física y química que son fundamentales para el estudio de los principios de transferencia de momento, calor y masa. Estos serán mencionados brevemente a continuación.

**Conservación de la materia:** una de las leyes básicas de física es la ley de conservación de la materia, que de forma simple enuncia que la masa no puede crearse ni destruirse, por consiguiente, la masa total de todos los materiales que entran a un proceso debe ser igual a la masa total de todos los materiales que salen del mismo, más la masa de los materiales que se acumulan o permanecen en el proceso.(30)

**Conservación de la energía:** de manera similar a la conservación de materia, la ley de conservación de energía, enuncia que toda la energía que entra a un proceso es igual a la que sale más la remanente en el proceso. La energía puede manifestarse de varias maneras, tales como la entalpía la energía cinética, la energía potencial, entre otras. Sin embargo, en muchos casos de ingeniería de proceso, que casi siempre se llevan a cabo a presión constante sólo es necesario tomar en cuenta la entalpía de los materiales, llamándose a esto balance de calor.(30)

**Ley de los gases ideales:** un gas ideal se define como aquel que obedece leyes simples. Las moléculas de un gas ideal se consideran como esferas rígidas que no ocupan volumen por sí mismas y que no se afectan mutuamente. Ningún gas real obedece estas leyes con exactitud, pero a temperaturas y presiones normales de no más de varias atmósferas, la ley del gas ideal proporciona respuestas con bastante aproximación, y por consiguiente, con precisión suficiente para cálculos de ingeniería. La ley del gas ideal de Boyle indica que el

volumen de un gas es directamente proporcional a la temperatura absoluta e inversamente proporcional a la presión absoluta. La ley de Dalton se aplica para mezclas de gases ideales, y enuncia que la presión total de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales individuales.(12)

Ecuaciones adimensionales y unidades consistentes: las ecuaciones que se han deducido matemáticamente a partir de leyes fundamentales constan de términos que tienen las mismas dimensiones, debido a que se utilizan estas mismas leyes fundamentales para definir las magnitudes secundarias. Las ecuaciones cuyos términos poseen todas las mismas dimensiones se llaman adimensionales o dimensionalmente homogéneas. Una ecuación dimensionalmente homogénea puede utilizarse con cualquier conjunto de unidades, con tal de que se usen siempre las mismas unidades para las magnitudes fundamentales. Las unidades que cumplen esta condición reciben el nombre de unidades consistentes.(21)

Análisis dimensional: muchos problemas de ingeniería no pueden resolverse totalmente por métodos teóricos o matemáticos. Problemas de este tipo son especialmente frecuentes en flujo de fluidos, flujo de calor y flujo de masa. Una forma de atacar el problema, para el que no es posible deducir una ecuación matemática, consisten en recurrir a la experimentación. Existe un método intermedio entre el desarrollo matemático formal y el estudio experimental, que se basa en el hecho de que, si existe una ecuación teórica entre las variables que afectan a un proceso físico, dicha ecuación tiene que ser dimensionalmente homogénea. Teniendo en cuenta esta condición, se pueden reunir varios factores en un número menor de grupos adimensionales de las variables. Los valores numéricos de estos grupos son, en un caso determinado, independientes del sistema dimensional utilizado, y en la ecuación final intervienen los grupos como tales en lugar de los factores por separado. El análisis dimensional no conduce a una ecuación numérica y es preciso recurrir a la experimentación para completar la solución del problema, pero es muy valioso para orientar dicha experimentación, y resulta de gran utilidad para señalar el camino a seguir con el fin de correlacionar los datos experimentales en una forma adecuada para su utilización en ingeniería. El análisis dimensional no se puede aplicar si no se tiene un conocimiento suficiente de los aspectos físicos del problema para poder decidir qué variables son importantes en cada caso y qué leyes básicas tienen que intervenir.(21)

A continuación se presenta una explicación detallada de la operación unitaria que compete a este estudio, el secado, donde se ven involucradas simultáneamente la transferencia de calor y la transferencia de masa.

## 1.1 Transferencia de calor

La transferencia de calor es común en muchos procesos y puede realizarse por medio de uno o más de los tres tipos de transferencia: conducción, convección o radiación.

1. **Conducción:** es la transferencia de calor de una parte a otra del mismo cuerpo, o de un cuerpo a otro que esté en contacto físico con él, sin un desplazamiento apreciable de las partículas del cuerpo.
2. **Convección:** implica el transporte de calor a través de una fase y el mezclado de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido. Existen dos tipos de convección, la natural, donde el movimiento del fluido se debe exclusivamente a diferencias de densidad como resultado de diferencias de temperatura, y convección forzada, donde el movimiento se produce por medios mecánicos.

3. Radiación: es la transferencia de calor de un cuerpo a otro que no requiere de un medio físico para la transferencia, no necesita estar en contacto, sino que se realiza por el movimiento ondulatorio a través del espacio.

La transferencia de calor por conducción obedece a una ecuación básica expresada como la Ley de Fourier:

$$dQ / dt = -k A (dT / dx)$$

La conductividad térmica es una constante surgida en la ley de Fourier, y es una propiedad característica del material por el cual fluye el calor. La conductividad térmica varía con la temperatura, los gases tienen los valores más bajos, los líquidos valores intermedios y los sólidos los más altos.(30)

La transferencia de calor puede realizarse en estado estable o en estado inestable, determinado esto según el tipo de flujo de calor que se presente. A continuación se presenta una ecuación tridimensional de estado inestable para sólidos o fluidos estáticos:

$$c \rho (\delta T / \delta t) = \delta / \delta x [k (dT / dx)] + \delta / \delta y [k (dT / dx)] + \delta / \delta z [k (dT / dx)] + q'$$

En estado estable, el flujo de calor es constante por lo que en la ley de Fourier el término  $dQ / dt$  se puede reemplazar con  $q$  o  $Q/t$  y  $\delta T / \delta t$  es cero en la ecuación tridimensional. El área es muy importante y se puede trabajar en coordenadas rectangulares, cilíndricas y esféricas. En estado inestable, las temperaturas de los materiales están en función tanto del tiempo como de las variables de espacio, y por lo tanto las ecuaciones a manejar son más complicadas (12), siendo por ello recomendable trabajar en estado estable siempre que sea posible.

Cuando el fluido que rodea a la superficie del sólido tiene un movimiento convectivo, natural o forzado, la velocidad de transferencia de calor del sólido al fluido o viceversa, se expresa como:

$$Q = h A \Delta T \quad [1]$$

El coeficiente  $h$  es conocido como el coeficiente convectivo de transferencia de calor, y es función de la geometría del sistema, de las propiedades del fluido, de la velocidad de flujo y de la diferencia de temperaturas. Puesto que se sabe que cuando un fluido fluye por una superficie existe una capa delgada casi estacionaria adyacente a la pared que presenta la mayor parte de la resistencia a la transferencia de calor, muchas veces  $h$  se conoce también como coeficiente de película.(12)

Hay dos métodos para expresar los coeficientes convectivos de transferencia de calor, y son relaciones adimensionales y ecuaciones empíricas. Los números adimensionales empleados son el número de Reynolds ( $Re$ ), el número de Prandtl ( $Pr$ ) y el número de Nusselt ( $Nu$ ), los cuales están definidos por las siguientes expresiones (12):

$$Nu = h D / k$$

$$Re = D v \rho / \mu$$

$$Pr = Cp \mu / k$$

Con base en estos números adimensionales se puede conocer el coeficiente convectivo de transferencia de calor, mediante la siguiente relación de los mismos:

$$Nu = \alpha (Re)^m (Pr)^n \quad [2]$$

los valores de  $\alpha$ , y de las potencias de  $m$  y  $n$  están en función de la transferencia de calor que se esté llevando a cabo.

Con frecuencia, los datos experimentales señalan coeficientes promedio de transferencia de calor basados en una diferencia de temperaturas definida arbitrariamente, pudiéndose emplear la media logarítmica o el  $\Delta T$  si éste es constante.

## 1.2 Transferencia de masa

Existe una analogía entre la transferencia de calor y la transferencia de masa. En ambos casos la causa del flujo es un gradiente. La fuerza impulsora en la transmisión de calor es el gradiente de temperaturas, mientras que en la transferencia de masa es un gradiente de concentraciones. En los dos casos el flujo por unidad de área es proporcional al gradiente. Sin embargo, la analogía no puede extenderse más debido a que el calor no es una sustancia sino un efecto energético. Esto hace que el fenómeno de transferencia de masa tenga un mayor grado de complejidad para su estudio, ya que por ejemplo cuando la materia está en movimiento, los flujos y velocidades son relativos a un estado de reposo arbitrario, que es preciso elegir previamente al cálculo de estos parámetros.(33)

La ley que define la transferencia de masa por difusión es la ley de Fick, que se expresa como:

$$N_{Az} = -D_{ab} (dc_a / dz)$$

(Ver nomenclatura en página v)

La difusividad, también conocida como coeficiente de difusión es una medida de la movilidad de difusión del componente (A) en el componente (B). El signo negativo hace hincapié en que la difusión ocurre en el sentido del decrecimiento en concentración. La difusividad es una característica de un componente y de su entorno (temperatura, presión, concentración y la naturaleza de los otros componentes).(12)

La difusividad es característica de la difusión molecular, pero en muchos casos, la velocidad de difusión es lenta y se desea una transferencia más rápida. Para lograrlo se incrementa la velocidad del fluido hasta obtener una transferencia de masa turbulenta. Cuando un fluido tiene flujo turbulento no es posible describir la velocidad real de las partículas pequeñas del fluido con la misma claridad que en el flujo laminar, sin embargo es natural que la rapidez de la transferencia de masa se trate de describir de la misma forma en que se realiza la difusión molecular, dado que para ésta la aplicación de la teoría y los resultados experimentales sí concuerdan. De aquí es donde surge la necesidad de que en lugar de emplear simplemente la difusividad, se usen los llamados coeficientes de transferencia de masa, que involucran todos los parámetros que influyen en el fenómeno de la transferencia de masa.

De esta manera, una de las formas en que se puede expresar la velocidad de transferencia de masa es:

$$N_a = k_c (c_{a1} - c_{a2})$$

donde  $k_c$  es el coeficiente de transferencia de masa. La concentración también suele definirse en términos de fracciones mol en un líquido o un gas, o bien en términos de presiones parciales en el caso de gases.(33)

Existen varios métodos para determinar los coeficientes de transferencia de masa, como son métodos experimentales, los números adimensionales, y analogías con la transferencia de calor. En el caso de los números adimensionales empleados para la transferencia de masa, son el número de Reynolds (Re), el número de Schmidt (Sc) y el número de Sherwood (Sh) principalmente. Las expresiones de cada uno de estos números adimensionales son:(12)

$$Re = D v \rho / \mu$$

$$Sc = \mu / D \rho$$

$$Sh = k D / D$$

Con base en éstos números adimensionales, y generalmente realizando analogías con la transferencia de calor, es como se llega finalmente a los coeficientes de transferencia de masa, dado que como ya se expuso anteriormente, el estudio directo de la transferencia de masa presenta mayor complejidad que el estudio de la transferencia de calor.

### 1.3 Teoría de secado

Secado es la remoción de humedad llevada a cabo comúnmente con un gas que transporta dicha humedad fuera del material que se desea secar. La humedad a retirar ejerce una presión de vapor, y su valor dependerá de la naturaleza de la humedad, las características de la sustancia que la contenga y la temperatura del sistema. De aquí surge la necesidad de definir los diferentes tipos de humedad existentes, que gráficamente se distinguen en el comportamiento de secado de un material mostrado en la Figura 1.(29)

- Contenido de humedad, base húmeda: cantidad de agua presente referida al peso total del material.
- Contenido de humedad, base seca (X): cantidad de agua presente referida al peso de los sólidos secos presentes en el material.
- Humedad de equilibrio (X<sup>\*</sup>): humedad contenida en un material cuando su presión de vapor es igual a la ejercida por el líquido en el gas secante.
- Humedad ligada: humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura.
- Humedad no ligada: humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura.
- Humedad libre: humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en el equilibrio.
- Contenido de humedad crítico (X<sub>c</sub>): es el punto que se alcanza cuando la humedad no ligada es eliminada de la sustancia.

La circulación de la humedad dentro del sólido ocurre siguiendo varios mecanismos que dependen de la estructura del sólido. Los principales son la difusión del líquido, el movimiento capilar, y el gradiente de presiones, los cuales se explican a continuación, haciendo mención que pueden presentarse en la operación de secado a diferentes etapas del proceso.

- La difusión del líquido sucede cuando en el sólido, el contenido de humedad de equilibrio está por debajo del punto de saturación atmosférica, como es el caso de las últimas etapas de secado de harinas, por ejemplo. También se efectúa este tipo de movimiento a sistemas en que la humedad y los sólidos son mutuamente solubles, como es el caso del secado de gomas, gelatinas y pastas.
- En el movimiento capilar, la humedad contenida en los intersticios del sólido se desplaza por gravedad y capilaridad, siempre y cuando existan pasadizos para un flujo continuo. En el secado, este tipo de circulación se aplica a líquidos que no están en solución y a toda humedad por encima del contenido de humedad de equilibrio a la saturación atmosférica, como sucede en polvos finos y sólidos granulares.
- Para el caso de gradiente de presiones, la humedad se desplaza por acción de la difusión de vapor a través del sólido, a condición de que se establezca un gradiente de temperatura por calentamiento, creando así un gradiente de presión de vapor. Esto ocurre en cualquier sólido donde se realice el calentamiento en una superficie y la desecación en la otra, y en donde el líquido quede aislado entre los granulos del sólido.(33)

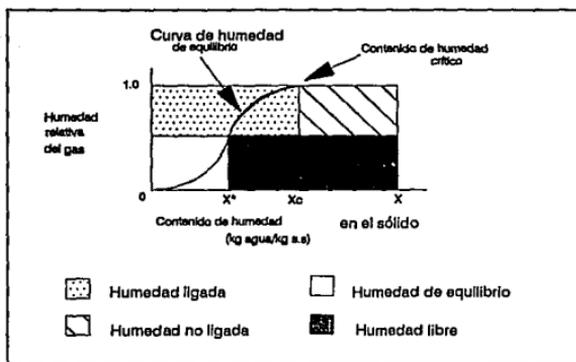


Figura 1 Curva de humedad de equilibrio

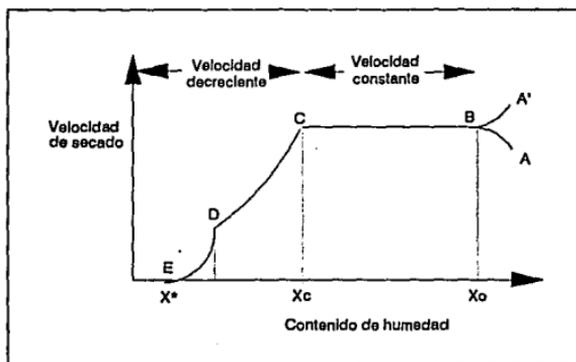


Figura 2 Curva de secado

Los métodos de secado pueden clasificarse de diferentes maneras como son el tipo de proceso, y el tipo de transferencia, entre otras. En el primer caso, estos procesos pueden ser por lotes, cuando el material se introduce en el equipo de secado y el proceso se verifica por un período de tiempo, o continuos, donde el material se añade sin interrupción al equipo de secado y se obtiene material seco con régimen continuo.

Para el segundo caso, se pueden clasificar de acuerdo a las condiciones físicas usadas para adicionar calor y extraer el vapor de agua. En la práctica, la energía necesaria para evaporar el líquido se suministra en forma de calor. La transferencia de calor se produce predominantemente por convección o por conducción, aunque se presenta radiación, más no es ésta la fuente principal. La radiación es un efecto secundario y generalmente debe tenerse en cuenta como corrección al mecanismo de transporte (convección o conducción).

El secado por conducción difiere del secado por convección. Para el primero, el sólido húmedo se coloca en un recipiente calentado externamente, que tiene una salida para eliminar el vapor. En el caso de secado por convección, el gas caliente circula sobre la superficie del sólido húmedo proporcionando los dos efectos, entregar calor y eliminar el vapor formado. (28)

En cualquier proceso de secado, con la cantidad adecuada de calor suministrado, la temperatura y la velocidad a las cuales se produce la evaporación dependen de la concentración de vapor en la atmósfera circundante. De ahí la aplicación de la psicrometría al proceso de secado. A continuación se presentan las relaciones psicrométricas comúnmente empleadas para la descripción del proceso de secado. (32)

Humedad absoluta ( $Y'$ )

$$Y' = (M_a / M_b) (p_a / P - p_a)$$

Humedad de saturación ( $Y'_s$ ): humedad de equilibrio para el gas saturado

$$Y'_s = (M_a / M_b) (p_a^* / P - p_a^*) \quad [3]$$

Humedad relativa ( $Y_r$ ): relación entre la presión parcial del vapor entre su presión de vapor

$$Y_r = (p_a / p_a^*) 100$$

Temperatura de bulbo seco del gas ( $T_g$ )

Saturación porcentual ( $\%Y'_a$ ):

$$\%Y'_a = (Y'_a / Y'_s) 100$$

Volumen húmedo ( $V_h$ ): volumen de una masa unitaria de gas seco y su vapor acompañante a la temperatura del gas y a la presión del sistema

$$V_h = [(1/29) + (Y'/18)] [(R T)/P] \quad [4]$$

Temperatura de bulbo húmedo ( $T_w$ ): temperatura límite de enfriamiento alcanzada por una pequeña masa de líquido en contacto con un masa mucho mayor de gas húmedo.

$$p_w^* - p_v = (h/k M_v \lambda_w) (T - T_w)$$

La velocidad de secado es la relación que existe entre la humedad eliminada de un material y el tiempo en que se realiza. En un secador por conducción, la velocidad de secado disminuye a medida que el material se seca. Este efecto puede ser explicado con base en la disminución de la transferencia de calor de la pared al sólido que se está secando. Para su estudio, la operación puede suponerse controlada por la transferencia de calor al material, y descrita mediante un coeficiente total de transferencia de calor desde el medio calefactor al sólido que está secando, la temperatura de este último se toma como igual a la temperatura de

ebullición del líquido. Al final del secado este mecanismo deja de ser limitante, y el secado comienza a ser controlado por la velocidad de eliminación de agua desde el material, efecto que se nota más claramente por un aumento de temperatura por encima de la correspondiente a la ebullición de la solución saturada. En los secadores por conducción, éste es, en general un efecto secundario y puede ser incluido en el coeficiente total de transferencia de calor.

Por lo tanto, la velocidad de secado en un secador por conducción es en gran parte independiente de la transferencia de masa desde la sustancia. Desafortunadamente, esto no es lo mismo que decir que la velocidad de secado es independiente de las propiedades del material, pues el coeficiente de transferencia de calor depende, entre otras cosas, del material a secar.

El caso de secado por convección es distinto. El coeficiente de transferencia de calor suele ser grande y no varía mayormente durante el transcurso del secado. Ahora la limitación de la velocidad de secado está dada principalmente por el coeficiente de transferencia de masa. Este hecho nos muestra la existencia de dos regímenes de secado diferentes, conocidos como período de velocidad constante, y período de velocidad decreciente. En el primero, la operación está limitada por la transferencia de calor al material; esta transferencia es previsible y más o menos independiente de la naturaleza del material. En el período de velocidad decreciente, la limitación está dada por el coeficiente de transferencia de masa, que depende de las propiedades del material a secar, y cuyo valor no es fácilmente predecible. En la práctica, el período de velocidad decreciente implica una parte sustancial del tiempo de secado en un secador por convección. Este período de velocidad decreciente es equivalente al período de elevación de temperatura que ocurre comúnmente al final de secado por conducción.

El punto en que se produce el cambio de período de velocidad constante a velocidad decreciente, es función de la velocidad de secado que viene impuesta por las condiciones externas, y la disposición del secador, y de la transferencia de masa, que depende del material a secar. Esta transferencia de masa es función del tamaño, forma y disposición de las partículas componentes del material sólido y de la facilidad con que el vapor y el líquido puedan migrar a través de los poros y capilares del sólido a su superficie externa. (28)

En el período de velocidad constante, la superficie del sólido está totalmente cubierta por una capa de líquido y la velocidad de evaporación dependerá solamente de la velocidad de difusión del vapor (transferencia de masa) o de la intensidad de paso de calor a través de la capa límite de aire (transferencia de calor). Cuando el calor por evaporación se suministra a través de un gas caliente, se establece un equilibrio dinámico entre la velocidad de transmisión de calor al material y la velocidad de eliminación de vapor de la superficie:

$$dw/dt = [h A (T_g - T_w)]/\lambda_w = k A (p_w - p_g) \quad [5]$$

El período de velocidad decreciente puede subdividirse en el que la velocidad varía linealmente con la humedad desde el punto crítico y en el que no se cumple esta variación lineal. En el primero, la velocidad está regida por la evaporación del agua sobre la fracción de superficie mojada, estando seca al final de este período. En el segundo período, la superficie está totalmente seca, teniendo que evaluar la velocidad atendiendo al proceso de transporte de humedad desde el interior del sólido hasta la superficie, y que puede llevarse a cabo por diversos mecanismos como lo son la difusión y el flujo capilar.(30) Para este último caso, la velocidad de secado se puede definir como:

$$dw/dt = [h (T - T_w) (X_o - X)] / [\rho_s \lambda_w D (X_c - X)] \quad [6]$$

Haciendo uso de la velocidad de secado se pueden obtener curvas de secado como la indicada en la Figura 2, siendo éstas de gran utilidad para determinar el tiempo necesario para secar grandes lotes en las mismas condiciones de secado.

La curva de secado, tomando en cuenta la Figura mencionada, puede dividirse en diferentes secciones las cuales son:

- A -> Condición inicial del sólido en proceso estando más caliente que el gas secante
- A' -> Condición inicial del sólido en proceso teniendo una temperatura menor a la del medio de secado
- B -> Inicio del período de la velocidad de secado constante
- C -> Término del período de velocidad constante e inicio del período de velocidad decreciente constante
- D -> Término del período de velocidad decreciente constante e inicio del período de velocidad decreciente variable
- E -> Alcance del equilibrio en el proceso

#### 1.4 Secado por aspersión

Entre los diferentes tipos de secado se encuentra el secado por aspersión, definido como la transformación de una materia en forma líquida a forma seca, atomizándola en un medio de secado caliente. La materia puede tener la forma de solución, suspensión o pasta. El producto seco es polvo compuesto de partículas o aglomerados, dependiendo de las propiedades físicas y químicas del producto de entrada y del diseño y operación del secador.(20)

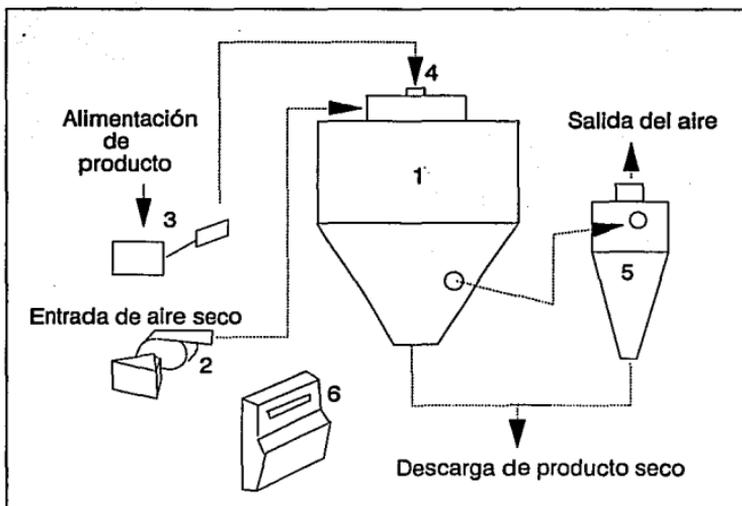
Una instalación típica de secado por aspersión consta de los componentes principales siguientes, como puede observarse en la Figura 3:

1. Cámara de secado
2. Sistema de aire caliente y distribución del aire
3. Sistema de alimentación
4. Atomizador
5. Sistema de separación de polvo
6. Instrumentación y automatización

El funcionamiento del secador (Figura 3) se inicia al bombear el fluido desde el tanque de alimentación al dispositivo atomizador colocado en el dispersor de aire sobre la cámara de secado. El aire de secado es aspirado de la atmósfera a través de un filtro por un ventilador, pasando luego al dispersor a través del calentador de aire. El líquido se atomiza en forma de pequeñas gotas que encuentran el aire caliente, el cual suministra el calor necesario para completar la evaporación del líquido logrando así la transferencia de calor y de masa. A continuación del secado en la cámara, la mayor parte del producto seco cae al fondo de la misma y pasa a un sistema de transporte neumático y de enfriamiento. Los finos, es decir las partículas con un diámetro pequeño, son arrastrados por el aire, y es necesario por lo tanto, pasar el aire a través de ciclones para separarlos.(34)

La función primordial de la atomización es crear una gran superficie en relación a la masa, dando como resultado una alta capacidad de evaporación y la producción de partículas con forma, tamaño y densidad deseadas. Para cumplir estos requisitos, se han aplicado muchas técnicas de atomización en los secadores. Sin embargo, como las más comunes pueden citarse las siguientes:

- 1.- Energía de presión como en las boquillas de presión.
- 2.- Energía cinética como en las boquilla de dos fluidos.
- 3.- Energía centrífuga como en los discos rotativos.



**Figura 3** Funcionamiento de secador típico  
y partes que lo componen

El contacto inicial entre el esprayado y el aire de secado controla la evaporación y las temperaturas del producto dentro de la cámara de secado. El gas utilizado como medio de arrastre de humedad, puede suministrarse en tres diferentes maneras:(2)

- **Paralelo.** El aire de secado y las partículas pasan a través de la cámara de secado en la misma dirección. Las temperaturas del producto a la salida son inferiores a las del aire de salida, lo cual es especialmente indicado para productos termosensibles. Con el atomizador centrífugo, el dispersor de aire crea un alto grado de rotación que da lugar a una uniformidad de temperatura en todas las partes de la cámara.(Figura 4)
- **Contracorriente.** El aire de secado y las partículas atraviesan la cámara de secado en direcciones opuestas. La temperatura del producto a la salida de la cámara de secado suele ser superior a la del aire de salida. Este sistema es indicado para productos que precisan de cierto grado de tratamiento térmico durante el secado.(Figura 5)
- **Flujo mixto.** El movimiento de las partículas a través de la cámara de secado pasa por ambas fases de paralelo y contra corriente. Este tipo es muy apropiado para productos termoestables, que debido a la especificación de producto final grueso, precisan el uso de un atomizador de boquillas, atomizando hacia arriba en el flujo de aire de entrada.(Figura 6)

Para alimentos, los diferenciales de temperatura son más favorables empleando un sistema en paralelo, dado que los alimentos son muy sensibles durante su exposición al calor.

El tipo, forma y dimensiones de la cámara de secado en un proceso dependerá del diseño fundamental del elemento aspersor y del tipo de arreglo de flujo del gas secante y del fluido a procesar. Su dimensión obedece principalmente a poder proporcionar a la partícula formada en el elemento aspersor, un tiempo de residencia suficiente para lograr el contenido de humedad final requerido en el proceso, esto en cuanto a su longitud. En cuanto a su diámetro, se determina por la trayectoria de la partícula en la coordenada horizontal, de manera que no llegue a tener contacto con la pared de la cámara sin haberse secado.

El secado por aspersión ofrece muchas ventajas en el procesado de materiales con alto contenido de humedad y de características termolábiles. Además se tiene la ventaja de poder tener un cierto control en las características del producto obtenido, tales como su densidad, diámetro de partícula seca y el costo de operación es bajo, especialmente en altos volúmenes de trabajo.(24)

El secado por aspersión está formado por cuatro etapas:

1. Atomización de la alimentación
2. Contacto del aire y el esprayado
3. Secado del esprayado o evaporación
4. Separación del producto seco del aire

Todas las etapas tienen efecto en las características finales del producto. La atomización, su técnica y las propiedades del fluido a secar influyen en el tamaño de la gota, su distribución, densidad final, contenido de humedad, etc. El contacto del aire y el esprayado y la evaporación, afectan densidad, apariencia, contenido de humedad, retención de aromas y sabores, etc.

Ahora bien, dado que la calidad de producto obtenido es uno de los factores más importantes a considerar durante el secado por aspersión, las características de éste, son por lo mismo de vital importancia. La distribución de tamaño de las partículas es una de las principales características del producto seco, y aunque está muy relacionado con la distribución

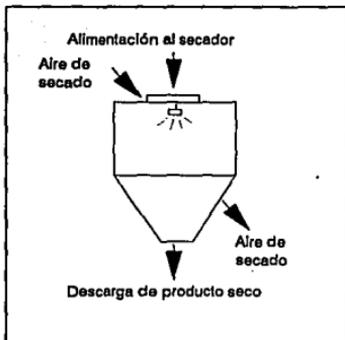


Figura 4 Secador con sistema en paralelo

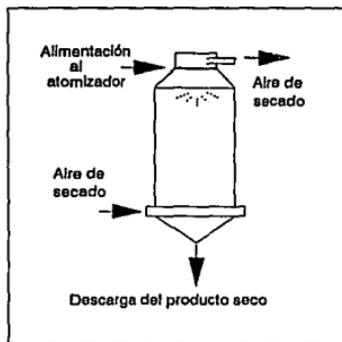


Figura 5 Secador con sistema en contra-corriente

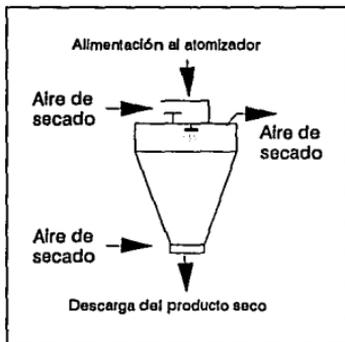


Figura 6 Secador con sistema de flujo mixto

de tamaño de las gotas, rara vez son iguales, así que una predicción exitosa de la distribución de tamaño permitirá un mejor control de las propiedades finales deseadas.(24)

Se habla de una distribución de tamaño de las gotas esparcidas, ya que el atomizador no puede formar un esparcido completamente homogéneo. Las gotas están sujetas a diferentes distorsiones que dependen de las características de secado y de viaje en el secador. Se han desarrollado muchos métodos para evaluar la distribución de tamaño (1, 10, 15), dentro de los cuales se encuentra el método de Friedman que presenta las siguientes ecuaciones para el cálculo de la distribución de tamaño, en el caso de emplear un disco centrífugo como atomizador.(20)

$$Dvs = 0.4 [G/(\rho N \omega^2)]^{0.6} [\mu/G]^{0.2} [(\gamma \rho L)/G^2]^{0.1} \quad [7]$$

$$Dm = 3 Dvs \quad [8]$$

$$D_{95} = 1.4 Dvs \quad [9]$$

Dvs es el Sauter medio, es decir, el diámetro que representa a la población de gotas esparcidas; Dm es el diámetro máximo de la población de gotas esparcidas, y D95 es el diámetro debajo del cual se incluye el 95% de la población de gotas esparcidas. Estas ecuaciones se deben manejar con unidades del sistema cgs.

Las variables operacionales son también de mucha importancia, ya que son las que regirán el proceso, contando entre ellas las características propias del secador como tipo de atomizador, arreglo, temperaturas de secado, etc. Ahora bien, mientras la gota se está secando, la temperatura se mantiene a la temperatura de bulbo húmedo del aire secante. Por esta razón, se pueden tolerar altas temperaturas del aire secante en un secador por aspersión con un mínimo de daño para los componentes sensibles al calor. Además, la velocidad de reacciones degradativas en alimentos disminuye a bajos contenidos de humedad. Es importante que para hablar de un proceso exitoso, el nivel de humedad contenido en el producto sea lo suficientemente bajo para evitar que éste se adhiera a una superficie sólida, de ahí que la velocidad de secado deberá ser tal que la partícula esparcida sea secada antes de llegar a la pared del secador.

La trayectoria y velocidad de las partículas determina el tiempo de secado disponible. Al igual que la distribución de tamaño, las trayectorias que siguen las partículas dentro de la cámara de secado han sido motivo de muchas investigaciones (2, 11, 20), dentro de las cuales se encuentra la que se presenta a continuación:

$$v_i / v_o = 1.2 [ (b' / (R - \omega)) * (\omega / R) ]^{1/2}$$

$$b' = [ G / (\rho_a \pi D v_i) ]$$

Esta ecuación es aplicable a secadores por aspersión con cámaras pequeñas (menos de 3m de diámetro) y disco atomizador (20). Generalmente la trayectoria se representa por una línea recta al graficar  $v_i / v_o$  en función de  $[(R/\omega) * ((R - \omega) / b)]$

El tiempo de la trayectoria a la pared de la cámara puede determinarse integrando la ecuación anterior de manera que:

$$t = [(Rc - \omega) / 2]^2 / [2.4 v_o ((b' \omega)^{1/2})] \quad [10]$$

Asimismo, se han obtenido relaciones de trayectoria de los esparcidos para discos rotatorios, entre las que se encuentran las desarrolladas por Frazer et al. (20), Friedman et al (10) y Harring et al (20), y que se presentan a continuación:

$$R_{max} = [7.2 \pm 0.21 G^{0.2}] / N^{0.16} \quad [11]$$

$$R_{10} = 0.4 [(\pm NG)/2]^{0.25}$$

$$R_{99} = [12 \pm 0.2 G^{0.25}] / N^{0.16}$$

Estas relaciones están basadas en las unidades del sistema inglés.

