



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN



DETERMINACION DE UNA ECUACION EMPIRICA
DE PREDICCIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR
DURANTE EL SECADO POR ASPERSION A PARTIR
DEL DESARROLLO DE LOS PATRONES DE FLUJO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERA EN ALIMENTOS

P R E S E N T A:
ESTHER VILLAFUERTE MEJIA

DIRECTOR: DR. JOSE LUIS ARJONA ROMAN

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO 1993

TESIS CON
FALLA OS



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.

INDICE

	no. de Pag.
RESUMEN.....	10
INTRODUCCION.....	11
OBJETIVOS DE TRABAJO.....	12
I.- ANALISIS BIBLIOGRAFICO	
1.1 El secado por aspersion.....	13
1.1.1 Generalidades.....	13
1.1.1.1 Balances de materia energia.....	14
1.1.2 Periodos de velocidad de secado.....	16
1.1.2.1 Periodo de velocidad constante.....	18
1.1.2.1 Periodo de velocidad decreciente.....	20
1.1.3 Transferencia de calor durante el secado.....	21
1.1.3.1 El número de Nusselt.....	23
1.1.4 Tipos de atomización.....	26
1.1.4.1 Boquillas a alta presión.....	27
1.1.4.2 Boquillas a dos fluidos.....	29
1.1.4.3 Disco centrífugo.....	30
1.1.5 Patrones de flujo.....	32
1.1.5.1 Perfil de velocidades del aire.....	33
1.1.5.2 Perfil de temperaturas del aire.....	36
1.1.6 Secado por aspersion de leche.....	39
1.1.6.1 Tipos de leche.....	40
1.1.6.2 Operaciones previas al secado.....	42
1.1.6.3 El proceso de secado por aspersion.....	44
1.1.6.4 Características del producto final.....	45

II.- METODOLOGIA EXPERIMENTAL.

2.1 Desarrollo del cuadro metodológico.....	47
2.1.1 Actividades preliminares.....	47
2.1.2 Etapas de trabajo.....	54
2.1.3 Análisis estadístico.....	62
2.2 Especificaciones de equipo.....	63
2.3 Diseño experimental.....	66
2.3.1 Validación de termopares.....	66
2.3.2 Objetivo particular 1.....	66
2.3.3 Objetivo particular 2.....	70
2.3.4 Objetivo particular 3.....	72

III.- ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

3.1 Validación de los termopares.....	74
3.2 Patrones de flujo.....	77
3.2.1 Perfil de velocidad de aire	77
3.2.2 Perfil de temperaturas	82
3.2.3 Perfil de humedades	90
3.3 Análisis térmico.....	94
3.4 Ecuaciones empíricas de transferencia de calor.....	101
3.4.1 No. de Reynolds	101
3.4.2 No. de Nusselt	103
3.4.3 Obtención de una ecuación empírica de predicción de transferencia de transferencia de calor ...	104

IV.- CONCLUSIONES..... 111

APENDICE..... 114

BIBLIOGRAFIA..... 116

FIGURAS

no. de Pag.

1.- Esquema de operación del proceso general de secado.....	15
2.- Curva de velocidad de secado a condiciones de operación constantes.....	17
3.- Dirección de flujo en un sistema de secado paralelo con boquilla a presión.....	28
4.- Dirección de flujo en sistema de secado A) co-corriente B) contracorriente.....	29
5.- Dirección de flujo en sistema de secado co-corriente con disco centrifugo.....	30
6.- Distribución de temperaturas del aire, durante un sistema de secado de corriente directa.....	38
7.- Diseño de estructura para realizar mediciones de presiones y temperatura dentro de un secador Niro Atomizer.....	49
8.- Carta psicrométrica a 585 mmHg.....	51
9.- Zonas de estudio de patrones de flujo dentro de un secador N. A.....	56
10.- Velocidad puntual del aire en cada abertura de la válvula a diferentes posiciones radiales.....	79
11.- Velocidad puntual del aire en cada posición radial en posición a diferentes aberturas de la válvula.....	80
12.- Velocidad puntual del aire en cada posición radial en posición axial III a diferentes posiciones angulares...	81
13.- Zona crítica del perfil de velocidades de aire.....	81
14.- Perfil de TBS en zona radial durante la evaporación de agua.....	83
15.- Perfil de TBS en zona radial durante el secado de leche.....	84
16.- Perfil de TBS en zona axial durante la evaporación de agua.....	85
17.- Perfil de TBS en zona axial durante el secado de leche.....	86

18.- Perfil de TW en zona axial durante la evaporación de agua.....	88
19.- Perfil de TW en zona axial durante el secado de leche.....	89
20.- Perfil de HR en zona radial durante la evaporación de agua.....	90
21.- Perfil de HR en zona radial durante el secado de leche.....	91
22.- Perfil de HR en zona axial durante la evaporación de agua.....	92
23.- Perfil de HR en zona axial durante el secado de leche.....	93
24.- Perfil de Y' en zona axial durante la evaporación de agua.....	93
25.- Perfil de Y' en zona axial durante el secado de leche.....	94
26.- Perfil de velocidad de secado en zona axial I a diferentes posiciones angulares durante la evaporación de agua.....	97
27.- Perfil de velocidad de secado en zona axial I a diferentes posiciones angulares durante el secado de leche.....	98
28.- Perfil de velocidad de secado en zona axial II a diferentes posiciones angulares durante la evaporación de agua.....	99
29.- Perfil de velocidad de secado en zona axial II a diferentes posiciones angulares durante el secado de leche.....	99
30.- Perfil de velocidad de secado en zona axial III a diferentes posiciones angulares durante la evaporación de agua.....	100
31.- Perfil de velocidad de secado en zona axial III a diferentes posiciones angulares durante el secado de leche.....	100
32.- No. de Reynolds en zona axial I durante la evaporación de agua.....	101

33.- No. de Reynolds en zona axial I durante el secado de leche.....	102
34.- No. de Nusselt en zona axial I durante la evaporación de agua.....	103
35.- No. de Nusselt en zona axial I durante el secado de leche.....	103
36.- No. de Nusselt vs Reynolds en posición axial I durante la evaporación de agua.....	106
37.- No. de Nusselt vs Reynolds en posición axial I durante el secado de leche.....	106

CUADROS

1.- Grupos adimensionales en la transferencia de movimiento, calor y masa.....	23
2.- Ecuaciones empíricas de transferencia de calor bajo una convección forzada.....	25
3.- Valores exponenciales para la determinación del número de Nusselt.....	26
4.- Clasificación de atomizadores.....	27
5.- Número de Reynolds en función del flujo durante el secado por aspersión.....	33
6.- Uso de leche en polvo descremada elaborada a partir de diferentes leches UHT.....	41
7.- Etapas de fabricación de leche en polvo entera y descremada.....	42
8.- Instalación de equipos adicionales para el secado por aspersión de leche.....	46
9.- Cuadro metodológico experimental.....	48
10.- Construcción de una carta psicrométrica a 585 mmHg.....	50
11.- Validación de termopares.....	52
12.- Medición de presiones dinámica y estática.....	53
13.- Medición de temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco durante la evaporación de agua.....	55

14.- Medición de temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco durante el secado por aspersión de leche al 25%.....	57
15.- Cálculo para la evaluación de la velocidad de secado.....	58
16.- Cálculo para la evaluación de Reynolds.....	60
17.- Cálculo para la evaluación de Nusselt.....	61
18.- Resultados de repetibilidad de termopares.....	74
19.- Resultados de linealidad de termopares.....	75
20.- Resultados de reproducibilidad de termopares.....	75
21.- Resultados de exactitud de termopares.....	76
22.- Análisis factorial del perfil de velocidad de aire.....	78
23.- Análisis factorial de TBS.....	83
24.- Cuadro comparativo del desarrollo del perfil de TBS durante el secado de leche y la evaporación de agua.....	86
25.- Análisis factorial de TW.....	88
26.- Análisis de bloques aleatorios de TW de los fluidos en estudio.....	90
27.- Datos para el cálculo del diámetro de la gota.....	95
28.- Dimensiones de la gota.....	95
29.- Ecuaciones empíricas de transferencia de calor evaluadas a 45°C.....	107
30.- Ecuaciones empíricas de transferencia de calor evaluadas a 60°C.....	108

RESUMEN

El objetivo general de este trabajo fué obtener una expresión algebraica para la predicción de la transferencia de calor durante el secado por aspersión.

La base del desarrollo experimental fué la elaboración de una metodología de acuerdo a los objetivos preliminares que dieron la pauta para cumplir el objetivo general.

Se encontró una zona crítica de evaporación dentro de la cámara de secado, la cual se localiza en las zonas cercanas al disco aspersor, sobre el radio hasta el 39% de la distancia radial total y sobre la altura del cilindro hasta el 49% de la altura total. En esta zona se localizan humedades relativas hasta del 95%, por esta razón la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo toman un mismo valor.

Se secó una suspensión de leche para determinar la influencia de las partículas en la transferencia de calor y la velocidad de secado, encontrando que por esta influencia existe una disminución en cada una de estas variables, ésto es consecuencia de que las partículas de leche están rodeadas por una capa superficial que impide la salida totalmente libre de líquido.

A partir de la obtención de números adimensionales se obtuvieron ecuaciones para cada una de las zonas radiales y axiales de estudio y finalmente se contrastaron los análisis realizados para la obtención de una sola expresión que representara el proceso de secado en términos de transferencia de calor.

INTRODUCCION

El presente trabajo tiene como objetivo, el estudiar el proceso de secado por aspersión en un Niro Atomizer operando a un flujo paralelo empleando un disco centrífugo; con la finalidad de contrastar los estudios realizados anteriormente, para así, establecer el efecto que tienen los perfiles de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire en la transferencia de calor convectiva y en la velocidad de secado. Este efecto adquiere una expresión matemática entre el número de Nusselt y el número de Reynolds.

Para lograr este propósito se realizó un diseño experimental, en el cual se determinaron los patrones de flujo dentro de la cámara del secador, siendo éstos los perfiles de velocidad del aire y de temperatura, empleando los instrumentos de medición para cada uno de los casos, tubo de Pitot y termopares respectivamente.

Durante la experimentación se efectuó la vaporización de agua y el secado de leche con 25 % de sólidos , realizando un análisis térmico comparativo entre ambos fluidos, en cuanto a cada uno de los perfiles obtenidos a fin de contrastar los resultados y determinar los efectos de la presencia de partículas en los patrones de flujo y la transferencia de calor para éste proceso de operación en particular.

Por último se estableció una ecuación empírica para la predicción de la transferencia de calor convectiva a partir del número de Nusselt para cada uno de los fluidos en estudio con la finalidad de realizar un análisis comparativo entre éstos hasta obtener una sola expresión matemática de este proceso.

OBJETIVOS DE TRABAJO

1) OBJETIVO GENERAL

Determinación de una ecuación empírica de predicción de transferencia de calor durante el secado por aspersión en función de la evaluación de patrones de flujo en un secador Niro Atomizer.

2) OBJETIVO PARTICULAR 1

Determinación experimental de las zonas críticas de secado a partir de la evaluación de los perfiles de humedad relativa, humedad absoluta y velocidad de aire, así como el análisis térmico durante la evaporación de agua.

3) OBJETIVO PARTICULAR 2

Determinación experimental de la influencia de los sólidos en los perfiles de humedad relativa, humedad absoluta durante el secado por aspersión de leche, así como la contrastación del análisis térmico entre este proceso y la evaporación de agua.

4) OBJETIVO PARTICULAR 3

Determinación de una ecuación empírica entre los números adimensionales Nusselt y Reynolds para la predicción de la transferencia de calor durante el secado por aspersión.

I. ANALISIS BIBLIOGRAFICO.

1.1.- EL SECADO POR ASPERSION.

1.1.1 GENERALIDADES

Durante los últimos años el secado por aspersión ha sido una opción a la conservación de diversos materiales, tales como productos farmacéuticos, productos químicos, alimentos, cosméticos, colorantes, etc. Este proceso se recomienda para soluciones, emulsiones y suspensiones, así como, cualquier otro líquido que sea bombeable y sensible al calor. (20, 22, 33).

En general el secado se caracteriza como una operación en la que se logra la eliminación de la humedad de una sustancia a través del arrastre de un gas secante. (33).

Esta operación es importante en la conservación de los alimentos ya que al disminuir el porcentaje de humedad en éstos; se reducen, las posibilidades de un ataque microbiano y las reacciones de tipo enzimático. Además por las características del producto obtenido se pueden omitir operaciones de reducción de tamaño. (26).

La aspersión puede realizarse de tres formas: empleando boquillas a presión, boquillas con dos fluidos y disco centrífugo. Las condiciones a las que se opere en cada caso determinan la calidad del producto, como es en la forma, el tamaño, la vida de anaquel, etc.

El diseño y construcción de cada uno de los secadores por aspersión son básicos para lograr este proceso y cada uno de los diseños de los equipos representa diferentes procesos, lo que implica un estudio más complejo de esta operación. Las investigaciones realizadas anteriormente describen estos procesos de manera general, por ello resulta interesante el estudio del

proceso de secado por aspersion para este caso en particular.

Esta operacion se basa en la atomizacion del liquido para formar pequenas gotas de tamano micrometrico y posteriormente mezclarse con aire caliente, el cual suministra el calor necesario para su evaporizacion; el objeto de la atomizacion es crear la maxima superficie posible para facilitar la evaporizacion, teniendo asi, una mejor eficiencia termica. (27).

Con la atomizacion se llegan a tener tamanos en las gotas desde 2 micras hasta un maximo de 500 .

Debido a la gran superficie de desecacion y los tamanos tan pequenos de las gotas, el tiempo real de secado es en unos cuantos segundos. La residencia total de la particula dentro del sistema no rebasa el promedio de los 30 seg. (19).

Las principales ventajas del secado por aspersion son diversas; entre ellas, el control de variacion de las propiedades y calidad de los productos, la densidad del producto, la forma de la particula y su tamano, esto se logra en funcion de las condiciones de operacion, ademàs es recomendado para el secado de materiales sensibles al calor que requieren de bajas temperaturas y alto vacio.

El secado por aspersion està sujeto tambièn a algunas desventajas como las bajas densidades del producto que se llegan a obtener, el diseño experimental establecido es sòlo aplicable a una forma de atomizacion; requiere de una alta inversion inicial y en algunos casos pueden existir problemas de corrosion. (21).

1.1.1.1 BALANCES DE MATERIA Y ENERGIA

Una forma de conocer previamente las condiciones de operacion para lograr el secado por aspersion de una solucion a fin

de obtener un producto de características particulares, es aplicando los balances de materia y energía, para obtener datos empíricos. El siguiente esquema representa una operación de secado de manera general.

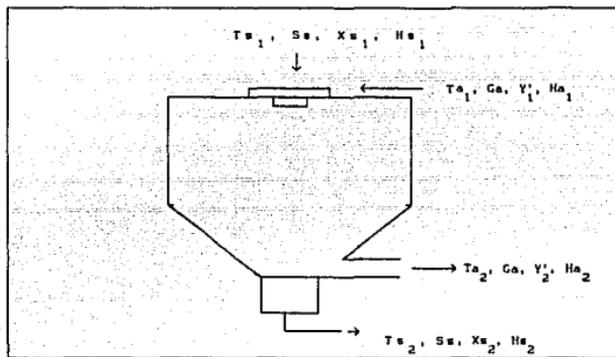


Fig. 1. Esquema de operación del proceso general de secado por aspersión. (11, 22).

El balance de agua se representa en la siguiente expresión

$$Ss Xs_1 + Ga Y_1' = Ss Xs_2 + Ga Y_2' \quad (\text{Ec. 1.01})$$

Donde:

Ta_1 = Temperatura del aire a la entrada del secador ($^{\circ}\text{C}$)

Ta_2 = Temperatura del aire a la salida del secador ($^{\circ}\text{C}$)

Ts_1 = Temperatura del sólido a la entrada del secador ($^{\circ}\text{C}$)

Ts_2 = Temperatura del sólido a la salida del secador ($^{\circ}\text{C}$)

Ga = Flujo másico de aire (kg a.s./hr)

Ss = Flujo másico del producto (kg s.s./hr)

Y_1' = Humedad absoluta del aire a la entrada del secador (kg H_2O /kg a.s.)

Y_2' = Humedad absoluta del aire a la salida del secador (kg H_2O /kg a.s.)

Xs_1 = Humedad del sólido a la entrada del secador (kg H_2O /kg s.s)

Xs_2 = Humedad del sólido a la salida del secador (kg H_2O /kg s.s)

Durante este proceso de secado, la velocidad de evaporación es muy rápida y las pérdidas por calor se consideran despreciables, por lo tanto el balance de energía en estado adiabático esta dado por la siguiente expresión:

$$Q = G_a (H_{a1} - H_{a2}) + S_s (H_{s1} - H_{s2}) \quad (\text{Ec. 1.02})$$

$$H_s = (c_{p_s} + X c_{p_l}) (T_a - T_o) \quad (\text{Ec. 1.03})$$

$$H_a = (0.25 + 0.45Y') (T_a - T_o) + Y' \lambda_o \quad (\text{Ec. 1.04})$$

Donde:

Q= Calor transmitido durante el proceso de secado (kcal/hr)

H_s= Entalpia del sólido (kcal/kg s.s.)

H_a= Entalpia del aire (kcal/kg a.s.)

c_{p_s} = Calor específico del sólido (kcal/kg s.s °C)

c_{p_l} = Calor específico del líquido (kcal/kg H₂O)

λ = Calor latente de vaporización a la temperatura de referencia (kcal/kg H₂O)

T_a= Temperatura del aire (°C)

T_o= Temperatura de referencia = 0°C

(11, 22, 33)

1.1.2 PERIODOS DE VELOCIDAD DE SECADO

La velocidad de secado convencionalmente presenta dos etapas denominadas período de velocidad constante y período de velocidad decreciente; ambos períodos representan el proceso de secado, involucrando desde la evaporización de las gotas atomizadas hasta la formación de la partícula sólida.

En la figura 2, se representa un sólido que inicialmente se encuentra con un contenido de humedad X muy elevado (punto A o A');

cabe aclarar que la forma de la curva puede variar, dependiendo de las condiciones a las que se realice el secado, pero en general ésta curva es frecuente.

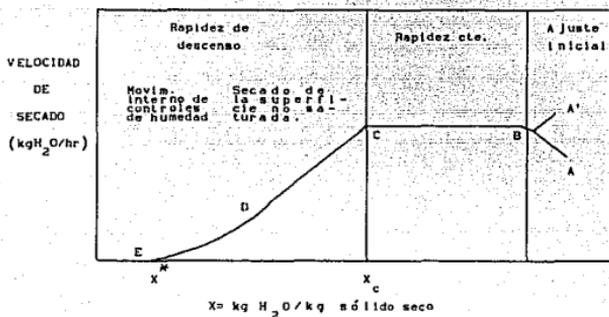


Fig. 2. Curva de velocidad de secado a condiciones de operación constantes. (1, 15, 29, 30, 33, 35).

. En algunos casos esta curva se grafica con la ordenada expresada como masa de humedad evaporada/(tiempo) (masa de sólido seco), y adquiere la expresión:

$$-\frac{dx}{d\theta} \quad (\text{Ec. 1.05})$$

Durante el punto A o A', la superficie sólida y líquida generalmente se encuentran a una temperatura más baja o más alta que la temperatura de bulbo húmedo del medio secante, al entrar en contacto las gotas atomizadas con el aire caliente, la temperatura superficial aumenta o disminuye según la figura presentada y la rapidez de evaporación también hasta su valor final durante la

zona AB; esta zona es muy corta, por ello no se toma en cuenta para realizar los análisis en tiempos de secado.

En la zona BC se establecen condiciones dinámicas de equilibrio, por ello se denomina como *periodo de velocidad constante*. En el punto C el contenido de humedad promedio del sólido alcanza un valor X_c o contenido crítico de humedad, mismo que se manifiesta cuando la capa superficial de humedad disminuye a causa de la evaporación, produciéndose poros o puntos secos que aparecen en la superficie del sólido ocupando porciones grandes de ésta que se encuentra expuesta al continuar el proceso de secado.

Posteriormente en la zona CD la rapidez de evaporación disminuye dando lugar a la primera parte del *periodo de velocidad decreciente*, en el cual se realiza el secado de la superficie no saturada. Finalmente se evapora el contenido de humedad promedio del sólido en el punto D, como humedad ligada.

Por último en la zona DE se manifiesta un movimiento interno de los controles de humedad, hasta que el contenido de humedad del sólido llega a un valor en el equilibrio X^* , al llegar a éste punto el secado se detiene; la humedad de equilibrio se manifiesta cuando la presión parcial es igual a la presión de vapor en el material de secado. (1, 5, 22, 29, 30, 33, 35).

1.1.2.1. PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE.

El período de velocidad constante es la primera etapa del secado por aspersión y se caracteriza por la evaporación de líquido libre de la superficie. En este período existe una difusión de vapor, la cual se presenta desde la superficie saturada del material, pasando por una capa de aire inmóvil hasta el medio que lo rodea; dentro del sólido se manifiesta un movimiento rápido de la humedad, logrando mantener una condición saturada en la superficie. Debido a que el sólido sólo recibe calor del aire caliente, la superficie de la gota permanece a una temperatura constante, en un valor igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire (T_w). La velocidad de

evaporación se logra por un cambio en la presión de vapor causada por la presencia del soluto. (3, 30, 32).

En este período el coeficiente convectivo de transferencia de calor no muestra cambios significativos por cambios en el diámetro de la gota y la temperatura, se logra un equilibrio entre la transmisión de calor y la transferencia de masa, permaneciendo constante la saturación de la superficie de la gota, este comportamiento adquiere la siguiente expresión.

$$- \frac{dx}{d\theta} = \frac{hA\Delta T}{\lambda} = K_G A \Delta P \quad (\text{Ec. 1.06})$$

$$\Delta T = T - T_w \quad (\text{Ec. 1.07})$$

$$\Delta P = P_v - P_o \quad (\text{Ec. 1.08})$$

Donde

$$- \frac{dx}{d\theta} = \text{Velocidad de secado (kg H}_2\text{O evap/hr)}$$

h = Coeficiente convectivo de transferencia de calor (kcal/hr m² °C)

A = Area expuesta al secado (m²)

K_G = Coeficiente de transferencia de masa (kg/hr m² atm)

T = Temperatura del gas secante (°C)

T_w = Temperatura de bulbo húmedo (°C)

P_v = Presión de vapor del agua a la temperatura de la superficie (kN/m²)

P_o = Presión parcial del vapor de agua en el gas (kN/m²)

La simetría esférica de las gotas es aprovechada para inducir la rotación por la atomización y por el aire turbulento. Dentro del movimiento progresivo que sigue la gota, se forma primeramente la fase sólida en la región de alta velocidad de evaporación, en las áreas en las cuales la velocidad de evaporación es baja, el sólido se forma después de que las condiciones son uniformes. (3).

La magnitud de la velocidad constante depende de tres factores, los cuales son:

- 1) El coeficiente de transferencia de calor y de transferencia de masa
- 2) El área expuesta al medio de secado.
- 3) La dirección de la temperatura o humedad entre la corriente de gas y la superficie húmeda del sólido. (30).

1.1.2.2. PERIODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE.

La velocidad de secado en este segundo periodo muestra gran variación de partícula a partícula; las propiedades de la estructura a través de la cual se mueve la humedad no se pueden predecir.

Estas son dependientes no solamente de la naturaleza del material a secar, sino también en las condiciones bajo las cuales el sólido es depositado en la solución. Un factor como es la velocidad del aire que pasa a través de la partícula, la cual tiene un mínimo efecto en el secado que ocurre entre los poros de la estructura, el efecto indirecto es un factor que determina las dimensiones y la existencia de la estructura. (3).

El período de velocidad decreciente se manifiesta cuando el contenido inicial de humedad es inferior al crítico. Este período se divide en dos zonas:

- Zona de desecación de la superficie no saturada.
- Zona de desecación, donde el movimiento interno de la humedad ejerce control.

En este periodo conforme prosigue la desecación de la superficie de evaporización llega a la insaturación y la velocidad de secado es regida por la velocidad del movimiento interno de humedad. En la primer zona, como se explicó en la figura 2, la velocidad de secado se realiza a causa de la evaporación del agua desde una parte de la superficie de la gota, que va disminuyendo a medida que se da el secado por la difusión del líquido a la superficie. En la segunda zona, la superficie se encuentra seca en su totalidad, de modo que la velocidad de secado se manifiesta por el transporte de la humedad

desde el interior del sólido hasta la superficie y puede realizarse por mecanismos de difusión de líquido, capilaridad, vapor, contracción superficial, etc. (5, 24, 29, 30, 33).

El mecanismo de difusión del líquido se debe a los gradientes de concentración entre el interior del sólido, donde es alta y la superficie donde es baja. Se presenta como el transporte de la humedad a través de los sólidos con estructura continua como los jabones, gomas y gelatinas, entre otros; también puede darse en casos en donde se está secando la humedad ligada, como en arcillas, harinas, textiles, papel y madera. (5, 29, 30).

La difusión por capilaridad se presenta en sólidos granulares y porosos, en donde el líquido se desplaza a través de los intersticios a causa de fuerzas capilares que tienen relación con la tensión superficial. (5, 29, 30, 33).

La difusión por vapor, se manifiesta cuando la humedad se evapora en un plano interior y el vapor se difunde a través de los intersticios; este mecanismo ocurre a medida que el material adquiere una temperatura mayor. (5).

El mecanismo de difusión por contracción superficial, se presenta en materiales que al ser sometidos al secado sufren una contracción superficial y tienden a cerrar sus poros, lo que origina una expulsión del líquido a la superficie al no encontrar éste otra salida. (5).

1.1.3 TRANSFERENCIA DE CALOR DURANTE EL SECADO.

La transmisión de calor y la transferencia de masa se logran mediante el contacto del gas caliente con las gotas asperjadas. El proceso de secado por aspersión sigue una transferencia de tipo convectiva, ya que la transferencia de calor se da de un punto a

otro entre la gota y el gas, el calor hace que el líquido del centro se vaporice, a fin de que la capa externa se expanda y forme una esfera hueca, tomando en cuenta que depende de las propiedades de la solución y de las condiciones de operación según sea el caso. (5)

La transferencia de calor depende fuertemente de la geometría y la fracción del área superficial durante el proceso de evaporación y ocurre solamente a través de la interfase líquida-líquida, el coeficiente de transferencia de calor varía con el mecanismo del paso del calor al material húmedo, para el caso de una transferencia convectiva de calor del aire caliente a la superficie húmeda de la gota será dado por la expresión siguiente:

$$U = h \quad (\text{Ec. 1.09})$$

Donde:

U= Coeficiente global de transferencia de calor

h= Coeficiente convectivo de transferencia de calor (15)

El complejo fenómeno del secado; en el que se interrelacionan transferencias de movimiento, calor y masa, mismas que definen las condiciones de operación interactuando con las propiedades de la gota representadas en un conjunto de grupos adimensionales que se muestran en el cuadro 1.

Entre estos números, los mas importantes por su aplicabilidad en el diseño y la práctica de secado desde el punto de vista de la transferencia de calor son Nusselt, Prandtl, Reynolds y Grashof; y éstos se relacionan en función del tipo de convección que se da en el proceso.

$$\text{Convección natural} \quad Nu = C Gr^m Pr^n \quad (\text{Ec. 1.10})$$

$$\text{Convección forzada} \quad Nu = C Re^m Pr^n \quad (\text{Ec. 1.11})$$

Se considera convección de tipo natural cuando el coeficiente convectivo de transferencia de calor (h), se encuentra en un intervalo de 5 a 25 W/m² °K, y de convección forzada en un intervalo de 15 a 200 W/m² °K.

(1, 10, 16).

GRUPO	SIGNIFICADO	SIMBOLO
Reynolds (Re)	$\frac{\text{Fuerza inercia}}{\text{Fuerza viscosa}}$	$\frac{vD\rho\mu}{\mu}$
Prandlt (Pr)	$\frac{\text{Difusividad cinemática}}{\text{Difusividad térmica}}$	$\frac{C_p\mu}{K}$
Schmidt (Sc)	$\frac{\text{Viscosidad cinemática}}{\text{Difusividad molecular}}$	$\frac{\mu}{D\rho\mu}$
Nusselt (Nu)	$\frac{\text{Transferencia total de calor}}{\text{Conductividad térmica}}$	$\frac{h_c D}{K}$
Sherwood (Sh)	$\frac{\text{Difusividad másica}}{\text{Difusividad molecular}}$	$\frac{K_g D}{D_v}$
Grashof (Gr)	$\frac{\text{Expansión térmica}}{\text{Viscosidad cinemática}}$	$\frac{g\Delta T \rho}{\mu}$
Lewis (Le)	$\frac{\text{Difusividad térmica}}{\text{Difusividad de masa}}$	$\frac{K}{\rho C_p D_v}$

Cuadro 1. Grupos dimensionales en la transferencia de movimiento, calor y masa (1, 10, 22).

1.1.3.1 EL NUMERO DE NUSSLETT

El número de Nusselt es una forma de expresar a la transferencia

de calor que se da, en este caso durante el secado por aspersión; y se define como la transferencia total de calor por convección térmica para este caso de secado por aspersión. Este número adimensional es de gran importancia en la aplicación al diseño de equipo, ya que, involucra variables de dimensión, tiempo, masa, calor y características del producto; los valores que adquieran cada una de estas variables para determinar un valor en el número de Nusselt, pueden estar sujetos a cambios a fin de establecer un diseño en microequipos o macroequipos, siempre y cuando los grupos adimensionales sean la base de éste diseño.

El número de Nusselt se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$Nu = \frac{h D}{K} \quad (\text{Ec. 1.12})$$

Donde:

h = Coeficiente convectivo de transferencia de calor (kcal/hr m² °C)

D = Diámetro de la gota (m)

K = Conductividad térmica del aire (kcal/m hr °C)

Desde 1952 los investigadores han tratado de establecer el valor del número de Nusselt; uno de los primeros pioneros fue Kessler quien en ese año realizó algunos estudios experimentales, los cuales consistían en la atomización de gotas de alcohol en un flujo de aire turbulento, esto lo llevó a encontrar un valor numérico de este número adimensional el cual se aproxima a 2. (13)

Ranz y Marshall en el mismo año encontraron ecuaciones para la transferencia de masa y calor de una gota bajo una convección de calor y se muestran en el cuadro 2.

Estas ecuaciones eran aplicadas sólo a bajas velocidades de evaporación, además las ecuaciones 1.13 y 1.14 se aplicaban a convecciones de tipo forzadas y las ecuaciones 1.15 y 1.16 a las de tipo natural..

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (\text{Ec. 1.13})$$

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (\text{Ec. 1.14})$$

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{1/4} Pr^{1/3} \quad (\text{Ec. 1.15})$$

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{1/4} Sc^{1/3} \quad (\text{Ec. 1.16})$$

Cuadro 2. Ecuaciones empíricas de transferencia de calor bajo una convección de aire. (13).

También se ha establecido que el número de Nusselt varía en un rango de 2.07 ± 0.06 para un diámetro de gotas de agua asperjadas de $11.5-38.5 \mu\text{m}$; a diferentes condiciones de velocidad de aire y de temperatura. (13).

El coeficiente de transmisión total para la transferencia de calor de una gota esférica puede ser expresada en términos del grupo adimensional de la siguiente manera:

$$Nu = 2 + K Re^x Pr^y \quad (\text{Ec. 1.17})$$

El valor del exponente (x) se ha generalizado para la evaporación durante el secado por aspersión, siendo su valor de 0.5 y el exponente (y) de 0.33 aplicable para un número de Reynolds entre un intervalo de 100 y 1000. Ranz y Marshall propusieron estos valores en base a correlaciones experimentales a condiciones generales. (14)

Se han hecho varias propuestas a esta ecuación, las cuales son resumidas en el cuadro 3 con un sistema de estudio de transferencia de calor.

INVESTIGADOR	K	X	Y	INTERVALO DE Re
Ingebo	0.303	0.6	0.6	0-500
Taubouchi Sato	0.500	0.5	0.33	0.1-1000
Kudryashev Tpatenko	0.326	0.5	0.33	0-300
Yuge	0.493	0.33	0.33	10-1800

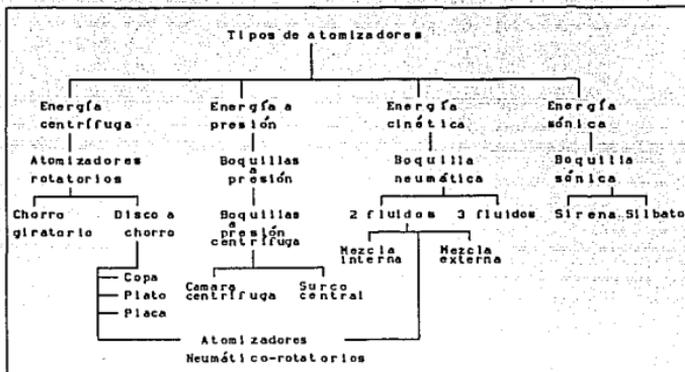
Cuadro 3. Valores exponenciales para la determinación del número de Nusselt. (10).

Cada uno de los valores de las variables (κ , x , y) fueron evaluadas a diferentes condiciones de operación, es por ello que en el presente trabajo se propone obtener una expresión algebraica que represente el proceso de secado por aspersión a fin de obtener un intervalo de aplicación diferente a los establecidos en investigaciones anteriores para condiciones de aspersión por disco centrífugo a 25,416 rpm.

1.1.4 TIPOS DE ATOMIZACIÓN.

La atomización es el resultado de la acción de una fuente de energía sobre un líquido, ocasionando fuerzas sobre éste hasta ocurrir la desintegración a fin de crear gotas individuales asperjadas. Las diferentes técnicas de atomización son evaluadas de acuerdo a las diferentes formas de energía aplicadas sobre el líquido

.El siguiente esquema muestra una clasificación en función del tipo de energía que se emplea.



Cuadro 4. Clasificación de atomizadores
(22, 27).

En la actualidad los tipos de atomización por su práctica e importancia en el secado por aspersión destacan tres procesos los cuales se mencionan a continuación.

- a) Boquillas a alta presión
- b) Boquillas de dos fluidos.
- c) Disco centrífugo a alta presión.

1.1.4.1 BOQUILLAS A ALTA PRESION

En las boquillas a alta presión, el líquido es forzado bajo una alta presión a través de un pequeño orificio, el cual puede variar desde los 0.0254 cm. hasta 0.381 cm. de diámetro. Las presiones operan en un rango de 2,578 a 68,950 KN/m². La mayoría de las toberas o boquillas tienen una cámara en espiral que produce una rotación del líquido, de tal forma que deja un orificio en forma de cono hueco. (30, 34).

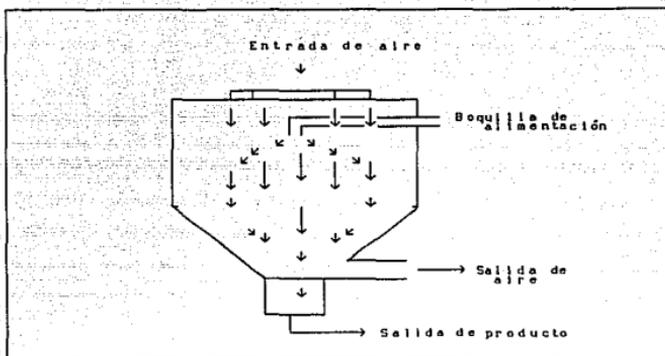


Fig. 3. Dirección del flujo en un sistema de secado paralelo con boquilla a presión. (22, 30).

La atomización de las gotas se logra al chocar dos corrientes del líquido detrás del orificio, ocurriendo un movimiento de ondas por medio de los ductos en donde se forma una lámina en forma de un plana perpendicular sobre estas corrientes. El tamaño de las gotas que se forman es independiente de la viscosidad, la figura 3 muestra el proceso de secado por aspersión empleando una boquilla a alta presión.