La velocidad de secado en el secado por aspersión, también ocurre en períodos, el de velocidad constante y el de velocidad decreciente. Mientras las gotas dejan el atomizador, la superficie pierde rápidamente agua. Los sólidos en suspensión y solo se solidifican rápidamente formando una capa en la superficie de la partícula. El diámetro de la partícula generalmente disminuye a medida que el secado continúa. La formación de esta capa constituye el período de velocidad constante. Cuando la corteza se vuelve lo suficientemente gruesa para ofrecer resistencia considerable a la difusión de agua a la superficie, la velocidad de secado decrece, y es controlada por la velocidad de transferencia de masa. La temperatura de la partícula aumenta y el líquido atrapado en el interior se evapora y genera presión. Eventualmente, una porción de la capa se rompe y el vapor se libera. Las partículas secadas por aspersión poseen formas de esferas huecas o fragmentos de esferas y de ahí las excelentes propiedades de rehidratación. (32)

Las velocidades de secado en el período de velocidad constante están generalmente controladas, como ya se dijo anteriormente, por la transferencia de calor, y el balance de calor está dado por la siguiente expresión: (32)

$$(dw/dt) M_s = [h A (T_g - T_s)] / \lambda_s \quad [12]$$

La masa de sólidos secos toma la siguiente forma para el caso de secado por aspersión y suponiendo la forma de una esfera: (32)

$$M_s = [4 \pi r^3 \rho] / [3 (1 + X_0)]$$

De este modo, la velocidad de secado en el período constante queda expresada como:

$$dw/dt = [3 (1 + X_0) h (T_g - T_w)] / [4 r \rho \lambda] \quad [13]$$

Así, la velocidad de secado en este período se puede determinar si se conoce el coeficiente de transferencia de calor y el tamaño de las gotas. Integrando esta última ecuación, se tiene el tiempo de secado en el período constante ( $t_c$ ).

$$t_c = [4 (X_0 - X_c) r \rho \lambda] / [3 (1 + X_0) h (T_g - T_w)] \quad [14]$$

Al tiempo  $t_c$  también se le conoce como tiempo crítico en secado por aspersión, el cual debe existir en la trayectoria de las partículas antes de que éstas choquen en una superficie sólida del secador.

El tiempo de secado para el período decreciente lo derivaron Ranz y Marshall (32), expresado mediante la siguiente ecuación:

$$t_d = [(X_c - X) r_c \rho_s \lambda] / [3 h (\Delta T)] \quad [15]$$

donde  $r_c$  es el radio de la partícula seca, y el  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre el aire secante y la superficie de la partícula durante el período de velocidad decreciente, muchas veces es considerado como la media logarítmica entre la depresión de bulbo húmedo y la diferencia entre el aire de salida y la temperatura del producto.  $\rho_s$  es la densidad del sólido seco. Para líquidos que contienen una alta concentración de sólidos en suspensión o solutos cristalizables, existe un cambio mínimo en el tamaño de la gota durante el secado por aspersión. Por lo tanto,  $r$  y  $r_c$  se pueden aproximar para que sea el diámetro de la gota saliendo del atomizador.

Como se puede observar, el coeficiente de transferencia de calor juega un papel muy importante para conocer los tiempos de secado, vitales para evaluar la eficiencia del secador por aspersión. Por esta razón se han realizado muchas investigaciones para lograr su determinación y se han desarrollado algunas relaciones que permiten conocerlo.

Una de estas relaciones es la siguiente, que se aplica a agua evaporando de una partícula esférica muy pequeña en aire en movimiento lento, (32)

$$(h r) / k_f = 1.0 \quad [16]$$

donde  $k_f$  es la conductividad térmica de la película que envuelve a la partícula. En secado por aspersión,  $k_f$  se puede tomar como la conductividad térmica del aire saturado evaluado a la temperatura de bulbo húmedo.

Otros investigadores han desarrollado ecuaciones, haciendo uso del análisis adimensional, que expresan las relaciones para obtener el coeficiente de transferencia de calor, así como también el coeficiente de transferencia de masa, entre las cuales destacan las de Ranz y Marshall (10, 11) que se muestran a continuación. Hay que aclarar que estas ecuaciones fueron desarrolladas para una gota estacionaria suspendida en aire sin movimiento o con movimiento muy lento.

$$Nu = 2.0 + [0.6 (Re^{0.5}) (Pr^{0.33})] \quad [17]$$

$$Sh = 2.0 + [0.6 (Re^{0.5}) (Sc^{0.33})] \quad [18]$$

donde:

$$Re = (\rho_a v r D) / \mu_a \quad [19]$$

$$Pr = (C_p \mu_a) / k_a \quad [20]$$

$$Sc = \mu_a / (\rho_a \beta) \quad [21]$$

$$Nu = (h D) / k_a \quad [22]$$

$$Sh = (L D) / \beta \quad [23]$$

Para conocer la velocidad relativa se tiene que:

$$v_r = v_p - v \quad [24]$$

donde:

$$v_p = \text{velocidad de partícula} = v_p = w r = (2 \pi N r) \quad [25]$$

$$w = \text{velocidad angular} = 2 \pi N$$

Es conveniente mencionar, que el diámetro de la gota que se emplea al hablar de condiciones de diseño es el diámetro máximo de la gota ( $D_m$ ), ya que es el que tendrá las condiciones máximas de secado, es decir, la que necesite un mayor tiempo de secado, y por lo mismo serán las condiciones críticas.(9)

En otra investigación, se obtuvo una relación que establece que el número de Nusselt puede tener un valor hasta de 10 (16), recordando que este número adimensional involucra al coeficiente de transferencia de calor. Además se obtuvo también una gráfica que permite conocer el valor del número de Nusselt conociendo el número de Reynolds (Figura 7). Las condiciones experimentales de esta investigación implican nuevamente gotas en estado estacionario y movimiento de aire lento, es decir, número de Reynolds relativamente bajos; los coeficientes de transferencia de calor obtenidos fueron del orden de 3000 kcal/h m<sup>2</sup> °C para una gota de agua pura de 100  $\mu$  con una velocidad inicial de 100 m/s.

Otro método de poder evaluar el coeficiente de transferencia de calor, es realizando un balance de calor y masa en la gota (14), recordando que la eliminación de la humedad inicial de una gota durante el secado por aspersion, se lleva a cabo a velocidad constante, conduciendo ésto a las siguientes expresiones:

$$dw/dt = k A (p_w - p_g) = [2 \pi r \rho D (p_w - p_g)]/p_a \quad \text{Balance de masa} \quad [26]$$

$$y \quad dw/dt = [h A (T_g - T_w)]/\lambda = [2 \pi k_a D (T_g - T_w)]/\lambda \quad \text{Balance de calor} \quad [27]$$

Ahora bien, los patrones de flujo del aire, de las partículas y de las temperaturas se pueden obtener a partir de balances de materia y energía en el secador por aspersion.(20) A continuación se presenta el esquema (Figura 8) de un secador por aspersion con flujo paralelo y disco aspensor, como el que se emplea en el presente trabajo, indicando en él las variables de cada flujo para así poder realizar los balances de materia y de energía.

Balance de materia:

$$S_s X_1 + G_s Y_1 = S_s X_2 + G_s Y_2 \quad [28]$$

Balance de energía

$$S_s H_{s1} + G_s H_{g1} = S_s H_{s2} + G_s H_{g2} + Q \quad [29]$$

Para conocer cada uno de los componentes de los balances recién citados se tienen las siguientes expresiones:(20, 29, 33)

$$S_s = S_H (1 - x) \quad [30]$$

$$G_s = (v \cdot A) / V_h \quad [31]$$

$$X = x / (1 - x) \quad [32]$$

$$H_s = [(C_{ps} + (X \cdot C_{pL})) \cdot (T_{ss} - T_o)] \quad [33]$$

$$H_g = [(C_s \cdot (T_g - T_o)) + (\lambda_o \cdot Y)] \quad [34]$$

$$C_s = [0.24 + (0.45 Y)] \quad [35]$$

El término Q puede quedar eliminado si el secador por aspersion funciona como un sistema adiabático.

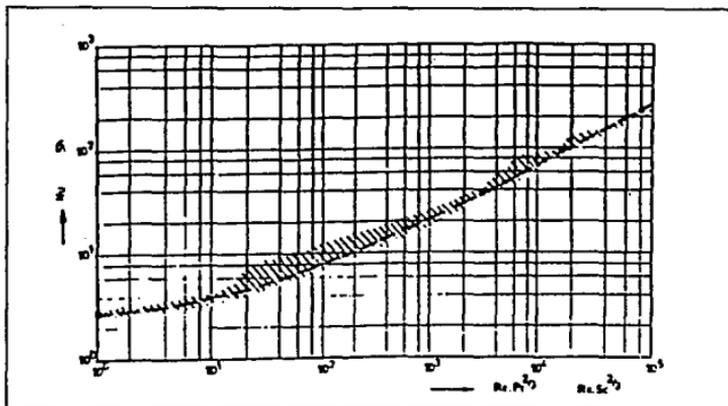


Figura 7 Gráfica  $Nu$  VS  $Re$  (16)

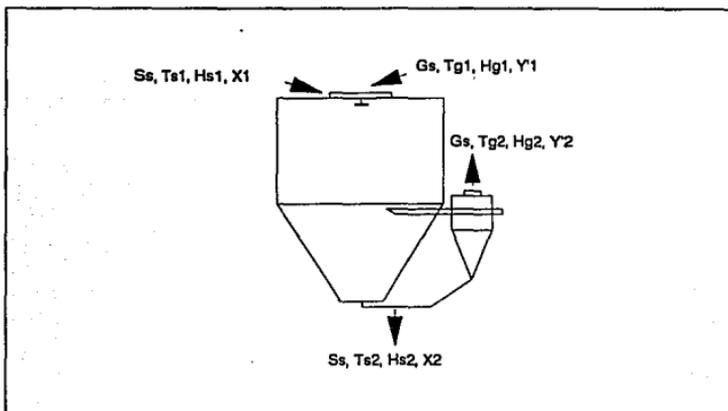


Figura 8 Balances de materia y energía en un secador por aspersión

Generalmente la eficiencia del proceso se evalúa con base en la eficiencia térmica global, que se define mediante la siguiente expresión:(20)

$$\eta = (Tg_1 - Tg_2) / (Tg_1 - T_0) \quad [36]$$

La efectividad del proceso depende de cómo se lleve a cabo la transferencia de calor y masa, y de ahí la importancia de los coeficientes de transferencia de calor y de masa, los cuales son el principal objetivo de estudio de este trabajo.

## CAPITULO 2

### DESARROLLO METODOLOGICO

Con el fin de cumplir los objetivos planteados, el estudio realizado está comprendido en tres grandes etapas, las cuales serán ampliamente detalladas posteriormente. Lo que a continuación se presenta es la descripción del equipo y materiales empleados para el desarrollo de dicho estudio.

#### 2.1 EQUIPO Y MATERIALES

1. Secador por aspersión Niro Atomizer serie Minor, tipo FU11BAA06, con atomización rotativa y de sistema en paralelo. Sus dimensiones son 1.75 m de largo, 1.675 m de ancho, 3.10 m de alto y peso neto de 750 kg. El disco atomizador empleado tiene un radio de 6 cm y posee 24 orificios de una altura de 8 mm cada uno. El sistema de atomización posee un motor al que se le pueden acoplar tres tamaños diferentes de poleas, de manera que se puede trabajar con tres diferentes velocidades del disco atomizador. Para la alimentación del fluido a secar se emplea una bomba que conduce a dicho fluido del tanque de alimentación hasta la parte superior del secador, por donde es alimentado el fluido. El sistema de calentamiento del aire para el secado es mediante una serie de resistencias eléctricas, pudiéndose de este modo controlar la temperatura de entrada del aire de secado. El secador posee un tablero en el que se encuentran dos termómetros de carátula, los cuales indican la temperatura de entrada y de salida del aire. La cámara de secado, de acero inoxidable, tiene doble pared, en medio de la cual se encuentra un aislante, por lo que las pérdidas por calor son despreciables. El secador consta además de un ventilador y de un ciclón, donde se separan las partículas finas que haya arrastrado el aire. En la Figura 9 se presenta un esquema del secador empleado para la experimentación.(27)
2. Rotámetro para líquidos para control del gasto volumétrico alimentado.
3. Anemómetro mecánico para determinación de la velocidad del aire del secador.
4. Refractómetro Abbe para el control de los sólidos en la solución salina.
5. Picnómetro para determinación de densidad del fluido alimentado.
6. Viscosímetro de Ostwald para determinación de viscosidad del fluido alimentado.
7. Tubos capilares para determinación de tensión superficial del fluido alimentado.
8. Balanza analítica para determinación de densidad del fluido alimentado.
9. Desecador para determinación de densidad del fluido alimentado.
10. Termómetros de bulbo.
11. Agitador mecánico para la preparación de los fluidos a alimentar.
12. Termopares bimetálicos.
13. Equipo de lectura de termopares.
14. Parrilla eléctrica para realización de la validación de termopares.
15. Silicón para la construcción de placa por donde se introducen los termopares a la cámara de secado.
16. Madera y cuerdas de tornillo para la construcción de la estructura-soporte de los termopares.
17. Termobalanza para determinación de humedad del NaCl obtenido como producto seco.
18. Estufa para determinación de humedad del huevo obtenido como producto seco.
19. Agitador de propela para preparación de soluciones a alimentar.

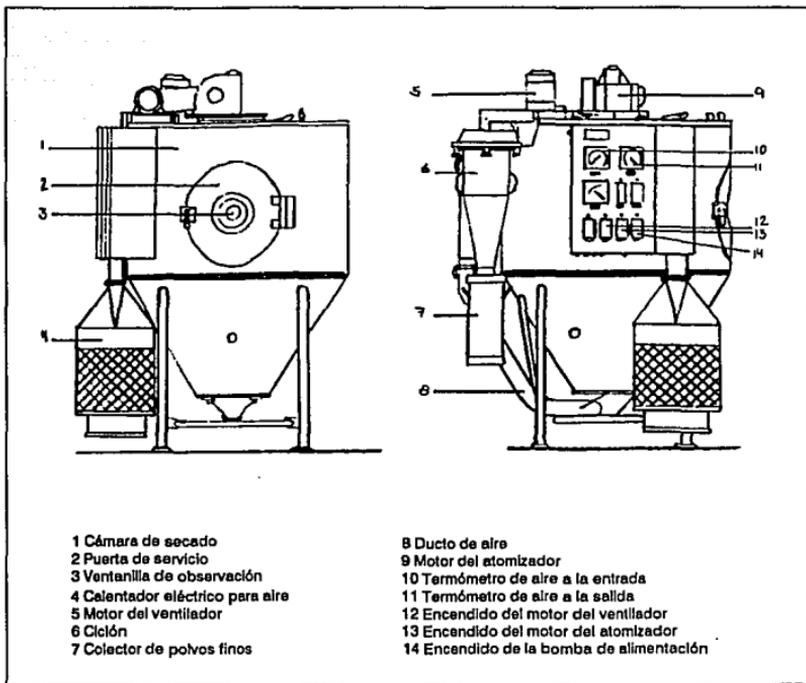


Figura 9 Niro Atomizer serie Minor

## 2.2 Métodos

A continuación se presenta la descripción de los métodos empleados para la realización del presente trabajo, encontrándose entre ellos métodos de medición (los doce primeros), y métodos analíticos.

1. **Calibración del rotámetro:** Dado que es muy importante controlar el gasto volumétrico de la alimentación al secador, es necesario realizar la calibración del rotámetro para conocer el gasto real del fluido alimentado. Para ello, se permite que fluyan diferentes gastos a través del rotámetro, para conocer el tiempo que tarda en alcanzarse un determinado volumen. Una vez obtenidos estos tiempos, se elabora una gráfica de gasto real en función del gasto indicado en el rotámetro, y así se conoce la relación entre ambos y se puede manejar el gasto del fluido deseado.
2. **Determinación de la velocidad rotacional del disco atomizador:** Para la determinación de esta variable se consideró la velocidad rotacional del motor del secador (3430 rpm) y el número de vueltas que da el disco atomizador por una vuelta de la banda del motor. Con esto, se determinó la velocidad rotacional del disco aspersor.
3. **Determinación de la velocidad del aire dentro de la cámara de secado:** Para lograr conocer la velocidad del aire dentro del secador se utilizó un anemómetro mecánico. El anemómetro está compuesto por una hélice y dos carátulas, una que indica distancia y otra que indica tiempo. La hélice del anemómetro fue colocada a la salida de la cámara de secado, y se midió la velocidad del aire, recordando que se fija un tiempo determinado y se ve la distancia en la otra carátula del anemómetro.
4. **Determinación de densidad:** Uno de los parámetros necesarios de conocer para la experimentación es la densidad de la solución a alimentar al secador, para lo cual se utilizó un picnómetro. El picnómetro es un frasco con tapón de vidrio esmerilado, el cual tiene un ducto de diámetro capilar que permite llenar exactamente el picnómetro al volumen indicado. Para realizar la determinación, el picnómetro se pone a peso constante, es decir, una vez limpio se pesa en la balanza analítica, y se introduce en un desecador. Periódicamente se vuelve a pesar el picnómetro hasta que no existan variaciones en el peso registrado. Posteriormente se llena el picnómetro con agua destilada y se vuelve a pesar. Se repite el procedimiento sólo que esta vez se emplea el fluido problema. La determinación se realiza a la temperatura ambiente (20°C), y la densidad es la diferencia de la masa del mismo volumen del fluido problema y del agua destilada.(8)
5. **Determinación de viscosidad:** La viscosidad es otra de las características de la solución a alimentar al secador. La viscosidad de un líquido es la medida de la resistencia a fluir que opone un líquido. Para determinar el valor de viscosidad de las soluciones empleadas se utilizó el viscosímetro de Ostwald, realizando la determinación a la temperatura ambiente (20°C). Este viscosímetro se basa en la comparación del tiempo de flujo en un tubo capilar del fluido problema, con el tiempo de flujo de un segundo líquido de viscosidad conocida. De esta manera una vez limpio el viscosímetro, se introduce con una pipeta un volumen conocido de agua destilada, suficiente para que un menisco esté en la parte más baja del bulbo inferior cuando el otro menisco esté en la parte más alta del bulbo superior. Posteriormente se deja fluir el agua y se ajusta el tiempo de flujo del líquido por el capilar hasta vaciarse el bulbo superior. Después se repite este proceso para el líquido problema. Estos tiempos se emplean para el cálculo de la viscosidad mediante la siguiente expresión:(8)

$$\mu_2 = [(\rho_1 t_1) / \mu_1] (\rho_2 t_2)$$

6. **Determinación de tensión superficial:** La tensión superficial ( $\gamma$ ) es otra propiedad importante de conocer. Definiendo la tensión superficial se puede decir que es la tendencia de la superficie de un líquido a presentar cierta rigidez, y ya que el secado por aspersión se basa en la atomización de pequeñas gotas para que entren en contacto con una corriente de aire caliente, esta fuerza ejerce un efecto a considerar en la operación de secado. Para la determinación de la tensión superficial se empleó el método de elevación capilar, que se basa en la tendencia de un líquido a ascender o descender en un tubo capilar como consecuencia de la adhesión y la cohesión de las moléculas. Para realizar la determinación se coloca un volumen determinado del fluido problema en un recipiente, posteriormente se introduce el tubo capilar pegado a una de las paredes del recipiente permitiendo así que el líquido fluya a través del mismo. Cuando el líquido deje de ascender en el tubo, se tapa el orificio superior de éste y se retira del recipiente. En seguida se mide la altura alcanzada por el fluido dentro del capilar y se puede conocer la tensión superficial mediante la ecuación siguiente ecuación:(8)

$$\gamma = (h \rho g r) / 2$$

7. **Determinación de sólidos disueltos en la solución salina:** Con el fin de controlar la concentración de sólidos en la solución salina se empleó un refractómetro, el cual funciona teniendo como principio la refracción de la luz, es decir, el cambio de dirección debido a la variación de la velocidad de la luz al atravesar medios diferentes. Para la determinación se debe asegurar que los prismas estén absolutamente limpios, y levantando la tapa de los prismas se coloca la muestra directamente en el prisma de medida. Se oprime el interruptor de contacto y se lee de manera directa el valor del índice de refracción y el porcentaje de sólidos disueltos del líquido problema.(8)
8. **Determinación de humedad por medio de termobalanza:** Este método se aplicó al producto del secado por aspersión de la solución de NaCl. La termobalanza es un sistema de suspensión asociado a una fuente eléctrica de calor que se aplica para medir la humedad de algunos materiales, y funciona bajo el principio de radiación infrarroja. Para la determinación, se enciende la termobalanza, se coloca el platillo ajustando a cero con el botón correspondiente hasta que la marca de cero gramos coincida con la marca cero del vernier. Se coloca una muestra de 10 g sobre el platillo y se fija el tiempo de la determinación en 5 minutos, encendiendo la fuente de calor. Una vez concluido este tiempo se lee directamente el % de humedad de la muestra en la escala del equipo.(8)
9. **Determinación de humedad por estufa:** Este método se aplicó al producto del secado por aspersión de la dilución de huevo en agua 1:1. Para la determinación se emplea una caja de humedad, poniéndola previamente a peso constante. Se colocan 5 g de muestra en la caja de humedad, y empleando unas pinzas para crisol se introduce a la estufa. Las condiciones de la determinación a 70°C durante 3 horas. Una vez transcurrido este tiempo se saca la caja de humedad, sin olvidar taparla antes de retirarla de la estufa, se coloca en el desecador hasta que se enfríe, y se pesa en la balanza analítica, verificando que se haya alcanzado el peso constante. La diferencia de pesos da el % de humedad contenido en la muestra.(7)
10. **Estructura-soporte de termopares:** Dado que el estudio a realizar es con base en la determinación de las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo dentro de la cámara del secador por aspersión, es necesario construir una estructura que soporte a los termopares. Esta estructura está hecha de madera y cuerdas de tomillo que permiten colocar los termopares en los puntos preestablecidos para el estudio. La estructura de madera es un cubo que se coloca dentro del secador, en la parte cilíndrica de la cámara de secado (Figura 10). Los termopares se colocan en otra tabla, la cual tiene unas perforaciones en las que se colocan los termopares. Los cables de los termopares salen por una puerta hecha de silicona, permitiendo de este modo que se conserve la hermeticidad de la cámara. Las cuerdas de tomillo permiten fácilmente el desplazamiento

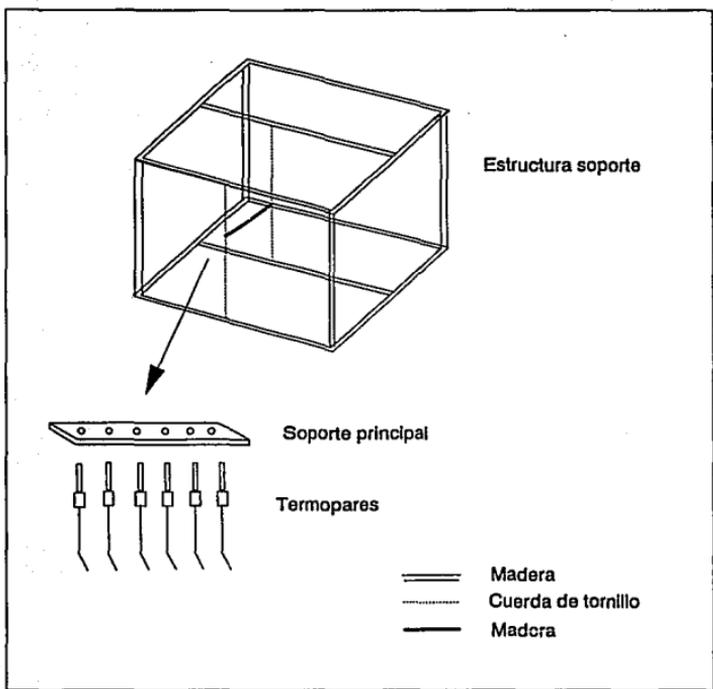


Figura 10 Estructura-soporte  
de termopares

del soporte principal de los termopares a las diferentes alturas predeterminadas para el estudio. El hecho de que se coloquen los seis termopares en el soporte, permiten registrar las temperaturas de una línea al mismo tiempo.

11. Implementación del sistema de medición de temperaturas de bulbo húmedo: Durante una experimentación algunos investigadores midieron la temperatura de bulbo húmedo goteando agua sobre un material absorbente colocado alrededor de un termómetro.(23) Con base en esta idea y después de probar varios métodos, el más adecuado fue colocar algodón humedecido en los termopares y esperar a que se llegara a un régimen estacionario para tomar las lecturas de temperatura.
12. Validación de termopares: Para conocer el valor real de la lectura tomada por cada uno de los termopares empleados es necesario someterlos a una validación. Esta validación consiste en una experimentación previa, introduciendo los termopares en diferentes medios y registrando las temperaturas marcadas por los mismos. El primer medio es agua a 90°C donde se colocan los termopares tomando lecturas de las temperaturas registradas cada 10 s hasta que la temperatura del agua alcance los 30°C. La prueba se repite sólo que esta vez se emplea aceite a 230°C. En la última prueba se emplea agua pero manteniendo constante su temperatura a 95°C, y registrando cada 10 s las temperaturas marcadas. Posteriormente se aplican a los resultados varios técnicas estadísticas para obtener las características esenciales de la validación, (linealidad, precisión, exactitud, reproducibilidad y repetibilidad). Las técnicas estadísticas empleadas para ello son regresión, coeficiente de variación, prueba de hipótesis, análisis de muestras apareadas, y análisis de varianza respectivamente.(22) Como resultado de esta validación se obtienen las ecuaciones para cada termopar que darán las temperaturas ya corregidas.
13. Determinación de humedad absoluta: el método a usar para obtener la humedad absoluta del aire se basa en el uso de la carta psicrométrica. Para obtener la humedad absoluta se tiene que el valor de ésta, está dado por el punto de intersección de la temperatura de bulbo seco (eje de las abscisas) con la línea de saturación adiabática correspondiente a la temperatura de bulbo húmedo, realizando la lectura de humedad en el eje de las ordenadas del diagrama.(29) La carta psicrométrica empleada es la correspondiente a la presión de la Ciudad de México.
14. Análisis de coeficiente de variación: este método estadístico sirve para comparar la variación en varios conjuntos de datos, valiéndose de una medida de variación relativa, que es el coeficiente de variación (%CV). (22)
15. Análisis factorial: Este método estadístico tiene como finalidad conocer el efecto de cada factor involucrado en la experimentación, así como también su interacción, además permite conocer el efecto de las repeticiones realizadas en la misma experimentación. (22)
16. Análisis de bloques aleatorios: Este método estadístico es en esencia un análisis de variancia con dos factores, que puede ser aplicado a las media de los n duplicados obtenidos en una experimentación. Permite conocer el efecto que ejercen estos factores sobre la variable de respuesta. (22)
17. Operación del secador por aspersión: Para iniciar el secado por aspersión de una solución se debe verificar primero que esté colocada la patea indicada para trabajar con la velocidad del disco deseada, que esté limpio y seco el secador así como los colectores de polvo, que esté lista la solución a alimentar, y que los termómetros que indican las condiciones de entrada y salida del aire estén dispuestos. Una vez verificados estos cuatro puntos, se enciende el ventilador y a continuación se enciende el sistema para calentar el aire. Cuando se alcanza la temperatura a la que se desea trabajar, se comienza a alimentar la solución, regulando el flujo mediante el rotámetro. Un cambio en el gasto de alimentación ocasiona cambios en la temperatura de salida. Cuando se ha

concluido el secado de la solución, se retiran los colectores del producto e inmediatamente después se comienza a alimentar agua para efectuar la limpieza del equipo. Después de transcurridos 10 minutos de alimentación de agua, se apaga el sistema de calentamiento del aire, se suspende la alimentación del agua y a los tres minutos se apaga el atomizador. Cuando se alcanza una temperatura de salida de 50°C se abre la puerta de la cámara y se barre el producto que haya quedado dentro de la cámara, siendo conveniente tener aún encendido el ventilador. Cuando se requiere se puede emplear una solución de jabón para realizar una limpieza más efectiva del equipo, enjuagando posteriormente con suficiente agua y secando completamente antes de iniciar nuevamente el proceso de secado.(27)

### 2.3 Desarrollo metodológico

Como ya se mencionó, este trabajo fue dividido en tres etapas, tal como se indica en la Figura 11 en que se detalla la planeación del desarrollo metodológico.

#### I.- Primera etapa

Antes de iniciar la experimentación que permitió cumplir el objetivo de esta fase (3), fue necesario realizar la caracterización del secador por aspersión donde se realizó el presente trabajo. Esta caracterización, punto \*1 de la Figura 11, involucra cuatro actividades:

- 1) La determinación de la velocidad rotacional del disco atomizador, habiéndose descrito el método en la sección 2.2 página 26
- 2) La determinación de la velocidad del aire con el anemómetro (página 26).
- 3) La calibración del rotámetro (página 26).
- 4) La determinación de las características propias del secador como lo son el diámetro de la cámara, el radio del disco, y el número de los orificios del mismo, así como también la altura que presentan éstos. Estos parámetros se determinaron empleando una cinta métrica.

Explicando los pasos de la Figura 11:

- \*2 : determinación de las propiedades de alimentación de la solución a alimentar. Estas propiedades son la densidad, empleando para su determinación el método del picnómetro (página 26), la viscosidad, empleando un viscosímetro de Ostwald, página 27; y la tensión superficial, empleando el método de elevación capilar descrito en la página 27. La preparación de la solución de NaCl, ya sea al 25 o al 12.5% en peso, se verificó mediante la determinación de sólidos disueltos con el refractómetro, (página 27).
- \*3 : determinación de la temperatura mínima de entrada del aire para el gasto máximo posible de alimentación, sin que se mojase la cámara de secado. Para ello se comenzó a alimentar la solución al secador a una temperatura de 200°C y se fue disminuyendo gradualmente la temperatura de entrada del aire, hasta que se comenzaron a mojar las paredes de la cámara. La temperatura elegida fue superior en 10°C a aquella en que se presentó este fenómeno. Una vez conocida esta temperatura se fijaron los niveles de Tg1 a emplear durante la experimentación.
- \*4 : secado por aspersión de la solución salina al 25% con una Tg1 de 200°C. Se realizó con el fin de conocer el efecto de dos variables, la tensión superficial y la velocidad rotacional del disco, sobre el coeficiente de transferencia de calor. La tensión superficial se varió empleando un agente tensoactivo de base aceite.

Así, las variables que se involucraron en esta etapa se clasificaron como:

## Cuadro metodológico Primer etapa

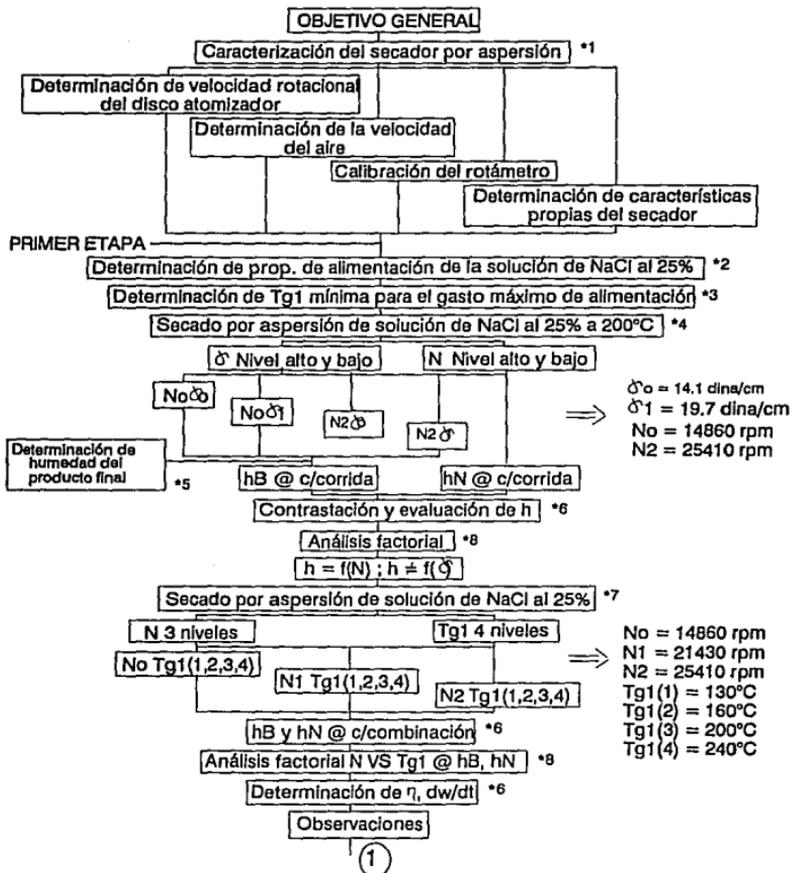


Figura 11

## Cuadro metodológico Segunda etapa

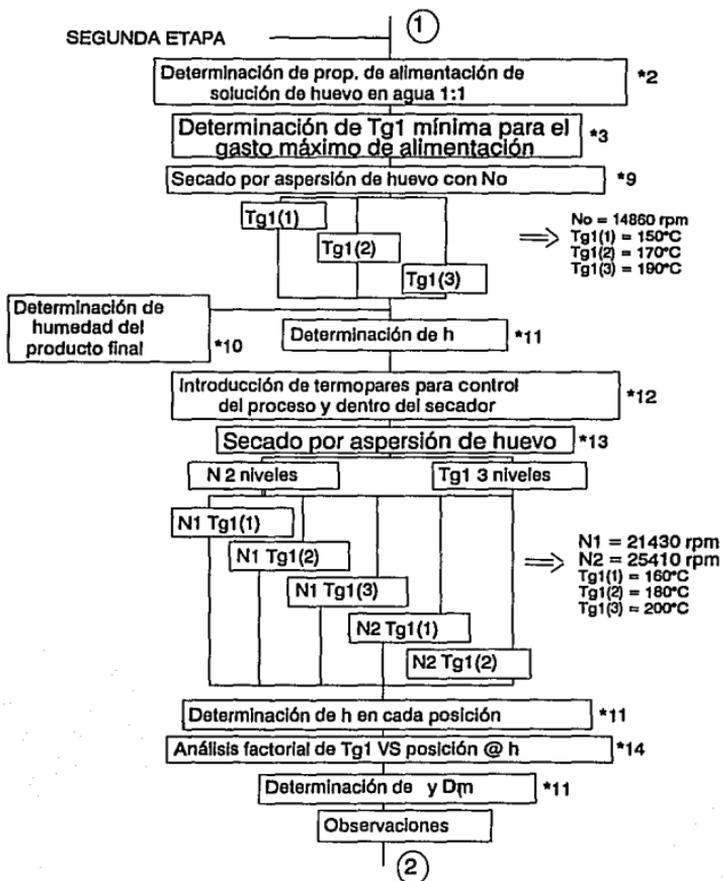


Figura 12

## Cuadro metodológico Tercer etapa

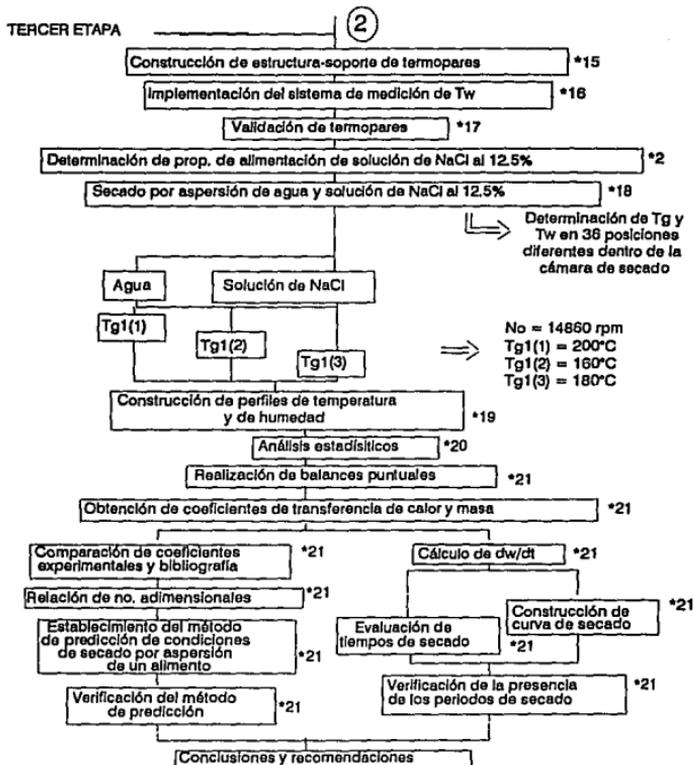


Figura 13

Constantes:  $Tg_1$ ,  $Ts_1$ ,  $G_a$

Variables independientes:  $\gamma$ ,  $N$

Variables dependientes: diámetro de la gota,  $\Delta T$ , temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo, humedades del aire,  $C_{pA}$ ,  $\mu_a$ ,  $\rho_a$ ,  $k_a$ ,  $C_{ps}$ ,  $\mu$ ,  $\rho$ ,  $k_s$ ,

Variables de respuesta: coeficientes de transferencia de calor, velocidad de secado, eficiencia térmica global.