Este tipo de boquillas, algunas veces tienden a complicar el patrón de flujo del aire, así como, el riesgo de colisión de las partículas, por lo que, el tamaño y rocío de éstas no es totalmente uniforme. La desintegración de las partículas puede ocurrir en diferentes zonas del equipo, algunas ocasiones, se presenta en la componente radial frente a la boquilla; a causa de fuerzas externas que ocasionan un flujo turbulento en el líquido. En el caso de que el flujo sea laminar, la desintegración se origina después del radio de la boquilla. (3, 22, 30).

1.1.4.2 BOQUILLAS DE DOS FLUIDOS.

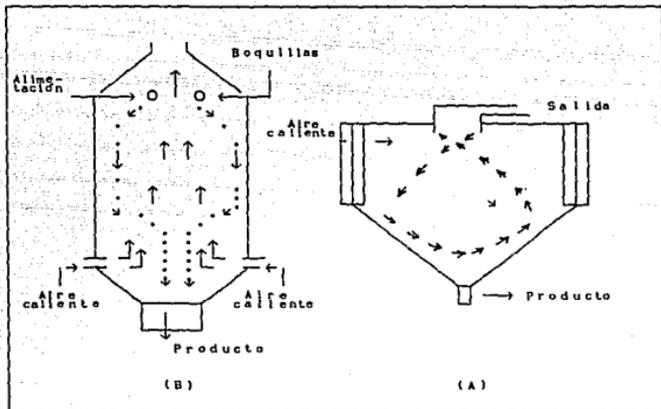


Fig. 4. Dirección de flujo en sistema de secado A) co-corriente, B) contracorriente, con boquilla a dos fluidos (22, 30).

Para este método se emplean dos flujos; líquido y gas principalmente, la atomización del líquido se logra por las altas velocidades que adquiere el gas logrando un impacto entre ambos fluidos. No son recomendables para altas capacidades, operan a presiones relativamente bajas, en un rango de 413.7 KN/m^2 hasta 689.5 KN/m^2 . (30).

La atomización con este tipo de boquilla se puede realizar con un proceso co-corriente o contracorriente, al igual que la atomización con boquilla a presión, como lo muestra la figura 4; además existe una diversidad en la combinación de las variables de operación en cuanto a presión, tipo de fluido (gas o vapor), etc.

1.1.4.3. DISCO CENTRIFUGO

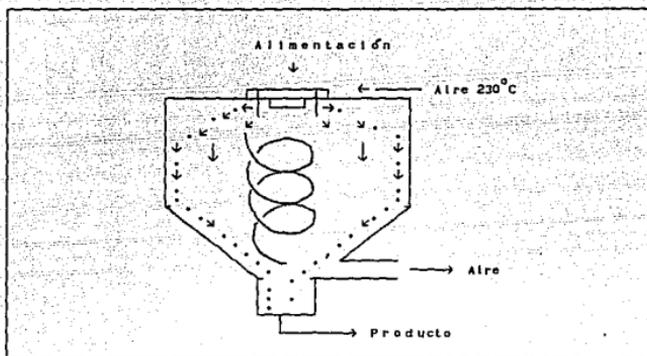


Fig. 5. Dirección de flujo en un sistema de secado co-coriante con disco centrífugo. (22).

Este método de atomización se basa en la diseminación de los líquidos en hojas delgadas, a partir de una fuerza centrífuga a causa de la rotación, la alta velocidad del disco centrífugo hace que el líquido abandone el rotor, promoviendo la desintegración de éste en pequeñas partículas. (9, 30).

El diseño del disco permite obtener una distribución uniforme en el tamaño de las gotas que puede lograr al variar la velocidad de rotación del disco y con la modificación de las propiedades físicas de la alimentación.

En general el tamaño de la gota se determina en base a las características de la alimentación y del diseño del disco, la evaluación del tamaño de la partícula está dado por la expresión:

$$D_{\text{Prom}} = 0.4 \left[\frac{G}{\rho_1 N r^2} \right]^{0.6} \left[\frac{\mu_1}{G} \right]^{0.2} \left[\frac{\sigma \rho_1 L_w}{G^2} \right]^{0.1} \quad (\text{Ec. 1.18})$$

Donde :

- D_{Prom} = Diámetro promedio de la gota (m)
 G = Flujo de alimentación (gr/cm*s)
 ρ_1 = Densidad de la alimentación (kg/m³)
 N = Velocidad angular del disco atomizador rpm
 r = Radio del disco aspersor (m)
 μ_1 = Viscosidad de la alimentación (pa s)
 σ = Tensión superficial (Dina/cm²)
 L_w = Perímetro mojado (m)
 (8, 22, 30).

Donde la gota de mayor tamaño en la población del rocío tiene tres veces el diámetro del tamaño promedio de la gota.

$$D_{\text{max}} = 3D_{\text{prom}} \quad (\text{Ec. 1.19})$$

Ventajas.

La atomización por el disco centrífugo resulta muy atractiva para numerosas aplicaciones en el secado por aspersión, entre ellas la atomización de suspensiones, pastas, fluidos con alta viscosidad y materiales tixotrópicos, que erosionan y taponan las boquillas. Esto ayuda a reducir costos de energía, ya que la duración del equipo es relativamente mayor.

Los discos centrífugos funcionan en una amplia gama de velocidades de alimentación y velocidades de disco, sin tener variaciones en el producto que sean apreciables.

Desventajas.

Una de las desventajas más comunes es que por su diseño tienen una menor capacidad de secado del producto, comparada con la que se obtiene en las boquillas de atomización.

1.1.5 PATRONES DE FLUJO

Un patrón de flujo es un vector con dirección y sentido, y se manifiesta como una distribución de magnitudes dentro de un espacio finito. Para cada tipo de operación y diseño de equipo, se encuentran establecidos los patrones de flujo a fin de obtener un producto de características establecidas. Para este caso de la operación de secado por aspersión, los principales patrones de flujo son : el perfil de velocidades de aire y el perfil de temperaturas; involucrando en éste último al perfil de humedades. En las figuras 3, 4 y 5 de éste primer capítulo se puede observar la forma que adquiere la dirección del flujo de aire como una velocidad. De igual manera la temperatura manifiesta una distribución dentro de la cámara de secado, representando un perfil definido de acuerdo a las zonas en que se realiza el secado ; en los siguientes subcapítulos se hablará del tipo de perfil que manifiestan cada uno de estos patrones.

Los patrones de flujo son de gran importancia en el secado por aspersión debido a que de éstos dependen las condiciones en que se lleve a cabo el proceso de secado. Durante el proceso, el calor procedente de la corriente del aire caliente pasa al material sólido durante su recorrido, desde que se forma la gota inmediatamente después de ser atomizada, y después llegar a las paredes calientes hasta abandonar la cámara; por esta razón se ha demostrado que la velocidad del aire y la temperatura de éste, así como, las propiedades del material tienen gran influencia sobre el coeficiente de transferencia de calor, disminuyendo o aumentando el valor de él. y como consecuencia de éste fenómeno existe un efecto en las

características finales del producto como son: forma, tamaño de la partícula, contenido de humedad, solubilidad, distribución de tamaños, etc.

1.1.5.1 PERFIL DE VELOCIDADES DEL AIRE.

La velocidad con la que el aire circula dentro de la cámara de secado, tienen un efecto directo sobre la velocidad de secado e influye en la velocidad de las partículas en la cámara, así como en su trayectoria.

Es muy importante la velocidad que tiene el aire, ya que de ella depende el tiempo de residencia de las partículas para lograr el secado, también evita que éstas aún húmedas tengan contacto con la paredes, que de lo contrario originaría la aglomeración y pérdida de material en la cámara.

Las partículas manifiestan una velocidad en función del sistema aspersor, y cuando éstas entran en contacto con el flujo de aire, su velocidad toma un valor relativo al de la velocidad del aire. El tipo de flujo que se da, depende de las características de la partícula y de la velocidad del aire, con lo cual es posible evaluar el número de Reynolds y determinar la región del flujo como se muestra en el siguiente cuadro.

REGION	NUMERO DE REYNOLDS
Laminar	menor a 0.2
Semi- turbulento (flujo transitorio)	0.2-500/1000
Turbulento	mayor a 1000

Cuadro 5. No. de Reynolds en función del flujo, durante el secado por aspersión. (22).

La velocidad del aire manifiesta un flujo complejo y turbulento

en la cámara de desecación. El aire se introduce de manera tangencial a la parte superior de la cámara cilíndrica y se desplaza siguiendo un patrón de espiras, el cual desciende por la pared de la cámara. La alimentación se introduce en el centro de la parte superior y se desplaza hacia abajo hasta llegar a la circulación del gas. La figura 5 muestra la dirección de este patrón. (20).

Gauvin junto con otro colaborador en 1969 realizaron estudios acerca del perfil de velocidades que sigue el flujo de aire y determinaron que si se divide el secador en zonas concéntricas, la velocidad del aire toma un valor mayor cerca del disco aspersor y conforme aumenta la distancia del centro hacia la pared, esta disminuye notablemente. Lo que implica que cerca del disco aspersor existe una mayor turbulencia que en el resto de la cámara, ocasionando fuerzas de fricción por el choque entre las partículas. La zona que se encuentra cerca del disco aspersor se considera como una zona crítica del secado, ya que es en ésta en donde posiblemente se localiza el primer periodo de velocidad constante. De igual manera encontraron que el desarrollo del perfil de velocidades en un secador con boquilla de atomización se coloca a una distancia de 64 cm desde el punto de atomización de la boquilla. (17).

La velocidad del aire se manifiesta en tres componentes, las cuales son: axial (V_a), radial (V_r) y tangencial (V_t), y la resultante se presenta como:

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_a^2 + v_t^2} \quad (\text{Ec. 1.20})$$

La velocidad axial puede tomar diferentes valores dependiendo de la distancia a la que se realice la evaluación, pero generalmente se ha considerado constante ya que no presenta grandes variaciones.

La velocidad radial toma valores muy pequeños, por lo que muchos investigadores la consideran igual a cero, o simplemente de un valor despreciable. (8)

En cuanto a la velocidad tangencial no se reportan especificaciones, el valor de esta velocidad probablemente varía en

función de la altura del equipo. (8).

Los valores que tome la velocidad del aire en cada una de las componentes, depende del tipo del secador en que se estén efectuando la medición, así como el tipo de proceso de operación que se lleve a cabo, en otras palabras, alimentación tipo co-corriente, paralela o mixta.

Métodos de medición de la velocidad del aire.

La determinación directa de la velocidad del aire implica dificultades debido a la turbulencia que manifiesta ésta. Uno de los métodos empleados en las primeras mediciones fue el método fotográfico y, posteriormente se utilizaron otros, como el tubo de pitot. (10).

El de tubo pitot tiene una amplia aplicación en ductos circulares y rectangulares, durante su empleo se registran, a través de un manómetro diferencial, las presiones estática y dinámica, la velocidad es posible calcularla empleando la siguiente expresión:

$$V = C \sqrt{2g_c \frac{(P_d - P_e)}{\rho}} \quad (\text{Ec. 1.21})$$

$$C = 1$$

(30, 31, 37)

Donde:

V = Velocidad puntual del aire (m/s)

g_c = Constante dimensional = 0.999 kg m/Ns²

P_d = Presión dinámica (kN/m²)

P_e = Presión estática (kN/m²)

ρ = Densidad del fluido manométrico (kg/m³)

C = Coeficiente en función de la graduación de los tubos del manómetro.

Algunos autores no recomiendan el uso de del tubo de pitot para

las mediciones de la velocidad del aire, ya que durante el proceso de secado por aspersión las gotas y/o partículas pueden producir coalescencia en la presión estática y la presión dinámica. Los posibles errores en la medición pueden disminuirse si ésta se realiza sin introducir la alimentación del líquido o mezcla. (17).

Una de las limitaciones de éste instrumento de medición es que no resulta confiable para flujos de aire muy bajos. Además por su diseño de construcción requiere de que el flujo de aire fluya libremente, evitando obstáculos que ocasionarían errores en la medición.

1.1.5.2 PERFIL DE TEMPERATURAS DEL AIRE.

La temperatura del aire es otra de las variables que determinan la velocidad de secado, además es un factor muy importante que dependiendo del rango de aplicación, en relación a la temperatura del aire a la entrada y a la salida del equipo, pueden mantener, o en su defecto dañar las características físicas y organolépticas del producto (22).

Durante el proceso de secado por aspersión existe un gradiente de temperatura, por lo que el proceso se vuelve complejo. Las gotas de agua pura ($a_w = 100 \%$) se evaporan al ser expuestas a una temperatura mayor que la del bulbo húmedo (T_w), hasta lograr la evaporación completa, mientras que las partículas sólidas ya secas se calientan a la temperatura del aire durante el proceso, la cual se considera igual a la temperatura de salida. (16, 34).

No existe solo un gradiente de temperatura del centro de la gota a la superficie de ésta, sino también, diferentes temperaturas entre diversas zonas de la superficie, éste gradiente aumenta cuanto mayor sea el diámetro de la partícula, debido a su menor relación superficie-masa. Es por ello que las partículas pequeñas secan más uniformemente. (34).

En la mayoría de los casos dentro de la partícula se acumula vapor de agua y burbujas de aire, y puede sobrecalentarse si la temperatura del aire que la rodea es superficialmente alta, provocando una expansión del vapor y el aire. La presión aumenta y la simetría de la partícula adquiere una forma completamente redonda con una superficie lisa. Si la temperatura del aire circulante se mantienen en un valor alto, la partícula puede aún explotar. Si la cantidad de burbujas del aire es pequeña, la expansión del vapor no se beneficia en gran manera, y no tiene ningún efecto el sobrecalentamiento, en consecuencia resulta la formación de una cáscara pequeña que ocasiona mala solubilidad (Ref. 16, 34).

La temperatura del aire a la salida del secador, influye directamente en la temperatura de la partícula. La temperatura de salida es determinada por muchos factores, como son:

- Contenido de humedad en el producto final.
- Temperatura y humedad del aire de secado.
- Contenido de sólidos en el concentrado.
- Tipo de atomización.

(30, 34).

En general esta temperatura de salida del aire debe tener un valor con el cual se pueda obtener un producto de características aceptables.

Debido a la turbulencia y a la mezcla de los gases, las condiciones de secado se consideran uniformes en todos los puntos del interior de la cámara, por tanto, toda la cámara se encuentra a la temperatura de salida del gas, excepto en la zona inmediata a la entrada del gas y la atomización del líquido. (30).

Se han encontrado algunas distribuciones de la temperatura del aire durante el secado por aspersión en un sistema co-corriente y se esquematiza en la figura 6. Como se puede observar la temperatura del aire cerca de las paredes del equipo varía desde el 10 hasta el 20%,

mientras que en la zona inmediata al disco atomizador hay variaciones de la temperatura hasta del 60% (desde el centro hasta la pared), ésta última variación se asume que es la zona en donde se lleva a cabo la mayor parte de la evaporación y por lo tanto también se considera como una zona crítica de secado.

Algunos autores citan resultados de los perfiles de temperatura durante el secado por aspersión empleando una boquilla a presión y

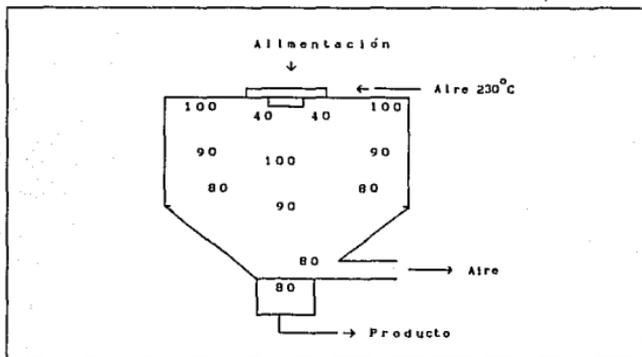


Fig. 6. Distribución de temperaturas del aire, durante un sistema de secado de corriente directa. (22).

se indica que la principal humidificación del aire existe en la zona radial, cerca de la boquilla de aspersión, y esta disminuye conforme la distancia de la boquilla hacia la pared se incrementa (Ref. 17).

En base a los estudios anteriormente mencionados en este subcapítulo en relación a los patrones de flujo se puede decir que los patrones y distribuciones de la temperatura que se presenten dentro de la cámara depende del tipo de operación que se realice, así como, de las variables que se involucren en el proceso como

son: La temperatura del aire a la entrada y la salida del equipo, la humedad del aire, el contenido de los sólidos de la alimentación, la velocidad del aire, la temperatura de la alimentación y el diseño del equipo.

Medición de temperaturas.

El método termoeléctrico se emplea para realizar mediciones de temperaturas y se fundamenta en la variación de una fuerza termoeléctrica motriz de un termómetro termoeléctrico en función de la temperatura.

Este tipo de termómetros son usados en un amplio intervalo de temperaturas a partir de los -200°C y hasta 2500°C . La desventaja de emplear altas temperaturas es que la medición debe ser de breve duración ya que con el número de T° crece la influencia de las propiedades agresivas del medio, ocasionando una disminución en el trabajo de termómetros eléctricos.

Las principales ventajas de estos instrumentos son: alto grado de precisión, la posibilidad de centrar el control de la temperatura uniendo varios termómetros termoeléctricos con un aparato de medición a través de un conmutador, logrado así un registro automático de la temperatura, la posibilidad de graduar el aparato de medición y el termómetro termoeléctrico por separado. (20).

1.1.6 SECADO POR ASPERSIÓN DE LA LECHE

El secado por aspersión en la industria láctea fue posible hasta el año de 1850, logrando secar grandes cantidades de leche, pero el proceso necesitaba la adición de azúcar, ácidos o álcalis, por lo que el producto final no era puro. Hasta el año de 1913 el americano Grey y el danés Jensen diseñaron un secador por toberas en donde la leche se pulverizaba a través de éstas dentro de una cámara

con aire caliente, logrando así el secado por aspersión. Esto fue la base para el desarrollo de la industria moderna de leche en polvo. Los equipos empleados en esta época son en su mayoría muy sofisticados e implican un avanzado diseño técnico y tecnológico; por esta razón los estudios realizados de este proceso son mas profundos, con la finalidad de establecer las variables mas importantes y encaminar los resultados a la aplicación del secado por aspersión de otros fluidos y de esta manera lograr predecir condiciones de operación para cada caso en particular. (21, 24).

1.1.6.1 TIPOS DE LECHE.

Existen algunos tipos de leche de acuerdo a las siguientes características:

- Por su composición.
- Por su procedimiento de desecación.
- Por la intensidad del tratamiento recibido antes de la desecación.

Por su composición.

Según su composición puede ser leche en polvo entera o leche en polvo descremada.

La leche en polvo entera se utiliza fundamentalmente para la alimentación infantil y para la preparación previa de redisolución en agua . Su contenido de grasa es menor o igual al 26% (6, 12).

La leche en polvo descremada es un producto de fácil almacenamiento con una gran variedad de aplicaciones en la industria alimentaria y en la alimentación animal. Su contenido de grasa es menor o igual al 15%. (6, 12).

Por su procedimiento de desecación.

Dependiendo del tratamiento puede tratarse de una leche desecada en rodillos (cilindros), o leche en polvo spray (obtenida

por atomización), ésta última es mucho mas soluble que la primera. (Ref. 35).

Por la intensidad del tratamiento.

Existen tres categorías de ésta clasificación de intensidad del tratamiento recibido antes del secado, las cuales son:

- Leche en polvo de baja temperatura.
- Leche en polvo de temperatura media.
- Leche en polvo de alta temperatura.

Estos tipos de leche se diferencian en el grado de desnaturalización de sus proteínas solubles, que aumenta proporcionalmente al tratamiento térmico.

Tratamiento	Nitrógeno no desnaturalizado mg/mg polvo.	Finalidad de uso
Calor bajo - 135°C	6.0 o mas	Leche en polvo de disolución instantánea, para uso en quesería, alimentación animal, leche de consumo, alimentos infantiles, helados y productos para blanquear café.
Calor medio + 135°C - 210°C	1.51-5.99	Usos múltiples en la industria alimentaria.
Calor alto + 210°C	1.5 o menos	Industria panadera y pastelería

Cuadro 6. Uso de leche en polvo descremada elaborada a partir de diferentes leches UHT. (6).

En algunos casos es importante conservar intactas la mayor parte de las proteínas, pero en otros, como es el caso de la utilización en pastelería, es preferible emplear un producto cuyas proteínas solubles hayan sido desnaturalizadas. (12).

El cuadro 6 resume los usos de acuerdo al grado de

desnaturalización.

1.1.6.2 OPERACIONES PREVIAS AL SECADO.

Cuando la leche llega a recepción se somete a distintos tratamientos, según el destino a leche en polvo entera o leche en polvo descremada, el cuadro 7 esquematiza las diferentes operaciones para cada tipo de leche.

En la elaboración de la leche en polvo entera existen mas etapas de fabricación; primeramente se eliminan los residuos que pueden alterar sus características, se realiza una clarificación o filtración, posteriormente se estandariza con la adición o eliminación de grasa. La homogeneización tiene efecto sobre la distribución uniforme de la grasa en la elaboración de la leche en polvo. (6, 12, 36).

LECHE EN POLVO DESCREMADA	LECHE EN POLVO ENTERA
Recepción	Recepción
↓	↓
Desnatado	Clarificación
↓	↓
Precaentamiento	Estandarización
↓	↓
Desecación	Homogeneización
↓	↓
Envasado	Precaentamiento
	↓
	Concentración
	↓
	Desecación
	↓
	Envasado

Cuadro 7. Etapas de fabricación de leche en polvo entera y descremada. (12).

Calentamiento de la leche.

La leche que va a ser sometida a un secado, no requiere de un precalentamiento tan intenso, ya que durante el proceso de secado se le extrae la humedad que es tan necesaria para el desarrollo de los microorganismos; sólo basta la destrucción de gérmenes patógenos con una pasteurización. (6).

El precalentamiento de la leche determina muchas propiedades del producto final. Existen tres tipos de precalentamiento, los cuales son los siguientes:

- **Precalentamiento a baja temperatura:** Tratamiento equivalente a una pasteurización normal tipo HTLT a 62°C durante 30 minutos y se obtiene la leche en polvo de baja temperatura.
- **Precalentamiento a temperatura media:** Tratamiento de 76.5-85°C, durante 15-30 min., con un efecto bactericida y produce la formación de grupos reductores. Se obtiene la leche en polvo de temperatura media.
- **Precalentamiento a alta temperatura:** Tratamiento de 90-110°C o hasta 121°C por un periodo de tiempo de hasta un segundo. Se obtiene la leche en polvo de alta temperatura, la cual se encuentra dentro de los límites de mejor solubilidad y mejor sabor. (12).

Algunos tratamientos mas intensos, como los utilizados para la elaboración de leche evaporada, tienen la característica de desnaturalizar y estabilizar proteínas.

Concentración

La leche es sometida a una evaporación para concentrar los sólidos, a fin de ahorrar energía en la extracción de agua. El concentrado se evapora hasta llegar a su límite de fluidez, en otras palabras, hasta una proporción de extracto seco 40 a 50%. La relación de concentración depende del procedimiento de desecación al que es sometido el producto. (12).

- Leche en polvo entera
 - obtenida por cilindros 1:3, 1:5, 1:4
 - obtenida por pulverización 1:3, 1:5
 - Leche en polvo descremada
 - Obtenida por cilindros 1:4, 1:6
 - obtenida por pulverización 1:4, 1:5
- (6, 12).

1.1.6.3 EL PROCESO DE SECADO POR ASPERSION.

El secado por atomización consiste en nebulizar el producto a desecar, dentro de una cámara en donde circula aire caliente. Según Schulz, la superficie de un litro de líquido pulverizado en gotas es de 120m². (6).

Las gotas al entrar en contacto con el aire caliente, éste les aporta calor para evaporar el contenido de agua, así como también, para guiarlas y evacuarlas del equipo.

El proceso de secado se subdivide en tres etapas, para evitar alteraciones en el producto y así obtener partículas de un determinado tamaño.

La primera etapa se realiza en la cámara de secado inmediatamente después de haber entrado en contacto con el aire, donde la mayor parte del agua es evaporada rápidamente. La velocidad del aire es importante, ya que, al ser mayor hay una mejor mezcla con el líquido atomizado y el producto obtenido tiene mejores características. Cuando la gota tiene contacto con el aire caliente se produce un intercambio térmico aire/líquido, pero si el choque es muy violento puede ocasionar desnaturalización de las proteínas e incluso empardeamiento del producto. Aunado al choque térmico una velocidad de alimentación muy lenta ocasiona un sobrecalentamiento que afecta no solo la solubilidad del polvo, sino que provoca una

fusión excesiva de la grasa en el producto, ocasionando una vida de anaquel corta. (2, 6, 12, 36).

En la segunda etapa de secado, la corriente de aire atraviesa la capa superficial del producto hasta llegar a la capa inferior, produciendo una extracción complementaria de agua. (6).

Finalmente en la tercera etapa se realiza la desecación final y el producto abandona la cámara.

Las condiciones de operación del secado varían de acuerdo al tipo del secador, pero en cada una de éstos, cierto número de parámetros se deben ajustar a fin de obtener un porcentaje de humedad de 2 a 2.5%, estos resultados se consiguen regulando las temperaturas de entrada y salida de aire del equipo y otros factores como la concentración, temperatura y flujo de alimentación. La temperatura del aire a la entrada del secador varía entre los 135 y 210°C y la de salida entre 70 y 100°C. (4, 6).

1.1.6.4 CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO FINAL.

La gota de líquido pulverizado se transforma en una partícula de polvo, durante la operación se intenta obtener granos de un tamaño fino, pero evitando llegar a la elevada proporción de polvo y la existencia de pocas partículas aglomeradas, ya que se reduce la capacidad de dispersión del producto en agua y favorece la formación de grumos, además existen mermas por el aire de escape durante el proceso y un elevado peso a granel del producto. (6, 7).

Este problema en la mayoría de los casos, para algunos productos, es resuelto aplicando técnicas de instantaneización que se presenta en las siguientes etapas:

- Penetración del líquido en el producto a través de la capa superficial.
- Hundimiento de aglomerados en el líquido.

- Dispersión de aglomerados.
- Disolución de partículas

Equipo instalado	Efectos de operación después de la salida cónica.	Características del producto
Desecador por pulverización de transporte neumático	Enfriamiento del producto en el sistema de transporte neumático.	Polvo muy fino, difícil de humedecer con agua, formación de grumos y elevado peso a granel.
Fluidificador	Filtración de partículas con aire frío y detención de aglomerados.	Tamaño homogéneo y propiedad de semiinstantánea, buena humectabilidad en agua fría
Instantaneizador unidireccional.	Enfriamiento con aire frío y filtración en lecho vibratorio, separación de partículas - por ciclón.	Disolución instantánea de estructura granulada, exenta de partículas sueltas, muy buena humectabilidad con agua fría, peso a granel de 500gr/1000cm ³ .
Instantaneizador de rehumectación.	Humedecimiento con aire caliente, desecación - enfriamiento con aire frío y filtración en lecho vibratorio y homogeneización.	Alta calidad, para alimento de lactantes, peso a granel 300gr/1000cm ³ .

Cuadro B. Instalación de equipos adicionales para el secado por aspersión de - leche (6).

Aquellas propiedades del polvo que ejercen alguna influencia sobre el desarrollo de estos procesos parciales se denominan propiedades de instantaneización. (6, 7).

La instalación de equipos adicionales a un secador por aspersión, ayuda a obtener un producto de buena calidad, en el cuadro B se resumen estas características.

II. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.

Para cumplir con el objetivo general que se propuso al inicio del presente trabajo se planteo un diseño experimental en el cual se desarrollaron tres etapas de trabajo, siendo las siguientes:

- 1.- Determinación de zonas críticas de secado durante la evaporación de agua a partir de la evaluación de los perfiles de humedad y velocidad de aire; realizando un análisis térmico para contrastar los resultados con la siguiente etapa.
- 2.- Determinación experimental de la influencia de los sólidos en los perfiles de humedad y velocidad de secado, realizando un análisis térmico y contrastando resultados con la primera etapa.
- 3.- Determinación de ecuaciones empíricas de predicción de transferencia de calor durante el secado por aspersión.

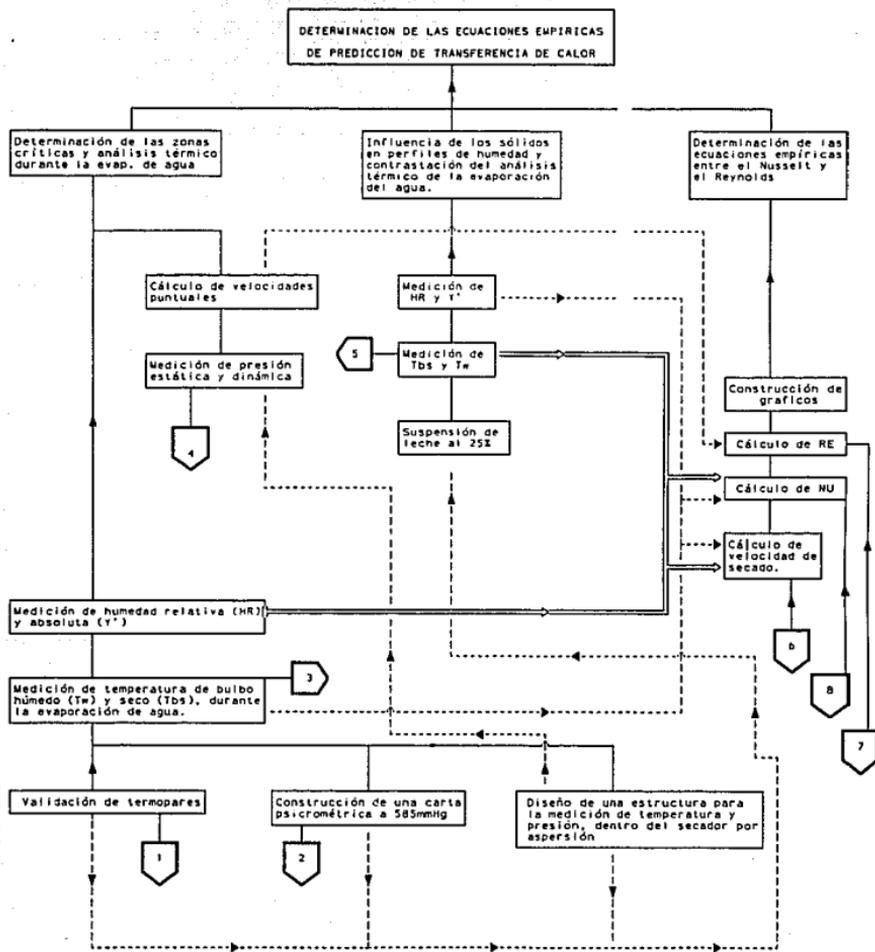
2.1. DESARROLLO DEL CUADRO METODOLOGICO.

En el cuadro metodológico (cuadro 9) se presenta el desarrollo del trabajo experimental y a lo largo de este capítulo se explica la manera en que se aplican cada uno de los conectores en cada objetivo particular.

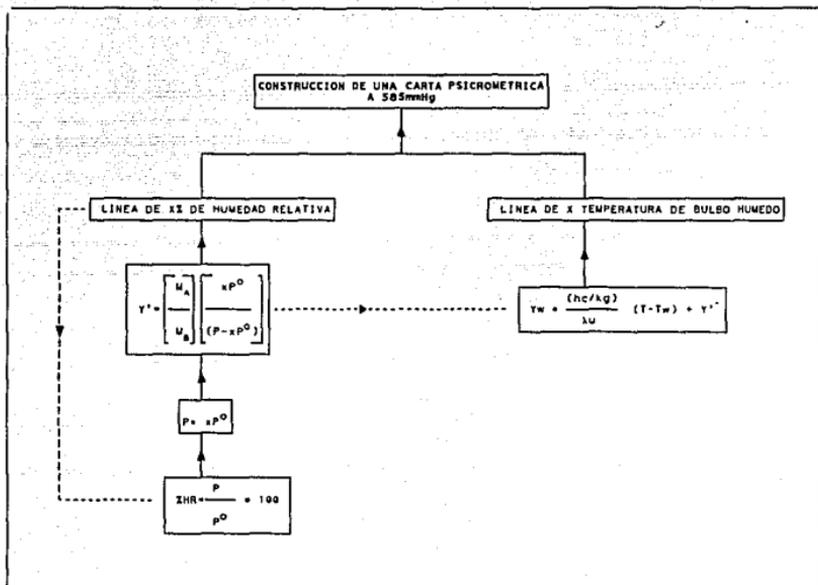
2.1.1. ACTIVIDADES PRELIMINARES.

Inicialmente se realizaron algunas actividades para coadyuvar a cada etapa de trabajo, siendo estas actividades las siguientes:

CUADRO 9. CUADRO METODOLÓGICO EXPERIMENTAL



CONECTOR I



Cuadro 10. Construcción de una carta psicrométrica a 585mmHg.

2.1.1.2 CONSTRUCCION DE UNA CARTA PSICROMETRICA.

La carta psicrométrica se construyó a la presión de operación de la experimentación la cual fué de 585mmHg, los datos para la construcción de esta tabla se obtuvieron a partir de la secuencia de cálculo que se encuentra en el cuadro 10, en donde se muestra como se realiza el cálculo para la construcción de las líneas de porcentaje de humedad relativa empleando presiones de vapor de agua (P^0), la presión atmosférica (P) y los pesos moleculares de la mezcla aire (M_B) y agua (M_A). Para la construcción de las líneas de temperatura de bulbo húmedo se evalúa la humedad de saturación (Y_w).

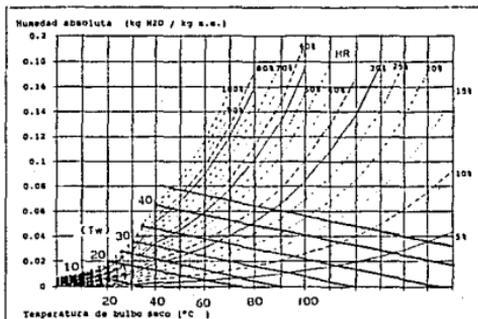
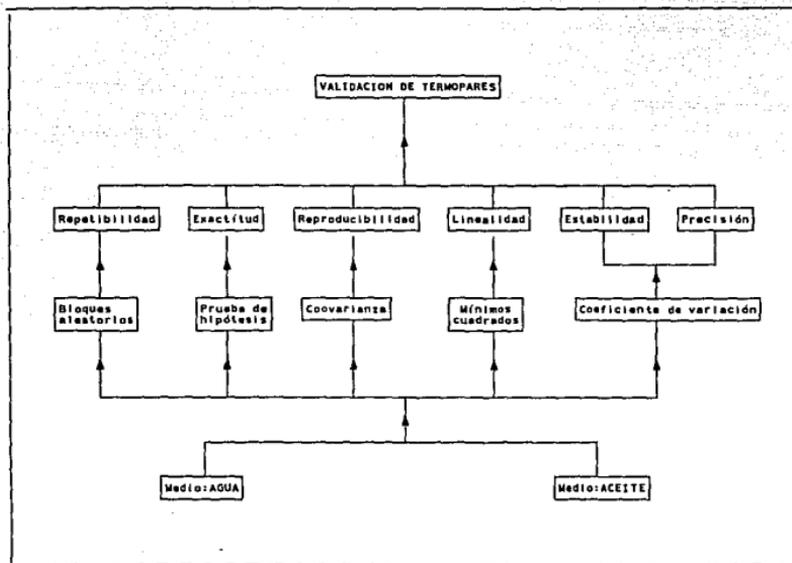


Fig. 8. Carta psicrométrica a 585mmHg

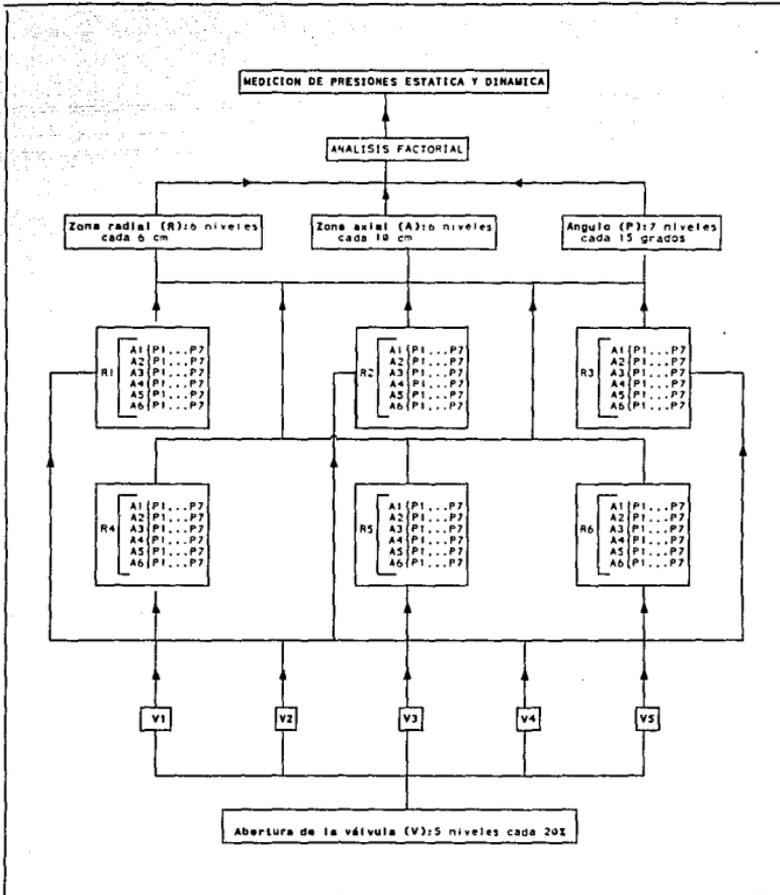
Los intervalos de temperatura empleados para cada caso fueron de: 5 a 100°C para la temperatura de bulbo seco en intervalos de 10°C para la temperatura de bulbo húmedo de 5 a 55°C en intervalos de 10°C.