Los intervalos de las variables fueron:

- Tensión superficial: dos, 14.1 y 19.7 dina/cm
- Velocidad de rotación del disco: dos, 14860 y 25410 rpm

Durante el secado por aspersión se registraron temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire a la entrada y a la salida del secador, a partir de las cuales se realizó el estudio de la transferencia de calor.

- \*5 : después del secado por aspersión se recolectaron muestras, y se enlataron sabiendo que el NaCl es una sustancia higroscópica, para posteriormente determinar el contenido de humedad presente en el producto final (página 28).
- \*6 : son puntos contenidos en el algoritmo para la primera etapa de este estudio. A continuación se presenta dicho algoritmo.

A.- Coeficientes de transferencia de calor con base en números adimensionales

- 1) Obtener de tablas  $C_{ps}$ ,  $k_s$ ,  $\rho_a$ ,  $\mu_a$ ,  $k_a$ ,  $C_{pA}$ .
- 2) Obtener de la carta psicrométrica  $Y'$  evaluada a  $T_g$  y  $T_w$  (página 30)
- 3) Determinación de  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\gamma$  (páginas 26 y 27)
- 4) Calcular la velocidad de la partícula ( $v_p$ ) con la ecuación [25]
- 5) Determinar el perímetro mojado ( $L$ ) con la expresión:  
$$L = a n \quad [37]$$
- 6) Determinar el volumen húmedo ( $V_h$ ) con la ecuación [4]
- 7) Determinar el gasto de aire seco ( $G_s$ ) con la ecuación [31]
- 8) Determinar el gasto másico de la alimentación ( $G$ ) con la expresión:  
$$G = Ss / (1 - x_1) \quad [38]$$
- 9) Determinar el diámetro máximo de la gota ( $D_m$ ) con la ecuación [8]
- 10) Determinar el coeficiente de transferencia de calor despejándolo de la ecuación [17] quedando expresado como:

$$h = \{ [ 2.0 + [0.6 (Re^{0.5}) (Pr^{0.33})] ] k_a \} / D_m \quad [39]$$

B.- Coeficientes de transferencia de calor con base en balances de materia y energía

- 1) Obtener de tablas  $C_{ps}$ ,  $C_{pA}$ .
- 2) Obtener de la carta psicrométrica  $Y'$  evaluada a  $T_g$  y  $T_w$  (página 30)
- 3) Obtener la humedad de salida del sólido ( $X_2$ ) (página 28)
- 4) Determinar la cantidad de sólidos secos ( $Ss$ ) con la ecuación [30]
- 5) Determinar la cantidad de aire seco ( $G_s$ ) con la ecuación [31]
- 6) Obtener la humedad de entrada del sólido a partir del balance de materia con la ecuación [28]
- 7) Determinación de entalpías de sólido y de aire con las ecuaciones [33] y [34]

- 8) Determinar Q a partir del balance de energía con la ecuación [29]
- 9) Determinar el coeficiente de transferencia de calor a partir de la ecuación [1]

C.- Una vez conocidos los coeficientes de transferencia de calor:

- 1) Determinar la eficiencia térmica global ( $\eta$ ) con la ecuación [36]
- 2) Determinar la velocidad de secado ( $dw/dt$ ) con el primer término de la ecuación [27]

\*7 : secado por aspersión de la solución salina al 25% pero esta vez realizado manteniendo la tensión superficial constante y variando en cuatro niveles la temperatura de entrada del aire y en tres niveles la velocidad rotacional del disco aspersor. Se realizaron durante la experimentación todas las combinaciones posibles, con las variables empleadas.

Las variables que se involucraron en esta fase se clasificaron de la siguiente forma:

Constantes:  $\gamma$ ,  $T_{s1}$ ,  $G_a$

Variables Independientes:  $N$ ,  $T_{g1}$

Variables dependientes: diámetro de la gota,  $\Delta T$ , temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo, humedades del aire,  $C_{pa}$ ,  $\mu_a$ ,  $\rho_a$ ,  $k_a$ ,  $C_{ps}$ ,  $\mu$ ,  $\rho$ ,  $k_s$ ,

Variables de respuesta: coeficientes de transferencia de calor, velocidad de secado, eficiencia térmica global.

Los intervalos de las variables fueron:

- Temperatura de entrada del aire: cuatro, 130, 160, 200, 240°C
- Velocidad de rotación del disco: tres, 14860, 21430 y 25410 rpm

Las lecturas de temperatura cuando el equipo se encuentre en estado estacionario, verificado por no existir variaciones en las mismas, para tener así mayor confiabilidad en los resultados.

Además es muy importante identificar el lugar donde se evalúa la velocidad del aire, así como el área de flujo para obtener valores reales de gasto másico del aire, ya que de ello depende el desarrollo adecuado del cálculo de los parámetros estudiados.

\*8 : análisis estadísticos y gráficos. Dentro de los estadísticos se realizaron factoriales de  $N$  VS  $\gamma$ , de  $N$  VS  $T_{g1}$  tanto para el coeficiente de transferencia de calor obtenido en base a números adimensionales ( $h_N$ ) como para el obtenido en base al balance de materia y energía ( $h_B$ ); de  $N$  VS  $T_{g1}$  para la eficiencia, y para las velocidades de secado obtenidas por los dos caminos mencionados. En cuanto a los gráficos, se construyeron gráficas de cada uno de los factores en estudio contra las variables de respuesta, ( $h_N$ ,  $h_B$ ,  $dw/dt$ ,  $\eta$ )

## II.- Segunda etapa

Para la segunda etapa se empleó huevo como fluido a secar (4). Para ello fue necesario acondicionarlo para la operación de secado. Este acondicionamiento implica una serie de cinco pasos:

- a) El descascarado manual del huevo.
- b) Una homogeneización empleando un agitador de propela durante 10 minutos.
- c) Un filtrado empleando una malla lo suficientemente fina para contener en ella posibles pedazos de cascarón presentes y la chalaza del huevo.

- d) La dilución del huevo en agua en proporción 1:1.  
e) Una segunda homogeneización empleando un agitador de propela durante 10 minutos

Se tuvo que administrar el huevo como una dilución en agua, ya que de lo contrario se coagulaba en la parte superior del secador, obstruyendo el ducto de alimentación al disco aspersor.

Explicando los pasos en la Figura 12:

- \*2 : se determinaron las propiedades de alimentación del huevo en agua 1:1, densidad, viscosidad y tensión superficial como lo indican los métodos de la sección 2.2.  
\*9 : secado por aspersión de huevo, se realizó con una velocidad del disco constante de 14860 rpm y para tres niveles de temperatura de entrada del aire, que fueron 150, 170, y 190°C.

Las variables involucradas en esta experimentación se clasificaron como:

Constantes: N,  $T_{s1}$ ,  $G_a$

Variable independiente:  $T_{g1}$

Variables dependientes:  $\Delta T$ , temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo, humedades del aire,  $C_{pa}$ ,  $\mu_a$ ,  $\rho_a$ ,  $k_a$ ,  $C_{ps}$ ,  $\mu$ ,  $\rho$ ,  $k_s$ .

Variable de respuesta: coeficientes de transferencia de calor.

- \*10 : después de efectuar el secado del huevo se recolectaron muestras del producto final, enlatando algunas para evaluar posteriormente el contenido de humedad del producto final, mediante la determinación de humedad por estufa, método descrito en la página 28.  
\*12 : del secado por aspersión de huevo recién mencionado, se observó que no existía una congruencia en los datos registrados de temperaturas de salida del aire por lo que fue necesario introducir termopares para un control más efectivo del proceso. Aprovechando el uso de los termopares se colocaron, aparte de los de la entrada y la salida de la cámara de secado, dentro de la misma cámara en cuatro diferentes posiciones, mostradas en la Figura 14. Los termopares se pegaron a la pared de la cámara con cinta adhesiva.  
\*11 : son pasos del algoritmo de la segunda etapa experimental, el cual se muestra a continuación:

#### A. Coeficientes de transferencia de calor

- 1) Obtener de la carta psicrométrica Y' evaluada a  $T_g$  y  $T_w$ . (página 30)
- 2) Determinar la cantidad de aire seco ( $G_s$ ) con la ecuación [31]
- 3) Determinación de entalpías del aire con la ecuación [34]
- 4) Determinar Q a partir del balance de energía, considerándolo el calor cedido por el aire con la expresión:

$$Q = G_s (H_{g1} - H_{g2}) \quad [40]$$

- 5) Determinar el coeficiente de transferencia de calor a partir de la ecuación [1]

#### B. Una vez conocidos los coeficientes de transferencia de calor:

- 1) Determinar la eficiencia térmica global ( $\eta$ ) con la ecuación [36]
- 2) Determinar el diámetro máximo de la gota ( $D_m$ ) con la ecuación [8]

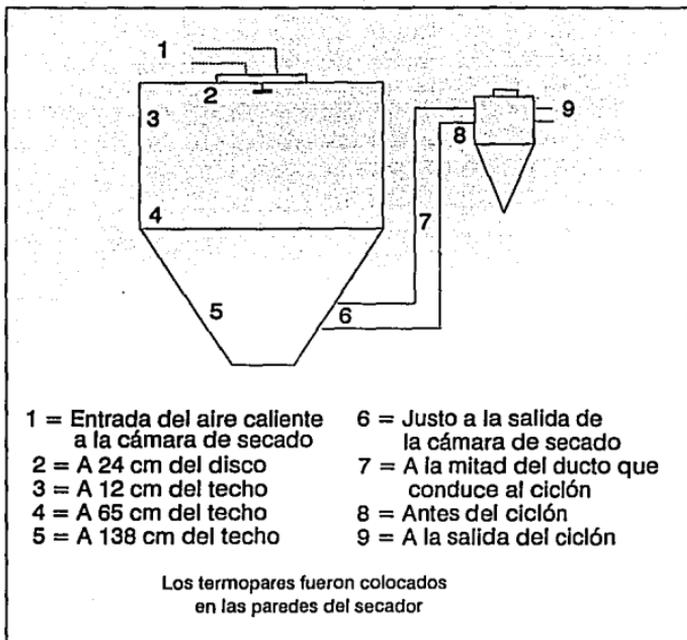


Figura 14 Posiciones de termopares durante el secado por aspersion de huevo

El algoritmo señalado en A se empleó para evaluar el coeficiente de transferencia de calor en cada uno de los puntos en que se colocaron los termopares. La diferencia entre este algoritmo y el de la primera etapa, radica en que no se conocen las temperaturas de bulbo húmedo puntuales, así como tampoco se conoce la humedad de la partícula ni su temperatura en cada uno de los puntos señalados.

**\*13 :** una vez colocados los termopares se realizó el secado por aspersión de huevo con dos variables, la velocidad de rotación del disco y la temperatura de entrada del aire.

Las variables involucradas en esta fase se clasificaron de la siguiente forma:

Constantes:  $T_{s1}$ ,  $G_a$

Variables independientes:  $N$ ,  $T_{g1}$ , posición longitudinal de los termopares

Variables dependientes: diámetro de la gota,  $\Delta T$ , temperaturas puntuales de bulbo seco y bulbo húmedo, humedades del aire,  $C_{pa}$ ,  $\mu_a$ ,  $\rho_a$ ,  $k_a$ ,  $C_{ps}$ ,  $\mu$ ,  $\rho$ ,  $k_s$ .

Variables de respuesta: coeficientes de transferencia de calor, eficiencia térmica global.

Los intervalos de las variables fueron:

- Temperatura de entrada del aire: 160, 180, 200°C
- Velocidad de rotación del disco: dos, 21430 y 25410 rpm
- Posición longitudinal de termopares: cuatro, a 24 cm del disco aspersor, a 12, 65 y 138 cm del techo de la cámara de secado.

**\*14 :** análisis estadísticos y gráficos, como lo fueron el perfil de las temperaturas, análisis factoriales de  $T_{g1}$  VS posición del termopar para cada velocidad rotacional empleada, y la contrastación de los resultados obtenidos de la primera etapa y los obtenidos en la segunda etapa.

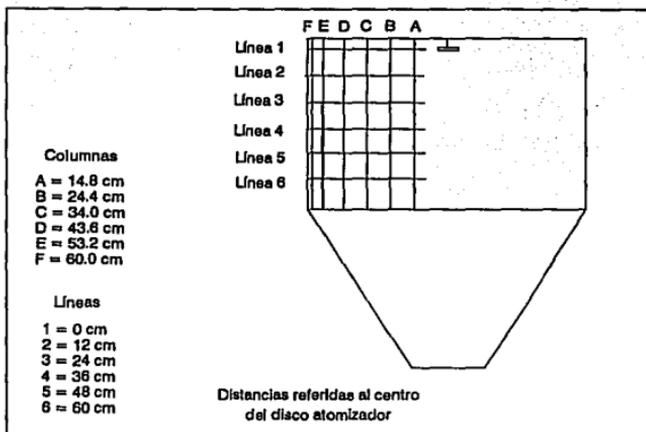
### III.- Tercera etapa

La tercera etapa surge con la finalidad de resolver las inquietudes obtenidas de la información y análisis de las dos etapas anteriores, y como primer paso se planteó la introducción de termopares a lo largo y a lo ancho de la cámara de secado para conocer el perfil de temperaturas que se desarrolla dentro de ésta y conocer así el comportamiento de los coeficientes de transferencia.

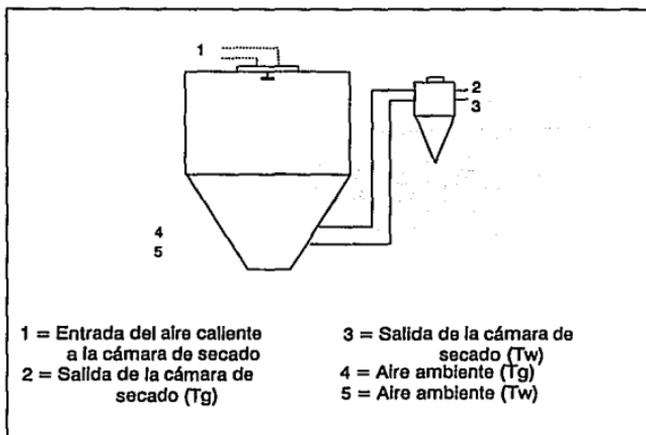
Explicando los pasos en la Figura 13:

**\*15 :** para poder introducir los termopares fue necesario la construcción de una estructura que soportara a los termopares (página 28). La cámara de secado se seccionó en seis columnas y seis filas, de modo que se tuvieron 36 puntos donde fueron colocados los termopares para la determinación de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo (Figura 15). En la Figura 16 se muestran las posiciones en que se colocaron otros termopares para determinar la temperatura de entrada del aire, las temperaturas de bulbo húmedo y seco del aire ambiente, y las temperatura de bulbo seco y húmedo del aire a la salida de la cámara.

**\*16 :** para poder determinar las temperaturas de bulbo húmedo del aire en el interior de la cámara de secado, se implementó un sistema, el cual fue descrito en la sección 2.2 página 28.



**Figura 15 Posiciones de termopares dentro de la cámara de secado**



**Figura 16 Posiciones de termopares fuera de la cámara de secado**

**\*17 :** antes de iniciar la experimentación fue necesario realizar la validación de los termopares para que las temperaturas obtenidas sean las correctas (página 28).

**\*18 :** secado por aspersión, empleando dos fluidos de alimentación, agua, que se toma como modelo para evaluar como se lleva a cabo el secado de la solución pura, sin contener sólidos, y una solución salina al 12.5%. El secado se realiza con velocidad rotacional del disco constante e igual a 14860 rpm, con un gasto volumétrico de alimentación igualmente constante de 11.084 l, logrado ésto con el uso de un rotámetro, y variando la temperatura de entrada del aire.

Las variables que se involucran en esta etapa se clasificaron de la siguiente forma:

Constantes:  $T_{s1}$ ,  $N$ ,  $G_a$

Variables independientes: tipo de fluido, temperatura de entrada del aire y posición radial y longitudinal de los termopares.

Variables dependientes: diámetro de la gota,  $\Delta T$ , temperaturas puntuales de bulbo seco y bulbo húmedo, humidades del aire,  $C_{pa}$ ,  $\mu_a$ ,  $\rho_a$ ,  $k_a$ ,  $C_{ps}$ ,  $\mu$ ,  $\rho$ ,  $k_s$ .

Variables de respuesta: coeficientes de transferencia de calor y de transferencia de masa.

Los intervalos de las variables fueron:

- Tipo de fluido: dos, agua y solución salina
- Temperatura de entrada del aire: tres, 200, 180 y 160°C
- Posición radial: seis, separadas cada 9.6 cm entre sí
- Posición longitudinal: seis separadas cada 12 cm entre sí

Se hicieron cinco repeticiones para cada ensayo, considerando cada ensayo como el secado por aspersión de un fluido con las temperaturas de entrada del aire correspondientes, y realizado para las determinaciones de temperaturas de bulbo seco y húmedo de las 36 posiciones fijadas, a partir de las cuales se realizó el estudio para obtener los coeficientes de transferencia de calor y de masa.

Durante la experimentación, primero se realizó la toma de lecturas de bulbo seco, y posteriormente se colocaban los algodones humedecidos, que permitan la toma de lecturas de bulbo húmedo. Todas las lecturas de temperaturas fueron tomadas cuando ya se tenía un régimen permanente, siendo el tiempo necesario para ello de 10 minutos en el caso de temperaturas de bulbo seco, y de 5 minutos para el caso de temperaturas de bulbo húmedo.

**\*19 :** para la construcción de los perfiles de temperatura se efectuó primero la corrección de las temperaturas registradas por los termopares, empleando las ecuaciones resultantes de la validación de los mismos. Una vez corregidas las temperaturas, se graficaron las temperaturas de bulbo seco para cada ensayo, y también las temperaturas de bulbo húmedo para cada uno de los ensayos realizados.

**\*20 :** análisis estadísticos realizados a las temperaturas obtenidas de la experimentación. Se les aplicó un análisis de coeficiente de variación, un análisis factorial de líneas en función de columnas para las temperaturas de bulbo seco, y un análisis de bloques aleatorios de líneas y columnas para las temperaturas de bulbo húmedo. Estas técnicas estadísticas fueron descritas brevemente en la sección 2.2 página 30.

**\*21 :** son parte del algoritmo de la tercera etapa de este estudio. El algoritmo se presenta a continuación:

- Determinación de humedades absolutas puntuales a partir de  $T_g$  y  $T_w$  empleando la carta psicrométrica para la Ciudad de México (página 30)
- Construcción de los perfiles de humedad absoluta por medio de gráficas.
- Determinación del volumen húmedo mediante la ecuación [4]
- Determinación de la densidad del aire dentro de la cámara mediante la expresión:

$$p_a = 1 / Vh \quad [41]$$

- Determinación de entalpías del aire mediante la ecuación [34]
- Determinación del calor cedido por el aire en cada punto mediante la expresión:

$$Q = G_s (H_g - H_w) \quad [42]$$

- Determinación de los coeficientes de transferencia de calor mediante la ecuación [1]
- Evaluación de la distribución de tamaño de las gotas en el esparado mediante las expresiones [7, 8, 9]
- Comparación de los coeficientes de transferencia de calor obtenidos de la experimentación contra las expresiones extraídas de la bibliografía mediante las expresiones:
  - $(h r) / k_f = 1.0 \quad [16]$
  - $Nu = (h D_m) / k_a$  empleando gráfica de Re en función de Nu [22]
  - $h = \{ [2.0 + [0.6 (Re^{0.5}) (Pr^{0.33})] k_a ] / D_m \} \quad [39]$
- Determinación de la velocidad de secado mediante el primer término de la ecuación [27]
- Determinación de los coeficientes de transferencia de masa mediante el primer término de la ecuación [26], siendo la expresión:

$$k = (dw/dt) / [A (p_g - p_w)] \quad [43]$$

- Comparación de los coeficientes de transferencia de masa obtenidos de la experimentación contra las expresiones extraídas de la bibliografía:
  - $k = [2 \pi k_a d (T_g - T_w)] / [D_w A (p_w - p_g)] \quad [44]$
  - $h = [k (p_w - p_g) \lambda_w] / (T_g - T_w) \quad [45]$
- Determinación de tiempo de la trayectoria de la gota a la pared de la cámara mediante la ecuación [10]
- Evaluación de tiempos de secado mediante la ecuación [14]
- Construcción de la curva de secado, velocidad de secado en función de humedad del sólido ( $dw/dt$  en función de X)
- Establecimiento de una relación de los números adimensionales que representen al fenómeno en estudio, considerando la expresión [2]
- Análisis y proposición del método de predicción de condiciones de secado por aspersión de un alimento.

#### IV.- Consideraciones

El estudio del secado por aspersión presenta dificultades debido a las condiciones propias de la operación tales como los tiempos de secado extremadamente cortos, la forma y materiales de construcción de la cámara de secado, los patrones de flujo del aire y de las gotas, el tamaño y forma de las gotas, entre otras. Es por esta razón que fue necesario hacer algunas consideraciones, las cuales se presentan a continuación:

#### Primera etapa:

1. Temperatura de la superficie de la gota.- como la transferencia de calor durante el secado por aspersión se realiza por convección forzada y para llevarse a cabo la evaporación, la superficie de la gota debe alcanzar la saturación, se supone que la temperatura de la superficie de la gota es la temperatura de bulbo húmedo del aire. (11, 15, 20)
2. Temperatura dentro de la cámara.- debido a que el cambio de la temperatura del aire a la entrada de la cámara se realizó sólo en el área de atomización y luego permanece constante en el resto de la cámara, se considera que es la misma a la salida de la cámara.
3. Velocidad del aire.- la velocidad del aire tiene tres componentes (radial, axial y tangencial). Dentro de la cámara de secado, la velocidad del aire manifiesta principalmente una sola componente, que es la tangencial, debido al movimiento circular que sigue al entrar a la cámara de secado.(11, 15)
4. Velocidad de la gota.- la velocidad de la gota tiene tres componentes (axial, radial y tangencial). Dentro de la cámara la gota sigue el patrón de flujo de la velocidad del aire, por lo tanto su velocidad es, principalmente sólo en la dirección tangencial.(1, 11)
5. Forma de la gota.- debido a los problemas que implica manejar la geometría de una gota, se considera a la gota con forma esférica para facilitar el estudio.(9, 11, 20)
6. Distribución de las gotas.- el disco atomizador esprea gotas de diferentes tamaños, pero se puede determinar el diámetro medio de ellas. Como factor limitante tenemos el diámetro máximo que puede ser considerado como tres veces el diámetro medio.(20)
7. Tensión superficial.- la tensión superficial es un factor que afecta el diámetro de la gota asperjada. La tensión superficial varía al tener diferentes concentraciones, pero esto implica la variación de otros factores como la densidad y la viscosidad. Es posible variar la tensión superficial en la solución salina, empleando un agente tensoactivo, sin variar con ello alguna otra propiedad.(8)
8. Se considera que durante el secado, la solución salina no presenta el período de velocidad decreciente sino únicamente el período de velocidad constante. Esto se atribuye a que la sal no contienen humedad ligada, que es eliminada en el período de velocidad decreciente.

#### Segunda etapa:

1. Se hacen las mismas consideraciones que en la etapa anterior.
2. Se supone que el diámetro crítico de la gota asperjada es igual al diámetro final de la partícula seca.(32)

#### Tercera etapa:

1. Se toman las consideraciones 1, 3, 4, 5, 6, y 8 de la primera etapa.
2. Se considera que para soluciones que forman cristales, como en el caso de sal, el diámetro final de la partícula es casi igual que el de la gota asperjada, es decir que durante el secado no existe una reducción considerable de tamaño.(20)

3. Se emplea agua como fluido a secar para poder facilitar la comparación de los coeficientes obtenidos con los resultados de otros investigadores que presentaron relaciones para los coeficientes de transferencia de calor para gotas estacionarias de agua. (2, 11, 18)
4. Se supone una simetría dentro de la cámara de secado, por lo que sólo se realiza la determinación de las temperaturas de bulbo seco y húmedo durante la experimentación en una mitad del secador por aspersión.

## CAPITULO 3

### ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en cada una de las etapas del presente trabajo, así como el análisis de los mismos.

#### 3.1 Primera etapa

Dentro de la primera etapa, se estudió el efecto de la velocidad de rotación del disco aspersor, la tensión superficial y la temperatura de entrada del aire sobre el coeficiente de transferencia de calor, la velocidad de secado y la eficiencia térmica global. Esto se realizó en dos partes.

La primera, fue el estudio de la velocidad de rotación y la tensión superficial sobre el coeficiente de transferencia de calor, presentando a continuación los coeficientes convectivos resultantes, tanto de los obtenidos por números adimensionales como por los obtenidos a partir de balances de materia y energía.

**Cuadro 1** Coeficientes  $h_B$  y  $h_N$  variando tensión superficial y velocidad rotacional

N	$\gamma$	$h_B$	$h_N$
14860	14.1	48.27	2379.51
	19.7	41.00	2330.64
25410	14.1	40.30	3767.60
	19.7	39.58	3697.45

El comportamiento esperado para la tensión superficial era que a mayor tensión, el valor del coeficiente convectivo se vería disminuido, dado que el aumento de la tensión superficial provoca que el diámetro de las gotas asperjadas sea mayor. Sin embargo, de los resultados experimentales se obtuvo que la tensión no afecta el coeficiente de transferencia de calor, al menos no en el intervalo de variación empleado en este estudio. Esto se debe a que aún cuando la tensión superficial de un líquido se manifiesta como una fuerza entre las moléculas de las gotas, de manera que se tiene una tendencia a formar esferas, la fuerza entre estas gotas es inmensamente menor a la fuerza centrífuga que proporciona el disco atomizador.

Para la velocidad rotacional del disco, el comportamiento esperado era que a medida que aumentarían las revoluciones del disco, el coeficiente de transferencia de calor aumentara. Aquí se obtuvieron dos tendencias diferentes, mientras que los coeficientes obtenidos por números adimensionales, sí cumplieron el comportamiento predicho, los coeficientes  $h_B$  presentaron la tendencia opuesta, es decir que al aumentar N, los coeficientes de transferencia de calor disminuyeron. Esto se justificó pensando que los coeficientes  $h_B$ , aún cuando el tamaño de la gota es menor, la partícula sale a una velocidad más elevada y está muy poco tiempo con el aire a la temperatura de entrada.

La segunda parte de la primera etapa, se enfocó al estudio de la velocidad de rotación y de la temperatura de entrada del aire sobre las mismas variables de respuesta, que en la parte anterior. La gráfica de la Figura 17 muestra la tendencia del coeficiente  $h_B$  obtenido del secado por aspersión de la solución salina con tres niveles de velocidad de rotación y cuatro niveles de

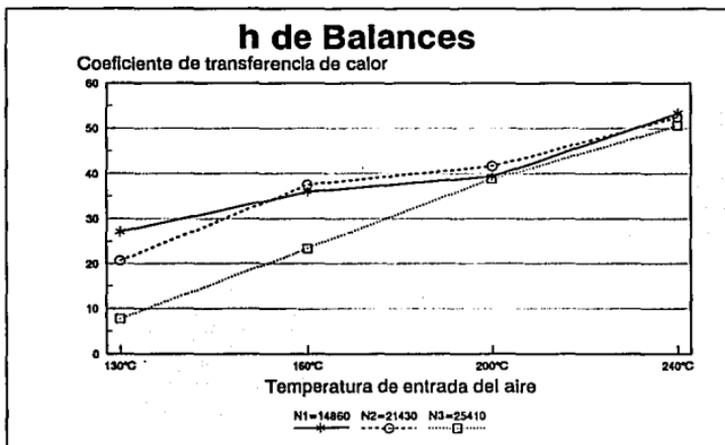


Figura 17

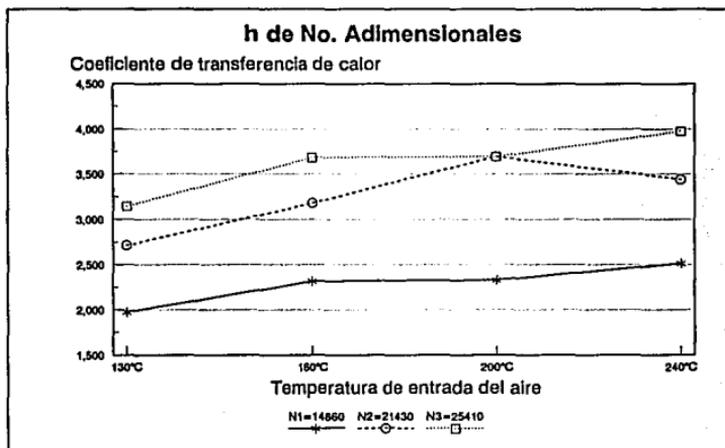


Figura 18

temperatura de entrada del aire, mientras que en la Figura 18, se muestra el comportamiento de  $h_N$  en las mismas condiciones.

El aumento en la temperatura de entrada del aire provoca un aumento en los coeficientes de transferencia de calor obtenidos por los dos diferentes caminos. No sucediendo así para el efecto que ejerce la velocidad de rotación del disco como ya se mencionó antes. La diferencia entre estos comportamientos, así como la diferencia tan marcada entre los valores de  $h_B$  y  $h_N$  se atribuyó a que mientras los coeficientes obtenidos a partir de los números adimensionales tienen una tendencia ideal, sin olvidar el origen de la expresión empleada, los coeficientes resultantes del balance de materia y energía fueron obtenidos del ámbito real en que se desarrolla la operación de secado por aspersión.

Se aplicaron los análisis estadísticos planteados a las variables en estudio presentando los resultados obtenidos en el siguiente cuadro.

**Cuadro 2 Resultados de análisis estadísticos para  $h_B$  y  $h_N$ .**

Análisis estadístico	Fuente de variación	Efecto ejercido
Factorial N VS $T_{p1}$ para $h_B$	Repetición	No significativo
	N	Significativo
	$T_{p1}$	Significativo
	Interacción	No significativo
Factorial N VS $T_{g1}$ para $h_N$	Repetición	-
	N	Significativo
	$T_{g1}$	Significativo
	Interacción	-

Los resultados de estos estadísticos confirman la importancia de las variables en estudio, velocidad de rotación del disco aspersor y la temperatura de entrada del aire. Del análisis aplicado a la tensión superficial, se confirmó también que esta propiedad no ejerce un efecto significativo sobre el coeficiente de transferencia de calor, al menos no en el intervalo de variación empleado en este estudio.

En cuanto al efecto de la velocidad de rotación del disco atomizador y la temperatura de entrada del aire sobre la eficiencia térmica global, se tuvo que a medida que la temperatura del aire aumenta, la eficiencia, como era de esperarse, también aumenta.

El caso contrario se presenta con la velocidad de rotación, ya que a medida que la velocidad rotacional aumenta, la eficiencia térmica global (pág 23), disminuyó. Esto puede explicarse nuevamente bajo la idea que, aunque una mayor N provoca un diámetro menor de la gota asperjada, la gota viaja a una velocidad mucho mayor y permanece menor tiempo en la zona más caliente de la cámara de secado.

Las tendencias mencionadas se pueden ver en la Figura 19, donde se trazó una gráfica la eficiencia en función de la temperatura de entrada del aire para los tres niveles de velocidad de rotación empleados. Si se trazara una gráfica de la eficiencia térmica global en función del coeficiente de transferencia de calor se tendría un comportamiento que confirma la tendencia de que a mayor velocidad de rotación la eficiencia disminuye.