CONECTOR 2.



Cuadro 11. Validación de termopares

CONECTOR 3.



Cuadro 12. Medición de presión estática y dinámica.

La figura 8 muestra la carta psicrométrica, con las diferentes líneas de temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo, así como también, las líneas de humedades relativas y humedades absolutas.

2.1.1.3 VALIDACION DE TERMOPARES.

La validación es una acción de verificar de que un instrumento es confiable para su utilización durante una medición.

Los instrumentos de medición de temperatura se validaron empleando métodos estadísticos, tal como se muestra en el cuadro 11 a fin de que durante su utilización se obtuvieran lecturas confiables durante la medición de temperaturas, en la sección 1.1.5.2 del primer capítulo se explicó la importancia de éstos instrumentos y su forma de operación.

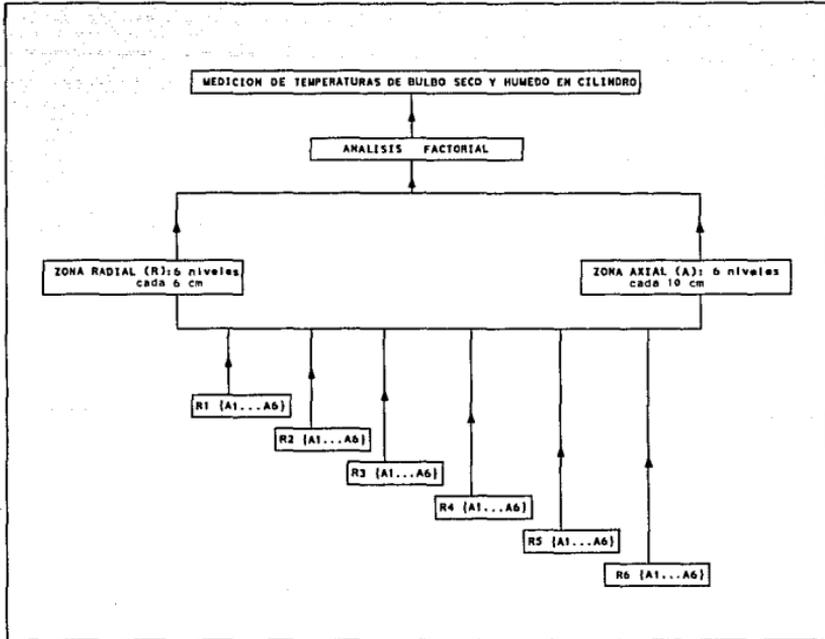
2.1.2. ETAPAS DE TRABAJO

Después de realizar estas actividades, se dió inicio a cada una de las fases de trabajo.

Primera etapa de trabajo

Para obtener el patrón de flujo de velocidades de aire (ver cuadro 9 y 12, se realizaron mediciones puntuales de presión estática y presión dinámica en cada una de las posiciones radiales, axiales y angulares, con ayuda del tubo de pitot el cual era sostenido en cada posición por la estructura de madera diseñada. que se muestra en la figura 7 de este capítulo, las posiciones radiales tenían una separación de 6 cm de distancia entre ellas y la primera posición (R 1) se encontraba a 7.5 cm de distancia del frente del disco aspersor, las posiciones axiales tenían una separación de 10 cm sobre la altura del equipo y la promer posición axial (A I) se localizaba a 10 cm bajo el techo del equipo y frente al disco aspersor, las posiciones angulares se variaron desde 0 a 90 grados y

CONECTOR 4



Cuadro 13. Medición de temperaturas de bulbo seco y húmedo durante la evaporación de agua.

las mediciones se realizaron en cada una de las posiciones radiales y axiales.

Una vez obtenidos los datos de estas presiones se realizaron los cálculos correspondientes para obtener la velocidad puntual, posteriormente se realizaron los análisis propuestos en cada uno de los cuadros y los gráficos representativos de este perfil. En la figura 9 se esquematizan las zonas de estudio durante cada una de las etapas de trabajo, en base a lo siguiente:

- Condiciones de secado en periodo constante.
- Dimensiones del equipo.
- Estructura de madera
- Características de las sondas de medición.

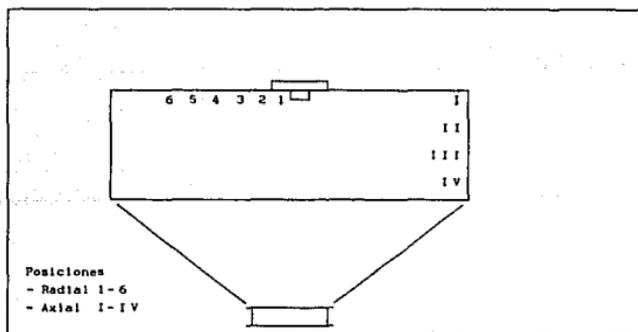
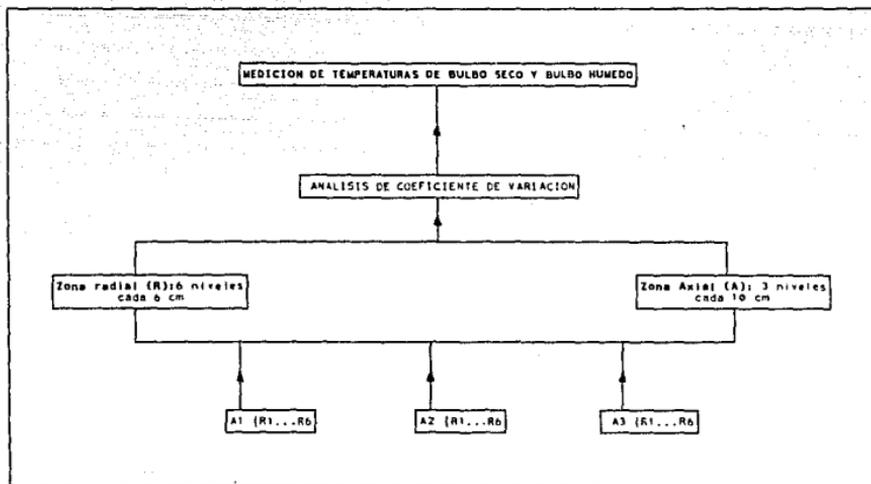


Fig 9. Zonas de estudio de patrones de flujo dentro de un secador Niro Atomizer.

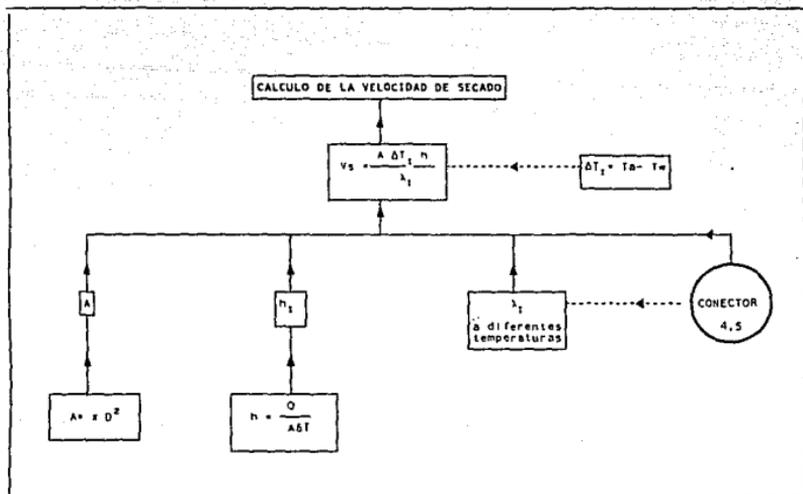
Para obtener los perfiles de humedades absoluta y relativa, se realizaron mediciones de temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo (ver cuadro 9 y 13). Durante la evaporación de gotas de agua; estas mediciones se lograron colocando los termopares en las diferentes posiciones radiales y axiales, sostenidos por la estructura de madera. Una vez obtenidos los datos se realizaron

CONECTOR 5.



Cuadro 14. Medición de temperaturas de bulbo seco y húmedo durante el secado de leche al 25%

CONECTOR. 6.



CUADRO 15. Cálculo de la velocidad de secado.

los análisis que se proponen en el cuadro 13, las determinaciones de las humedades en la carta psicrométrica de la figura 8 y los gráficos representativos de este perfil.

En esta etapa se realizó un análisis térmico del proceso evaluando la velocidad de secado en base a la secuencia de cálculo de el cuadro 15, el cálculo de esta velocidad se realizó de manera puntual en base a los datos experimentales que se obtuvieron, y se determinaron las zonas críticas de secado dentro del equipo, para realizar una contrastación con la segunda etapa.

Segunda etapa de trabajo

En la segunda etapa de trabajo se empleó un fluido patrón para determinar la influencia de los sólidos en los perfiles de humedad y velocidad de secado. Se preparó una mezcla de leche al 25% en peso (ver cuadros 9 y 14), las mediciones se realizaron de igual manera que en la primera etapa de trabajo.

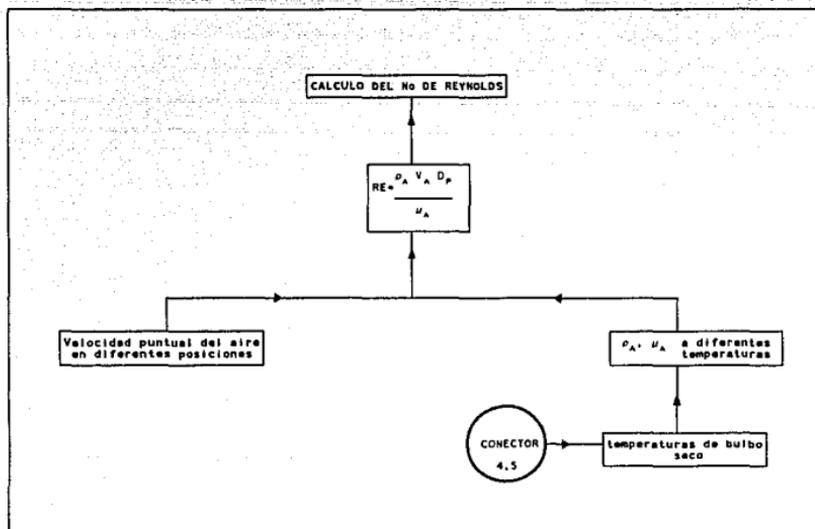
Después de realizar todos los cálculos correspondientes al cuadro 15 se realizó una contrastación con los patrones de flujo de la primera etapa y de esta manera se determinó el efecto de los sólidos en los perfiles.

Tercera etapa de trabajo

En ésta última etapa se emplearon los resultados obtenidos en las dos primeras fases de trabajo, para el cálculo de los números adimensionales con el objetivo de obtener las ecuaciones empíricas de predicción de transferencia de calor.

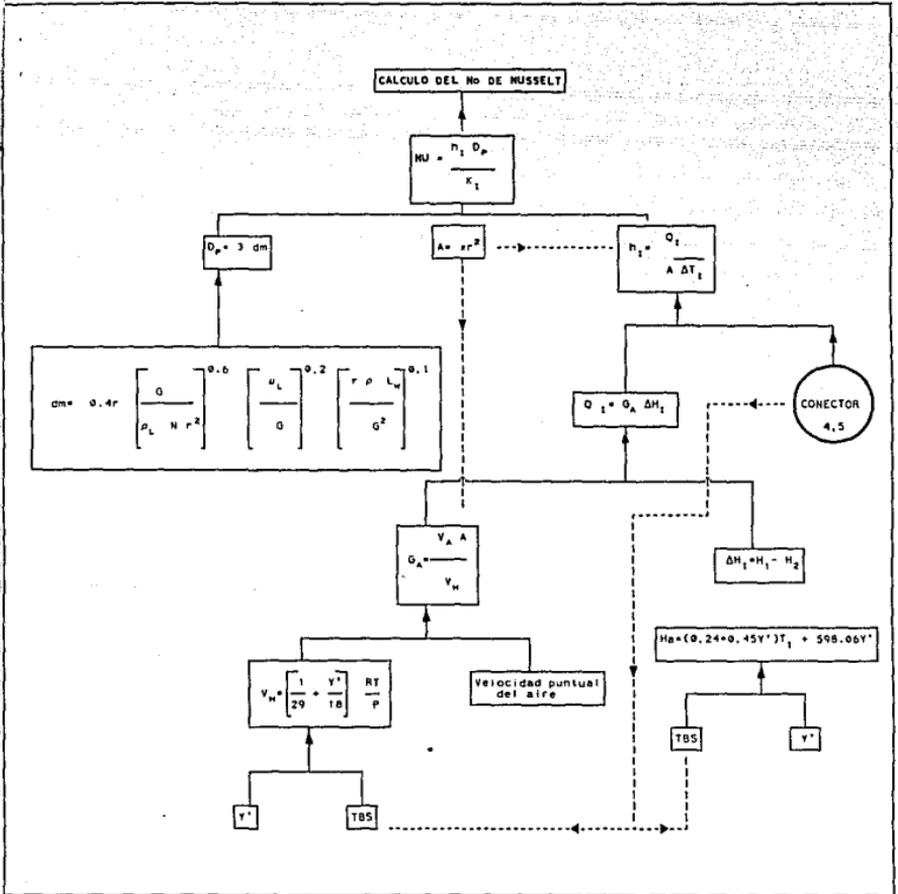
Para el cálculo del número de Reynolds, se llevó a cabo la secuencia de cálculo que aparece en el cuadro 16, y como se puede observar, de los datos que se obtuvieron de temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo a partir de las mediciones que indican los cuadros 13 y 14, se evaluaron las viscosidades y densidades del aire a cada una de las diferentes temperaturas de bulbo seco puntuales. Estos valores junto con los obtenidos de las velocidades puntuales ,

CONECTOR 7.



Cuadro 16. Cálculo del No. de Reynolds.

CONECTOR 8.



Cuadro 17. Cálculo del No. de Nusselt

fueron la base para el cálculo de éste número adimensional. Se determinaron No. de Reynolds para cada uno de los fluidos en estudio.

Para el cálculo del número de Nusselt, también se tomaron como base cada uno de los valores puntuales de temperaturas y humedades para evaluar, como se explica en el cuadro 17, entalpías (H_a) y volúmenes húmedos puntuales (V_{H_2O}) para determinar el calor y el flujo de aire puntual respectivamente. Por último con el calor puntual se realizó el cálculo del coeficiente convectivo de transferencia de calor.

Se realizaron gráficos entre estos números adimensionales y se realizó una contrastación entre la evaporación de agua y el secado por aspersión de leche. Finalmente se da una explicación de la posible aplicación de los resultados en los diferentes sistemas de secado por aspersión.

2.1.3 ANALISIS ESTADISTICOS.

En la sección 1.1.5.2, se habló de los termopares como un método de medición de temperatura y en este capítulo se propuso realizar una validación de estos instrumentos para realizar mediciones y obtener datos confiables, ya que en todos los sistemas de medición existen errores, es por ello que se emplean términos y análisis que permiten un estudio de estos sistemas.

Los métodos empleados son los análisis estadísticos para la evaluación de cada uno de los errores.

1.- Exactitud: Es la diferencia entre la media obtenida en las mediciones efectuadas con el dispositivo en evaluación y la media real de las medias, se emplea una prueba de hipótesis. (30).

2.- Repetibilidad: Es la variación de las mediciones obtenidas con un dispositivo cuando una misma persona lo emplea para medir características en la misma parte. Se aplica el método de bloques

aleatorizados (25).

3.- Reproducibilidad: Es la variación en el promedio de las mediciones efectuadas por operadores diferentes, empleando el mismo dispositivo para medir la misma característica, el método que se emplea es un análisis de covarianza (25).

4.- Estabilidad: Es la diferencia en el promedio de por lo menos dos grupos de mediciones obtenidas con un dispositivo en las mismas partes y características, como resultado del tiempo, se emplea el análisis del coeficiente de variación para cada uno de los grupos.

6.- Linealidad: Se realiza un análisis de mínimos cuadrados de cada termopar en función del tiempo y la temperatura, y entre cada par de termopares en función de la temperatura.