Para el estudio del efecto de la velocidad de rotación del disco atomizador y la temperatura de entrada del aire sobre la última variable de respuesta, la velocidad de secado, ésta fue evaluada a partir tanto de los coeficientes  $h$  de balances como de los coeficientes  $h$  de adimensionales.

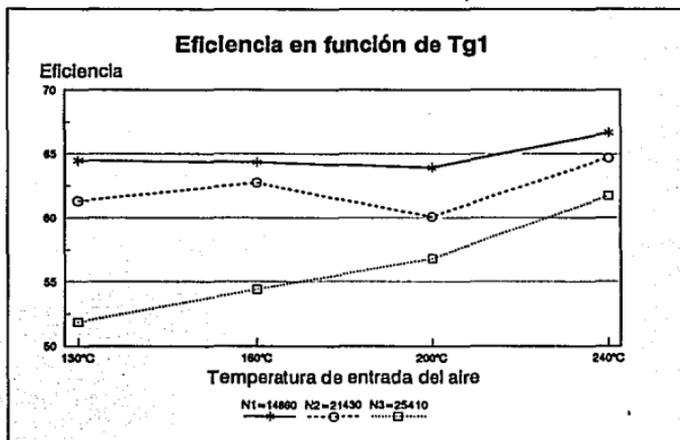


Figura 19

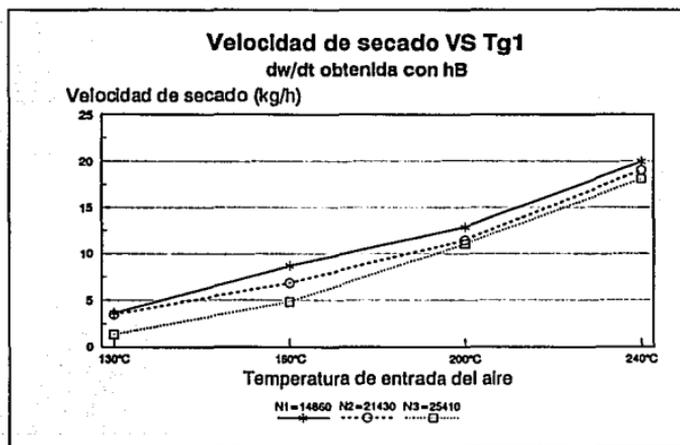


Figura 20

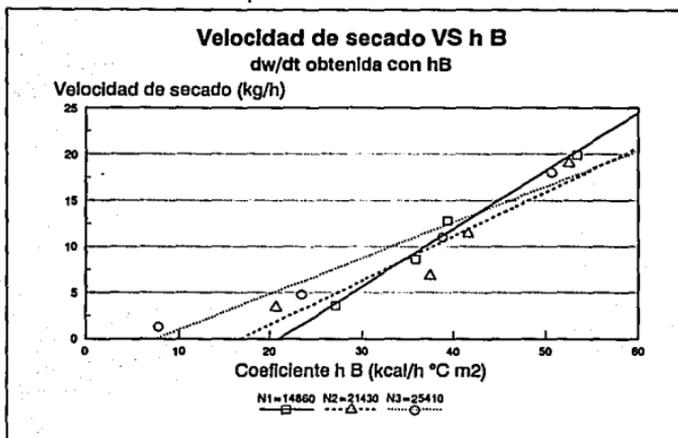


Figura 21

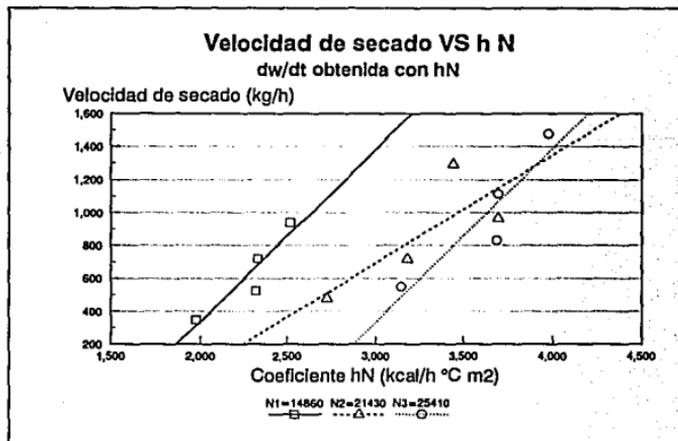


Figura 22

Para el caso de la temperatura de entrada del aire se esperaba que a medida que ésta aumentara, la velocidad de secado también se incrementara. Esto se cumplió para la velocidad de secado obtenida para ambos caminos (Figura 20). Esto se debe a que al aumentar la temperatura de entrada del aire se incrementa la diferencia de temperaturas entre el aire y la gota, provocando un mayor flujo de calor del aire a la gota y, por lo tanto, un mayor flujo de masa de la gota al aire.

En cuanto a la velocidad rotacional se esperaba, al igual que en los coeficientes de transferencia de calor y la eficiencia térmica global, que para un aumento en la velocidad rotacional del disco existiera un aumento en la velocidad de secado. Sin embargo, se presentaron dos comportamientos diferentes, mientras que para la velocidad de secado obtenida a partir de los números adimensionales sí se cumplió la tendencia esperada (Figura 22), para la velocidad de secado obtenida a partir de los balances de materia y energía la tendencia fue la opuesta (Figura 21).

Este hecho puede explicarse de varias formas, entre ellas que aún cuando la gota sea de menor tamaño con una velocidad rotacional más grande, la partícula sale a una velocidad más elevada y está muy poco tiempo en contacto con el aire a la temperatura de entrada. Sin embargo, hay que remarcar que la expresión empleada para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor por medio de los números adimensionales, se desarrolló para gotas estacionarias en un flujo de aire con movimiento muy lento, lo cual no es muy cierto para secado por aspersión. De este modo, las tendencias obtenidas para los coeficientes con base en los números adimensionales, son un tanto ideales, sucediendo lo contrario para los coeficientes con base en el balance de materia y energía. Cabe mencionar, que el orden de los coeficientes de transferencia de calor con base en los números adimensionales estuvo entre 2000 y 4000 kcal/h m<sup>2</sup> °C, mientras que el orden de los coeficientes con base en el balance de materia y energía estuvo entre 20 y 50 kcal/h m<sup>2</sup> °C; esta diferencia confirma lo anteriormente explicado, eligiendo como más confiables los resultados obtenidos a partir de los balances de materia y energía.

El análisis estadístico apoya lo antes mencionado, sobre el efecto tan importante de las dos variables N y Tg1, y su interacción sobre la velocidad de secado durante el proceso de secado por aspersión de la solución salina.

Se encontró una relación entre la eficiencia térmica global, la velocidad de secado y el coeficiente de transferencia de calor (3), de la cual se puede obtener el punto que indica las mejores condiciones de operación en función de la transferencia de calor durante el período de velocidad constante del secado por aspersión de la solución salina al 25%. Aunque los resultados obtenidos en esta etapa sobre la evaluación de las diferentes variables de operación para determinar los parámetros que delimitan y explican la transferencia de calor durante el período de velocidad constante, sus valores no son extrapolables para otros fluidos que se sometan a este proceso. Sin embargo, la metodología seguida se puede utilizar para replantear cualquier otra experimentación que determine los valores de los parámetros de cada fluido específico.

Otra de las actividades planteadas en esta etapa fue la determinación de la humedad del producto seco. El producto obtenido presentó una humedad muy pequeña (0.5% base seca), lo que indica que la mayor parte del agua evaporada era libre, y que para eliminarse el agua de la gota se mantiene una capa límite durante la evaporación. Con esto se comprueba que el modelo propuesto es apto para estudiar únicamente el período de velocidad constante durante el proceso de secado.

La transferencia de calor se da directamente del aire hacia la gota. El calor cedido del aire hacia la gota se da por convección forzada, por ello, no se involucran características del equipo, ya que la transferencia de calor por conducción y radiación es despreciable. Por lo tanto, el coeficiente global U determinado a partir del calor proveniente del balance de energía

resulta ser el coeficiente convectivo de transferencia de calor, tomando la forma de la ecuación de Newton [1].

### 3.2 Segunda etapa

El objetivo de esta etapa fue estudiar el efecto del diámetro de partícula, la temperatura de entrada del aire y las velocidades relativas aire-partícula sobre la transferencia de calor y masa durante el secado por aspersión de huevo, mediante la modelización para encontrar la relación entre los tiempos de secado del modelo y en el secador por aspersión. La razón de elegir un alimento como fluido a procesar fue el hecho de que éste, por su naturaleza, contiene humedad libre y humedad ligada, lo cual indica la presencia de los dos períodos de secado (constante y decreciente).

Inicialmente, esta etapa había sido concebida en dos partes, la primera comprendía la modelización de una partícula suspendida en un sistema que proporcionara aire caliente. De aquí se evaluaría la velocidad de secado, la difusividad, el coeficiente convectivo de transferencia de calor y el coeficiente de transferencia de masa, todo esto enfocándose posteriormente al tiempo de secado. De la curva de secado, podría conocerse además el contenido de humedad crítica ( $X_c$ ).

La segunda parte comprendía el secado por aspersión del huevo, obteniendo de ahí los tiempos de secado, empleando el contenido de humedad crítica resultante de la primer fase mencionada. Y por último se planteaba la relación entre ambos tiempos de secado, los obtenidos del secador y los obtenidos de la modelización.

Durante esta etapa surgieron imprevistos que imposibilitaron la realización de la modelización planteada, por lo que la parte del estudio relacionada con la transferencia de masa no pudo ser analizada. Sin embargo, la parte referente a la transferencia de calor del alimento durante su secado por aspersión sí se efectuó, como se observa en el cuadro metodológico del presente trabajo.

Del secado por aspersión de la dilución de huevo en agua 1:1 con velocidad rotacional constante e igual a 14860 rpm, y variando la temperatura de entrada del aire en tres niveles se obtuvieron los siguientes coeficientes de transferencia de calor.

**Cuadro 3 Coeficientes de transferencia de calor para huevo variando únicamente  $T_{g1}$ .**

$T_{g1}$	U	$T_{g1}$	U	$T_{g1}$	U
150°C	9.236	170°C	13.842	190°C	8.189
	3.086		12.938		9.075
	5.244		13.871		17.308
	12.967				

De este cuadro se puede observar que existen enormes variaciones del coeficiente de transferencia de calor; ésto se atribuyó a que no se estaba trabajando a régimen permanente, lo cual llevó a repetir la experimentación pero empleando en lugar de los termómetros de carátula propios del equipo, un sistema de termopares para poder tener un mejor control de las temperaturas y con ello darle mayor confiabilidad a la experimentación.

Una vez introducidos los termopares en las posiciones que indica la Figura 12, se realizó el secado por aspersión del huevo con dos variables, la velocidad rotacional en dos niveles y la temperatura de entrada del aire en tres niveles.

La gráfica de la Figura 23, muestra el perfil de las temperaturas obtenidos durante la experimentación a una velocidad rotacional de 21430 rpm. Cabe señalar que el termopar de la posición 2 se cayó de su posición durante la experimentación. Se puede observar que las temperaturas registradas en las posiciones 2 a 5 prácticamente no presentan variación alguna, siendo estas las que se presentaron dentro de la cámara de secado, incluso en el punto 6, localizado justo a la salida de la cámara de secado no se presenta algún cambio drástico.

En el punto 7, localizado a la mitad del ducto que conduce a las partículas finas y al aire de secado al ciclón, se registró un decremento en la temperatura, esto se atribuyó a que esta sección del secador ya no está aislada. En la posición 8, justo antes de la entrada al ciclón, se presentó un aumento en la temperatura debido a que la parte superior del secador posee una temperatura elevada.

Se aplicó el algoritmo para evaluar el coeficiente de transferencia de calor en las posiciones 4, 5 6 y 9. Con los coeficientes resultantes se trazó una gráfica mostrándose en la Figura 24. Aparentemente, la posición del termopar en el secador no afecta al coeficiente de transferencia de calor. Se realizó un análisis de coeficiente de variación para los coeficientes de transferencia de calor para ver si las diferencias son considerables estadísticamente, teniendo como coeficiente de variación máximo un 2.9%, lo que sugiere que no exista un perfil de temperaturas marcado dentro de la cámara de secado, hecho no confiable del todo.

Por otro lado, nuevamente se confirmó la gran influencia de la temperatura de entrada del aire y de la velocidad rotacional sobre los coeficientes de transferencia de calor. A medida que la temperatura del aire secante aumenta, los coeficientes de transferencia de calor son mayores. En cuanto a la velocidad de rotación del disco, se encontró que a diferencia de los resultados obtenidos del secado por aspersión de la solución salina, a medida que esta variable aumenta, los coeficientes de transferencia de calor también aumenta. Esto puede atribuirse a que el tamaño de la gota de huevo es mayor en un 20% que la gota de la solución de NaCl, que la tensión superficial de la gota de huevo es cuatro veces más grande que la de la solución salina, y/o a la presencia de los dos periodos de secado durante el secado por aspersión del huevo.

Realizando análisis factoriales de temperatura de entrada del aire contra las posiciones de los termopares, para cada una de las velocidades rotacionales empleadas, se obtuvo que los dos parámetros, así como su interacción ejercen un efecto significativo para el caso de la velocidad de 21430 rpm, mientras que para la velocidad de 25410 rpm sólo ejerce efecto significativo la temperatura de entrada del aire.

La eficiencia térmica global tuvo el comportamiento siguiente, a medida que la temperatura de entrada del aire aumenta, la eficiencia también aumenta, y con un incremento de la velocidad rotacional también aumenta la eficiencia, es decir, su tendencia fue igual a la de los coeficientes de transferencia de calor, como era de esperarse.

De la determinación de humedad del producto seco, se obtuvo que el contenido de humedad del huevo en polvo osciló entre 2.2 y 3.7% base seca, humedad permitida dentro de los estándares establecidos para este producto (7).

Ahora bien, para que realmente se pueda comparar la experimentación efectuada con la solución salina y la efectuada con huevo, es necesario manejar el mismo porcentaje de sólidos en ambos fluidos, ya que mientras para la sal el contenido de sólidos fue de 25%, para el huevo fue de 12.5% debido a la dilución del mismo en agua.

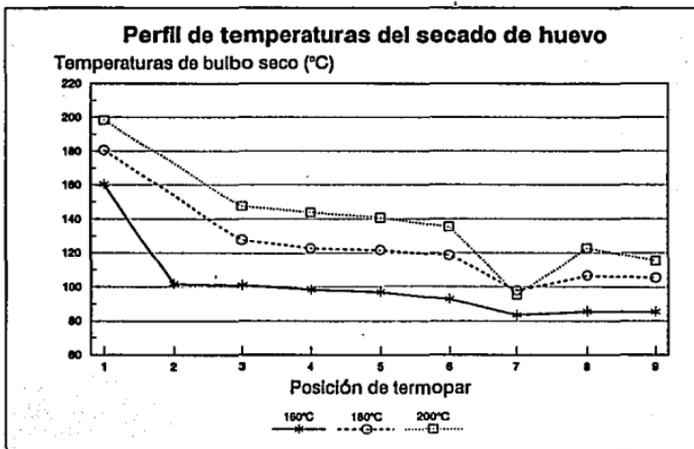


Figura 23

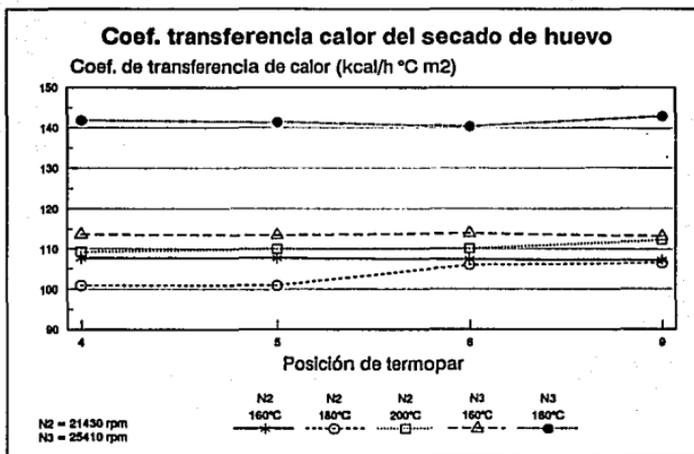


Figura 24

### 3.3 Tercera etapa

Antes de iniciar la experimentación comprendida en la tercera etapa, fue necesario realizar la construcción de la estructura soporte de los termopares, la implementación del sistema de medición de las temperaturas de bulbo húmedo y la validación de los termopares empleados, las cuales fueron descritas en la sección 2.2 del capítulo anterior.

Como resultado de la validación se obtuvieron las ecuaciones para cada termopar, que dieron las temperaturas ya corregidas. Las ecuaciones resultantes son:

$$\begin{array}{ll} \text{Tp 1} = (0.995 \text{ T1}) - 0.428 & \text{Tp 2} = (1.001 \text{ T2}) - 0.739 \\ \text{Tp 3} = (0.998 \text{ T3}) - 0.524 & \text{Tp 4} = (0.996 \text{ T4}) - 0.0768 \\ \text{Tp 5} = (1.002 \text{ T5}) - 0.213 & \text{Tp 6} = (0.990 \text{ T6}) + 0.137 \\ \text{Tp 7} = (0.986 \text{ T7}) + 1.789 & \text{Tp 8} = (1.009 \text{ T8}) - 0.395 \\ \text{Tp 9} = \text{T9} & \text{Tp 10} = \text{T10} \\ \text{Tp 11} = (1.0059 \text{ T11}) - 0.067 & \text{Tp 12} = (1.0057 \text{ T12}) - 2.03 \\ \text{Tp 13} = (1.035 \text{ T13}) - 3.024 & \text{Tp 14} = (1.015 \text{ T14}) - 1.336 \\ \text{Tp 15} = (1.003 \text{ T15}) - 0.579 & \end{array}$$

Para la determinación de las propiedades de alimentación de los fluidos involucrados en esta etapa, se realizaron experimentalmente las determinaciones de densidad, viscosidad y tensión superficial para la solución de NaCl al 12.5%, al igual que la tensión superficial para el agua, empleando los métodos descritos en la sección 2.2. La densidad y la viscosidad del agua fueron valores tomados de tablas (12). Los resultados se presentan a continuación:

	Agua	Solución salina
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0.9962	1.15
Viscosidad (g/cm s)	0.026	0.009
Tensión superficial (dina/cm)	19.74	30.19

También se calibró el rotámetro para manejar el mismo gasto volumétrico para los dos fluidos, fijándose éste en 11.087 l/h. Conociendo la densidad de cada fluido y el gasto volumétrico, se determinó el gasto máscico de alimentación, siendo para el caso del agua igual a 3.067 g/s, y para la solución salina de 3.540 g/s.

Una vez realizadas estas actividades, se inició la experimentación con velocidad rotacional constante e igual a 14860 rpm, para los ensayos establecidos de secado por aspersion de los dos fluidos a las temperaturas correspondientes.

#### 3.3.1 Perfiles de temperatura y de humedad

Las lecturas de temperatura obtenidas fueron corregidas con las ecuaciones resultantes de la validación de los termopares. Estos datos fueron sometidos a los análisis estadísticos planteados en el cuadro metodológico, y del análisis de coeficiente de variación se obtuvo que los intervalos en los que se encuentran éstos son:

**Cuadro 4 Coeficientes de variación para Tg y Tw**

ENSAYO	Temperatura	% Coeficiente de variación
Agua 200°C	Bulbo seco	0 a 1.23
	Bulbo húmedo	0 a 1.83
Agua 160°C	Bulbo seco	0 a 2.10
	Bulbo húmedo	0 a 2.38
Sal 180°C	Bulbo seco	0 a 2.54
	Bulbo húmedo	0 a 3.66

Esto indica que las temperaturas obtenidas son bastante confiables, por lo que serán utilizadas desde este momento las medias aritméticas, las cuales representan los valores centrales de la población.

De la misma manera que se realizaron los análisis de coeficiente de variación para las temperaturas íntimas de la cámara de secado, también se realizaron para las temperaturas de bulbo seco y húmedo para el aire ambiente. Por conveniencia para el manejo de los datos, se sometieron a otro análisis de coeficiente de variación las medias aritméticas de las temperaturas en los puntos de entrada y salida, así que de esta manera, los cuadros 5 a 7 resumen las medias aritméticas de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo que representan los puntos evaluados en este estudio.

Las abreviaturas de los cuadros significan: TEM = temperaturas, BS = bulbo seco, BH = bulbo húmedo, ENT = entrada del aire, SAL = salida del aire, en la válvula de mariposa, A, B, C, D, E, F = los diferentes puntos evaluados a lo ancho de la cámara de secado, y las líneas 1, 2, 3, 4, 5, 6 = los diferentes puntos evaluados a lo largo de la cámara de secado.

**Cuadro 5 Temperaturas promedio de bulbo seco y húmedo para agua a 200°C**

Línea	TEM	ENT	A	B	C	D	E	F	SAL
1	BS	199.84	47.72	45.30	45.38	46.33	66.56	69.62	63.70
	BH		43.35	43.50	43.98	44.52	42.82	43.13	41.30
2	BS		65.24	59.52	45.38	48.12	57.10	62.18	
	BH		45.53	45.30	44.58	44.54	43.01	43.34	
3	BS		67.23	67.32	64.94	63.06	63.34	64.45	
	BH		45.14	44.90	45.38	46.73	44.63	43.96	
4	BS		70.41	71.53	71.33	70.03	70.17	70.87	
	BH		46.73	46.90	46.18	46.53	44.42	44.16	
5	BS		70.21	71.93	71.93	69.83	70.58	71.69	
	BH		45.33	45.30	45.58	46.53	46.03	46.44	
6	BS		67.62	69.33	70.33	68.24	69.57	70.46	
	BH		45.14	45.50	51.37*	45.33	43.42	44.99	

Ambiente: BS=21.66 y BH=17.63

\* Este punto es desechado dado que hubo problemas con los registros dados por el termopar.

**Cuadro 6 Temperaturas promedio de bulbo seco y bulbo húmedo para agua a 160°C**

Línea	TEM	ENT	A	B	C	D	E	F	SAL
1	BS	160.40	40.36	40.30	40.59	41.75	40.60	46.23	55.05
	BH		40.36	39.70	38.79	40.15	38.79	38.78	39.69
2	BS		52.70	46.70	41.39	42.15	44.23	50.56	
	BH		40.56	40.10	39.59	39.95	38.99	39.20	
3	BS		49.91	49.91	46.18	44.14	42.61	45.20	
	BH		40.16	39.90	39.99	40.55	38.99	38.99	
4	BS		53.49	54.31	53.36	52.70	49.25	48.92	
	BH		40.16	40.10	40.19	40.15	38.59	38.99	
5	BS		51.70	51.71	52.26	51.11	48.85	48.31	
	BH		40.36	40.10	40.99	41.35	39.60	38.99	
6	BS		49.51	51.91	49.57	49.71	46.63	46.03	
	BH		39.96	39.50	40.19	40.55	38.39	38.99	

Ambiente: BS=21.66 y BH=17.63

**Cuadro 7 Temperaturas promedio de bulbo seco y bulbo húmedo para sal a 180°C**

Línea	TEM	ENT	A	B	C	D	E	F	SAL
1	BS	180.57	48.92	46.30	45.38	45.73	48.45	56.38	59.93
	BH		45.53	43.30	42.38	43.94	42.62	43.55	41.32
2	BS		59.07	55.31	46.18	46.73	51.46	56.38	
	BH		42.55	42.10	41.99	42.74	41.21	41.27	
3	BS		61.06	60.72	60.35	55.69	58.51	58.24	
	BH		43.74	42.90	43.18	43.54	41.81	42.09	
4	BS		58.07	57.91	58.35	57.69	55.29	55.13	
	BH		41.55	41.50	42.38	41.95	41.21	42.09	
5	BS		63.05	62.52	63.34	59.67	60.52	61.14	
	BH		42.75	42.10	43.98	42.35	41.81	41.47	
6	BS		62.25	62.32	63.34	58.08	60.31	61.34	
	BH		43.54	42.70	43.38	43.14	41.21	41.48	

Ambiente: BS=20.33 y BH=16.30

Con el fin de observar el comportamiento de las temperaturas dentro de la cámara de secado, se presentan en las Figuras 25, 26 y 27 las gráficas que representan los perfiles de las temperaturas de bulbo seco para cada ensayo.

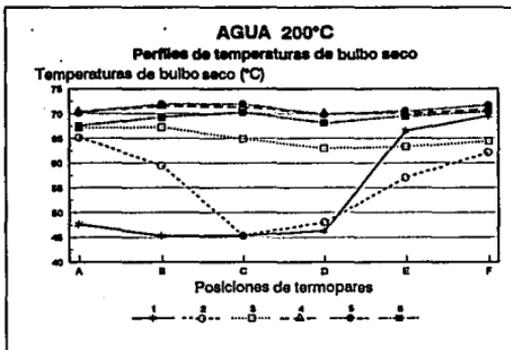
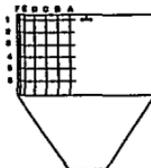


Figura 25

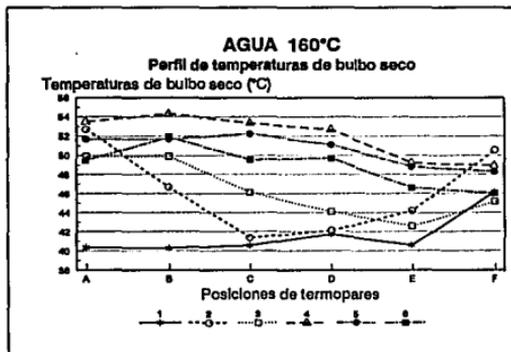


Figura 26

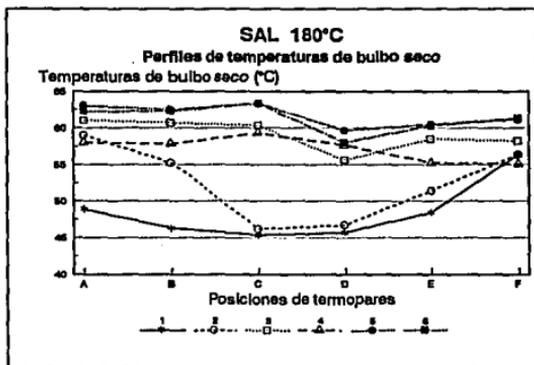
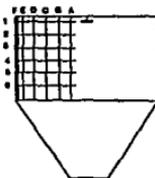


Figura 27

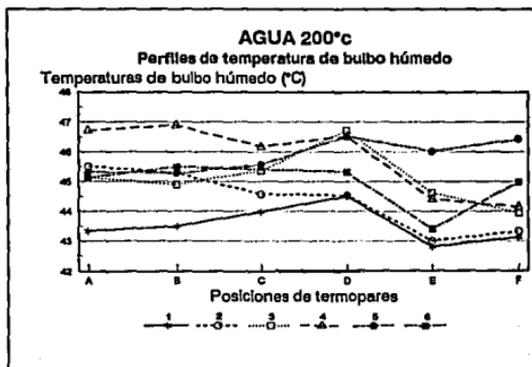


Figura 28

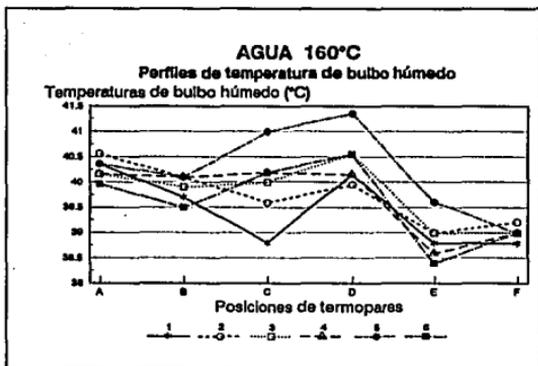
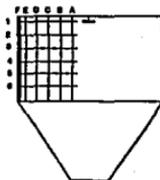


Figura 29

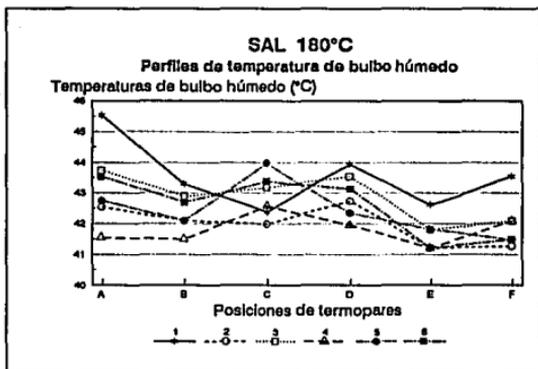


Figura 30

Como se puede observar las líneas 1 y 2 en las tres gráficas son las que presentan mayor variación, así como también que tienen una tendencia a aumentar la temperatura a medida que se acerca a la pared de la cámara. Además se puede observar que en estas mismas líneas, las posiciones B, C y D son las que poseen valores más bajos de temperatura. En cuanto a las líneas 4, 5 y 6, se observa que tienen tendencias y valores muy semejantes entre sí; casi logrando permanecer a temperatura constante, siendo esto más marcado en el ensayo de agua a 200°C. En el caso de la línea 3, su tendencia es semejante a las líneas 4, 5 y 6, la diferencia radica en que los valores de temperatura de esta línea se encuentran entre las dos primeras y las tres últimas, indicando con ello una especie de transición en el perfil de temperaturas. Los porcentajes de diferencia mencionados son de 13.5% de aumento en la temperatura para la línea 3 con respecto a las líneas 1 y 2, y de 6.3% menos de la temperatura de la línea 3 con respecto a las líneas 4, 5 y 6.

Analizando esta situación en cuanto a la transferencia de calor, es obvio que en los puntos donde ocurren los cambios más drásticos en la temperatura (líneas 1 y 2, posiciones B, C y D), es donde se presenta el intercambio térmico principal entre las gotas y el aire.

Por otro lado, de las gráficas se puede observar también que existe un comportamiento proporcional en los perfiles de Tg con respecto a la temperatura de entrada del aire. Evaluando por ejemplo, el decremento de Tg en algunas posiciones tenemos:

**Cuadro 8 Decremento de Tg en algunas posiciones de la cámara de secado**

Ensayo	Posición B Líneas 1-2	Posición B Líneas 2-3	Posición C Líneas 2-3	Posición D Líneas 2-3
Agua 200°C	31.39 %	13.10 %	43.10 %	31.04 %
Agua 160°C	15.88 %	6.9 %	11.57 %	4.72 %
Sal 180°C	19.46 %	9.78 %	30.68 %	19.17 %
Estimado para 180°C	23.63 %	10.0 %	27.33 %	17.88 %

De este cuadro se puede ver que la diferencia entre los resultados del ensayo de la solución salina a 160°C contra el estimado para agua a 180°C es poca. Esta diferencia se atribuyó a la naturaleza del fluido, ya que mientras que el agua no contiene sólidos en suspensión, la solución salina posee un 12.5% de ellos. Sin embargo, hay que remarcar que la tendencia de los perfiles para ambos fluidos es muy semejante.

Para el comportamiento de las temperaturas de bulbo húmedo, se presentan las medias aritméticas en las gráficas de las Figuras 28 a 30. De estas gráficas se puede observar que la temperatura de bulbo húmedo disminuye a medida que se aleja del disco atomizador, siendo esto contrario a lo que sucedía con las temperaturas de bulbo seco. Además es conveniente señalar la diferencia muy marcada en los intervalos que existen entre las temperaturas de bulbo húmedo y los intervalos que presentan las temperaturas de bulbo seco.

Ensayo	Intervalo de Tg	Intervalo de Tw
Agua 200°C	26.55 °C	3.89 °C
Agua 160°C	13.19 °C	2.96 °C
Sal 180°C	17.96 °C	4.32 °C

Esta diferencia en los intervalos de las temperaturas de bulbo húmedo, nunca mayor de 4.32°C, sumado a que no existe mucha diferencia entre sí de las tendencias de las 6 líneas de

estudio, conduce a pensar que la temperatura de bulbo húmedo puede ser considerada constante dentro de la cámara de secado. Por esta razón se realiza un análisis de coeficiente de variación para todas las temperaturas de bulbo húmedo obteniendo los siguientes resultados:

Tw global agua a 200°C = 44.94°C con un CV de 2.56%  
 Tw global agua a 160°C = 39.73°C con un CV de 1.79%  
 Tw global sal a 180°C = 42.53°C con un CV de 2.26%

Basándose en los coeficientes de variación es factible hacer la consideración de que la temperatura de bulbo húmedo permanece constante dentro de la cámara de secado.

Las temperaturas de bulbo seco de cada uno de los ensayos, fueron sometidas a un análisis factorial para evaluar la influencia de la posición radial y longitudinal sobre el valor de temperatura obtenido, para así confirmar lo anteriormente mencionado en cuanto a su comportamiento. Para reconfirmar que la temperatura de bulbo húmedo permanece constante dentro de la cámara de secado, se realizó un análisis de bloques aleatorios para estas temperaturas obtenidas bajo las condiciones de cada ensayo. Los resultados de dichos análisis estadísticos se presentan en el cuadro 9.

Como resultado de estos análisis, se tiene que la posición radial, la longitudinal y su interacción ejercen un efecto significativo sobre las temperaturas de bulbo seco, lo cual puede observarse en las gráficas de los perfiles de temperatura de bulbo seco. Las repeticiones no fueron significativas para agua a 200°C y para sal a 180°C, presentándose el caso contrario para agua a 160°C, sin embargo, dados los coeficientes de variación tan bajos obtenidos, este efecto fue desechado.

Para las temperaturas de bulbo húmedo, ni de la posición longitudinal ni de la posición radial, ejercen un efecto significativo sobre dichas temperaturas. Esto, sumado a los perfiles obtenidos y a los coeficientes de variación permiten asegurar que la temperatura de bulbo húmedo permanece constante dentro de la cámara de secado.

**Cuadro 9 Resultados de análisis estadísticos para Tg y Tw**

Ensayo	Análisis estadístico	Fuente de variación	Efecto ejercido	
Agua 200°C	P.rad y P.long @ Tg	Repetición	No significativo	
		P. longitudinal	Significativo	
		P. radial	Significativo	
		Interacción	Significativo	
Agua 160°C	P.rad y P.long @ Tg	Repetición	Significativo	
		P. longitudinal	Significativo	
		P. radial	Significativo	
		Interacción	Significativo	
Sal 180°C	P.rad y P.long @ Tg	Repetición	No significativo	
		P. longitudinal	Significativo	
		P. radial	Significativo	
		Interacción	Significativo	
Agua 200°C	Prad y P.long @ Tw	P. radial	No significativo	
		P. longitudinal	No significativo	
		Agua 160°C	P. radial	No significativo
			P. longitudinal	No significativo
Sal 180°C	Prad y P.long @ Tw	P. radial	No significativo	
		P. longitudinal	No significativo	

Observando las temperaturas ya sea de bulbo seco o las de bulbo húmedo, que se obtienen a la salida de la válvula de mariposa, son muy semejantes a las que se obtienen en las líneas 4, 5 y 6, repitiéndose esta situación para los tres ensayos. Este hecho permite hacer la consideración de que las condiciones de salida del aire, pueden ser tomadas como las existentes dentro de la cámara de secado, para fines prácticos, es decir, para ocasiones en las que se cuente con las condiciones de salida del aire únicamente.

Ahora bien, como era de esperarse las temperaturas obtenidas son más altas mientras mayor sea la temperatura de entrada del aire. La diferencia entre la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo global permite conocer el comportamiento de este  $\Delta T$  dentro de la cámara de secado para cada uno de los ensayos. Es conveniente mencionar que mientras para los ensayos de agua el  $\Delta T$  inicial es bajo, para el caso de sal es casi tres veces mayor para el caso de agua a 200°C y 10 veces mayor que en el caso de agua a 160°C. Esto puede atribuirse a la presencia de sólidos en las gotas esparcidas.

De las gráficas de los  $\Delta T$ , se puede observar que, nuevamente existen tendencias semejantes entre los tres ensayos; las líneas 1 y 2 son las que presentan mayor variación, mientras que las líneas 4, 5 y 6 presentan un comportamiento muy semejante entre sí y permaneciendo casi constantes. La línea 3 se encuentra entre las 2 primeras y las 3 últimas con un comportamiento un tanto similar a este último grupo. La tendencia a permanecer constante el  $\Delta T$ , es más marcado en el ensayo de agua a 200°C. Las variaciones en las líneas 1 y 2, implican que es básicamente en éstas donde se está llevando a cabo el mayor intercambio térmico entre el aire y las gotas, mientras que en las líneas 4, 5 y 6 este intercambio ya no existe, o existe solamente para establecer el equilibrio entre el aire y las partículas.

También se puede observar que la línea 1 para los tres ensayos es la que presenta valores de  $\Delta T$  más bajos, con tendencia a aumentar a medida que se aleja del disco atomizador. El que la temperatura aumente, significa que en esa zona, ya no se encuentran en intercambio el aire y las gotas, de hecho, es probable que ni siquiera existan gotas en ella. En la línea 2, existe un decremento gradual de la columna A hasta la C, que posteriormente se convierte en un incremento también gradual, es decir, que en el punto C se registra el  $\Delta T$  más bajo de la línea.

Los valores bajos, del orden de 0.36 hasta 4.2°C, implican un intercambio térmico de importancia, es decir que en las zonas que presentan  $\Delta T$  bajos, es donde se está llevando a cabo la mayor remoción de humedad de la gota, o lo que es lo mismo, el secado en el período de velocidad constante. En las líneas donde los  $\Delta T$  permanecen casi constantes (variaciones de aproximadamente 2°C), se remueve el poco de agua restante en las partículas, o simplemente se establece el equilibrio entre aire y partícula, por lo que se puede decir que esta zona corresponde al segundo período de secado, es decir, el de velocidad decreciente. Entonces, en la línea 3, debido a su comportamiento ya mencionado, se presentan ambos períodos de secado, por eso es que las temperaturas se encuentran con valores intermedios entre las líneas 1 y 2, y las tres líneas restantes.

Con todo lo anterior, es posible seccionar la cámara de secado en varias zonas presentadas en la Figura 31, con base en el tipo de transferencia que se presenta en cada una de ellas, así también como en cuanto a los perfiles de temperatura que presentan.

Las zonas A y B son las de mayor intercambio térmico y puede decirse que en ellas se lleva a cabo el secado a velocidad constante; la zona C es una sección en la que ocurre la transición entre el secado a velocidad constante y el secado a velocidad decreciente, mientras que en la zona E se lleva a cabo el secado a velocidad decreciente, si es que todavía queda alguna humedad en la partícula que sea posible remover. En la zona A la temperatura de bulbo seco permanece casi constante, mientras que en la zona D existe una elevación de la

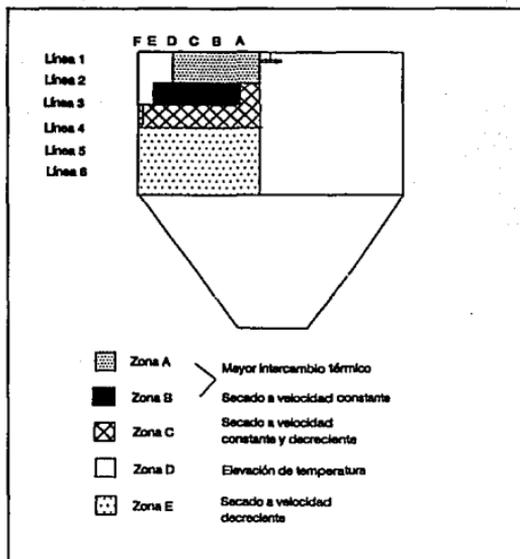


Figura 31 Zonas en la cámara de secado

temperatura. En la zona E, la temperatura de bulbo seco también permanece casi constante, con la diferencia de que los valores de temperatura en esta zona son mayores en comparación con los valores de la zona A. Asimismo, es posible que en la zona D no se lleve a cabo transferencia de calor y masa, dado que es probable que las gotas asperjadas no lleguen a esa zona.

En cuanto a la humedad absoluta, evaluada a partir de las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo en cada uno de los puntos de estudio, empleando una carta psicrométrica obtenida para las condiciones de presión de la Ciudad de México, se construyeron las gráficas que representan los perfiles de humedad que se llenan dentro de la cámara de secado bajo cada una de las condiciones de los ensayos. Desde este momento sólo se presentará dentro de este capítulo la gráfica correspondiente a las condiciones del ensayo de agua a 200°C (Figura 32).

Se puede observar, que los valores de humedad más altos se presentan en la línea 1 para los tres ensayos; cercanos a estos valores se encuentran los puntos C y D de la línea 2. Las líneas 4, 5 y 6 poseen la misma tendencia para los tres ensayos, con poca variación de los valores entre sí. La línea 3, presenta nuevamente un comportamiento un tanto semejante a este último grupo de líneas, aunque sus valores se encuentran entre las dos primeras líneas y las tres últimas. La línea 2 pasa de un incremento considerable en la humedad del punto A al punto C, a una disminución gradual en la humedad, hasta alcanzar valores muy parecidos a los del resto de líneas que le siguen.

Los perfiles de la humedad absoluta son, como era de esperarse, inversos a los perfiles de la temperatura de bulbo seco al igual que a los perfiles del  $\Delta T$  (bulbo seco - bulbo húmedo constante). Esto es, que en los lugares donde las temperaturas son más bajas, las humedades son las más altas, indicando que en esos puntos es donde existe la mayor cantidad de humedad y de intercambio térmico y másico, confirmando la división en sectores dentro de la cámara de secado, como ya fue expuesto en el punto anterior.

### 3.3.2 Coeficientes de transferencia de calor

Para determinar los coeficientes de transferencia de calor fue necesario realizar los balances de energía en cada uno de los puntos en estudio.

Dentro de los pasos involucrados para la realización del balance es necesario determinar el volumen húmedo, el cual permitirá conocer el gasto del aire, además de que permite conocer las densidades del aire, siendo éstas una de sus características físicas importantes.

Cabe hacer mención, que tanto para la humedad absoluta como para el volumen húmedo del aire evaluado a la salida de la válvula de mariposa es muy semejante a los valores que se presentan en las últimas tres líneas, lo que lleva a considerar que en todo el resto del secador, a partir de la línea 4 aproximadamente, permanece con condiciones del aire constantes.

En cuanto a la densidad, los resultados obtenidos de esta determinación para los tres ensayos, pueden graficarse para presentar los perfiles de densidad dentro de la cámara de secado (Figura 33). Se puede observar que tienen un comportamiento muy semejante a los perfiles de humedad, ésto es, que los valores más altos se presentan en la línea 1 y en los puntos C y D de la línea 2. La línea 3 es una transición entre las dos primeras líneas y las tres últimas, mientras que éstas tienen comportamientos semejantes así como también los son sus valores.

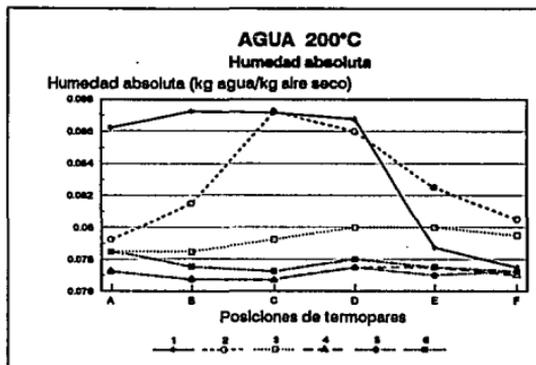
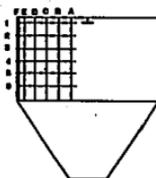


Figura 32

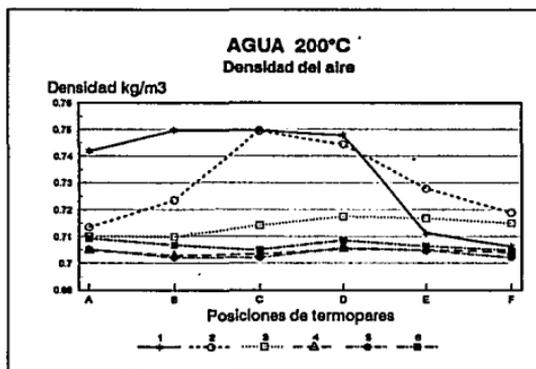


Figura 33

Para determinar las entalpías del aire de los puntos en estudio, y poder continuar con el algoritmo planteado, se empleó la ecuación [34] donde  $T_0$  es la temperatura de referencia, que en este caso es la temperatura de bulbo húmedo global para cada ensayo. De este modo, el calor latente se evaluó a la temperatura de bulbo húmedo constante, y sus valores, obtenidos de tablas (31), son:

$$\begin{aligned} \text{Agua } 200^{\circ}\text{C} &= T_w = 44.94^{\circ}\text{C} = \lambda_w = 571.791 \text{ kcal/kg} \\ \text{Agua } 160^{\circ}\text{C} &= T_w = 39.73^{\circ}\text{C} = \lambda_w = 574.749 \text{ kcal/kg} \\ \text{Sal } 180^{\circ}\text{C} &= T_w = 42.53^{\circ}\text{C} = \lambda_w = 573.159 \text{ kcal/kg} \end{aligned}$$

Dado que  $T_0$  es  $T_w$ , y se requiere determinar la entalpía del aire evaluada a la temperatura de bulbo seco y también a la temperatura de bulbo húmedo, las expresiones a usar para cada caso son:

$$\text{para } T_g = H_g = [(C_s (T_g - T_w)) + (\lambda_w Y)]$$

$$\text{para } T_w = H_w = [(C_s (T_w - T_w)) + (\lambda_w Y)] = H_w = (\lambda_w Y)$$

Con los valores de las entalpías de bulbo seco se realizaron las gráficas correspondientes, con la finalidad de observar el comportamiento de éstas dentro de la cámara de secado. Se puede observar que las entalpías siguen el mismo patrón de los perfiles de temperatura de bulbo seco, esto es que los valores más bajos se tienen en la línea 1, en los puntos C y D de la línea 2, mientras que las líneas 4, 5 y 6 poseen los valores más altos además de que son muy semejantes entre sí. En cuanto a la línea 3, sigue comportándose como línea de transición entre las primeras dos líneas y las tres últimas. La gráfica de las entalpías para las condiciones de agua a  $160^{\circ}\text{C}$ , no obedece con tanta certeza el patrón de comportamiento de las otras gráficas, pudiendo atribuirse a que a mayores temperaturas de entrada del aire, las tendencias de las temperaturas son más marcadas, como puede comprobarse al observar las gráficas de agua a  $200^{\circ}\text{C}$ .

Asimismo, se quiso observar la relación entre las entalpías de bulbo seco y las evaluadas a la temperatura de bulbo húmedo, al igual que se hizo con la diferencia de temperaturas ( $T_g - T_w$ ), y graficándola (Figura 34), se tiene que como era de esperarse, siguen exactamente las mismas tendencias que las gráficas de las diferencias de temperaturas. Todo lo anteriormente expuesto permite confirmar la existencia de diferentes sectores dentro de la cámara de secado, como lo muestra la Figura 31, en función al proceso de secado que se está realizando.

Para evaluar el gasto másico del aire, necesario para la determinación del calor puntual, la velocidad del aire fue medida experimentalmente a la salida de la cámara del secador, siendo su valor  $20.32 \text{ m/s}$ , y que el área donde fue medida es de  $0.00753 \text{ m}^2$ . El volumen húmedo se calculó anteriormente para las condiciones de salida de cada ensayo, siendo los valores  $1.3963$ ,  $1.3162$  y  $1.3575 \text{ m}^3/\text{kg}$  para agua a  $200^{\circ}\text{C}$ , a  $160^{\circ}\text{C}$  y sal a  $180^{\circ}\text{C}$  respectivamente. Con estos valores se obtienen los gastos de aire seco para cada ensayo, los cuales son:

$$\begin{aligned} \text{Agua } 200^{\circ}\text{C} &= G_s = 406.3349 \text{ kg/h} \\ \text{Agua } 160^{\circ}\text{C} &= G_s = 418.8949 \text{ kg/h} \\ \text{Sal } 180^{\circ}\text{C} &= G_s = 410.0200 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

De este modo, se realizó la determinación de los calores puntuales para cada ensayo. De los resultados se pudo observar que existen grandes diferencias entre los calores en los diferentes puntos en estudio. Los valores más bajos se presentan en la línea 1, así como en los puntos centrales de la línea 2. En lo que respecta a las líneas 4, 5 y 6, los valores son muy semejantes entre sí, tendiendo a permanecer constantes. El resto de los puntos de la línea 2 (A, E y F), como los puntos de la línea 3 presentan calores con valores medios del resto de los

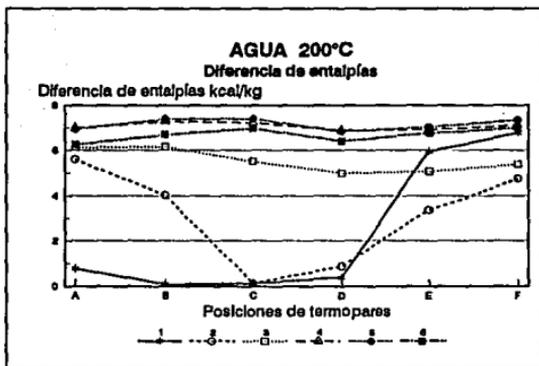
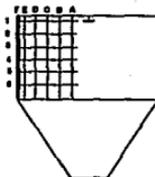


Figura 34

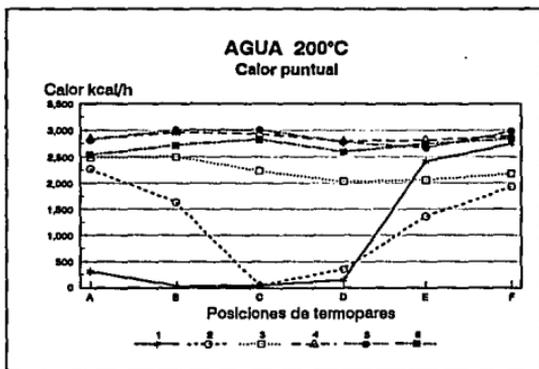


Figura 35

calores puntuales. Para el caso del ensayo con agua a 160°C, se observa que se presentan valores bajos en los puntos C, D, E y F de la línea 3, esto es atribuible a que dado que la temperatura de entrada del aire es más baja, se requiere un mayor tiempo para eliminar al fluido, por lo que llegan más lejos las gotas que en el caso del secado a 180 y 200°C.

La Figura 35 presenta la gráfica de los calores puntuales resultantes para agua a 200°C. Esta gráfica confirma lo recién expuesto, así como también es necesario comentar que los calores puntuales siguen las mismas tendencias de los perfiles de temperatura de bulbo seco y de las diferencias de entalpías.

Para la obtención de los coeficientes de transferencia de calor, se empleó la siguiente expresión:

$$h = Q / [A (T_g - T_w)]$$

donde A es el área donde se realiza la transferencia de calor, pudiendo considerarse como:

- Área de la partícula.
- Área que ocupa el termopar.
- Área de la zona anular en la que se encuentra colocado el termopar.

Sin embargo, el análisis no se está realizando con base en la partícula, sino en el balance del aire dentro de la cámara de secado, así, la primera opción no se aplica por el momento. En cuanto a la tercer opción, al evaluar las diferentes zonas anulares, se forza a que los coeficientes resultantes en cada columna (A, B, C, D, E y F), sin importar de que línea se trate, así como tampoco las condiciones para cada ensayo realizado, tengan valores muy similares, lo cual no sería representativo.

Por estas razones, la segunda opción se emplea para realizar la determinación de los coeficientes de transferencia de calor. El área que ocupa el termopar, considerando a éste como un cilindro, es de 0.0012 m<sup>2</sup> (la altura del termopar es de 1.5 cm y tiene un radio de 1cm).

Sin embargo al realizar la determinación de los coeficientes de transferencia de calor, se obtienen valores del orden de 92300 hasta 94400 kcal/h m<sup>2</sup> °C, lo que implica que una de las consideraciones hechas no es la correcta, dado que los coeficientes son demasiado grandes. Si se empleara el área de la partícula, estos coeficientes serían aún más grandes, por lo que se realizó un análisis de la secuencia empleada hasta el momento para identificar la consideración inadecuada.

Partiendo de las ecuaciones de gasto másico, entalpía, calor y coeficiente de transferencia de calor, se tiene:

$$G_s = (v A) / V_h \tag{1}$$

$$H_g = [(0.24 + (0.45Y)) (T - T_o)] + (\lambda_o Y) \tag{2}$$

$$Q = G_s (H_g - H_w) \tag{3}$$

$$h = Q / (A (T_g - T_w)) \tag{4}$$

donde:

T = Temperatura ya sea T<sub>g</sub> o T<sub>w</sub>

T<sub>o</sub> = Temperatura de referencia

A = Área donde se realiza la transferencia de calor

A = Área donde se mide la velocidad v

Sustituyendo entonces (1) y (2) en (3):

$$Q = [(v A) / V_h] \{ [(0.24 + (0.45Y)) (T_g - T_o) + (\lambda_o Y)] - [(0.24 + (0.45Y)) (T_w - T_o) + (\lambda_o Y)] \}$$

y sustituyendo en ésta última la ecuación (4):

$$h = \frac{[(v A)/Vh] \{[(0.24+(0.45Y))(Tg-To)+(\lambda_o Y)] - [(0.24+(0.45Y))(Tw-To)+(\lambda_o Y)]\}}{(A (Tg - Tw))}$$

Si se considera que  $T_o$  es  $T_w$ , tenemos que simplificando queda la siguiente expresión:

$$h = \frac{(v A) \{[(0.24+(0.45Y))(Tg-Tw)+(\lambda_w Y)] - [(0.24+(0.45Y))(Tw-Tw)+(\lambda_w Y)]\}}{(Vh A (Tg - Tw))}$$

$$h = \frac{\{v A [0.24 + (0.45Y)]\}}{Vh A} \quad (5)$$

Como el calor húmedo es  $C_s = (0.24 + 0.45Y)$ , se tiene que la ecuación (5) se reduce a:

$$h = [v C_s A] / [Vh A] \quad (6)$$

Por último, si  $A$  y  $A$  se consideran y evalúan en el mismo punto  $A=A$ , por lo que la ecuación (6), se reduce todavía más a:

$$h = (v C_s) / Vh \quad [46]$$

Este desarrollo conduce a reconocer la importancia de la consideración para determinar que área es la adecuada, así como también la importancia de la velocidad del aire en los cálculos. Es por ésta razón que se tomó en consideración el estudio realizado sobre el comportamiento de las velocidades puntuales dentro de la cámara de secado (25), ya que con ésto se reducen las probabilidades de error en la secuencia de cálculo mencionada.

Dicha velocidad puntual promedio tiene un valor de 0.8929 m/s, existiendo una enorme diferencia con la velocidad a la salida de la cámara, la cual fue de 20.32 m/s, siendo por ende, muy lógica la disminución en los valores de los coeficientes de transferencia de calor.

Se realizó la determinación de los coeficientes de calor, empleando la ecuación [46] y la velocidad puntual promedio, mostrándose el intervalo en que se encuentran para las condiciones de cada uno de los ensayos, en el cuadro 10.

**Cuadro 10 Intervalo de coeficiente de transferencia de calor para cada ensayo**

Ensayo	h mínimo	h máximo
Agua 200°C	480	522
Agua 160°C	504	528
Sal 180°C	492	520

Se trazaron las gráficas de los coeficientes de transferencia de calor resultantes (Figura 36) para conocer sus perfiles dentro de la cámara de secado. Las tendencias seguidas por cada una de las líneas en cada ensayo concuerdan exactamente con las tendencias que presentan los perfiles de humedad absoluta. Los puntos con coeficientes de transferencia de calor más altos son los de la línea 1, y los puntos B y C de la línea 2; las tres últimas líneas poseen valores muy semejantes entre sí, lo que lleva a pensar que tienden a permanecer constantes; y el resto de los puntos son una transición entre los primeros y los últimos. Una vez más se confirma el seccionamiento de la cámara de secado en función al tipo de comportamiento de las

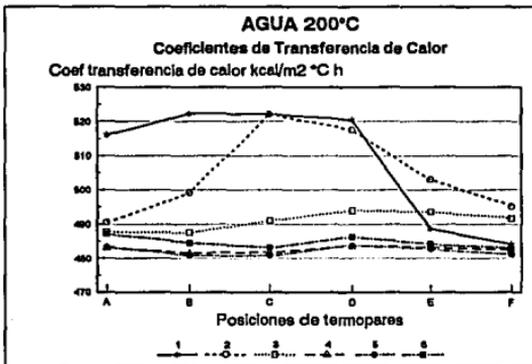
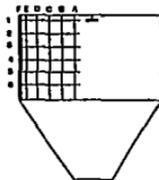


Figura 36

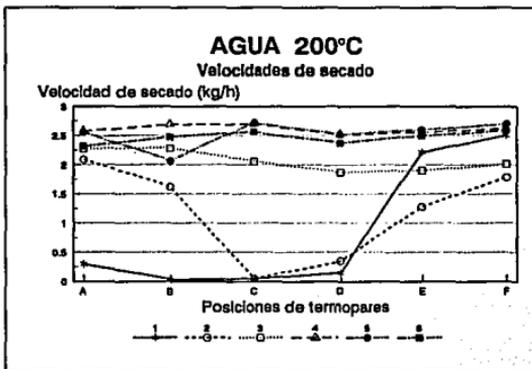


Figura 37

temperaturas, así como también en función al tipo de transferencia que se desarrolla en cada una de éstas zonas.

Con el fin de contrastar los resultados obtenidos hasta el momento, se procedió a emplear las teorías y relaciones reportadas en la bibliografía, para así conocer el intervalo en el que se encuentran estos coeficientes experimentales. Las expresiones a emplear con esta finalidad, son las señaladas en el punto 9 del algoritmo (página 38).

Uno de los parámetros involucrados en estas expresiones es el radio de la partícula, por lo que es necesario calcular el diámetro de la gota. Como el atomizador no puede formar un espray completamente homogéneo se hace necesario conocer la distribución de tamaño de las gotas, empleando para ello el método de Friedman (20) con las ecuaciones [7, 8, 9] (página 18).

Se realizó la evaluación de la distribución de tamaños de las gotas, mostrándose a continuación los resultados de dicha evaluación.

**Cuadro 11 Distribución de tamaño de las gotas esprayadas en cada ensayo**

ENSAYO	Dvs (m)	D95 (m)	Dm (m)
AGUA 200°C	1.5746 x 10 <sup>-5</sup>	2.2044 x 10 <sup>-5</sup>	4.724 x 10 <sup>-5</sup>
AGUA 160°C	1.5746 x 10 <sup>-5</sup>	2.2044 x 10 <sup>-5</sup>	4.724 x 10 <sup>-5</sup>
SAL 180°C	1.7873 x 10 <sup>-5</sup>	2.5022 x 10 <sup>-5</sup>	5.362 x 10 <sup>-5</sup>

Una vez conocido el tamaño de las gotas se puede proseguir con la comparación de los coeficientes experimentales de transferencia de calor contra los propuestos por la bibliografía.

a) La primera expresión usada fue:

$$(h \ r) / k_f = 1.0$$

donde *r* es el radio de la gota de mayor tamaño (mm), la cual se escoge para fines de diseño por ser la que determine las condiciones límites para el secado por aspersión, y *k<sub>f</sub>* es la conductividad térmica del aire saturado a la temperatura de bulbo húmedo.

Las conductividades térmicas se obtienen de tablas (12) evaluándose a la temperatura de bulbo húmedo global para cada ensayo, y junto con los radios máximos de las gotas se obtuvieron los coeficientes de transferencia de calor con base en esta expresión.

**Cuadro 12 Coeficientes de transferencia de calor según Toledo (32)**

ENSAYO	k <sub>f</sub> (kcal/m °C h)	rm (m)	h (kcal/m <sup>2</sup> h °C)
AGUA 200°C	0.02373	2.362 x 10 <sup>-5</sup>	1004.657
AGUA 160°C	0.02338	2.362 x 10 <sup>-5</sup>	989.839
SAL 180°C	0.02356	2.681 x 10 <sup>-5</sup>	878.778

El coeficiente obtenido mediante esta relación es aproximadamente el doble del obtenido mediante la experimentación. Sin embargo, esta relación se basa en algunas consideraciones tales como que el secado de la gota se efectúa en aire en movimiento lento, lo cual no es muy aplicable al secado por aspersión.

b) La segunda expresión empleada para la constatación de coeficientes fue el número adimensional de Nusselt, apoyados en el uso de la gráfica de Re en función de Nu (Figura 7 página 22). De esta manera es necesario calcular antes el no. de Reynolds para poder conocer posteriormente el no. de Nusselt.

El Reynolds se determina mediante la ecuación [19]:

$$Re = (\rho_a \ v_r \ D_m) / \mu_a$$

Para conocer la velocidad relativa se tiene que:

$$v_r = v_p - v$$

donde:

$$v_p = \text{velocidad de partícula} = v_p = w \ r = (2 \ \pi \ N \ r)$$

$$v = \text{velocidad del aire}$$

Para la velocidad del aire se puede tomar, ya sea la velocidad evaluada a la salida de la cámara del secador (20.32 m/s), o la evaluada puntualmente dentro de la cámara del secador (0.6929 m/s); tomando esta última para los cálculos, considerando que el coeficiente de transferencia de calor fue calculado con ésta, la velocidad de la partícula es de 93.388 m/s, y la velocidad relativa entre aire y partícula es:

$$v_r = v_p - v = 93.388 - 0.6929 = 92.6953 \text{ m/s}$$

Obteniendo de tablas (12) las densidades y viscosidades del aire evaluadas en las condiciones de temperatura de bulbo seco a la entrada y evaluando con éstos valores el número de Reynolds, y empleando la gráfica que permite conocer el número de Nusselt a partir del Reynolds (Figura 7), se obtiene que el número de Nusselt correspondiente a esos Reynolds es:

**Cuadro 13** Números de Reynolds y Nusselt para cada uno de los ensayos según Leniger

Ensayo	$v_r$ (m/s)	$D_m$ (m)	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu_a$ (kg/ms)	Re	Nu
Agua 200°C	92.6953	$4.724 \times 10^{-5}$	0.7441	$2.585 \times 10^{-5}$	126.048	8.2
Agua 160°C	92.6953	$4.724 \times 10^{-5}$	0.8314	$2.421 \times 10^{-5}$	150.346	9.0
Sal 180°C	92.6953	$5.362 \times 10^{-5}$	0.7867	$2.505 \times 10^{-5}$	156.087	9.0

Estos valores van de acuerdo a lo que establece la teoría (16), la cual también hace consideraciones tales como que el aire está en movimiento lento, y que se trata de agua pura, entre otras.

Evaluando a partir de este número de Nusselt aproximado, los valores de los coeficientes de transferencia de calor para los tres ensayos mediante la ecuación [22], y obteniendo la conductividad térmica del aire a partir de tablas (12), se tienen los siguientes resultados:

**Cuadro 14 Coeficientes de transferencia de calor según Leniger**

ENSAYO	$k_a$ (kcal/h m <sup>2</sup> C)	$D_m$ (m)	Nu	$h$ (kcal/h m <sup>2</sup> C)
AGUA 200°C	0.0333	4,724 x 10 <sup>-5</sup>	8.2	5780.270
AGUA 180°C	0.0308	4,724 x 10 <sup>-5</sup>	9.0	5867.908
SAL 180°C	0.0321	5,362 x 10 <sup>-5</sup>	9.0	5387.914

Como se puede observar, estos coeficientes no son del orden de los obtenidos experimentalmente, sino que son aproximadamente once veces más grandes. La razón por la cual, existe esta gran diferencia entre los coeficientes es que la bibliografía estima el coeficiente de transferencia de calor para una gota de agua pura de 100  $\mu$  con una velocidad inicial de 100 m/s a 3011.369 kcal/h m<sup>2</sup> °C, mientras que nuestras condiciones son de agua pura y una solución salina, con diámetro de 40 a 50  $\mu$  y velocidad inicial de 93.3 m/s.

c) La tercera expresión [17], fue la relación de números adimensionales de Marshall:

$$Nu = 2.0 + [0.6 (Re^{0.5}) (Pr^{0.33})]$$

El número de Prandtl se obtiene de tablas (12), de modo que evaluando el número de Nusselt empleando esta expresión, se tiene:

**Cuadro 15 Número de Nusselt según Marshall para cada ensayo.**

ENSAYO	Re	Pr	Nu
AGUA 200°C	126.048	0.6844	7.943
AGUA 180°C	150.346	0.6897	8.508
SAL 180°C	156.087	0.6870	8.622

Estos datos concuerdan con el intervalo de número de Nusselt que establecen Leniger y Beverloo. Sin embargo, si se determinan los coeficientes de transferencia de calor a partir de éstos, se tendrá nuevamente que sobrepasan considerablemente los valores de los coeficientes obtenidos experimentalmente. Esta situación conduce a la reconsideración de áreas empleadas en la determinación de los coeficientes de transferencia de calor.

Como la determinación de los coeficientes se realizó con base en un balance de calor en la cámara de secado, es factible que lo que se necesite sea involucrar el área total de las gotas asperjadas, para que de esta manera el balance sea más veraz.

Teniendo la distribución de tamaño de las gotas, se pueden conocer los porcentajes de las gotas con sus respectivos diámetros, de modo que en el caso de agua, tanto para 200 como para 180°C el 50% de las gotas tienen un diámetro de 1.574 x 10<sup>-5</sup> m, que el 45% tienen un diámetro de 2.204 x 10<sup>-5</sup> m, mientras que el 5% tienen un diámetro de 4.724 x 10<sup>-5</sup> m. Para el caso de la solución salina, el 50% de las gotas tienen un diámetro de 1.787 x 10<sup>-5</sup> m, el 45% de 2.502 x 10<sup>-5</sup>, y por último el 5% de las gotas tienen un diámetro de 5.362 x 10<sup>-5</sup> m.