2.2. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO.

El equipo empleado durante las etapas experimentales fué el siguiente:

a) Secador por aspersión Niro Atomizer.

- Marca = Niro Atomizer, Copenhagen Denmark.
- Escala de temperatura de salida = 0-150°C.
- Escala de temperatura de entrada = 0-400°C.
- Escala de amperaje = 0-10 ⁰A.
- Construcción de acero inoxidable.
- Radio interno del cilindro = 1.20 m.
- Altura interna del cilindro = 77cm.
- Altura interna del cono = 81cm.
- Disco atomizador D=12 cm, vel= 25 416 rpm
- Ventilador.
- Sistema de operación paralelo.

b). Termopares.

Se emplearon siete termopares con las siguientes especificaciones:

- Construcción = Aleación de cobre y aluminio.
- Protección = IEC IP53
- Conexión del tubo = Material de vinil AISI tipo 302, flexible de 316ss de capilar y de largo 1mt.
- Diámetro = 2.4mm
- Largo = 10cm
- Intervalo de temperatura = -250°C a 2500°C
- Tiempo de respuesta = entre 2 y 12 segundos

c) Registrador de temperatura

- Serie = 34 C, PSS 2B-1F1 B.
- Construcción de Niquel.
- Registro de temperaturas = -215 a 317°C .

d) Tubo de pitot.

- Marca = AD (airflow developments limited Lancaster Road High Wycombe, Bucks England).
- Serie = 9004474-677.
- Diámetro interior = 2.33mm.
- Tiempo de respuesta = 10-20seg.

e) Bomba de desplazamiento positivo.

- 3.73 Nm
- Requerimiento de energía: 0.55kw
- Velocidad de rotación= 1420rpm

f) *Calentador eléctrico de aire.*

Este calentador tiene 5 resistencias de diferente capacidad, siendo estas las siguientes:

- 1.5 kw - 9.0 kw
- 3.0 kw -18.0 kw
- 4.5 kw

g) *Manómetro diferencial.*

- Marca = Mikromanometer Koferprufsatz
- Modelo = 4v.5
- Este manómetro esta compuesto por dos tubos que contienen líquido manométrico.

	Tubo corto	Tubo largo
Escala	0-250ml	0-500ml
$\rho_{liq} =$	782.432 kg/m^3	

Alineadores con medidores de presión atmosférica de 58-83mmHg

h) *Anemómetro mecánico.*

- Marca = S^{te} An^{no} Des Etab^{ts}. Joules Richard Argenteuil.
- Escala= 0-100 m
 - 0- 60 seg.
 - 0- 30 min

i) *Rotámetro.*

- Marca = Fisher Porter, Mobro Instrumentering.
- Escala = 0-100 %.

2.3. DISEÑO EXPERIMENTAL.

2.3.1. VALIDACION DE TERMOPARES.

Para realizar esta actividad se emplearon los siguientes medios y equipo:

- Medios = Agua y aceite.
- Equipo = Siete termopares e indicador eléctrico de temperatura.

El procedimiento que se llevó a cabo fué el siguiente:

Se conectan las terminales de los termopares al indicador eléctrico de temperatura, al mismo tiempo uno de los medios se eleva a una temperatura de 96°C , posteriormente se aísla el recipiente que contiene al medio y se introducen los termopares.

Después de que se ha estabilizado la lectura en el indicador se acciona el cronómetro y se comienza a tomar lecturas de temperatura de los termopares cada 60 seg. El número de ensayos para cada medio fué de tres.

Una vez obtenidos los datos se realizaron los análisis correspondientes para llegar a la validación de los termopares.

2.3.2. OBJETIVO PARTICULAR 1.

Determinación experimental de las zonas críticas de secado a partir de la evaluación de los perfiles de humedad relativa, humedad absoluta y velocidad de aire, así como, el análisis térmico durante la evaporación de agua.

a) Variables.

De respuesta: Perfiles de temperatura de bulbo seco (Tbs)
Perfiles de temperatura de bulbo humedo (Tw)
Perfiles de humedad relativa (HR)
Perfiles de humedad absoluta (Y')
Perfiles de velocidad del aire (V)

b) Tratamientos.

1.- Perfiles de temperatura, HR y Y'

- Posición axial: 6 niveles cada 10cm sobre el cilindro.
- Posición radial: 6 niveles frente al disco aspersor cada 6 cm.

2.- Perfiles de velocidad de aire

- Posición axial: 4 niveles cada 10cm
- Posición radial: 6 niveles cada 6cm
- Angulo: 7 niveles cada 15 grados (0-90°)
- Válvula de salida del aire: 5 niveles, cada 20% de abertura

Los análisis estadísticos a realizar en cada tratamiento son los siguientes:

- Coeficiente de variación
- Factorial fraccionario

c) Hipótesis.

1.- Hipótesis de trabajo:

El análisis de los perfiles de humedad relativa, humedad absoluta y velocidad del aire; así como, el análisis térmico durante la evaporación de agua, determinan una zona crítica de secado en la cual se evapora la mayor parte del agua libre.

2.- Hipótesis estadística:

- Hipótesis nula:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \dots = \alpha_n$$

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_3$$

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_n$$

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_n$$

$(\alpha, \beta, \tau)_{1..n}$ todas las combinaciones entre ellas

Nota: cabe aclarar que cada variable representa un tratamiento diferente:

α : Posición axial

β : Posición radial

τ : Angulo

ρ : Repeticiones

- Hipótesis alterna:

No todas las α son iguales a cero

No todas las β son iguales a cero

No todas las τ son iguales a cero

No todas las ρ son iguales a cero

e) Procedimiento

El procedimiento que se llevó a cabo se dividió en dos etapas; siendo estas la medición de temperaturas y la medición de presiones.

1.- Medición de temperaturas:

Se instaló la estructura de madera dentro del secador, posteriormente se colocaron los termopares en forma radial sobre la estructura. Las conexiones de los termopares al registrador eléctrico de temperatura, se realizaron a través de un pequeño orificio que se localiza en el ducto a la salida del equipo (donde se instala el termopar del equipo que mide la temperatura de salida del aire). De esta manera se garantiza que las mediciones durante el proceso no sufrieron cambios ya que éstas se

realizaron en el mismo sitio.

Una vez instalados todos los instrumentos de medición, se puso en marcha el equipo; se accionaron los interruptores eléctricos hasta alcanzar una temperatura de entrada del aire de 200°C , se mantuvo una temperatura de salida de 87 a 89°C . La alimentación fué agua pura con un flujo en la alimentación de 10.8 lt/hr y fué el máximo para mantener la temperatura de salida.

La medición de temperaturas de bulbo seco y bulbo humedo se realizó en cada una de las posiciones radiales y axiales con los diferentes niveles de variación; a partir de los datos obtenidos se realizaron las mediciones de humedad relativa y humedad absoluta en la carta psicrométrica construída.

Cabe mencionar que se realizó una experimentación previa en la zona tangencial del cilindro del equipo, frente al disco aspersor con la finalidad de comprobar que el perfil de flujo es constante en la zona.

Las condiciones de operación fueron las siguientes:

- Tbs del aire a temperatura ambiente = 24°C
- Tw del aire a temperatura ambiente = 20°C
- Temperatura inicial de la alimentación = 20°C
- Gasto volumétrico de la alimentación = 10.8 lt/hr agua
- Velocidad del disco centrífugo = 25416.3 rpm
- Presión de operación = 585 mmHg
- Amperaje inicial = 10A

2.- Medición de presiones

El tubo de pitot se colocó sobre la estructura de madera, la cual se encontraba dentro del equipo, la conexión del tubo de pitot al manómetro diferencial se realizó también a través del orificio del ducto de salida del aire. Posteriormente se puso en marcha el equipo, pero únicamente el disco centrífugo y el ventilador, la temperatura del aire a la entrada y a la salida del

equipo fué la ambiental. Para evitar la coalescencia de las partículas no hubo flujo de alimentación. Se realizaron las mediciones de presión estática y presión dinámica en las diferentes posiciones radiales, axiales y angulares con los diferentes niveles de variación propuestos.

Las condiciones de operación fueron las siguientes:

- Temperatura del aire a la entrada y salida = 22°C
- Velocidad del disco aspersion = 25416.3rpm
- Presión de operación = 585mmHg
- Amperaje inicial = 10A

Una vez obtenidos los datos se realizaron los cálculos correspondientes para obtener velocidades puntuales, a partir de la ecuación 1.21.

2.3.3 OBJETIVO PARTICULAR 2.

Determinación experimental de la influencia de los sólidos en los perfiles de humedad relativa, y humedad absoluta, así como, la contrastación del análisis térmico entre esta y la evaporación de agua.

a) Variables.

De respuesta: Perfiles de Tbs
Perfiles de Tw
Perfiles de $\%HR$
Perfiles de Y'

b) Tratamientos.

- Posición radial: 6 niveles cada 6cm sobre el cilindro a partir del disco centrífugo

- Posición axial: 3 niveles cada 10cm sobre el cilindro a partir del disco centrífugo

c) Hipótesis.

1.- Hipótesis de trabajo:

El análisis de los perfiles de $\%HR$ y Y' , así como el análisis térmico durante el secado por aspersion de una suspensión de concentración conocida, contrastados con los obtenidos durante la evaporación de agua, determinan el efecto que tienen los sólidos en la transferencia de calor durante el secado por aspersion.

2.- Hipótesis estadística:

- Hipótesis nula

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 \quad \rho_1 = \rho_2 = \rho_3$$

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_n$$

$(\alpha, \beta)_{1-n}$ en todas las combinaciones

Nota: α representa las posiciones axiales

β representa las posiciones radiales

ρ representa el numero de repeticiones para cada ensayo

- Hipótesis alterna

No todas las α son iguales a cero

No todas las β son iguales a cero

No todas las ρ son iguales a cero

Los análisis estadísticos a realizar son:

-Coeficiente de variación

-Factorial

-Bloques aleatorios

e) Procedimiento.

Se instaló la estructura de madera dentro del equipo de secado; así como también los siete termopares sobre ésta con sus respectivas conexiones al indicador eléctrico de temperatura. Se preparó una mezcla de leche en polvo y agua al 25% en peso. Se accionó el equipo hasta alcanzar una temperatura del aire de 200°C a la entrada del secador y manteniendo una temperatura a la salida del equipo de 87 a 89°C.

Las mediciones de temperatura de T_{bs} y T_w se realizaron en cada una de las posiciones radiales y posiciones axiales con los diferentes niveles de variación; a partir de estos datos se realizaron las mediciones de humedad relativa y humedad absoluta en la carta psicrométrica. Con estos datos obtenidos se realizó un análisis comparativo con los resultados obtenidos durante la evaporación del agua.

Las condiciones de operación fueron las siguientes:

- T_{bs} del aire inicial = 26°C
- T_w del aire inicial = 21°C
- Temperatura de la alimentación = 20°C
- Gasto volumétrico = 10.8lt/hr (igual al flujo de agua)
- Velocidad del disco centrífugo = 25416.3rpm
- Presión atm = 585mmHg
- Amperaje inicial = 10A

2.3.4. OBJETIVO PARTICULAR 3.

Determinación de una ecuación empírica entre los números adimensionales Nusselt y Reynolds para la predicción de transferencia de calor durante el secado por aspersión.

a) Variables

De respuesta: Ecuaciones empíricas entre el número de Nusselt y el

número de Reynolds.

b) Tratamientos.

-Posición radial: 6 niveles cada 6cm sobre el cilindro

-Posición axial: 3 niveles cada 10cm sobre el cilindro

-Posición angular: 2 niveles 45 y 60°

c) Hipótesis.

1.- Hipótesis de trabajo:

A partir de las ecuaciones empíricas entre los números adimensionales es posible obtener una expresión representativa en el proceso de secado por aspersión durante la transferencia de calor.

d) Procedimiento.

Con los datos obtenidos en las dos primeras etapas experimentales, se realizaron los gráficos correspondientes entre el número de Nusselt y el número de Reynolds, para encontrar las ecuaciones empíricas de predicción de transferencia de calor.

III. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Este capítulo ha sido dividido en subcapítulos a fin de dar a conocer los resultados de manera conjunta de la evaporación de agua y del secado por aspersión de leche al 25 % en peso. En cada uno de los subcapítulos se realizó un análisis comparativo entre los dos fluidos de estudio. Las figuras que se presentan son las más representativas de este proceso.

3.1 VALIDACION DE TERMOPARES.

Cada uno de los siete termopares empleados en las fases experimentales fueron sometidos a los tratamientos estadísticos que se mencionaron en la sección 2.1.3 del segundo capítulo. En los siguientes cuadros se resumen los resultados de los análisis realizados.

a) Repetibilidad.

Fuente de variación	F _{0.05} (Bib.)	F _{calc.} para cada termopar						
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇
Tratamientos								
- Agua	3.63	3.43	3.40	2.85	3.06	3.41	2.56	3.00
- Aceite		3.39	4.00	3.01	2.26	3.21	2.16	3.16
Bloques								
- Agua	2.59	45.6	38.9	43.2	25.6	38.4	51.2	36.0
- Aceite		35.6	21.3	53.1	50.0	31.8	28.3	56.1

Cuadro 18. Resultados de repetibilidad de termopares.

Para obtener estos resultados se realizó un análisis de bloques aleatorizados a cada uno de los termopares y el análisis estadístico muestra que todos los termopares son repetibles en ambos medios, ya que la F obtenida en los tratamientos, no rebasa la F de tablas a un nivel de significancia de 0.05%. Los termopares más

repetibles son el 6, 3 y 4 en orden decreciente.

b) Linealidad.

Todos los termopares fueron sometidos a un análisis de mínimos cuadrados para linealizar las curvas obtenidas y obtener la regresión lineal, a fin de obtener la mayor correlación.

Termopar	Regresión lineal	
	Agua	Acetle
1	-0.995	-0.997
2	-0.998	-0.998
3	-0.997	-0.997
4	-0.998	-0.998
5	-0.998	-0.998
6	-0.997	-0.998
7	-0.989	-0.994

Cuadro 19. Resultados de linealidad de termopares.

En el cuadro 19 se muestra la correlación lineal de cada uno de los termopares, demostrando que todos ellos cuentan con la característica de ser lineales por tener una correlación mayor a 0.99.

c) Reproducibilidad.

Este análisis se realizó de manera conjunta entre todos los termopares.

Medio	F _{0.05}	F _{calc.}
Agua	2.92	0.05
Acetle	4.28	1.21
Agua-Acetle	18.5	12.01

Cuadro 20. Resultados de Reproducibilidad de termopares.

En el cuadro 20 se observa que todos los termopares son reproducibles en agua ya que la F a un nivel de significancia de 0.05% es mayor a la F calculada, lo que indica que todos los termopares darán un mismo valor en la medición de temperatura en este medio.

A partir del análisis realizado, se observa que en el caso del aceite la F calculada es menor a la F obtenida en tablas al mismo nivel de significancia, por ello, todos los termopares son reproducibles en este medio.

En el caso de la reproducibilidad en ambos medios, todos los termopares cuentan con esta característica, ya que la F calculada menor a la F obtenida en tablas, por ello se obtienen datos de temperatura iguales en todos los termopares cuando se encuentran en cualquier medio.

d) Exactitud.

Para realizar éste análisis se tomó uno de los termopares como patrón para simplificar los cálculos y se empleó el termopar número 6, ya que es el más repetible. Las características son: (media) $\mu_0 = 60.04$ y (desviación estandar) $s = 0.21$.

Comparación.	Característica.	Termopar					
		1	2	3	4	5	7
	μ	60.3	60.4	60.5	60.3	60.3	61.0
	s	0.23	0.26	0.30	0.25	0.20	0.62
Primera	t_{calc}	0.31	1.06	1.55	0.62	0.77	1.80
	$t_{0.05}$	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89
Segunda	t_{calc}	1.05	1.71	1.66	1.54	1.72	1.58
	$t_{0.05}$	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73
Tercera	t_{calc}	1.62	1.63	1.65	1.68	1.62	1.61
	$t_{0.05}$	20	19	20	18	20	19
		+1.7	+1.7	+1.7	+1.7	+1.7	+1.7

Cuadro 21 Resultados de exactitud de termopares.

En el cuadro 21 se resumen los resultados del análisis de exactitud de termopares; en la primera comparación no existe diferencia significativa, por ello la media de cada termopar (\bar{x}), es una estimación de la media del termopar patrón (M_0) y se aprueba la hipótesis de que todas las $M = M_0$.

En la segunda comparación se aprueba que las medias de los termopares (M) son iguales a la del termopar patrón, así como, cada una de las desviaciones estandar de cada termopar con la del patrón, lo que indica que si se modifican los termopares podría cambiar la media experimental (μ_0), pero no el error experimental (σ).

En la tercera comparación se observa que los resultados no son significativos en cuanto a la comparación de la t calculada y la t de tablas, ésto nos indica que si otro operador realiza la experimentación empleando los termopares, posiblemente cambiaría el error de cada ensayo; se prueba la hipótesis que se refiere a que las medias son iguales. Por lo tanto los termopares son exactos.

Cumpliendo con los análisis propuestos podemos concluir que todos los termopares son confiables y precisos para la medición de temperaturas dentro del equipo Niro Atomizer.

3.2. PATRONES DE FLUJO.

Para realizar el análisis de los patrones de flujo se ha dividido este subcapítulo, a fin de tratar cada uno de los perfiles por separado, realizando un análisis comparativo entre los dos fluidos de estudio, leche y agua, respectivamente.

3.2.1 PERFIL DE VELOCIDAD DE AIRE.

El perfil de velocidades es parte del diseño del equipo empleado para realizar esta investigación, es por ello, que resulta el mismo para cualquier fluido en estudio, es decir, que

manifiesta el mismo patron de flujo cuando se evapora agua o cuando se realiza el secado de leche. Como se hizo mención en la sección 1.1.5.1 del primer capítulo, se omitió la introducción de alimentación durante la medición de presiones estática y dinámica para evitar la coalescencia entre las partículas que ocasionarían errores en la medición.

A partir de los datos obtenidos de presiones durante la etapa experimental, se realizó el cálculo de la velocidad puntual con ayuda de la expresión 1.21; posteriormente se realizó un análisis factorial fraccionario en donde se involucran las cuatro variables en estudio.

Fuente de variación	F cal.	F _{0.05K}
Repeticiones	2.71	3.23
Efectos principales		
A	3.47	2.84
B	3.81	3.23
C	4.01	2.84
D	19.75	3.23
Interacción con 2 factores		
AB	4.31	2.34
AC	3.87	2.12
AD	11.72	2.34
BC	2.96	2.34
BD	13.47	2.61
CD	12.31	2.34
Interacción con 3 factores		
ABC	2.31	1.84
ABD	8.71	2.00
BCD	6.96	2.00
Interacción con 4 factores		
ABCD	7.41	1.69

Cuadro 22. Análisis factorial fraccionario de perfil de velocidades

Para simplificar el análisis estadístico se tomaron los valores de la velocidad de los niveles mínimos, medios y máximos, quedando de la siguiente manera:

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

- Posición radial: 4 niveles, 1, 3, 5 y 6 (A)
- Posición axial: 3 niveles, I, III, V (B)
- Posición angular: 4 niveles, 0G, 30G, 60G, 90G. (C)
- Posición de la válvula: 3 niveles 0%, 40%, 80% (D)

El análisis estadístico muestra a través de la F_{calc} el efecto significativo de las cuatro variables sobre el perfil de velocidad de aire, además de los siguientes resultados:

- No existe diferencia significativa en las repeticiones de los ensayos, por lo tanto, son datos confiables.
- Existe un efecto significativo en la interacción de 2, 3 y 4 factores, por lo tanto, tienen influencia sobre el perfil de velocidad de aire.
- Todas las variables a diferentes niveles ejercen un efecto significativo sobre la velocidad puntual del aire, pero la abertura de la válvula tiene un efecto mayor, ya que, aumenta la turbulencia dentro del equipo.

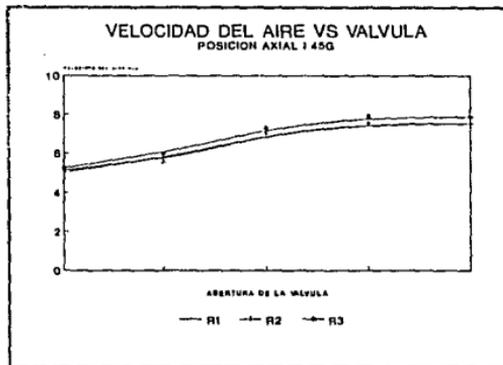


Figura 10. Velocidad puntual del aire en cada posición radial a diferentes aberturas de la válvula.

La figura 10 muestra el perfil que sigue la velocidad del aire en relación a la abertura de la válvula y se observa que al incrementar esta abertura, la velocidad del aire va adquiriendo un valor mayor, esto se debe a que el ventilador del equipo aumenta la extracción del flujo de aire al exterior.

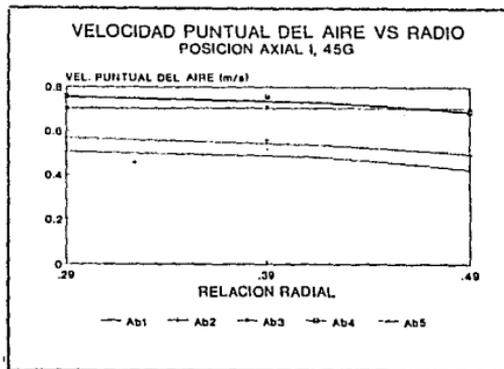


Figura 11 Velocidad puntual del aire en cada abertura de la válvula a diferentes posiciones radiales.

El comportamiento que adquiere el perfil en la figura 11 respecto a cada una de las aberturas de la válvula es el mismo, por esta razón en la continuación del análisis de resultados se omitió esta variable y el estudio se enfocó a las tres restantes.

Para realizar el análisis de las variables, se escogió la figura más representativa que involucra a las zonas radial, axial, y angular. La figura 12 muestra el comportamiento que sigue el perfil del aire en la zona radial evaluado al 26% de la altura del cilindro en cada una de las zonas angular.

en la posición radial 3 frente al disco aspersor, a una altura total del cilindro del equipo del 13%, y va disminuyendo sobre la posición radial 1 (29% del radio) a una altura total del 39% o posición axial III, en la zona central del equipo bajo el disco aspersor, no se manifiestan valores de la velocidad del aire a causa de que el perfil del aire forma una espiral.

La zona angular que registra una mayor velocidad son los ángulos de 45 y 60 grados, lo que implica que la espiral toma estas inclinaciones para formar el perfil de aire dentro de la cámara de secado.

Esta zona crítica es en donde se realiza la mayor parte de la evaporación de agua, ya que como se mencionó anteriormente, el movimiento que sigue el aire es importante y tiene un efecto significativo sobre la transferencia de calor a través de las partículas. Esta zona ocupa el 20% del volumen total del cilindro del equipo, el resto del volumen es para terminar la desecación y para transportar el producto hacia el exterior.

Comparando los resultados obtenidos durante la experimentación y los que menciona la bibliografía acerca de la zona en donde el perfil tiene un mejor desarrollo, en ambos se obtiene que se realiza hasta el 50% del radio total de un equipo de secado.

La velocidad del aire tiene gran influencia sobre la gota atomizada, ya que a pesar que ésta manifiesta una velocidad terminal decaída libre de acuerdo a la Ley de Stokes, al tener contacto con la corriente de aire esta velocidad terminal es dominada por la velocidad del aire y el valor de la velocidad terminal es mínima que puede ser despreciada; además las partículas siguen la corriente de aire y por lo tanto el mismo comportamiento, por esta razón se infiere que la velocidad de la partícula es la velocidad del aire.

3.2.2 PERFIL DE TEMPERATURAS.

a) Temperatura de bulbo seco (TBS).

A partir de los datos obtenidos durante la experimentación se realizaron análisis factoriales de cada uno de los fluidos en estudio y los resultados se resumen en el cuadro 23.

FUENTE DE VARIACION	F calculada		F 0.05
	Agua	Leche	
REPETICION	4.56	3.50	5.10
EFFECTOS PRINCIPALES			
A	526.80	638.42	4.31
D	237.19	112.29	3.51
INTERACCION	105.64	100.64	2.52

Cuadro 23. Análisis factorial de TBS

El cuadro 23 muestra que no existe diferencia significativa en las repeticiones de cada uno de los ensayos, por lo tanto, los datos son confiables y pueden ser empleados para los cálculos posteriores. Los efectos principales que son las posiciones radiales y axiales son de carácter muy significativo, así como también, la interacción de los dos efectos sobre la temperatura de bulbo seco.

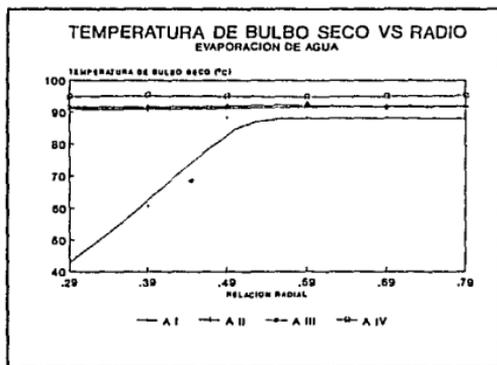


Figura 14. Perfil de TBS en zona radial durante la evaporación de agua.

La figura 14 muestra el perfil de temperaturas de bulbo seco que se obtuvo durante la evaporación y se observa que la posición axial I es la más irregular, es en donde existe un mayor gradiente de temperatura a lo largo del radio, la temperatura varía desde los 43°C hasta los 87°C; esto es a causa de que esta zona axial se encuentra frente al disco aspersor y es en donde la mayor parte del flujo de agua es evaporada, en el 13% del radio del equipo la temperatura de bulbo seco es igual a la temperatura de bulbo húmedo ya que en este punto el aire se encuentra al 100% de la saturación.

El ascenso de la temperatura en esta posición axial, se debe a que por influencia de los alrededores en donde el aire se encuentra a una mayor temperatura, este cede calor a la zona. A partir del 26% de la altura del equipo (posición axial II), la temperatura se mantiene constante en el resto de la altura del equipo con un valor mayor al de las zonas cercanas del disco aspersor, esto se debe a que la evaporación no es de la misma magnitud que en las primeras zonas, por ello el gas secante no cede la misma cantidad de calor.

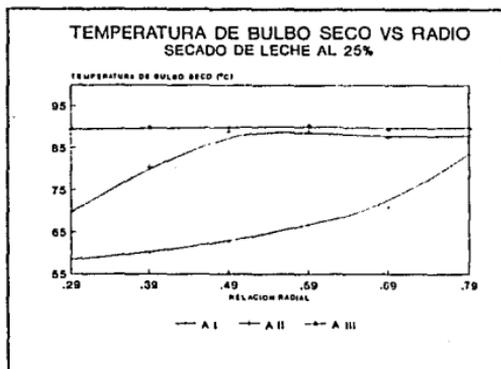


Figura 15. Perfil de TBS en zona radial durante el secado de leche.

En la figura 15 en donde se muestra el perfil que sigue la temperatura de bulbo seco durante el secado por aspersión de leche se observa que este perfil manifiesta el mismo comportamiento que se observa en la figura 14, pero por el efecto de los sólidos la evaporación del líquido resulta un poco mas complicada, a causa de las membranas que mantienen al líquido dentro de la partícula. La transferencia de calor del aire a la gota se enfrenta a esta barreras propias del producto ocasionando que el tiempo de secado se incremente para lograr la eliminación del agua libre y ligada, por esta razón en la figura 15 existe un gradiente de temperatura que se marca desde el 13% de la altura del cilindro del equipo hasta el 26%.

En las figuras 16 y 17 se muestra el perfil de la temperatura de bulbo seco a lo largo de la altura del cilindro durante la evaporación de agua y el secado de leche.

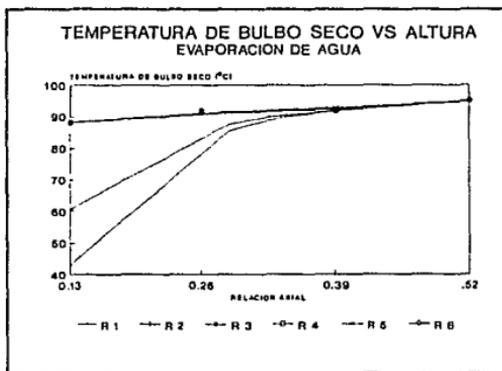


Figura 16. Perfil de TBS en Zona axial durante la evaporación de agua.

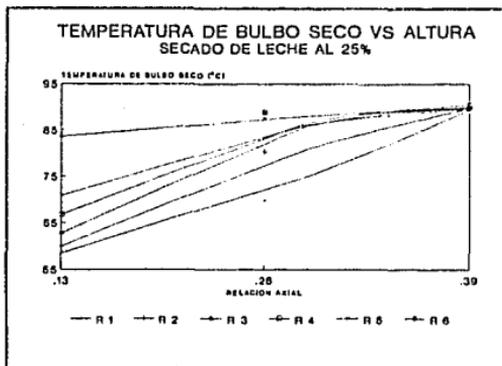


Figura 17. Perfil de TBS en zona axial durante el secado de leche.

Las tres primeras posiciones axiales muestran una variación mas significativa de la temperatura de bulbo seco tanto para el secado de leche como para la evaporación de agua, las diferencias entre los dos fluidos se expresan de manera concreta en el cuadro 24.

ZONA		EVAP. DE AGUA	SECADO DE LECHE	
AXIAL	Relación			
	Altura			
	0.13	67 cm	$r/R=0.29$ a 0.49	$r/R=0.29$ a 0.79
	0.26	57 cm	cte.	$r/R=0.29$ a 0.49
	0.39	47 cm	cte.	cte.
0.52	37 cm	cte.	cte.	
RADIAL	Relación			
	Radio			
	0.29	13.5 cm	$a/A=0.13$ a 0.39	$a/A=0.13$ a 0.52
	0.39	19.5 cm	$a/A=0.13$ a 0.39	$a/A=0.13$ a 0.52
	0.49	25.5 cm	cte.	$a/A=0.13$ a 0.32
	0.59	31.5 cm	cte.	$a/A=0.13$ a 0.32
	0.69	37.5 cm	cte.	$a/A=0.13$ a 0.26
0.79	43.5 cm	cte.	cte.	

Cuadro 24. Cuadro comparativo del desarrollo del perfil de TBS durante la evaporación de agua y el secado de leche.

Como se puede observar, el desarrollo del perfil de la TBS en la zona axial se presenta hasta una relación radial de 0.49 y 0.79 para agua y leche respectivamente; mientras que en la zona radial, para la evaporación de agua, hasta una relación axial de 0.39 en las dos primeras relaciones radiales disminuyendo gradualmente hasta la relación axial de 0.13, para el caso del secado de leche desde una relación axial de 0.52 en las dos primeras relaciones radiales, disminuyendo hasta una relación axial de 0.29.

Esto demuestra que en base al perfil de TBS que sigue la evaporación de agua, indica que la eliminación de agua libre, a las condiciones de operación en que se realizó la experimentación dentro del secador N. A. ocurre cuando la gota atomizada ha recorrido el 49% de la distancia radial del equipo y el 39% de la distancia axial del mismo, tomando en cuenta que su recorrido inicia al 29% de la distancia radial y al 13% de la distancia axial.

El recorrido de la gota forma una zona crítica de secado en la cual se evapora la mayor parte de agua.

En el caso del secado de leche, la eliminación de agua a las mismas condiciones de operación ocurre cuando la gota atomizada ha recorrido el 79% del radio total del equipo y el 52% de la altura del cilindro, tomando en cuenta que su recorrido también lo inicia como en el caso anterior.

b) Temperatura de bulbo húmedo (TW).

A partir de los datos obtenidos de TW durante la experimentación, se realizaron análisis factoriales en cada uno de los fluidos en estudio y los resultados se resumen en los siguientes cuadros.

El cuadro 25 muestran que no existe diferencia significativa en las repeticiones de los ensayos realizados, por lo que los datos son confiables.

FUENTE DE VARIACION	F calculada		F 0.05
	Agua	Leche	
REPETICION	0.001	0.001	5.18
EFFECTOS PRINCIPALES			
A	0.013	0.015	4.31
B	0.002	0.004	3.51
INTERACCION	0.003	0.004	2.52

Cuadro 25. Análisis Factorial de TW durante la evaporación de agua.

Se observa también que el efecto que ejerce en cada una de las posiciones radiales y axiales, no es significativo, de igual manera el efecto de la interacción de ambas variables.

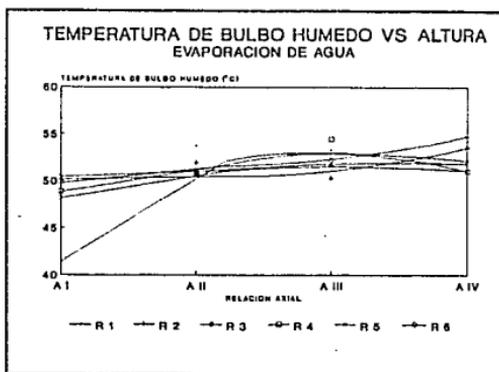


Figura 18. Perfil de TW en zona axial durante la evaporación de agua.

El análisis indica que la temperatura de bulbo húmedo no varía dentro de la cámara de secado, o sea, que se mantiene constante en cada uno de los puntos radiales y axiales durante su recorrido, iniciando en la atomización del fluido, posteriormente la

eliminación de agua y finalmente el desalojo al exterior. Esta teoría se apoya con las figuras 18 y 19, las cuales muestran un perfil prácticamente constante. La temperatura de la gota adquiere el valor de esta temperatura de bulbo húmedo del aire ya que por la corriente de aire y el calor de este la partícula se ve influenciada.

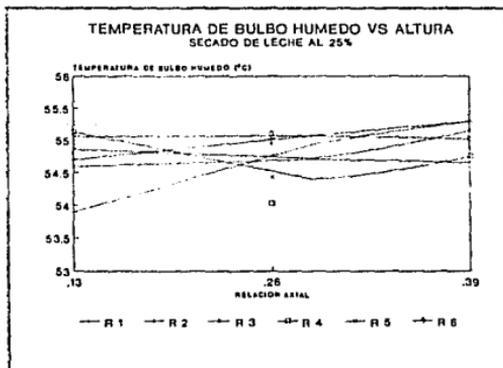


Figura 19. Perfil de TW en zona axial durante el secado de leche.

Durante la evaporación de agua la temperatura de bulbo húmedo varía entre 50 y 53°C, obteniendo un valor promedio de 51.5°C y en el caso del secado de leche, esta temperatura varía entre 54 y 55°C obteniendo un promedio de 54.5°C.

Como se puede observar, existe una diferencia en las TW promedios de los fluidos, la cual se asume al efecto del aire sobre la evaporación en la superficie del sólido el proceso, y realizando un pequeño análisis de bloques aleatorios, podemos observar en el cuadro 26 que la diferencia es significativa a un nivel de significancia de 0.05 y por lo tanto no se consideran iguales las TW para cada fluido.

FUENTE DE VARIACION	F CAL	F 0.05
POSICION RADIAL	7.71	5.05
FLUIDOS	19.28	6.61

Cuadro 26. Análisis de bloques de TW de los fluidos en estudio.

3.2.3 PERFIL DE HUMEDADES.

a) Humedad relativa (HR).

A partir de las temperaturas obtenidas durante la experimentación se localizaron cada una de las humedades de las diferentes zonas en la carta psicrométrica que se encuentra en la figura 8.

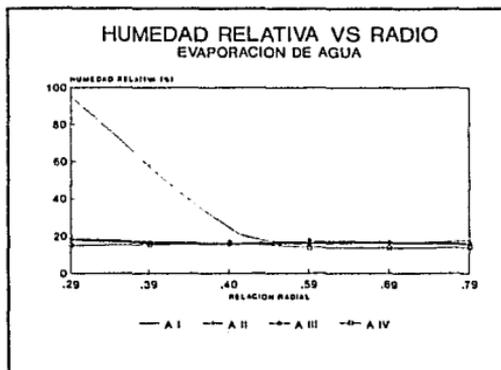


Figura 20. Perfil de HR en zona radial durante la evaporación de agua.