Para conocer el número total de gotas asperjadas se considera el volumen de la solución alimentada, la cual tuvo un gasto, para ambas soluciones, de 11.084 l/h (3.0788 x 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>/s), así que tenemos las siguientes equivalencias:

$$50\% \text{ del gasto} = 1.5394 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$45\% \text{ del gasto} = 1.3855 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$5\% \text{ del gasto} = 1.5394 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

Para determinar el volumen que ocupa una gota de cada uno de los % mencionados, considerando las gotas como esferas por simplicidad en los cálculos, se tiene que el volumen está dado por la expresión:

$$V = (4/3) \pi r^3$$

donde r es el radio de la gota de cada uno de los porcentajes

De modo que, evaluando el volumen de cada grupo de gotas se tiene:

**Cuadro 16 Volumen de cada grupo de gotas esparcidas.**

ENSAYO	%	D (m)	r (m)	V (m <sup>3</sup> )
AGUA 200°C y 180°C	50	1.574 x 10 <sup>-5</sup>	7.870 x 10 <sup>-6</sup>	2.0417 x 10 <sup>-15</sup>
		5		
	45	2.204 x 10 <sup>-5</sup>	1.102 x 10 <sup>-5</sup>	5.6057 x 10 <sup>-15</sup>
		5		
	5	4.724 x 10 <sup>-5</sup>	2.382 x 10 <sup>-5</sup>	5.5198 x 10 <sup>-14</sup>
		5		
SAL 180°C	50	1.787 x 10 <sup>-5</sup>	8.935 x 10 <sup>-6</sup>	2.9879 x 10 <sup>-15</sup>
		5		
	45	2.502 x 10 <sup>-5</sup>	1.251 x 10 <sup>-5</sup>	8.2008 x 10 <sup>-15</sup>
		5		
	5	5.362 x 10 <sup>-5</sup>	2.681 x 10 <sup>-5</sup>	8.0719 x 10 <sup>-14</sup>
		5		

Finalmente, para conocer el número de gotas de cada grupo se divide el gasto por grupo entre el volumen que ocupa la gota del grupo respectivo:

**Cuadro 17 Número de gotas de cada grupo para agua y solución salina**

ENSAYO	G (m <sup>3</sup> /s)	V (m <sup>3</sup> )	# gotas / s	# gotas totales
50%	1.5394 x 10 <sup>-6</sup>	2.0417 x 10 <sup>-15</sup>	7.54 x 10 <sup>8</sup>	
AGUA 45%	1.3855 x 10 <sup>-6</sup>	5.6057 x 10 <sup>-15</sup>	2.47 x 10 <sup>8</sup>	1003.79 x 10 <sup>8</sup>
5%	1.3855 x 10 <sup>-7</sup>	5.5198 x 10 <sup>-14</sup>	2.79 x 10 <sup>6</sup>	
50%	1.5394 x 10 <sup>-6</sup>	2.9879 x 10 <sup>-15</sup>	5.15 x 10 <sup>8</sup>	
SAL 45%	1.3855 x 10 <sup>-6</sup>	8.2008 x 10 <sup>-15</sup>	1.69 x 10 <sup>8</sup>	685.91 x 10 <sup>8</sup>
5%	1.3855 x 10 <sup>-7</sup>	8.0719 x 10 <sup>-14</sup>	1.91 x 10 <sup>6</sup>	

Una vez conocido el número de gotas, se procedió a calcular el área de las gotas, empleando la expresión para calcular el área de una esfera:

$$A = 4 \pi r^2$$

**Cuadro 18 Area total de las gotas esparcidas para agua y solución salina**

ENSAYO	r (m)	A gota	#gotas/s	A grupo	A total
50%	$7.870 \times 10^{-6}$	$7.783 \times 10^{-10}$	$7.54 \times 10^8$	0.5868	
Agua 45%	$1.102 \times 10^{-5}$	$1.526 \times 10^{-9}$	$2.47 \times 10^8$	0.3769	0.9832
5%	$2.382 \times 10^{-5}$	$7.0108 \times 10^{-9}$	$2.79 \times 10^6$	0.0195	
	$8.935 \times 10^{-6}$	$1.0032 \times 10^{-9}$	$5.15 \times 10^8$	0.5166	
50%					
Sal 45%	$1.251 \times 10^{-5}$	$1.9866 \times 10^{-9}$	$1.69 \times 10^8$	0.3323	0.8661
5%	$2.681 \times 10^{-5}$	$9.0324 \times 10^{-9}$	$1.91 \times 10^6$	0.0172	

Recalculando el coeficiente de transferencia de calor promedio para cada ensayo, considerando el área total de las gotas asperjadas, se tiene que la ecuación a emplear es:

$$h = (v A C_s) / (V_h A)$$

donde:

v = velocidad puntual del aire = 2494.44 m/h

A = área donde se midió v = 0.0012 m<sup>2</sup>

C<sub>s</sub> = calor húmedo [=] kcal/kg °C

V<sub>h</sub> = volumen húmedo [=] m<sup>3</sup>/kg

A = área total de gotas asperjadas = Agua = 0.9832 m<sup>2</sup>/s = 3539.52 m<sup>2</sup>/h

Sal = 0.8661 m<sup>2</sup>/s = 3117.96 m<sup>2</sup>/h

ENSAYO	h'	A	h"
AGUA 200°C	492.362	3539.52	$1.689 \times 10^{-4}$
AGUA 160°C	515.733	3539.52	$1.748 \times 10^{-4}$
SAL 180°C	502.484	3117.96	$1.933 \times 10^{-4}$

h' se refiere al coeficiente sin involucrar áreas, mientras que h" es el coeficiente con áreas involucradas. Estos coeficientes se alejan mucho más de los obtenidos y aún más con lo que establece la teoría, por lo que se les elimina, y los que se tomarán son los coeficientes de transferencia de calor que concuerdan con la relación  $(h' r)/k_f$ , dado que ésta es la que presenta mayor semejanza con las condiciones y consideraciones hechas en este estudio.

A continuación se presenta un cuadro comparativo de los valores de los coeficientes obtenidos y los criterios empleados para la determinación de los mismos, a manera de recopilación de lo evaluado hasta el momento.

**Cuadro 19 Comparación de coeficientes de transferencia de calor**

ENSAYO	h	Expresión	Criterios
Agua 200°C	492.36	$h=(v \text{ Cs})/Vh$	Area de transferencia y de evaluación del aire iguales
Agua 160°C	515.733		
Sal 180°C	502.484		
Agua 200°C	1004.657	$h=kf / m$	Secado de partícula muy pequeña con aire en movimiento lento (32)
Agua 160°C	989.839		
Sal 180°C	878.776		
Agua 200°C	5780.270	$h=(Nu \text{ } k_a)/Dm$	Secado de agua pura con aire en estado estacionario (16)
Agua 160°C	5867.908	Nu obtenido de la gráfica de Nu en función de Re	
Sal 180°C	5387.914		
Agua 200°C	5599.108	$(2+(.6 \text{ Re}^{-.5} \text{ Pr}^{.33})) \text{ } k_a$	Secado de gota en estado estacionario con aire en movimiento lento (11)
Agua 160°C	5547.129	$h=$	
Sal 180°C	5161.622	Dm	
Agua 200°C	$1.669 \times 10^{-4}$	$h=(v \text{ A Cs})/(Vh \text{ A})$	Area de transferencia igual al área que ocupan todas las gotas espreadas
Agua 160°C	$1.748 \times 10^{-4}$		
Sal 180°C	$1.933 \times 10^{-4}$		

Como se puede observar, los coeficientes obtenidos mediante la primer expresión, son tomados como los correctos, debido a que esta expresión implica las condiciones reales del secado por aspersión. Además, son la mitad de lo que propone la segunda expresión, donde la diferencia es que el secado se realiza con aire en movimiento lento, consideración no del todo aplicable para el proceso de secado por aspersión.

### 3.3.3 Coeficientes de transferencia de masa

Para la evaluación de los coeficientes de transferencia de masa es necesario determinar primero la velocidad de secado, empleando la ecuación [27]. Esta determinación sirve como enlace entre los coeficientes de transferencia de calor y los coeficientes de transferencia de masa, ya que cuando el calor por evaporación durante el período de velocidad constante se suministra a través de un gas caliente, se establece un equilibrio dinámico entre la velocidad de transmisión de calor al material y la velocidad de eliminación de vapor de la superficie del mismo. Este equilibrio se puede expresar como:

$$[h \text{ A } (T_g - T_w)]/\lambda_w = [k \text{ A } (p_w - p_g)]$$

La Figura 37 presenta la gráfica de las velocidades de secado para el ensayo de agua a 200°C, y permite observar el comportamiento que tiene este parámetro dentro de la cámara de secado. Los perfiles que presenta la velocidad de secado son los mismos que presentan los perfiles de temperatura de bulbo seco, es decir que los valores más bajos se encuentran en la línea 1 y los puntos C y D de la línea 2, mientras que los valores más altos, y con tendencia a permanecer constantes, se presentan en las líneas 4, 5 y 6. Este no era el comportamiento esperado, sino el contrario, valores más altos de velocidad de secado mientras más cerca se estuviera del disco atomizador. De cualquier manera, se prosiguió con el siguiente paso de la secuencia de cálculo, siendo éste la determinación de los coeficientes de transferencia de masa.

Partiendo del equilibrio dinámico entre la transferencia de calor y la transferencia de masa, y ya conociendo la velocidad de secado es posible determinar los coeficientes de transferencia de masa empleando la expresión:

$$k = (dw/dt) / [A (p_w - p_g)]$$

Para realizar esta determinación, fue necesario obtener de tablas las presiones parciales del aire, que fueron evaluadas como presiones de vapor (31). Estas presiones siguen el mismo perfil de temperaturas de bulbo seco en cada caso, como era de esperarse.

También se obtuvo el perfil de comportamiento de la diferencia de presiones ( $p_w - p_g$ ), como en el caso de la diferencia de temperaturas y de la diferencia de entalpías. Para ello, las presiones de vapor evaluadas a la temperatura de bulbo húmedo correspondiente para cada ensayo fueron:

Agua 200°C	=	$T_w = 44.94^\circ\text{C}$	=	$p_w = 9501.999 \text{ N/m}^2$
Agua 160°C	=	$T_w = 39.73^\circ\text{C}$	=	$p_w = 7287.325 \text{ N/m}^2$
Sal 180°C	=	$T_w = 42.53^\circ\text{C}$	=	$p_w = 7827.204 \text{ N/m}^2$

De este modo, fueron calculadas las diferencias de presión, sobreentendiendo que estas diferencias tendrán valores negativos. De los resultados de esta determinación se puede observar que se siguen las tendencias de los perfiles de temperatura de bulbo seco: valores bajos en línea 1 y puntos C y D de la línea 2, valores altos en líneas 4, 5 y 6 con comportamiento casi constante. Todo esto continúa apoyando la división de la cámara de secado en diferentes sectores, mostrada en la Figura 31.

Conocidas las presiones de vapor, y la velocidad de secado, así como también el área de transferencia que se ha venido considerando hasta el momento ( $0.0012 \text{ m}^2$ ), se realizó la determinación de los coeficientes de transferencia de masa para cada uno de los puntos en estudio y bajo las condiciones específicas de cada ensayo.

Los coeficientes de transferencia de masa resultantes se encuentran en los siguientes intervalos:

Agua a 200°C	: de 0.952 a $2.150 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2 \text{ h Pa}$
Agua a 160°C	: de 1.657 a $2.175 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2 \text{ h Pa}$
Sal a 180°C	: de 1.163 a $1.480 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2 \text{ h Pa}$

El perfil de comportamiento de los coeficientes se muestra para el caso de agua a 200°C en la Figura 38. Este perfil es muy semejante a los perfiles de humedad obtenidos para cada ensayo. Se tienen los coeficientes más grandes en la línea 1 y en los puntos C y D de la línea 2, la línea 3 se encuentra entre las dos primeras líneas y el grupo que forman las tres últimas. Forman un grupo porque tienen tendencias muy similares, así como también lo son sus valores de coeficientes. La gráfica del ensayo a 200°C, presenta un comportamiento muy definido, mientras que en las otras dos no es tan marcado. Por ejemplo, la línea 3 de la gráfica de agua a 160°C alcanza valores casi iguales que la línea 2 y la línea 4 tiene coeficientes un poco mayores que los de las líneas 5 y 6. En el caso del ensayo con sal a 180°C, esta tendencia de la línea 4 también se presenta, no así la tendencia de la línea 3 del agua a 160°C.

El hecho de que los valores más altos se presenten en la línea 1 y los puntos C y D de la línea 2, implica que es en esa zona donde se está llevando a cabo de manera más importante, la transferencia de masa de la gota hacia el aire, es decir que en dicha zona se realiza casi, si no es que por completo, el secado de las gotas asperjadas. El perfil que siguen los coeficientes de masa, continúan apoyando la división en sectores de la cámara de secado, basada en los perfiles de temperatura y en el tipo de transferencia que se realiza en cada uno de ellos. (Figura 31).

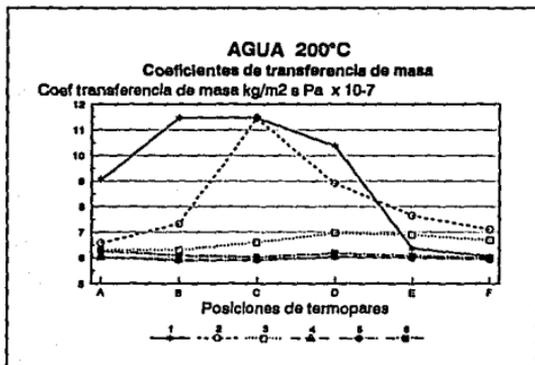
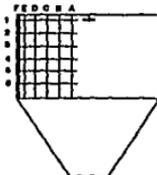


Figura 38

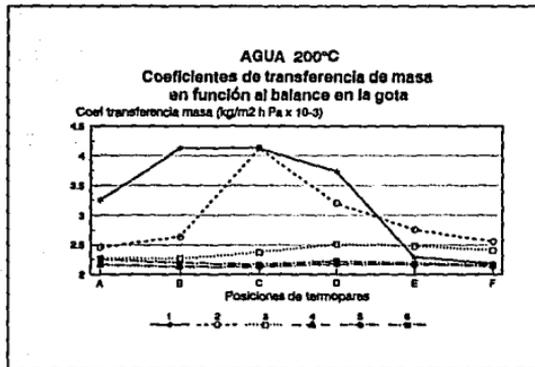


Figura 39

De la misma manera en que se realizó una comparación para los coeficientes de transferencia de calor experimentales, se realizó para los de transferencia de masa experimentales con algunas de las relaciones obtenidas anteriormente con base en la bibliografía. Dicha comparación fue realizada con el fin de evitar la posibilidad de algún error integrado en la determinación de los coeficientes de transferencia de calor resultantes de la experimentación, de los cuales se obtuvieron a su vez los coeficientes de transferencia de masa.

- a) Partiendo de que la eliminación de la humedad inicial de una gota durante el secado por aspersión, se lleva a cabo a velocidad constante, la velocidad de evaporación puede describirse adecuadamente tratando a la gota como líquido puro. Bajo esta consideración, un balance de calor y masa en la gota conduce a las siguientes expresiones:

$$dw/dt = k A (p_w - p_g) = [2 \pi D \rho d (p_w - p_g)]/\rho_a \quad \text{Balance de masa}$$

y

$$dw/dt = [h A (T_g - T_w)]/\lambda_w = [2 \pi k_a d (T_g - T_w)]/\lambda_w \quad \text{Balance de calor}$$

De esta forma, lo que procedió entonces fue la determinación del coeficiente de transferencia de masa con la siguiente secuencia:

- 1.- Determinación de la expresión:

$$dw/dt = [2 \pi k_a d (T_g - T_w)]/\lambda_w$$

$k_a$  es evaluada a la temperatura de bulbo seco, y  $T_w$  se considera constante

- 2.- Empleando la igualdad:

$$k A (p_w - p_g) = [2 \pi k_a d (T_g - T_w)]/\lambda_w$$

y despejando  $k$

$$k = [2 \pi k_a d (T_g - T_w)] / [\lambda_w A (p_w - p_g)]$$

Para la determinación de los coeficientes de transferencia de masa, es necesario conocer la conductividad térmica del aire evaluada a la temperatura de bulbo seco correspondiente a cada uno de los puntos de estudio. Este parámetro se obtuvo de tablas (12). Otro de los parámetros involucrados en esta expresión es el diámetro de la gota, para lo cual se empleó el diámetro máximo de la gota ( $D_m$ ) correspondiente, y el área de transferencia, fue el área de la gota máxima, ya que el balance se realizó, en esta ocasión con base en una gota.

Con el fin de confirmar que se continuaran manejando las unidades correctas, se realizó un análisis dimensional de la ecuación empleada para la obtención de los coeficientes de transferencia de masa. Este análisis se presenta a continuación.

$$k = \frac{[2 \pi k_a d (T_g - T_w)]}{[\lambda_w A (p_w - p_g)]} \quad \begin{matrix} \text{(m) (kcal/m s}^\circ\text{C) (}^\circ\text{C)} \\ [=] \frac{\text{(m}^2\text{) (kcal/kg) (N/m}^2\text{)}}{\text{(m}^2\text{) (kcal/kg) (N/m}^2\text{)}} \end{matrix}$$

Recordando que un pascal Pa = N/m<sup>2</sup> y sustituyendo en la ecuación anterior se tiene:

$$k [=] \frac{\text{(m) (kcal/m s}^\circ\text{C) (}^\circ\text{C)}}{\text{(m}^2\text{) (kcal/kg) (Pa)}} \quad [=] \frac{\text{kg}}{\text{(m}^2\text{) (s) (Pa)}}$$

Siendo éstas últimas las unidades en las que se expresan los coeficientes de transferencia de masa. Ahora bien, se ha venido trabajando con horas como unidad de tiempo, por lo que en lugar de segundos se expresan los coeficientes en función a horas.

La gráfica de la Figura 37 se construyó con los valores de los coeficientes de transferencia de masa obtenidos en función al balance en una gota, presentan los perfiles de comportamiento de estos coeficientes. Como se puede observar siguen exactamente el mismo comportamiento de los coeficientes de transferencia de masa obtenidos a partir de los coeficientes de transferencia de calor experimentales, la diferencia radica en los valores.

El intervalo de los coeficientes recién obtenidos se muestra a continuación, comparándolos contra el intervalo de los coeficientes obtenidos a partir de los coeficientes de transferencia de calor experimentales. Como se puede observar, los coeficientes recién obtenidos a partir del balance en la gota son aproximadamente dos veces más grandes que los coeficientes de transferencia de masa obtenidos a partir de los coeficientes de transferencia de calor experimentales.

**Cuadro 20 Intervalo de los coeficientes de transferencia de masa**

ENSAYO	Coefficientes experimentales	Coefficientes obtenidos del balance en la gota
Agua 200°C		
Valor mínimo	$0.952 \times 10^{-3}$	$2.129 \times 10^{-3}$
Valor máximo	$2.150 \times 10^{-3}$	$4.132 \times 10^{-3}$
Agua 160°C		
Valor mínimo	$1.657 \times 10^{-3}$	$3.359 \times 10^{-3}$
Valor máximo	$2.171 \times 10^{-3}$	$4.073 \times 10^{-3}$
Sal 180°C		
Valor mínimo	$1.163 \times 10^{-3}$	$2.181 \times 10^{-3}$
Valor máximo	$1.481 \times 10^{-3}$	$2.556 \times 10^{-3}$

- b) El otro método de comparación propuesto fue, que a partir de los coeficientes de transferencia de masa obtenidos con base en el balance en la gota, se realizara la determinación de los coeficientes de transferencia de calor, mediante la expresión:

$$h = \frac{k (p_w - p_g) \lambda_w}{(T_g - T_w)}$$

Esta determinación se realizó y de los resultados se puede observar que el comportamiento de los coeficientes de transferencia de calor es exactamente el inverso del perfil que siguen los coeficientes obtenidos a partir de la experimentación. Esto es, que mientras los coeficientes recién obtenidos con base en los coeficientes de transferencia de masa resultantes del balance en la gota, siguen un perfil igual al de las temperaturas de bulbo seco (a medida que se alejan del disco aspersor mayores son los coeficientes), los coeficientes obtenidos de la experimentación, siguen un perfil igual al de la humedad absoluta (mientras más cerca se encuentre del disco aspersor, mayor es el coeficiente). Esto no era lo esperado, ya que si se evalúan directamente las velocidades de secado con los coeficientes de transferencia de masa, éstas siguen el mismo patrón de comportamiento que seguía la velocidad de secado evaluada con los coeficientes de transferencia de calor experimentales.

Otra diferencia entre estos coeficientes y los experimentales, es que los recién calculados son aproximadamente el doble del valor de los coeficientes experimentales. De acuerdo con la predicción del coeficiente de transferencia de calor según Toledo, h tendría aproximadamente los valores siguientes:

AGUA	200°C	=	h = 1004.657	kcal/h m <sup>2</sup> °C
AGUA	160°C	=	h = 989.839	kcal/h m <sup>2</sup> °C
SAL	180°C	=	h = 878.776	kcal/h m <sup>2</sup> °C

Así, los resultados obtenidos de la determinación de los coeficientes de transferencia de calor con base en los coeficientes de transferencia de masa, concuerdan con esta expresión.

Empleando la expresión anterior se evalúa la relación h, r y k<sub>f</sub>, para los coeficientes de transferencia de calor recién obtenidos, dando como resultado:

		Valor máximo	Valor mínimo
AGUA	200°C	1.070	0.998
AGUA	160°C	1.039	1.000
SAL	180°C	1.068	1.005

Valores que son muy precisos y aceptables, lo que implica que tanto los coeficientes de transferencia de calor como los de transferencia de masa son correctos.

Para hacer otra comparación y verificar los coeficientes obtenidos h y k, se calculó el número de Nusselt empleando la expresión:

$$Nu = (h \cdot D_m) / k_a$$

teniendo como resultado:

	Valor máximo	Valor mínimo
AGUA 200°C	1.525	1.423
AGUA 160°C	1.577	1.519
SAL 180°C	1.568	1.476

Esta última evaluación presenta números de Nusselt mucho menores que los anteriormente obtenidos, sin embargo siguen encontrándose dentro del intervalo que establecen Leniger y Beverloo (16).

### 3.3.4 Evaluación de tiempos de secado

Como ya se sabe, la trayectoria y la velocidad de las partículas determinan el tiempo de secado disponible; según estos parámetros se tiene un tiempo fijo en el que se pueda realizar el secado. El tiempo de la trayectoria a la pared de la cámara puede determinarse con la ecuación [10], la cual se adapta a las características en que se está trabajando en este estudio:

$$t = [(Rc - \nu) / 2]^2 / [2.4 \text{ vo } ((b' \nu)^{1/2})]$$

donde:

$$b' = [G / (\rho_a \pi D v_l)]$$

Así, para realizar la determinación se tiene que los valores de los parámetros involucrados son:

$$\begin{aligned}
 v_i &= 20.32 \text{ m/s} \\
 v_o &= 92.6953 \text{ m/s} \\
 R_c &= 0.60 \text{ m} \\
 v &= 0.06 \text{ m} \\
 G &= 0.003067 \text{ kg/s para agua} \\
 &= 0.003540 \text{ kg/s para sal} \\
 \rho_a &= 0.7324 \text{ kg/m}^3 \text{ para } 200^\circ\text{C} \\
 &= 0.8342 \text{ kg/m}^3 \text{ para } 160^\circ\text{C} \\
 &= 0.7833 \text{ kg/m}^3 \text{ para } 180^\circ\text{C} \\
 D_m &= 4.724 \times 10^{-5} \text{ m para agua} \\
 &= 5.362 \times 10^{-5} \text{ m para sal}
 \end{aligned}$$

Determinando  $b'$  se tiene que

$$\begin{aligned}
 \text{Agua } 200^\circ\text{C} &= b' = 1.3886 \text{ m} \\
 \text{Agua } 160^\circ\text{C} &= b' = 1.2191 \text{ m} \\
 \text{Sal } 180^\circ\text{C} &= b' = 1.3203 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Y, evaluando el tiempo de la trayectoria de la gota para cada ensayo se tiene que:

$$\begin{aligned}
 \text{Agua } 200^\circ\text{C} &= t = 1.1352 \times 10^{-3} \text{ s} \\
 \text{Agua } 160^\circ\text{C} &= t = 1.2115 \times 10^{-3} \text{ s} \\
 \text{Sal } 180^\circ\text{C} &= t = 1.1642 \times 10^{-3} \text{ s}
 \end{aligned}$$

Como se puede observar, y como era de esperarse, los tiempos de trayectoria de la gota varían muy poco entre las diferentes condiciones de los ensayos. Estos tiempos son los que tiene la gota para secarse lo más posible antes de chocar contra la pared de la cámara, recordando que debe llegar con poca humedad para no quedar pegada en la pared.

Asimismo, de las relaciones de trayectoria de los esparcidos para discos rotatorios, que se han sido obtenidas por otros investigadores, se encuentra la ecuación [11], desarrollada por Frazer et al. (20), la cual se presentan a continuación:

$$R_{\max} = [7.2 \lambda^{0.21} G^{0.2}] / N^{0.16}$$

donde  $R_{\max}$  es la distancia radial que involucra el 99% de las gotas atomizadas, las cuales caen a 3 ft (91.4 cm) del atomizador. Esta relación es la recomendada por la bibliografía por ser la más precisa, además de que es la que mejor se adapta a la características del secador empleado en el estudio.

Para evaluar esta relación se tiene que los valores de los parámetros involucrados, manejando las unidades adecuadas con las que se desarrolló esta expresión, se tiene que:

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \text{diámetro del disco atomizador} = 0.06 \text{ m} = 0.3937 \text{ ft} \\
 N &= \text{velocidad rotacional del disco} = 14863.2 \text{ rpm} \\
 G &= \text{gasto másico de alimentación} = \text{agua } 0.4056 \text{ lb/min, sal } 0.4682 \text{ lb/min}
 \end{aligned}$$

y así, evaluando la distancia radial se tiene:

$$\begin{aligned}
 \text{Agua } 200 \text{ y } 160^\circ\text{C} &= R_{\max} = 1.602 \text{ ft} = 32.369 \text{ cm} \\
 \text{Sal } 180^\circ\text{C} &= R_{\max} = 1.093 \text{ ft} = 33.31 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Esto implica, que el 50% de las gotas atomizadas alcanzan una distancia entre 32 y 33 cm antes de caer 25 cm por abajo del disco aspersor, es decir que se encuentran en las zonas A y B de la Figura 31, las cuales son las zonas de mayor intercambio térmico. Todo esto continúa

apoyando la división en sectores de la cámara de secado, así como también el comportamiento de los coeficientes de transferencia de calor y de masa. La Figura 40 muestra la zona en la que se encuentra el 50% de las gotas atomizadas ( $R_{max}$ ).

Para evaluar los tiempos de secado, se tiene que el tiempo de secado total es la suma del tiempo de secado en el período de velocidad constante, más el tiempo en el período de velocidad decreciente. Para el período de velocidad constante, el tiempo de secado se expresa mediante la ecuación [14].

$$t_c = [ 4 (X_o - X_c) r \rho_a \lambda w ] / [ 3 (1 + X_o) h (T_g - T_w) ]$$

La humedad crítica  $X_c$ , para el caso de los ensayos de agua pura se vuelve igual a cero; para el caso del ensayo con la solución salina, por la consideración realizada sobre el hecho de que por su naturaleza no contiene humedad ligada, también se vuelve cero. De este modo, para estos casos la expresión se reduce a:

$$t_c = [ 4 X_o r \rho_a \lambda w ] / [ 3 (1 + X_o) h (T_g - T_w) ]$$

Los valores de las variables implicadas en esta ecuación para las condiciones de cada ensayo se encuentran en el siguiente cuadro:

**Cuadro 21 Variables implicadas para la determinación del  $t_c$  para cada ensayo.**

	AGUA 200°C	AGUA 160°C	SAL 180°C
$X_o$ (kg agua/kg s.s)	0.001	0.001	7
$r$ (m)	$2.362 \times 10^{-5}$	$2.362 \times 10^{-5}$	$2.681 \times 10^{-5}$
$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	0.7324	0.8342	0.7833
$\lambda w$ (kcal/kg)	571.791	574.749	573.159
$T_g$ (°C)	199.84	160.40	180.57
$T_w$ (°C)	44.94	39.73	42.53
$h$ (kcal/h m <sup>2</sup> °C)	492.362	515.733	502.484

La humedad inicial se obtiene a partir de la cantidad de sólidos que posee el fluido alimentado, que para el caso de sal es de 12.5% de cloruro de sodio; para el caso de agua, se supone que ésta contiene un 0.1% de impurezas, consideradas como la cantidad de sólidos que presenta. El coeficiente de transferencia de calor empleado es el resultante de un análisis de coeficiente de variación a los coeficientes experimentales. El radio de la gota empleado es el radio máximo, es decir de la gota de mayor tamaño. La densidad y el calor latente son los obtenidos de tablas.

La evaluación del tiempo de secado en el período constante da como resultado:

$$\begin{aligned} \text{Agua } 200^\circ\text{C} &= 1.7275 \times 10^{-7} \text{ h} = 6.2190 \times 10^{-4} \text{ s} \\ \text{Agua } 160^\circ\text{C} &= 2.4238 \times 10^{-7} \text{ h} = 8.7256 \times 10^{-4} \text{ s} \\ \text{Sal } 180^\circ\text{C} &= 2.0245 \times 10^{-7} \text{ h} = 7.2882 \times 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Como se puede ver, los tiempos de secado en el período constante, son menores que los tiempos de trayectoria de la gota hacia la pared de la cámara

**Cuadro 22 Tiempos de trayectoria y de secado para cada ensayo**

Ensayo	Tiempo de trayectoria	Tiempo de secado
Agua 200°C	$1.1352 \times 10^{-3} \text{ s}$	$6.2190 \times 10^{-4} \text{ s}$
Agua 160°C	$1.2115 \times 10^{-3} \text{ s}$	$8.7256 \times 10^{-4} \text{ s}$
Sal 180°C	$1.1642 \times 10^{-3} \text{ s}$	$7.2882 \times 10^{-4} \text{ s}$

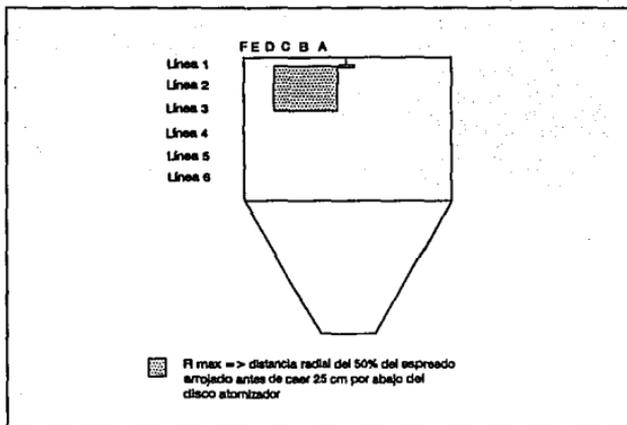


Figura 40 Distancia radial R max

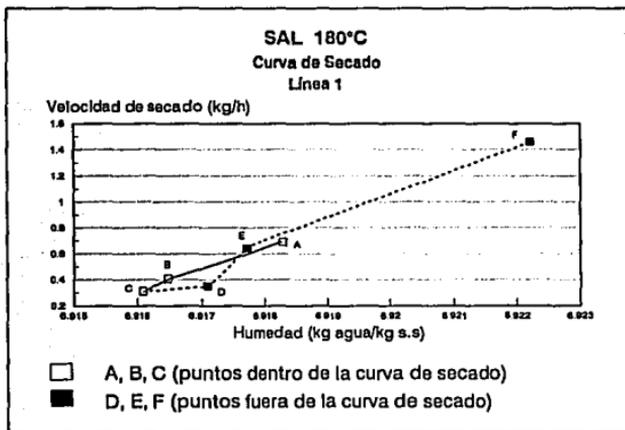


Figura 41

Esto quiere decir que las gotas se secan mucho antes de llegar a una superficie sólida de la cámara de secado, lo que indica un secado por aspersión eficiente.

Conociendo los tiempos de secado y los tiempos de trayectoria de las gotas, y descartando lo que se argumenta acerca de que la gota sufre una desaceleración a medida que avanza después de haber dejado el disco aspersor(32), se puede conocer la distancia radial a la que la gota se encuentra en la cámara al momento del tiempo de secado correspondiente. Esto es, para cada uno de los casos,

Agua	200°C	=	0.3286 m
Agua	160°C	=	0.4321 m
Sal	180°C	=	0.3756 m

Estas distancias están de acuerdo con los perfiles de temperatura observados para cada ensayo, así como también con la distancia radial que involucra el 99% de las gotas atomizadas (Rmax), como se puede ver en la Figura 40.

En cuanto al tiempo de secado en el período de velocidad decreciente, éste no se puede evaluar en las condiciones de los ensayos realizados en este estudio, ya que los fluidos alimentados no poseen humedad ligada, hecho confirmado al observar los tiempos de secado contra los tiempos de trayectoria de la gota, además de los perfiles de los coeficientes de transferencia de calor y de transferencia de masa, los cuales se vuelven constantes a una altura de 36 cm hacia abajo del disco atomizador.

Por otro lado, otra forma de verificar la presencia de uno o de los dos períodos de secado, consiste en la construcción de una curva de secado basada en los balances de calor y masa puntuales, como había sido planteado en el desarrollo del presente trabajo.

Para ello, y por simplicidad en los cálculos, la expresión a usar es el balance de materia, ecuación (28), de donde todos los parámetros se conocen, a excepción de la humedad del sólido en las condiciones finales. Esto tiene solución, si se resuelve una serie de balances para así conocer este parámetro en cada uno de los puntos en estudio.

Tomando el caso del ensayo de secado de una solución salina a 180°C como ejemplo para la construcción de la curva de secado, se tiene que si el contenido de sólidos de secado es de 12.5%, tiene una humedad inicial correspondiente al 87.5% kg agua/kg sólido húmedo. Ya que en la ecuación del balance se emplean humedades en base seca se tiene:

$$x_1 = 87.5\% \text{ kg agua/kg sólido húmedo} = X_1 = x/(1 - x) \text{ [=] kg agua/kg sólido seco}$$

$$X_1 = 7 \text{ kg agua/kg sólido seco}$$

Para conocer la cantidad de sólidos secos, recordando que el gasto másico de la alimentación fue de 12.744kg/h para la solución salina, se tiene que:

$$S_s = S_H (1 - x) = S_s = 1.593 \text{ kg sólido seco/h}$$

Por último, como el gasto másico del aire fue

$$G_s = (v \ A)/V_h = G_s = 2.223 \text{ kg aire seco/h}$$

entonces, despejando la humedad del sólido en el punto 2 de la ecuación del balance de materia:

$$X_2 = [(G_s (Y^*_1 - Y^*_2)) + (S_s X_1)] / S_s$$

- en donde se involucran las humedades del aire para este ensayo, evaluadas en cada punto.

Una vez obtenidos estos valores es posible construir la curva de secado, donde en el eje de las abscisas se encuentra la humedad del sólido, y en el eje de las ordenadas la velocidad de secado correspondiente.

La gráfica de la Figura 41 presenta el resultado obtenido de trazar la gráfica la velocidad de secado en función de la humedad del sólido para la línea 1. Como se puede observar, hasta el punto C (distancia radial 34 cm) se puede pensar en la posibilidad de que efectivamente sea una curva de secado, sin embargo los puntos D, E y F ya no pertenecerían a la curva, hecho que puede explicarse con base en que en esta zona ya no existe un intercambio de humedad entre el aire y la partícula. De cualquier manera, el tener solo tres puntos para la curva no permite considerar ésto como el comportamiento real. Este problema podría solucionarse de tener termopares colocados a menores intervalos de distancia entre sí.

En cuanto al resto de las líneas ya no tienen un comportamiento ni siquiera un tanto similar a lo que sería una curva de secado, por lo que no fue posible llegar por este camino a la verificación de la presencia de uno o de los dos períodos de secado durante el proceso.

### 3.3.5 Relación de números adimensionales

Durante el análisis de los etapas anteriores, así como también durante esta última, se observó que las relaciones de números adimensionales obtenidas por otros investigadores no son del todo aplicables a las condiciones reales del proceso de secado por aspersión. Por esta razón, se propuso obtener una relación de dichos números que reflejen de una manera más cercana el comportamiento de la operación de secado.

Para lograr esta relación, se tienen todos los parámetros involucrados en los números adimensionales del Reynolds, Nusselt y Prandtl, siendo estos últimos los comúnmente relacionados para transferencia de calor.

$$Nu = \alpha Re^m Pr^n$$

donde los valores de  $\alpha$ ,  $m$  y  $n$  están en función de la transferencia de calor que se esté llevando a cabo.

Para el caso de secado por aspersión estos números adimensionales quedan expresados por las ecuaciones [19, 20, 22]:

$$Re = (\rho_a \ v_r \ D_m) / \mu_a$$

$$Pr = (Cp_a \ \mu_a) / k_a$$

$$Nu = (h \ D) / k_a$$

Las densidades del aire son las evaluadas en cada uno de los puntos en cuestión como el inverso del volúmen húmedo; las viscosidades del aire evaluadas a la temperatura de bulbo seco se obtienen de tablas (12); las conductividades térmicas del aire evaluadas a las temperaturas de bulbo seco correspondientes, también se obtienen de tablas (12); el número de Prandtl se obtiene de tablas (12) evaluándose también en las temperaturas de bulbo seco respectivas. La velocidad relativa entre aire y partícula ya había sido calculada, siendo igual a 92.6953 m/s, y el diámetro máximo de la gota, previamente determinado fue de  $4.724 \times 10^{-5}$  m para los ensayos realizados con agua, y de  $5.632 \times 10^{-5}$  m para el ensayo realizado con la

solución salina. Los coeficientes de transferencia de calor empleados fueron los obtenidos de la experimentación.

Se realizó la determinación del número de Reynolds y del número de Nusselt para las condiciones de cada ensayo, presentándose los valores máximos y mínimos y la posición en la que se encuentran en el siguiente cuadro.

**Cuadro 23 Intervalo de los números adimensionales para cada ensayo**

Ensayo	No.	Máximo	Posición	Mínimo	Posición
Agua 200°C	Re	169.952	L 1 - C B	150.294	L 5 - C B
	Pr	0.7054	L 1 - C B	0.7015	L 5 - C B
	Nu	1.0409	L 1 - C B	0.8944	L 5 - C B
Agua 160°C	Re	180.661	L 1 - C A	169.081	L 4 - C B
	Pr	0.7061	L 1 - C A	0.7041	L 4 - C B
	Nu	1.0661	L 1 - C B	0.9814	L 4 - C B
Sal 180°C	Re	196.492	L 1 - C C	180.691	L 5 - C C
	Pr	0.7054	L 1 - C C	0.7029	L 5 - C C
	Nu	1.1782	L 1 - C C	1.0643	L 5 - C C

De aquí se puede observar que los valores máximos de cada uno de los números adimensionales evaluados, se encuentran en la zona A de la Figura 31, que es la zona de mayor intercambio térmico y donde se lleva a cabo el secado a velocidad constante, como también se encuentran en la zona determinada por la distancia radial R max (Figura 40). Los valores mínimos de los adimensionales se localizan en la zona E, de la Figura 31, donde se lleva a cabo el secado a velocidad decreciente. Todo esto reconfirma el seccionamiento de la cámara de secado según el tipo de intercambio térmico y másico que se está realizando.

Conociendo los valores de los números adimensionales en cada uno de los puntos de estudio, se procedió a realizar la relación mencionada de los mismos. La primer relación obtenida fue la del Nusselt con el Reynolds, recordando que Leniger y Beverloo (16) presentan una gráfica de Nu en función de Re para el secado por aspersión. La gráfica obtenida de esta relación es la de la Figura 42, donde se encuentran las líneas que representan a cada uno de los ensayos. Se puede observar que las pendientes y las ordenadas son muy semejantes entre sí, teniendo también las tres correlaciones de 0.99. Trazándose cada una de las líneas o de las columnas, por separado se tienen correlaciones incluso con valores de 0.9999. También se puede observar que la línea que representa el ensayo de agua a 200°C se encuentra separado de las líneas que representan las condiciones de agua a 160°C y sal a 180°C. El hecho de esta separación, se atribuyó a que el ensayo de agua a 200°C siempre presentó perfiles de comportamiento más marcados que los ensayos de agua a 160°C y sal a 180°C.

Al trazar la gráfica que representaría la relación de Nusselt en función del Reynolds para los tres ensayos, los valores de la ecuación de la recta cambian como consecuencia de la mencionada separación de la línea de agua a 200°C. Tomando los valores promedio de pendiente y ordenada de las líneas de cada uno de los ensayos, se puede obtener la ecuación de la recta representativa, de la relación del Nusselt y el Reynolds.

$$Nu = -0.22 + (0.007 Re)$$

Para relacionar el Reynolds y el Prandtl con el número de Nusselt se trazó una gráfica de Nu en función de (Re Pr), suponiendo que los valores de las potencias m y n son iguales a 1. Al igual que en el caso anterior de la relación de Nu y Re, las pendientes son muy semejantes,

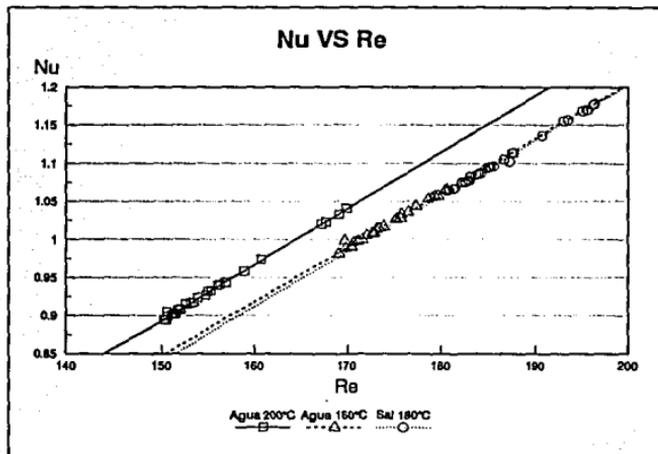


Figura 42

mientras que la ordenada resultante para sal a 180°C está un 25% por encima de las obtenidas para el caso de agua a las dos temperaturas, ésto se atribuyó a la presencia de sólidos en la solución alimentada. Sin embargo, al realizar las regresiones lineales para cada una de las líneas o de las columnas, se puede comprobar que esta diferencia no es tan marcada. Cabe mencionar que las correlaciones obtenidas para cada una de estas regresiones son de hasta 0.999, siendo menores que las obtenidas para la relación de Nu y Re. Nuevamente, los valores obtenidos de la regresión lineal para la gráfica que representa en una sola línea la relación Nu en función de (Re Pr), están alejados de los obtenidos en la gráfica que le precede, debido a que la línea representativa del ensayo de agua a 200°C, está un poco separada de las otras dos. Los valores obtenidos de las regresiones lineales se muestran en el cuadro 24, de donde se puede observar que la ecuación de la recta que representa los valores promedios de esta relación es:

$$Nu = -0.17 + [0.009 (Re Pr)]$$

Con la finalidad de encontrar alguna semejanza con los números adimensionales obtenidos por Marshall (11, 15), se tomaron los valores de las potencias m y n como 0.5 y 0.33 respectivamente. Con estos valores se realizaron las gráficas de Nu en función de  $(Re^{0.5} Pr^{0.33})$  necesarias para obtener la relación de los números adimensionales deseada.

Las gráficas mencionadas se presentan en las Figuras 43 y 44, donde se puede observar nuevamente el mismo comportamiento que en las relaciones anteriores en cuanto a la semejanza entre pendientes y ordenadas. Además al trazar una gráfica de cada una de las líneas o de las columnas se tienen correlaciones de hasta 0.999. Aquí hay que hacer notar, tomando como ejemplo la ecuación promedio, la semejanza con la ecuación obtenida por Marshall:

$$\text{Ecuación de Marshall} = Nu = 2.0 + [0.6 (Re^{0.5} Pr^{0.33})] \quad [17]$$

$$\text{Ecuación experimental} = Nu = -1.4 + [0.2 (Re^{0.5} Pr^{0.33})] \quad [47]$$

En el cuadro 24 se muestran los valores obtenidos de las regresiones lineales realizadas para cada uno de los ensayos, así como para el caso de la línea que representa a los tres ensayos para las tres relaciones de números adimensionales mencionadas.

Estas relaciones obtenidas, sí representan el comportamiento de los coeficientes de transferencia de calor, ya que se evaluaron en las condiciones reales del proceso de secado por aspersion, a diferencia del resto de las relaciones mencionadas en la bibliografía, dado que las obtenidas por los otros investigadores implicaban condiciones tales como aire en movimiento lento, y gotas en estado estacionario, es decir que no caían a lo largo de la cámara como sucede en realidad.

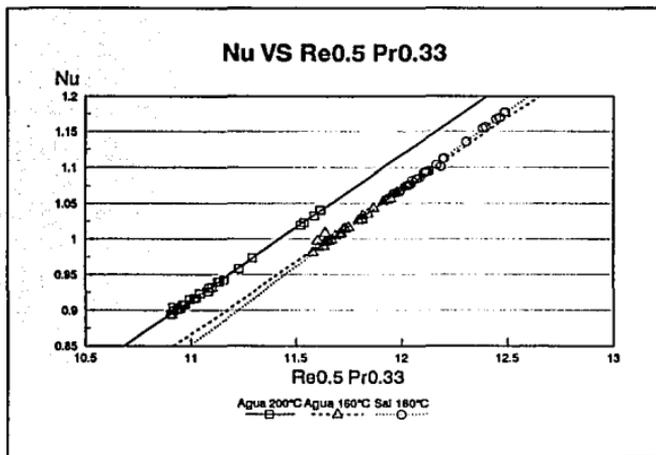


Figura 43

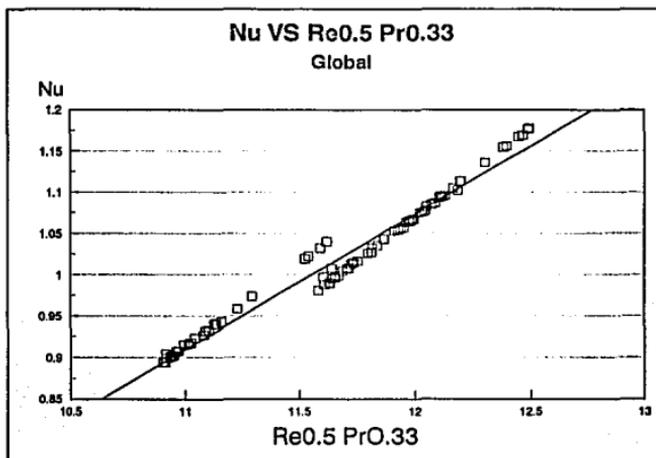


Figura 44

**Cuadro 24 Regresión lineal de relaciones adimensionales**

RELACION Ensayo	Ordenada	Pendiente	Correlación
<b>Nu VS Re</b>			
Agua 200°C	-0.214477	0.007383	0.998804
Agua 160°C	-0.222987	0.007132	0.992817
Sal 180°C	-0.250548	0.007266	0.997776
Valores promedio	-0.229337	0.007260	0.996465
Global	0.042678	0.005676	0.976441
<b>Nu VS (Re Pr)</b>			
Agua 200°C	-0.183266	0.010039	0.998820
Agua 160°C	-0.149934	0.009526	0.985083
Sal 180°C	-0.204089	0.009972	0.995559
Valores promedio	-0.172429	0.009846	0.993154
Global	0.057141	0.007947	0.976415
<b>Nu VS (Re<sup>0.5</sup>Pr<sup>0.33</sup>)</b>			
Agua 200°C	-1.325290	0.203577	0.998748
Agua 160°C	-1.359477	0.202348	0.984791
Sal 180°C	-1.541532	0.217608	0.997687
Valores promedio	-1.408766	0.207844	0.993742
Global	-0.897135	0.164217	0.973710

Resumiendo lo analizado durante este capítulo, se conocieron los efectos que ejercen la velocidad rotacional del disco y la temperatura de entrada del aire sobre los coeficientes de transferencia de calor. También se obtuvieron los perfiles de comportamiento de las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo dentro de la cámara de secado, así como también los perfiles de humedad dentro de la misma. Con las temperaturas se evaluaron puntualmente los coeficientes de transferencia de calor y masa, obteniendo una ecuación que permite el cálculo del primero, dentro de las condiciones reales en que se desarrolla el proceso.

Una vez conocido el coeficiente de transferencia de calor, es posible evaluar los tiempos de secado de las gotas esparcidas, y conociendo también el tiempo de trayectoria de las mismas, se determina si la gota llega seca a la pared de la cámara de secado, principio fundamental de este proceso. De esta manera, se puede desarrollar un método para predecir las condiciones de operación del secado por aspersión de un alimento, sin tener que realizar experimentaciones previas.

## CAPITULO 4

### METODO DE PREDICION DE CONDICIONES OPERACIONALES EN EL SECADO POR ASPERSION

Para poder evaluar, y controlar el proceso de secado por aspersión de un fluido cualquiera, se sabe que se necesita conocer una serie de parámetros, los cuales se encuentran involucrados en dicho proceso. A continuación se presenta una lista de estos parámetros, así como su clasificación.

#### A) Producto

- Solución a alimentar
- Contenido de sólidos presentes
- Densidad de alimentación
- Viscosidad de alimentación
- Tensión superficial de alimentación
- Gasto volumétrico de alimentación
- Gasto másico de alimentación

#### B) Secador

- Dimensiones del secador
- Sistema de alimentación
- Tipo de atomizador
- Temperatura de entrada del aire
- Temperatura de salida del aire
- Velocidad del aire
- Velocidad de partícula

#### C) Producto seco

- Contenido de humedad
- Distribución de tamaños de las partículas
- Capacidad de producción
- Densidad
- Solubilidad

#### D) Proceso

- Densidad del aire
- Viscosidad del aire
- Conductividad térmica del aire
- Capacidad calorífica del aire
- Gasto de aire seco
- Coeficiente de transferencia de calor
- Coeficiente de transferencia de masa

El objetivo de este capítulo fue la creación de un método que permita conocer las condiciones de operación que se deban emplear para el secado por aspersión de una solución problema, sin tener que realizar una experimentación previa en el secador. Esto se realizó tomando los elementos obtenidos como producto del análisis de resultados desarrollado en el capítulo anterior. El criterio principal para aceptar las condiciones de operación, fue que los

tiempos críticos de secado (tiempos de secado en el período de velocidad constante), fueran menores que los tiempos de trayectoria de las gotas hacia la pared de la cámara.

De esta forma, lo que se necesita saber para establecer este método es:

a) Características del producto a secar:

- Contenido de sólidos en la alimentación
- Densidad de alimentación
- Viscosidad de alimentación
- Tensión superficial de alimentación
- Cantidad de sólidos secos
- Densidad del producto seco
- Humedad inicial de la alimentación
- Humedad deseada del producto a la salida

El contenido de sólidos en la alimentación, se conoce al determinar que producto se desea secar, si es producto de otras operaciones previas, o si se prepara directamente para someterse al secado, y está ligado con la humedad inicial de la alimentación, y en caso de no conocerse ésta última, se puede determinar mediante una determinación en laboratorio. La densidad, viscosidad y tensión superficial pueden determinarse fácilmente en caso de no ser valores ya conocidos, de la misma manera que se realizó en este trabajo, es decir, la densidad con picnómetro, la viscosidad con un viscosímetro de Ostwald y la tensión superficial con el método de elevación capilar. La cantidad de sólidos secos se fija en función la capacidad de producción deseada. Para el caso de la densidad del producto seco, en caso de no conocerse previamente, puede determinarse experimentalmente de una manera sencilla. En cuanto a la humedad deseada del producto a la salida, se tienen dos opciones, la primera es un estimado, y la segunda es con base en la curva de absorción del producto en caso de que ésta exista.

b) Características del secador:

- Características del disco atomizador
- Velocidad de rotación del disco
- Dimensiones de la cámara de secado
- Velocidad del aire, dentro de la cámara y a la salida de la misma

Las características del disco atomizador y las dimensiones de la cámara son constantes, mientras que la velocidad de rotación del disco puede tener diferentes niveles de variación, según las condiciones de cada secador. El secador donde se realizó la investigación puede trabajar a tres diferentes velocidades de rotación. La velocidad del aire en el interior de la cámara de secado se determinó experimentalmente (25), mientras que la velocidad del aire a la salida de la cámara de secado se determinó, también experimentalmente, durante la primera etapa del presente trabajo.

Otro parámetro que se necesita es la humedad del aire ambiente, donde se encuentra el secador, la cual puede evaluarse por medio de la carta psicrométrica, un higrómetro o ser una variable ya conocida.

Con estos parámetros, se varió esencialmente la temperatura de entrada del aire, para evaluar así los tiempos de secado y compararlos con los tiempos de trayectoria de las gotas hacia la pared de la cámara. El método se basó en las condiciones máximas o críticas dadas por el diámetro máximo de las gotas asperjadas.

#### 4.1 Algoritmo del método de predicción

Para el desarrollo del método de predicción de las condiciones de operación en el secado por aspersión de un alimento, el algoritmo a seguir es:

- 1.- Conocer los parámetros que se enlistan a continuación:

Rc =	radio de la cámara de secado
r =	radio del disco atomizador
a =	altura de apertura de orificio en el disco atomizador
n =	no. de orificios en el disco atomizador
v =	velocidad del aire dentro de la cámara
v <sub>i</sub> =	velocidad inducida por el aire (velocidad a la salida de la cámara)
N =	velocidad de rotación del disco atomizador
Y <sub>1</sub> =	humedad del aire ambiente
s <sub>f</sub> =	cantidad de sólidos de la alimentación
x <sub>1</sub> =	humedad inicial de la alimentación
x <sub>2</sub> =	humedad final deseada en el producto
ρ <sub>s</sub> =	densidad del sólido seco
ρ =	densidad de alimentación
μ =	viscosidad de alimentación
γ =	tensión superficial de alimentación
S <sub>s</sub> =	cantidad de sólidos secos

- 2.- Determinar el diámetro máximo de la gota, para lo cual es necesario determinar primero el perímetro mojado, que viene dado por la ecuación [37]. Una vez, conocido este factor, también debe conocerse el gasto másico de la alimentación, mediante la ecuación [38].

Y para determinar la distribución de tamaño de las gotas asperjadas se emplean las ecuaciones [7, 8, 9].

- 3.- Hacer un estimado de la temperatura de la entrada del aire, considerando que el límite superior depende de las características del producto a secar, ya que se debe considerar su sensibilidad al calor.
- 4.- Con la temperatura del aire supuesta, se evalúan sus propiedades de densidad, viscosidad, conductividad térmica y capacidad calorífica, a partir de tablas (12). Por razones prácticas, se manejan los resultados de las regresiones lineales para cada parámetro.
- 5.- Determinar el tiempo de trayectoria de la gota de mayor tamaño (D<sub>m</sub>) hacia la pared de la cámara del secador. Para ello es necesario conocer la velocidad de la partícula empleando la ecuación [25].

Una vez determinada esta velocidad, se realiza la determinación de la trayectoria, para lo cual se emplea la expresión [10]

Para evaluar el tiempo de secado, es necesario realizar una serie de determinaciones:

- 6.- Determinación del coeficiente de transferencia de calor mediante la expresión obtenida de la experimentación del presente trabajo, que relaciona a los números adimensionales Nu, Re y Pr (ecuación [47]). Para ello, es necesario conocer primero la velocidad relativa entre el aire y la partícula, pudiéndose determinar con la ecuación [24].

Conocida esta velocidad se realiza la determinación de número de Reynolds y del número de Prandtl mediante las expresiones que los definen, siendo éstas las ecuaciones [19, 20].

Finalmente, se determina el valor del coeficiente de transferencia de calor mediante la expresión proveniente de la ecuación [47], de la cual se despeja el coeficiente de transferencia de calor:

$$h = [(-1.4 + 0.2 \text{Re}^{0.5} \text{Pr}^{0.33}) k_a] / D_m \quad [48]$$

- 7.- Otro parámetro que hace falta conocer para realizar la determinación de los tiempos de secado, es la temperatura de bulbo húmedo, la cual se obtendrá a partir de un balance de materia en el secador. Para ello se deben conocer las humidades en base seca de la alimentación, y del producto seco, logrando ésto mediante la ecuación [32].

Se debe conocer también el gasto de aire seco que entra al secador, lo cual se determina evaluando el volumen húmedo del aire en la condiciones de entrada del secador, usando la expresión [4]. Con el volumen húmedo, se determina el gasto de aire seco, empleando la ecuación [31], considerando el área donde se realiza la determinación del aire igual a 0.0012 m<sup>2</sup>, es decir que se emplea la velocidad determinada puntualmente dentro de la cámara de secado.

Con estos valores se realiza un balance de materia global en el secador para conocer la humedad del aire a la salida del mismo. Despejando esta humedad del balance de materia [28], se tiene que:

$$Y^2 = [(Ss (X_1 - X_2)) + (Gs Y^1)] / Gs \quad [49]$$

Como el aire que sale de la cámara de secado sale en condiciones de saturación, es posible considerar que la humedad del aire a la salida (Y<sup>2</sup>), como la humedad de saturación (Y<sup>s</sup>) correspondiente a esas condiciones. Si se emplea la ecuación que define a la humedad de saturación se tiene que:

$$Y^s = (Ma/Mb) [p^*/(P - p^*)] \quad [3]$$

donde Ma es igual a 18, Mb es igual a 29, P es la presión total del sistema y p<sup>\*</sup> es la presión de vapor en las condiciones de saturación. Y despejando de aquí p<sup>\*</sup> se tiene:

$$p^* = (P Y^s)/(0.6206 - Y^s) \quad [50]$$

Como la temperatura de bulbo húmedo es la temperatura límite de enfriamiento alcanzada por una pequeña masa de líquido en contacto con una masa mucho mayor de gas húmedo, se puede decir que la p<sup>\*</sup> en condiciones de saturación, es la misma que la presión de vapor en la condiciones de temperatura de bulbo húmedo (p<sup>w</sup>), entonces, es posible conocer de tablas (31) la temperatura de bulbo húmedo aplicable a las condiciones de ese proceso. La ecuación a emplear con este fin es:

$$T_w = 23.131372 + (0.002160 p^w) \quad [51]$$

Lo que se acaba de plantear fue evaluado para los valores experimentales del presente trabajo, confirmando la aceptación de esta aproximación a los datos obtenidos por medio de las determinaciones recién planteadas. Conociendo la temperatura de bulbo húmedo es posible determinar el calor latente evaluado a T<sub>w</sub> mediante tablas (31), quedando la ecuación que lo describe como:

$$\lambda_w = 597.760537 - (0.572292 T_w) \quad [52]$$

- 8.- En cuanto al tamaño de la gota, se sabe que existe una reducción de tamaño durante el proceso de secado, que para los casos de fluidos con muchos sólidos en suspensión o cristalizables, se puede considerar como constante. En el caso de no ser así, se debe conocer el tamaño final de la partícula para realizar las determinaciones de los tiempos de secado. También se sabe que el diámetro que posee la gota cuando alcanza el contenido crítico de humedad es prácticamente igual al diámetro de la gota al finalizar el proceso. Esto es debido a que la mayor parte del agua de la gota, fue eliminada en el primer período de secado.

La expresión que permite conocer el diámetro de la gota cuando alcanza el contenido crítico de humedad (13) es:

$$D_c = D_m \left[ \frac{\rho_s}{\rho} \left( \frac{1 + X_2}{1 + X_1} \right) \right] \quad [53]$$

En el caso de no tener forma de conocer la densidad del producto seco, puede suponerse que el diámetro permanece constante durante el proceso, y así tomarse el diámetro máximo de la gota para realizar las determinaciones necesarios.

- 9.- Es necesario conocer el contenido crítico de humedad. Para ello, deben determinarse la humedad removida y la humedad remanente (13). La humedad removida en la gota está dada por la expresión:

$$X_r = \left[ \frac{\pi}{6} \right] (D_m^3 - (D_c/D_m)^3 D_m^3) \rho_H \quad [54]$$

donde  $\rho_H$  es la densidad del agua. La humedad remanente en la gota está dada por la expresión:

$$X_p = \left[ \frac{\pi}{6} \right] D_m^3 x_1 \rho - X_r \quad [55]$$

Así, la humedad crítica se puede conocer mediante la ecuación:

$$X_c = X_p / \left[ \frac{\pi}{6} (D_m^3) \rho \right] \quad [56]$$

- 10.- Ya que se determinaron  $D_c$  y  $X_c$ , es importante conocer la humedad del aire cuando la gota alcanza el contenido crítico de humedad, logrando esto mediante un balance de materia desde las condiciones de entrada hasta las condiciones de la humedad crítica, quedando expresada la humedad del aire como:

$$Y^c = \left[ \frac{S_s (X_1 - X_c) + (G_s Y^1)}{G_s} \right] \quad [57]$$

- 11.- Basándose en la ecuación de saturación adiabática del aire (33), la cual es la adecuada debido a que las pérdidas de calor a través del secador son despreciables, se puede conocer la temperatura del aire cuando la gota asperjada alcanza el contenido crítico de humedad. Para ello, se necesita determinar el calor húmedo del aire (35), evaluado a la humedad del aire en las mismas condiciones ( $Y^c$ ), mediante la expresión:

$$C_s = 0.24 + (0.45 Y^c) \quad [58]$$

Con ésto, se puede conocer la temperatura del aire en la condiciones de la humedad crítica:

$$T_c = \left[ \frac{Y^2 - Y^c}{\lambda w / C_s} \right] + T_w \quad [59]$$

- 12.- Antes de poder determinar los tiempos de secado se necesita evaluar el  $\Delta T$ , que se aplica en la determinación del tiempo de secado en el período decreciente. Este  $\Delta T$ , es la media logarítmica de temperaturas desde el punto donde se alcanza el contenido crítico de humedad hasta el final del proceso, y está dado por la siguiente expresión:

$$\Delta T = [(T_c - T_w) - (T_{g2} - T_{ss2})] / [\ln ((T_c - T_w)/(T_{g2} - T_{ss2}))] \quad [60]$$

De aquí, solo falta conocer la temperatura de salida del aire, así como también la de salida del sólido. Se dice que la temperatura del aire a la salida del secador es prácticamente igual a (20):

$$T_{g2} = T_{g1} - 100 \quad [61]$$

De las experimentaciones realizadas, considerando las tres etapas, se pudo observar que la temperatura de salida se encuentra en un intervalo de 75 a 130°C menor que la temperatura de entrada del aire, por lo que sí es adecuado manejar esta expresión.

En cuanto a la temperatura de salida del sólido, se dice también (20) que es 10°C menor que la temperatura de salida del aire, es decir:

$$T_{ss2} = T_{g2} - 10 \quad [62]$$

De esta manera, es posible determinar la media logarítmica de temperaturas.

- 13.- El tiempo de secado en el período de velocidad constante puede determinarse haciendo uso de la expresión [14], empleando el radio de la gota cuando alcanza el contenido crítico de humedad ( $D_c/2$ ). Este tiempo  $t_c$  es el que debe existir como mínimo en la trayectoria de las partículas antes de que éstas choquen en una superficie sólida del secador.
- 14.- Para evaluar el tiempo de secado para el período decreciente se emplea la ecuación [15].
- 15.- Para conocer el tiempo total de secado, se suma el tiempo obtenido en los dos períodos, es decir:

$$t_t = t_c + t_d \quad [63]$$

- 16.- Si el tiempo de secado  $t_c$  es menor que el tiempo de la trayectoria de la gota hacia la pared de la cámara, las condiciones de operación manejadas son la adecuadas para el secado del fluido problema. Si el tiempo total es menor que el tiempo de la trayectoria, se puede pensar en disminuir la temperatura de entrada del aire, ahorrando así energía. En el caso de que el tiempo de secado en el período constante  $t_c$  sea mayor que el tiempo de trayectoria de la gota, se debe proponer otra temperatura de entrada del aire.

No sólo se puede cambiar la temperatura de entrada del aire, sino que puede variarse, en caso de ser necesario, la velocidad de rotación del disco atomizador, así como también el gasto de sólidos secos.

#### 4.2 Verificación del método de predicción

Para la verificación del método de predicción de condiciones de operación desarrollado, se elaboró un programa en una computadora personal FX-795P Casio. Este programa contiene la secuencia de cálculo mencionada en el punto anterior, y se diseñó con las constantes del secador empleado para esta investigación:

- El radio de la cámara de secado
- El radio del disco aspersor
- El perímetro mojado
- La velocidad del aire a la salida de la cámara
- La velocidad del aire dentro de la cámara
- La humedad del aire ambiente, considerada constante, tomando este dato como el valor medio de las humedades existentes durante la experimentación.

En cuanto a las características del fluido a alimentar al secador, se tiene que es necesario tener como datos, la cantidad de sólidos totales, la densidad, viscosidad y tensión superficial de la alimentación, la humedad inicial, y la final, así como también la densidad del producto seco. Dentro del programa, se incluyeron los valores correspondientes a fluidos como agua, solución salina al 12.5% y huevo en solución 1:1 en agua, fluidos empleados durante la experimentación del presente trabajo. Sin embargo, puede ser empleado para cualquier otro fluido, del cual se tenga conocimiento de los parámetros mencionados. En el caso de la densidad del producto seco, como en general sucede, no se puede conocer su valor, pero el programa está diseñado previendo esta situación; de cualquier manera es posible manejar algún estimado de esta variable.

Es necesario para iniciar el programa, fijar las condiciones de operación con las que se pretende realizar la operación de secado, las cuales son el gasto de sólidos secos, la velocidad de rotación del disco atomizador y la temperatura de entrada del aire.

Las unidades en las que se deben introducir los parámetros mencionados y las variables con las que se definieron en el programa son:

**Cuadro 25** Parámetros a introducir en el método de predicción de condiciones operacionales

Parámetros	Variables	Unidades
Cantidad de sólidos totales	SF	%
Densidad de alimentación	$\sigma$	g/cm <sup>3</sup>
Viscosidad de alimentación	$\mu$	g/cm s
Tensión superficial	$\gamma$	dina/cm
Humedad inicial	X	% en base húmeda
Humedad final deseada	P	% en base húmeda
Densidad del producto seco	$\sigma S$	kg/m <sup>3</sup>
Gasto de sólidos secos	SS	kg/s
Velocidad rotacional del disco	N	rps
Temperatura de entrada del aire	TG1	°C

Una vez introducidos los datos necesarios, el programa tiene dos condiciones principales. La primera es que si el tiempo de trayectoria de la gota hacia la pared de la cámara (t) es menor que el tiempo de secado en el periodo constante (t<sub>c</sub>), en la pantalla aparecerá la palabra "Recalcula", imprimiendo a continuación éstos dos valores, y pudiendo elegir si se desea o no continuar con el método. Si se continúa con el mismo, será necesario elegir nuevas condiciones de gasto de sólidos secos, de velocidad rotacional o de temperatura de entrada del aire.

La segunda condición es que si el tiempo de trayectoria es mayor que el tiempo total de secado ( $t_t$ ), pero este último es por lo menos dos veces el tiempo de trayectoria, aparecerá en la pantalla la palabra "Optimiza", para así reducir el gasto de energía, volviendo entonces a elegir condiciones de operación. Al igual que en la condición anterior, se imprimen los valores del tiempo de trayectoria y del tiempo total de secado, para dar la pauta sobre el cambio requerido sobre las condiciones de operación para cumplir con lo establecido.

Quando se cumplen estas dos condiciones la secuencia de cálculo ha sido exitosa, y se obtienen las variables a las cuales deberá trabajar el secador por aspersión, siendo éstas, el gasto volumétrico de alimentación, la velocidad de rotación del disco, y la temperatura de entrada del aire. Otros parámetros considerados como importantes por conocer son la probable distribución de tamaño de las partículas secas, el tiempo de trayectoria de la gota hacia la pared de la cámara, el tiempo de secado en el período constante y por último, el tiempo total de secado. A continuación se presenta una lista de estos parámetros con las unidades en las que se encuentran expresados y las variables que los definen en el programa.

**Cuadro 26** Parámetros resultantes del método de predicción de condiciones operacionales

Parámetros	Variables	Unidades
Gasto volumétrico de alimentación	GA	m <sup>3</sup> /s
Velocidad de rotación del disco	N	rps
Temperatura de entrada del aire	TG1	°C
Dm final	DMF	m
Dvs final	DVSF	m
Dg5 final	D95F	m
Tiempo de trayectoria de la gota	T	s
Tiempo de secado en el período constante	TC	s
Tiempo total de secado	TT	s

El programa diseñado para predecir las condiciones operacionales del secador por aspersión al procesar un fluido determinado se presenta en el apéndice del presente trabajo.

Con el fin de comparar los valores de algunos de los parámetros más importantes del método, se presenta el siguiente cuadro donde se muestran los valores obtenidos experimentalmente contra los valores obtenidos empleando el programa.

**Cuadro 27 Comparación de parámetros obtenidos mediante el programa y los obtenidos experimentalmente**

ENSAYO	Experimental	Programa
<b>Agua 200°C</b>		
<b>Parámetros</b>		
Dm	$4.724 \times 10^{-5}$	$4.7245 \times 10^{-5}$
t	0.001135	0.001124
Re	126.048	122.9213
h	0.1367	0.0983
Y <sup>2</sup>	0.08	0.0655
Tw	44.94	43.0146
λw	571.791	573.143
t <sub>c</sub>	$6.2190 \times 10^{-4}$	$8.5080 \times 10^{-4}$
<b>Agua 160°C</b>		
<b>Parámetros</b>		
Dm	$4.724 \times 10^{-5}$	$4.7245 \times 10^{-5}$
t	0.001211	0.001194
Re	150.346	148.6586
h	0.1432	0.1352
Y <sup>2</sup>	0.05725	0.0599
Tw	39.73	41.1573
λw	574.749	574.2064
t <sub>c</sub>	$8.7256 \times 10^{-4}$	$9.2505 \times 10^{-4}$
<b>Sal 180°C</b>		
<b>Parámetros</b>		
Dm	$5.362 \times 10^{-5}$	$5.3620 \times 10^{-5}$
t	0.001164	0.001150
Re	156.087	153.6153
h	0.1395	0.1308
Y <sup>2</sup>	0.06825	0.0834
Tw	42.53	42.3121
λw	573.159	573.5456
t <sub>c</sub>	$7.2882 \times 10^{-4}$	$7.7258 \times 10^{-4}$

Como se puede observar, los valores son muy similares a excepción del caso del ensayo de agua a 200°C, en el cual se comienza a notar la diferencia en el coeficiente de transferencia de calor. La diferencia puede radicar en los valores de los parámetros involucrados para su cálculo, principalmente en las propiedades del aire provenientes de las regresiones lineales anteriormente mencionadas. Además, hay que recordar que la línea del ensayo de agua a 200°C dentro de la gráfica de Nu en función de  $Re^{0.5} Pr^{0.33}$  (Figura 44), se separaba de las líneas que representan a los otros dos ensayos. Otro punto donde existe diferencia es en el valor de la humedad del aire a la salida del secador. Con estos dos puntos, es de esperarse que el tiempo de secado en el período constante sea diferente del calculado mediante los datos experimentales, siendo un 36% mayor el del programa que el experimental.

Analizando los ensayos de sal a 180°C y agua a 160°C, se observa que los valores obtenidos mediante el programa son muy similares a los obtenidos experimentalmente. La diferencia entre el tiempo de secado en el período constante mediante el programa es que es un 6% mayor al tiempo obtenido a partir de los datos experimentales, lo que lleva a considerar que este programa es lo suficientemente aceptable desde un punto de vista práctico, ya que a partir de este método es más fácil decidir bajo qué condiciones de operación se puede realizar el secado por aspersión de cualquier fluido, sin tener que realizar experimentaciones previas.

De esta forma, se puede tener un formato, como el que se muestra en la siguiente página, en el cual se manejen las variables necesarias para emplear este método de predicción de condiciones de operación de un secador por aspersión durante el secado de un fluido, teniendo también en consideración las limitantes que puedan existir para el secado de dicho fluido. Se puede incluir también la información obtenida en caso de que hubiesen experimentaciones anteriores con ese fluido bajo las mismas características de alimentación.

Al hablar de las posibles limitantes existentes para el secado de ese fluido, se hace referencia al hecho de que éste pueda ser sensible al calor, y por lo tanto tenga una temperatura máxima a la que pueda ser procesado sin repercutir en su estructura ni afectar sus propiedades, como las organolépticas. También se refiere al tamaño de partícula final que tenga el producto seco, ya que este parámetro puede repercutir en características del producto tales como la densidad y la solubilidad, ya que ésta es una de las características importantes de los productos atomizados, debido a que la mayoría son empleados posteriormente en procesos de rehidratación.

Este método desarrollado puede aplicarse a cualquier tipo de fluido, y a cualquier secador por aspersión con sistema en paralelo y disco atomizador, previo conocimiento y determinación, en su caso, de todos los parámetros involucrados.

## FORMATO PARA METODO DE PREDICION DE CONDICIONES DE OPERACION

### 1.- CARACTERISTICAS DEL FLUIDO

Fluido a secar \_\_\_\_\_  
Cantidad de sólidos totales \_\_\_\_\_  
Densidad de alimentación (g/cm<sup>3</sup>) \_\_\_\_\_  
Viscosidad de alimentación (g/cm s) \_\_\_\_\_  
Tensión superficial (dina/cm) \_\_\_\_\_  
Humedad inicial (% en base húmeda) \_\_\_\_\_  
Gasto de sólidos secos (kg/s) \_\_\_\_\_

### 2.- CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO SECO

Humedad final deseada (% en base húmeda) \_\_\_\_\_  
Densidad del producto seco (kg/m<sup>3</sup>) \_\_\_\_\_  
Distribución de tamaños de partícula deseada \_\_\_\_\_  
Si existe alguna limitación del tamaño de partícula,  
indicar el tamaño máximo o mínimo \_\_\_\_\_

### 3.- CARACTERISTICAS DEL SECADOR

Radio de la cámara de secado (m) \_\_\_\_\_  
Radio del disco aspersor (m) \_\_\_\_\_  
No. de orificios del disco aspersor \_\_\_\_\_  
Altura del orificio del disco aspersor (m) \_\_\_\_\_  
Velocidad del aire dentro de la cámara (m/s) \_\_\_\_\_  
Velocidad del aire a la salida de la cámara (m/s) \_\_\_\_\_

### 4.- CONDICIONES DE OPERACION

Velocidad rotacional del disco (rpm) \_\_\_\_\_  
Temperatura de entrada del aire (°C) \_\_\_\_\_  
Si el fluido es sensible al calor, temperatura límite (°C) \_\_\_\_\_  
Gasto volumétrico de alimentación \_\_\_\_\_  
Si existe alguna experimentación previa, indicar  
• Velocidad rotacional del disco (rpm) \_\_\_\_\_  
• Temperatura de entrada del aire (°C) \_\_\_\_\_  
• Si el fluido es sensible al calor, temperatura límite (°C) \_\_\_\_\_  
• Gasto volumétrico de alimentación \_\_\_\_\_

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A lo largo del estudio realizado dentro de la cámara del secador por aspersión, se observó la influencia de varios factores sobre la transferencia de calor y de masa que se efectúa durante el proceso de secado de un fluido.

Los fluidos empleados para este estudio fueron agua pura y una solución salina al 12.5%, mismos que fueron elegidos por presentar las características adecuadas para ser considerados como modelos. El primero permite observar el comportamiento del fenómeno sin tener sólidos presentes, es decir, se observa cómo se elimina la humedad de las gotas asperjadas, mientras que el segundo, permite observar el comportamiento del proceso, teniendo sólidos presentes en las gotas, pero conteniendo éstas sólo humedad libre, lo cual provoca que el secado se lleve a cabo únicamente en el período de velocidad constante. Esta consideración fue confirmada con los resultados de la primera etapa sobre la transferencia de calor global en un secador por aspersión.

Durante la etapa mencionada también se evaluó el efecto de la tensión superficial del fluido alimentado, de la velocidad rotacional del disco atomizador y de la temperatura de entrada del aire sobre el coeficiente de transferencia de calor, la velocidad de secado y la eficiencia térmica global. Como resultado de este estudio, se obtuvo que la tensión superficial no ejerce un efecto significativo por sí sola (por lo menos en los niveles empleados 14 a 20 dina/cm), sobre el diámetro de la gota, el cual a su vez se involucra con las variables de respuesta mencionadas. Sin embargo, que la tensión superficial está estrechamente ligada con otras propiedades de la alimentación, como lo son la densidad y la viscosidad, de manera que no es posible descartar su efecto sobre la velocidad de secado y el coeficiente de transferencia de calor.

El caso contrario se presenta para la velocidad de rotación del disco aspersor y para la temperatura de entrada del aire, los cuales sí tienen un efecto significativo sobre el coeficiente de transferencia de calor, la velocidad de secado y por ende, sobre la eficiencia térmica global del secador. La relación entre la velocidad de rotación y el diámetro de la gota es inversamente proporcional, es decir a medida que la primera aumenta, el tamaño de la gota esparcida disminuye; con la velocidad de rotación también se ve afectada la velocidad relativa entre el aire y la partícula, sólo que con una relación directamente proporcional, es decir, que a medida que la velocidad rotacional aumenta, la velocidad relativa también se ve incrementada.

Con respecto a la temperatura de entrada del aire, se tiene que, en general, mientras mayor sea esta temperatura, mayor será el coeficiente de transferencia de calor. Ahora bien, la combinación óptima de la velocidad de rotación y de la temperatura de entrada del aire, darán lugar a las mejores condiciones para realizar el secado del fluido alimentado.

La determinación del coeficiente de transferencia de calor fue realizada de dos formas diferentes en esta etapa, la primera con base en el balance global de materia y energía en el secador, y la segunda mediante el uso de la relación de los números adimensionales Nusselt, Reynolds y Prandtl desarrollada por Marshall [17]. Los coeficientes resultantes fueron muy diferentes entre sí, atribuyéndose este hecho a que esta expresión fue realizada bajo diferentes condiciones, las cuales fueron gotas en estado estacionario y aire en movimiento lento, no siendo del todo aplicables al fenómeno existente durante el secado por aspersión. Esta fue la razón fundamental por la cual se decidió reconocer a los coeficientes obtenidos por medio del balance de materia y energía como representativos del proceso.

Es conveniente aclarar que dado que la transferencia de calor se da directamente del aire hacia la gota mediante convección forzada, y la transferencia de calor por conducción y radiación son despreciables, el coeficiente global de transferencia de calor determinado con

base en el balance de energía, resulta ser el coeficiente convectivo de transferencia de calor, tomando éste la forma de la ley de Newton.

Un factor importante a tomar en cuenta, es el área donde se realiza la transferencia de calor, así como también el lugar donde se evalúa la velocidad del aire y el área donde fue determinada ésta. La importancia radica en poder manejar los valores reales de gasto másico del aire, fundamental para el desarrollo del balance de energía y determinación del coeficiente de transferencia de calor.

La segunda etapa realizada fue sobre el análisis de la transferencia de calor y masa durante el secado por aspersión de un alimento, mientras que en la primera el fluido alimentado fue una solución salina al 25%. El primer obstáculo que se presentó durante este trabajo fue la gran variación de las temperaturas registradas por los termómetros de carátula del secador, impidiendo así poder mantener un estado estacionario que asegurase la confiabilidad de los datos obtenidos. Por este motivo fue necesario hacer uso de termopares, mediante los cuales fue posible tener un mayor y eficiente control sobre las temperaturas del proceso.

Ya que surgió la necesidad de usar los termopares para controlar el proceso, se decidió introducir algunos en diferentes posiciones con la finalidad de conocer el perfil de las temperaturas de bulbo seco dentro de la cámara de secado. Los coeficientes de transferencia de calor obtenidos mediante balances de energía en cada uno de los puntos donde fueron colocados los termopares, no siguieron un patrón de comportamiento según su posición, lo que llevó a considerar la posibilidad de que sean constantes.

El haber escogido un alimento como fluido a procesar fue con el fin de tener un producto que presentara humedad libre así como también humedad ligada, por lo que la operación se debería realizar en los dos periodos de secado, el de velocidad constante y el de velocidad decreciente. Observando el comportamiento del proceso, se podría llegar a verificar la presencia de uno o de los dos periodos mencionados. Sin embargo, dentro de este trabajo, también se proponía una modelización del secado del alimento pero fuera del secador por aspersión, que por su naturaleza implica mucha dificultad para su estudio. Desafortunadamente, esta parte del proyecto no pudo ser realizada impidiendo así el conocimiento de algunos parámetros necesarios para el análisis deseado, tales como el contenido de humedad crítica, parámetro fundamental para la separación del primer período de secado, realizado a velocidad constante, y el segundo, realizado a velocidad decreciente.

Una de las consideraciones hechas para la realización de las primeras dos etapas, fue la de que la temperatura de bulbo húmedo permaneciera constante a lo largo de todo el proceso, y por lo mismo, la temperatura de bulbo húmedo determinada a la salida de la cámara de secado, era la misma que la que se encontraba en el interior del secador. El haber tenido la necesidad de introducir los termopares a la cámara de secado, permitió asegurar que esta consideración fuese correcta, mediante la implementación de un sistema que permitiese determinar esta temperatura dentro de la cámara del secador.

Con respecto a la introducción de los termopares al interior de la cámara de secado, fue necesario construir una estructura que los soportara en los puntos previamente determinados. Esta estructura fue lo más sencilla posible con el fin de no afectar los patrones de flujo dentro de la cámara. En cuanto al método para la determinación de la temperatura de bulbo húmedo, se consiguió implementar un sistema también eficiente, pudiéndose confirmar todo esto, con base en los resultados de los análisis estadísticos realizados a las temperaturas resultantes de la experimentación.

Los perfiles de las temperaturas de bulbo húmedo mostraron que no existen tendencias de comportamiento, esto aunado a los resultados de los análisis estadísticos (variaciones máximas de 4°C entre los diferentes puntos evaluados), permitió confirmar que la temperatura de bulbo húmedo permanece constante a lo largo del proceso de secado.

En cambio, para los perfiles de las temperaturas de bulbo seco sí se tienen tendencias de comportamiento diferentes (variaciones de hasta 26.5°C entre los diferentes puntos evaluados), ya que la temperatura tiende a aumentar a medida que se acerca a la pared, o desde el punto de vista longitudinal, a medida que se aleja del disco aspersor. Además se puede observar que en las dos primeras líneas evaluadas, es decir a 12 cm hacia abajo del disco, se tienen variaciones considerables en las temperaturas, mientras que a partir de una altura de 36 cm hacia abajo, las temperaturas permanecen casi constantes. En la línea situada a una altura de 24 cm, las temperaturas sufren una especie de transición, entre el comportamiento que siguen las dos primeras líneas y el grupo de las últimas tres líneas.

Observando el comportamiento que siguen las diferencias de temperaturas (bulbo seco menos bulbo húmedo), se puede pensar que existen diferentes zonas en el secador. Las zonas A (del disco aspersor hasta 43.6cm radialmente y 12 cm longitudinalmente), y B (radialmente de 14.8 a 53.2 cm y longitudinalmente de los 12 a los 24 cm), son las que presentar un mayor intercambio térmico, es decir que es en esta zona donde se realiza en mayor proporción la evaporación del agua libre de las gotas. La zona C, comprendida entre una altura de 24 y 36 cm, más una pequeña parte que abarca de los 6 cm del disco aspersor a los 14.8 radialmente, pero a una altura de 12cm, al presentar valores intermedios de temperaturas implica que se sigue realizando la remoción de humedad, pero en una proporción mucho menor, es decir que se puede estar efectuando el secado en los dos períodos, el de velocidad constante y el de velocidad decreciente. Existe una cuarta sección (zona D) localizada al final de las tres primeras líneas, donde se registra una elevación de la temperatura, pudiendo atribuirse a que en esta sección ya no se realiza la transferencia de humedad de la gota hacia el aire, incluso se podría decir que en ella ya no existen gotas. Una última sección (zona E) registra temperaturas casi constantes, lo que lleva a considerar que en esta zona, se realiza el secado a velocidad decreciente o simplemente se alcanza el equilibrio entre la partícula y el aire.

Este seccionamiento de la cámara de secado se confirma al observar los perfiles de humedad del aire dentro de la cámara. En estos perfiles se tienen las humedades más altas en las dos primeras líneas, y a medida que el punto evaluado se aleja del disco atomizador, los valores de humedad correspondiente sufren un decremento, hasta presentarse casi constantes a partir de una altura de 36 cm. Es lógico observar diferentes valores de humedad del aire, debido a que existe una transferencia de humedad de la gota hacia el aire secante.

El resto de los parámetros determinados durante la secuencia de cálculo, tales como la densidad del aire, las entalpías y los calores puntuales confirman la división en sectores de la cámara de secado, en función al tipo de transferencia que se está realizando.

Del resultado del análisis realizado a la secuencia de cálculo para obtener el coeficiente de transferencia de calor, se observó que éste puede quedar expresado simplemente como el producto de la velocidad del aire y el calor húmedo, dividido entre el volumen húmedo del aire, esto sí se consideran iguales el área de transferencia y el área donde fue determinada la velocidad del aire. Aquí se remarca la importancia de la velocidad del aire en el proceso, así como también se ven involucradas la humedad del aire (obtenida con base en las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo), en la determinación del calor húmedo y la determinación del volumen húmedo, donde se ve involucrada a su vez, la temperatura de bulbo seco.

Una vez obtenidos los coeficientes de transferencia de calor, se determinó la velocidad de secado en cada uno de los puntos de estudio, para poder llegar finalmente al cumplimiento de los coeficientes de transferencia de masa. Tanto los coeficientes de transferencia de calor, como los de masa presentan perfiles de comportamiento similares a los perfiles de humedad, es decir, que nuevamente se presentan, los valores más altos de los coeficientes en la zona A, confirmando así que es en ésta donde se elimina la mayor cantidad de agua contenida en la gota.

De la contrastación de los coeficientes obtenidos experimentalmente (del orden de  $500 \text{ kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) contra los mencionados en la bibliografía, se tiene que son la mitad del valor que pronostica la expresión presentada por Toledo (32), con la diferencia que dicha expresión fue desarrollada para partículas muy pequeñas pero con aire en movimiento lento, por lo cual se aceptaron como reales los valores obtenidos a partir de la secuencia de cálculo planteada en el presente trabajo. Además, hay que mencionar que evaluando los coeficientes de transferencia de masa mediante un balance en la gota, los perfiles obtenidos fueron exactamente los mismos, sólo que nuevamente se presentaron como el doble de los obtenidos experimentalmente.

Del resultado del análisis de coeficiente de variación al que fueron sometidos tanto los coeficientes de transferencia de calor, como los coeficientes de transferencia de masa, se tiene que los primeros presentan menor variación (2%) que los segundos (16%), dando la pauta para elegir a los coeficientes de transferencia de calor como los que serán empleados para realizar el análisis del proceso de secado, en lugar de los coeficientes de masa, comprobando así el hecho de que es más factible evaluar este proceso por transferencia de calor, que por transferencia de masa.

Una de las inquietudes que surgieron de las primeras dos etapas fue la de desarrollar una expresión basada en los números adimensionales que se aplicara a las condiciones reales existentes durante el secado por aspersión de un fluido. La obtención de dicha expresión se alcanzó mediante las determinaciones de los números de Reynolds, de Prandtl y de Nusselt con los valores resultantes de la experimentación (ecuación [47] obtenida bajo condiciones de temperatura de entrada del aire entre  $160$  y  $200^\circ\text{C}$  y con una velocidad rotacional de  $14800 \text{ rpm}$ , para agua y una solución de NaCl al 12.5%).

La eficiencia del proceso radica en que los tiempos de secado en el período de velocidad constante, sean menores que los tiempos de trayectoria de la gota hacia la pared de la cámara de secado. Uno de los parámetros fundamentales para poder conocer los tiempos de secado es el coeficiente de transferencia de calor, para el cual ya no será necesario realizar la experimentación correspondiente para conocer su valor, sino que puede conocerse mediante la expresión de los números adimensionales realizada en este estudio.

Otro de los parámetros necesarios para evaluar los tiempos de secado es la humedad crítica, la cual marca el final del primer período realizado a velocidad constante, y el inicio del período realizado a velocidad decreciente. Para los fluidos seleccionados, la humedad crítica no existe debido a que tanto para el caso de agua como para la solución salina, la humedad contenida es removida en su totalidad. Es por esta razón que no puede ser evaluada la posibilidad de la existencia del segundo período de secado.

Sin embargo, se trató de construir una curva de secado en la cual se pudiera observar la presencia de uno o de los dos períodos de secado. La curva se construyó con base en las velocidades de secado obtenidas experimentalmente, y a la humedad de la gota determinada mediante balances puntuales de materia. Lo que se obtuvo de esta gráfica fue que no es posible asegurar la existencia de uno u otro período debido a que los puntos evaluados no son los suficientes para la construcción de la curva. Es bueno mencionar que hay casos en los que no existe lo que se conoce como curva de secado durante el proceso mismo, pudiendo ésto ser el caso del secado por aspersión.

Otra conclusión es que, apoyándose en la división en sectores de la cámara de secado, se pueda reducir el tamaño de la misma dado que el secado se realiza básicamente hasta una altura de  $36 \text{ cm}$ . El reducir el tamaño de la cámara de secado implica una reducción considerable en el costo de la construcción del secador, ya que éste esta hecho principalmente con acero inoxidable. Al disminuir el costo de la construcción, también se puede disminuir el costo de su adquisición, la cual representa una gran inversión inicial al desear producir alimentos o cualquier otro fluido mediante secado por aspersión. Si el tiempo de residencia del producto en el secador por aspersión no es suficiente, para remover la cantidad de humedad

deseada, se puede pensar en la combinación de un secador por aspersión conectado a un secador con lecho fluidizado. Esta puede ser la proposición para un nuevo estudio que implique llegar al diseño de este equipo.

Del análisis de resultados obtenidos a lo largo de este trabajo, es posible crear un método el cual permita predecir las condiciones de operación para el secado por aspersión de un fluido determinado, sin tener que realizar una experimentación previa, reduciendo con ello el gasto del fluido a procesar así como también del tiempo que se necesitaría para la experimentación previa. Esto, resulta ser muy significativo a nivel industrial.

Conociendo la serie de parámetros que se encuentran involucrados en el proceso, su interrelación, así como también la influencia que ejercen sobre los tiempos de secado, el tiempo de trayectoria y el diámetro de las partículas, se planteó el método mencionado con el cual se pueden obtener las mejores condiciones de operación para el fluido alimentado.

Este método es aplicable a cualquier tipo de fluido y a cualquier tipo de secador con disco atomizador y sistema en paralelo, siempre y cuando se conozcan las características necesarias para ello. Las propiedades que se deben conocer del fluido son la cantidad de sólidos totales, densidad, viscosidad y tensión superficial de la alimentación, las cuales pueden ser evaluadas en caso de no conocerlas, mediante pruebas sencillas de laboratorio. También se debe fijar la humedad final deseada en el producto y distribución de tamaño de las partículas, dado que la calidad del producto deseado fijará en gran parte, las condiciones en las que se deba realizar el proceso.

En cuanto a las características que se deben conocer del secador, se tiene que éstas son el radio de la cámara, el radio del disco aspersor, el número de orificios que éste posea así como su altura, la velocidad del aire dentro de la cámara y la velocidad del aire a la salida de la misma. También se debe conocer con qué velocidades de rotación del disco se puede trabajar, con que intervalo de temperatura de entrada del aire y con que gastos volumétricos de alimentación.

De esta manera, las conclusiones alcanzadas en este trabajo son:

- 1.- Relación directamente proporcional de la temperatura de entrada del aire con respecto al coeficiente de transferencia de calor, velocidad de secado y eficiencia térmica.
- 2.- Relación inversamente proporcional de la velocidad de rotación del disco con respecto al coeficiente de transferencia de calor, velocidad de secado, eficiencia térmica y diámetro de la gota. Y directamente proporcional con respecto a la velocidad relativa aire-partícula.
- 3.- La temperatura de bulbo húmedo sí se puede considerar constante a lo largo del proceso.
- 4.- Los perfiles de temperatura de bulbo seco y de humedad permiten seccionar la cámara de secado en zonas según el tipo de intercambio que se esté realizando (Figura 31).
- 5.- El coeficiente de transferencia de calor puede expresarse simplemente como el producto de la velocidad del aire y el calor húmedo, dividido en el volumen húmedo correspondiente.
- 6.- Se encontró una ecuación que relaciona los números adimensionales Reynolds, Prandtl y Nusselt, la cual representa las condiciones reales en que se realiza el secado por aspersión.

- 7.- Desarrollo de un método de predicción de las condiciones de operación para el secado por aspersión de un alimento, en el cual se emplea la ecuación que relaciona los números adimensionales para conocer el coeficiente de transferencia de calor, evitando así el tener que realizar experimentaciones previas.

Dentro de las recomendaciones que se proponen se tiene:

- 1.- Repetir la experimentación con otros fluidos y con otras condiciones de operación, para ampliar el esquema de aplicación del método de predicción desarrollado.
- 2.- Apoyándose en la división de zonas según el tipo de transferencia de calor y masa de la cámara de secado, enfocar la experimentación a evaluar la posible reducción del tamaño del secador, bajando así el costo de su adquisición.
- 3.- Desarrollar métodos de predicción, pero para secadores con diferente sistema de alimentación (contracorriente y flujo mixto), y diferentes tipos de atomizadores (boquillas de presión y neumáticas), para abarcar en su totalidad los procesos de secado por aspersión.

## APENDICE

### PROGRAMA DEL MÉTODO DE PREDICCIÓN DE CONDICIONES OPERACIONALES EN EL SECADO POR ASPERSIÓN

```
10 CLEAR
12 DEFM 36
15 REM PREDICCIÓN DE CONDICIONES
50 INPUT "FLUIDO=", W$
55 IF W$ = "AG" THEN 110
60 IF W$ = "SA" THEN 150
65 IF W$ = "HU" THEN 185
70 INPUT "SF=", D(0)
75 INPUT "σ=", A(10)
80 INPUT "μ=", U
85 INPUT "γ=", Q
90 INPUT "X1=", X
95 INPUT "X2=", P
100 INPUT "σS=", O
105 GOTO 230
110 D(0) = 0.01
115 A(10) = .9962
120 U = .009
125 Q = 30.19
130 X = .999
135 P = 0
140 O = 0
145 GOTO 230
150 D(0) = 0.125
155 A(10) = 1.15
160 U = .026
165 Q = 19.74
170 X = .875
175 P = 0
180 O = 0
185 GOTO 230
190 D(0) = 0.125
195 A(10) = 1.004
200 U = .02508
205 Q = 85.565
210 X = .875
215 P = 1000
220 O = 0
230 INPUT "SS=", S
235 INPUT "N=", N
240 INPUT "TG1=", T
245 A(1) = S/(1-X)
250 A(2) = 2 * 3.1416 * N * .06
255 A(0) = .4 * ((A(1) * 1000)/(A(10) * N * 36))^.6
260 A(5) = (U/(A(1) * 1000))^.2
265 A(6) = ((Q * A(10) * 19.2)/(A(1) * 1000)^2)^.1
270 A(7) = (A(0) * A(5) * A(6))/100
275 A(8) = 3 * A(7)
```

```

280 A(5) = A(7) * 1.4
285 A(6) = 1.200067 - (0.002357 * T)
290 A(9) = 1.737510E-5 + (4.292853E-8 * T)
295 A(0) = 7.853396E-6 + (2.348679E-8 * T)
300 W = .239416 + (2.47534E-5 * T)
305 Z = (S/(1 - X))/(A(6) * 3.1416 * A(8) * 20.32)
310 A(1) = ((.6 - .06)/2)^2/(2.4 * A(2) * (Z * .06)^.5)
315 V = A(2) - .6929
320 A(2) = (A(6) * V * A(8))/A(9)
325 V = (W * A(9))/A(0)
330 R = ((-1.4 + (.2 * A(2)^.5 * V^.33)) * A(0)/A(8)
345 V = (.0344 + (.0145/18)) * ((.082 * (T + 273))/.7697)
350 A(0) = (.6929 * .0012)/V
355 A(2) = (((S * ((X/(1 - X)) - (P/(1 - P)))) + (A(0) * .0145))/(A(0) * 100)
360 V = (77989.852 * A(2))/(.6206 - A(2))
365 Y = 23.131372 + (.00216 * V)
370 V 0 597.760537 - (.572292 * Y)
375 IF O=0 THEN 400
380 Z = A(8) * (((A(10) * 1000)/O) * ((1 * (P/(1 - P)))/(1 + (X/(1 - X))))
385 GOTO 405
400 Z = A(8)
405 E(0) = .5236 * (A(8)^3 - ((Z/A(8)^3 * A(8)^3)) * 1000
410 A(12) = ((A(8)^3/6) * X * (A(10) * 1000)) - E(0)
412 IF P=0 THEN 462
415 E(0) = A(12)/(3.1416 * (A(8)^3/6) * D(0) * (A(10) * 1000))
420 A(12) = ((S * ((X/(1 - X)) - E(0))) + (A(0) * (.0145))/(A(0) * 100)
430 W = ((A(2) - A(12)) * (V/(.24 + (.45 * A(12)))) + Y
445 A(7) = ((W - Y) - 10)/(LN((W - Y)/10))
450 A(11) = (4 * ((X/(1 - X)) - E(0)) * (Z/2) * A(6) * V)
452 W = A(11)/(3 * (1 * (X/(1 - X)))) * R * (T - Y)
455 A(11) = ((E(0) - (P/(1 - P)) * (Z/2) * O * V)/(3 * R * A(7))
460 R = W * A(11)
461 GOTO 465
462 A(11) = (4 * (X/(1 - X)) * (Z/2) * A(6) * V)
463 W = A(11)/(3 * (1 * (X/(1 - X)))) * R * (T - Y)
464 R = W
465 IF W <= A(1) THEN 500
470 PRINT "RECALCULA"
475 PRINT "TC=", W
480 PRINT "T=", A(1)
485 INPUT "CONTINUAR S/N?", WS
490 IF WS$ = "N" THEN 600
495 GOTO 230
500 V = 2 * R
505 IF V <= A(1) THEN 515
510 GOTO 535
515 PRINT "OPTIMIZA, TT<<T"
520 PRINT "TT=", R
525 PRINT "T=", A(1)
530 GOTO 230
535 PRINT "FELICIDADES!!"
540 BEEP 0
545 R = (S/(1 - X))/(A(1)*1000)
550 V = Z * (A(8))/(3 * A(8))
555 A(7) Z * (A(5)/A(8))
560 PRINT "GA=", R

```

```
565 PRINT "DMF=", Z
570 PRINT "DVSF=", V
575 PRINT "D95F=", A(7)
576 PRINT "T=", A(1)
577 PRINT "TC=", W
578 PRINT "TT=", R
580 PRINT "TG=", T
585 PRINT "N=", N
600 END
```

## BIBLIOGRAFIA

1. BALTAS, L y GAUVIN, W.H., "Performance Predictions for a Cocurrent Spray Dryer", AICHE J., 15 (5) 1969 pág. 764-771
2. BALTAS, L y GAUVIN, W.H., "Transport Characteristics of a Cocurrent Spray Dryer", AICHE J., 15 (5) 1969 pág 772-779
3. CARRERA, P, FARELL, M, GONZALEZ, M y VILLAFUERTE, E, "Análisis de la Transferencia de Calor Global en un Secador por Aspersión", LEM IV FES-Cuautitlán Mayo 1990
4. CARRERA, P, FARELL, M, GARCIA, F, y GONZALEZ, M, "Análisis de la Transferencia de Calor y Masa durante el Secado por Aspersión de un Alimento", LEM V FES-Cuautitlán Octubre 1990
5. CHARLESWORTH y MARSHALL, W.R., "Evaporation from Drops Containing dissolved solids", AICHE J., 6 (1) 1960 pág 39-46
6. DLOUGHY, J y GAUVIN, W.H., "Heat and Mass Transfer in Spray Drying", AICHE J., 6 (1) 1960 pág 29-34
7. EGAN, H, KIRK, R, y SAWYER, R, "Análisis Químico de Alimentos de Pearson", CECSA México 1987
8. ELIAS, E, PEDRAZA, G, NAHON, D, "Pruebas Físicas", C.B. México 1985
9. FOUST, A., "Principios de Operaciones Unitarias", John Wiley & Sons N.Y. 1960
10. FRIEDMAN, S.J., GLUCKERT, F.A., y MARSHALL, W.R., "Centrifugal Disk Atomization" Chem. Eng. Prog. 48 (4) 1952 pág 181-190
11. GAUVIN, W.H y KATTA, S., "Basic Concepts of Spray Dryer Design" AICHE J. 22 (4) 1976 pág 713-724
12. GEANKOPLIS, C.J., "Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias", CECSA México 1986
13. GUTIERREZ, G., "Establecimiento de las Mejores Condiciones para una Planta Productora de Leche Entera y Descremada en Polvo" Tesis de maestría ENCB IPN 1979
14. HELDMAN, D., "Food Process Engineering", The AVI Publishing Co. USA 1979
15. KATTA, S y GAUVIN, W.H., "Some Fundamental Aspects of Spray Drying", AICHE J., 21 (1) 1975 pág 143-152
16. LENIGER, H.A y BEVERLOO, W.A., "Food Process Engineering", D.Reidel Publishing Co. Holland 1975
17. MANNING, W.P y GAUVIN, W.H., "Heat and Mass Transfer to Decelerating Finely Atomized Sprays", AICHE J., 6 (2) 1960 pág 184-190

18. MARSHALL, W.R y SELTZER, E., "Principles of Spray Dryer. Part I - Fundamentals of Spray Dryer Operation" Chem. Eng. Prog. 45 (10) 1950 pág 501-508
19. MARSHALL, W.R y SELTZER, E., "Principles of Spray Dryer. Part II - Elements of Spray Dryer Design" Chem. Eng. Prog. 46 (11) 1950 pág 575-582
20. MASTERS, K., "Spray Drying", John Wiley & Sons N.Y. 1976
21. McCABE, W.L y SMITH, J.C., "Operaciones Básicas de Ingeniería Química", Ed. Reverté España 1981
22. MILLER, I. y FREUND, J.E., "Probabilidad y Estadística para Ingenieros", Prentice Hall México 1986
23. MIURA, K., MIURA, T y OHTANI, S., "Heat and Mass Transfer to and from Droplets", AIChE Symposium Series 73 (163) 1977 pág 95-102
24. MUJUMDAR, A., "Handbook of Industrial Drying", M. Dekker New York 1987
25. NAJERA, A, "Estudio de los Patrones de Flujo del Aire en un Secador por Aspersión" LEM IV FES-Cuautitlán 1992
26. NIRO ATOMIZER, "Secado por Atomización", Niro Atomizer, Folleto B-Na483
27. NIRO ATOMIZER, "Spray Dryer FU11BAA06 Handbook", Niro AtomizerASO 410/S Denmark
28. NONHEBEL, G y MOSS, A., "El Secado de Sólidos en la Industria Química", Ed. Reverté España 1979
29. OCON, J y TOJO, B "Problemas de Ingeniería Química", Ed. Aguilar Madrid 1972
30. PERRY, R.H y CHILTON, C.H., "Biblioteca del Ingeniero Químico", McGraw-Hill México 1989
31. RSI, "Tablas de Vapor", Representaciones y Servicios de Ingeniería México 1970
32. TOLEDO, R.T., "Fundamentals of Food Process Engineering", The AVI Publishing Co. USA 1980
33. TREYBAL, R., "Operaciones de Transferencia de Masa", McGraw-Hill México 1988
34. WESTERGAARD, J., "Tecnología de la Leche en Polvo. Evaporación y Secado por Atomización", Niro Atomizer México 1984