En cada una de las zonas axiales y radiales existe un

efecto significativo de la temperatura de bulbo seco, manifestándose de igual manera en la humedad relativa, esto es posible observarse en las figuras 20 y 21 las cuales muestran el perfil de la humedad relativa en la zona radial durante el proceso de secado de los dos fluidos en estudio.

La figura 20 muestra que la humedad relativa adquiere un máximo valor en la zona axial I y comparandola con la figura 14 se observa que esta posición también es la mas irregular y es en donde existe el mayor gradiente de humedades, además se demuestra que cerca del disco aspensor el aire se encuentra saturado, ya que la humedad relativa adquiere un valor cercano al 100% indicando que es la zona en donde se esta eliminando la mayor cantidad de agua.

Esta gráfica de humedad relativa es igual ala figura 14 de temperatura de bulbo seco, las posiciones en donde se localiza la zona crítica es igual para ambos casos, la única diferencia es el signo de la pendiente de las curvas.

En las posiciones axiales II a la IV la humedad se mantiene constante, al no existir una mayor evaporación.

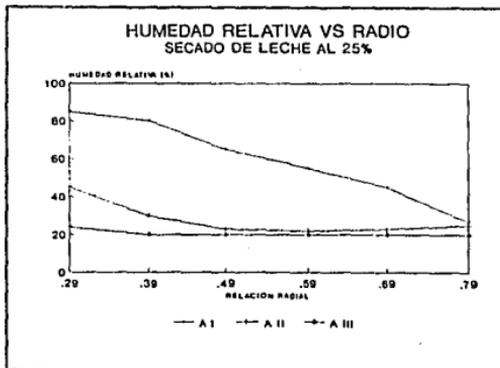


Figura 21. Perfil de HR en zona radial durante el secado de leche.

La figura 21 tiene una similitud con la figura 15, de igual forma que las que se mencionaron anteriormente. También las posiciones axiales I y II manifiestan el mejor desarrollo de esta humedad y la causa también es referida al efecto de los sólidos sobre la transferencia de calor del gas secante.

En las figuras 23 y 24 se muestra el perfil de HR en la zona axial, durante la evaporación de agua y el secado de leche.

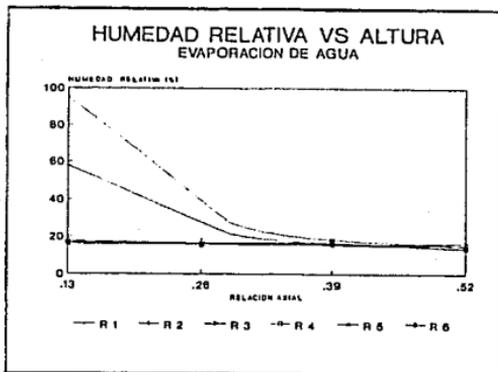


Figura 22. Perfil de HR en zona axial durante la evaporación de agua.

El perfil de la humedad relativa en función de la altura del equipo en cada una de estas figuras manifiesta el mismo comportamiento que sigue el de la temperatura de bulbo seco de las figuras 16 y 17, con la diferencia de que la pendiente de las curvas es positiva para TBS y negativa para HR, guardando una proporción totalmente inversa como lo muestran las figuras 22 y 23.

También puede observarse que cerca del disco aspersor existe una mayor humedad que en el resto del equipo, esto a causa de que la mayor parte de la evaporación de líquido se realiza en esa zona, en

donde el aire caliente cede la mayor parte de su calor a la gota asperjada.

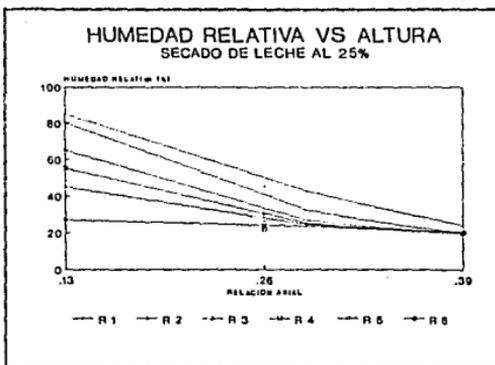


Figura 23. Perfil de HR en zona axial durante el secado de leche.

b) Humedad absoluta (Y')

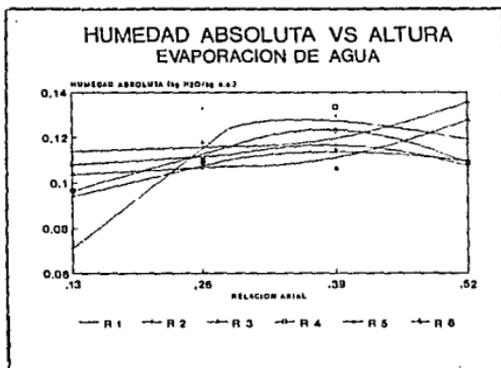


Figura 24. Perfil de Y' en zona axial durante la evaporación de agua.

En el caso de la humedad absoluta podemos observar que las figuras 24 y 25 son una representación inversa del perfil de temperaturas de bulbo húmedo que se encuentran en las figuras 18 y 19, debido a que también existe una relación inversa entre la TW y la Y', demostrando de esta manera que la humedad absoluta al igual que la temperatura de bulbo húmedo es constante dentro de la cámara de secado tanto para agua como para leche. En el primer caso la Y' varía entre 0.1 y 0.12kg H₂O/kg a.s. con un promedio de 0.015 kgH₂O/kg a.s, para el segundo caso Y' varía entre 0.1375 y 0.1475kg H₂O/kg obteniendo un promedio de 0.1425kg H₂O/kg.

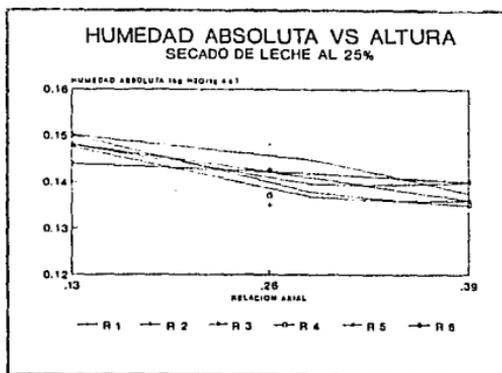


Figura 25. Perfil de Y' en zona axial durante el secado de leche.

La humedad absoluta es mayor durante la evaporación de agua, ya que durante la transferencia de calor del aire caliente a la gota se elimina todo el líquido de la alimentación que es el 100%, o sea que arrastra todo el flujo másico que tiene contacto con el aire.

3.3 ANALISIS TERMICO.

Para realizar este análisis térmico, se evaluó inicialmente el diámetro de la gota atomizada para cada uno de los fluidos en

estudio en base a las condiciones de operación y a partir de la expresión 1.18.

Variables	Unidades (SI)	Agua	Leche
W	gr/s	3.832	3.933
r	cm	6.00	6.00
G	gr/cm s	0.049	0.051
ρ_l	gr/cm ³	1.00	1.027
N	rpm	423.60	423.60
$\mu \cdot 10^{-2}$	poise	0.925	0.15
σ	Dina/cm	72.75	68.00
L_w	cm	76.80	76.80

Cuadro 27. Datos para el cálculo del diámetro de la gota

Diámetro máximo

- Gota de agua 113 μm
- Gota de leche 195 μm

Como se puede observar una variación en las propiedades del fluido varia el diámetro de la partícula, por esta causa el agua forma gotas mas pequeñas que la suspensión de leche, y son pequeñas en un porcentaje del 43% con respecto a las segundas.

Por esta razón el agua forma una mayor cantidad de gotas, obteniendo una area de transferencia mayor a la de la leche, el cuadro 28 muestra estas características.

Característica	Agua	Leche
Area/gota $\times 10^{-12}$ (m ²)	354.99	612.61
Volumen/gota $\times 10^{-12}$ (m ³)	0.75	3.82
Gotas/min	152 164 331	29 610 405
Area total $\times 10^{-2}$ (m ² /min)	5.40	1.81

Cuadro 28. Dimensiones de la gota

A partir de los datos obtenidos durante la experimentación se realizó el cálculo de la velocidad de secado empleando la expresión 1.06 y la secuencia de cálculo que se encuentra en el cuadro 15. Cabe mencionar que se tomaron algunas consideraciones en el cálculo de esta velocidad los cuales se mencionan a continuación:

- El diferencial de temperatura (ΔT) que involucra la diferencia de temperaturas entre la de bulbo húmedo y bulbo seco, se calculó de manera puntual, para cada zona axial radial y angular.

$$\Delta T = T_{bs} - T_w \quad (\text{Ec. 3.01}).$$

- El valor del calor latente de vaporización (λ) se determinó para cada temperatura de bulbo seco, considerando que la zona angular mantiene una misma temperatura en cada uno de los puntos radiales y axiales, ya que las mediciones se realizaron en el mismo lugar.
- En el cálculo del coeficiente convectivo de transferencia de calor (h), el diferencial de entalpías (ΔH) para evaluar la cantidad de calor fue tomada como un valor puntual para cada una de las zonas radiales y axiales.

$$\Delta H = H_{\text{puntual}} \quad (\text{Ec. 3.02})$$

Los resultados obtenidos de la velocidad de secado se resumen en las siguientes figuras, las cuales son las mas representativas de este proceso. En todas las figuras el ángulo de 45 grados muestra un valor ligeramente mayor al de los demás seguido por el ángulo de 60°, además de que todos los ángulos tienen el mismo comportamiento.

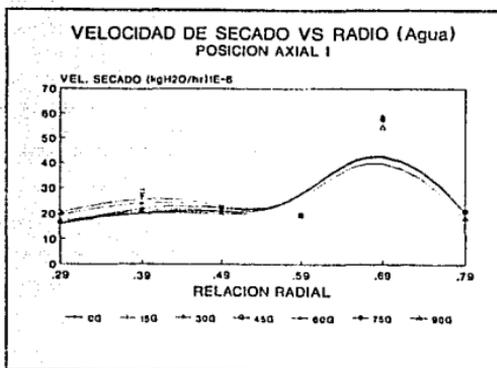


Figura 26. Velocidad de secado en zona axial I, a diferentes posiciones angulares, durante la evaporación de agua.

En las figuras 26 y 27 se esquematiza el perfil de la velocidad de secado para cada uno de los fluidos en estudio.

En el caso de la evaporación de agua, la velocidad de secado tiene una mayor magnitud desde el 59% del radio total hasta el 79% de éste, esto se debe a que el diferencial de temperatura es mayor en esta zona, a diferencia de la distancia radial mas cercana al disco aspersor la cual manifiesta una menor velocidad, pero esto no indica que no se lleve a cabo la mayor parte de la evaporación, como se ha estado observando en los análisis anteriores, sino que, existe una mayor turbulencia por efecto del perfil que sigue la velocidad del aire y de la saturación de este por la presencia de una gran masa de agua libre.

Durante el secado de leche al 25% se observa que en esta primer zona axial de la figura 27 la velocidad de secado es mayor cerca del disco aspersor desde el 29 hasta el 49% del radio del cilindro del equipo.

Puede observarse claramente que a medida que la gota realiza su recorrido del centro a la pared, se va evaporando el agua libre desde una mayor a una menor cantidad.

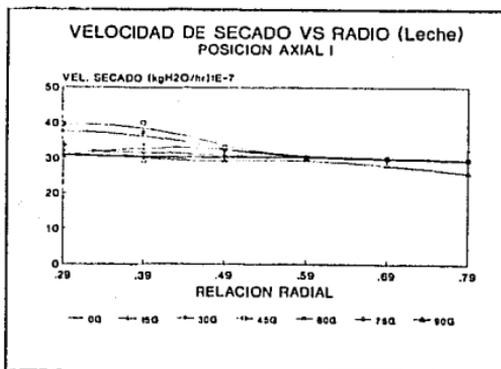


Figura 27. Velocidad de secado en zona axial I, a diferentes posiciones angulares, durante el secado de leche.

Existe una velocidad de secado durante la evaporación de agua que es diez veces mayor a la que se presenta durante el secado de leche, esto a causa de que existe una mejor transferencia de calor en la evaporación de agua, ya que no existen barreras a la eliminación de humedad como es el caso de las capas que presentan las partículas de la leche.

En las figuras 28 y 29 se muestra el perfil de la velocidad de secado en la zona axial II para cada una de las posiciones angulares de cada uno de los fluidos.

En la figura 29 la velocidad de secado durante la evaporación de agua es mayor cerca del centro y disminuye a medida que la gota se acerca a la pared, mostrando que en el centro existe una mayor evaporación que cerca de las paredes.

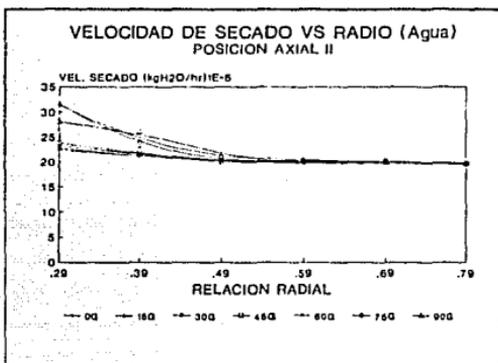


Figura 28. Velocidad de secado en zona axial II, a diferentes posiciones angulares, durante la evaporación de agua.

De igual manera en la figura 29, la velocidad de evaporación durante el secado de leche sigue el mismo comportamiento que durante la evaporación de agua.

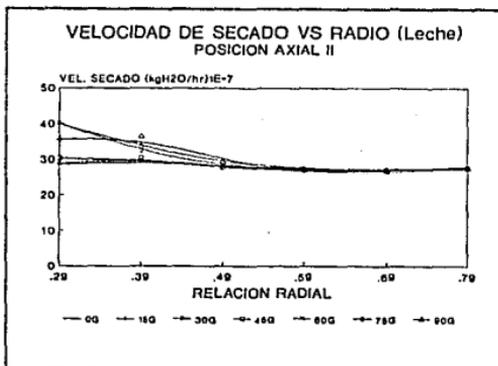


Figura 29. Velocidad de secado en zona axial II, a diferentes posiciones angulares durante el secado de leche.

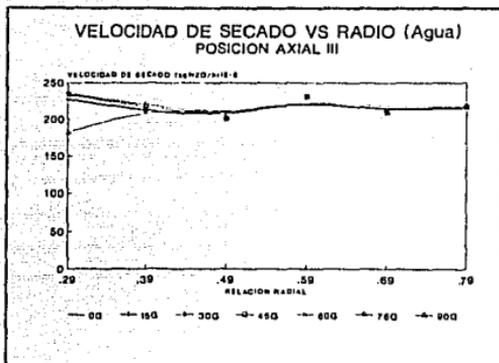


Figura 30. Velocidad de secado en zona axial III, a diferentes posiciones angulares, durante la evaporación de agua.

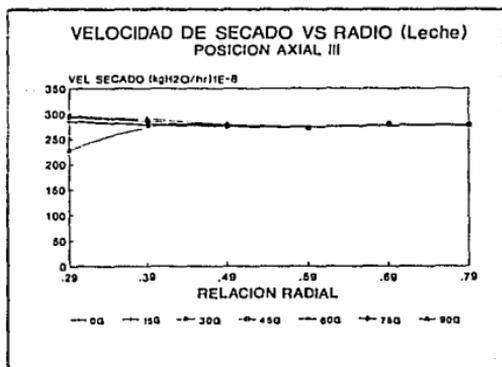


Figura 31. Velocidad de secado en zona axial III, a diferentes posiciones angulares, durante el secado de leche.

En las figuras 30 y 31 se observa que el perfil de la velocidad de secado también sigue un comportamiento similar durante el proceso de cada uno de los fluidos, además de que el perfil se mantiene casi constante, esto se debe a que en esta zona la partícula ha eliminado la mayor parte de su humedad.

3.4 ECUACIONES EMPÍRICAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

En esta parte del capítulo se llegó al cálculo de las ecuaciones empíricas de transferencia de calor. Primeramente se realizó el cálculo de los números adimensionales Reynolds y Nusselt a partir de las secuencias de cálculo que se encuentran en los cuadros 16 y 17 respectivamente empleando los datos obtenidos durante la experimentación. Antes de mencionar las ecuaciones que se obtuvieron, se muestra el comportamiento que siguen cada uno de estos números adimensionales en las diferentes zonas axiales, radiales.

3.4.1 NUMERO DE REYNOLDS.

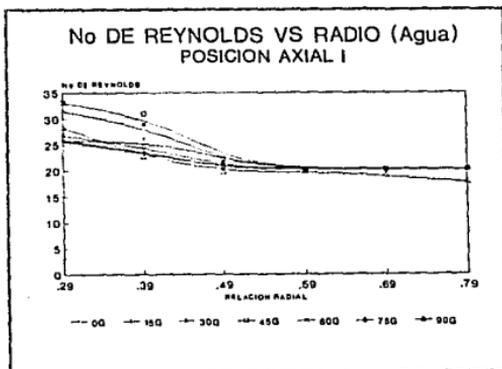


Figura 32. No. de Reynolds en zona axial I, durante la evaporación de agua.

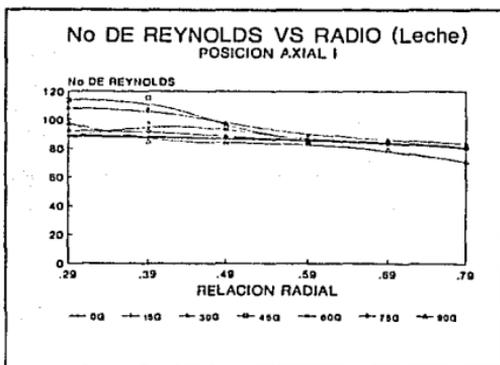


Figura 33. No. de Reynolds en zona axial I, durante el secado de leche.

Las figuras 32 y 33 son las gráficas mas representativas del proceso de secado para cada uno de los dos fluidos, ya que en las zonas axiales II y III se manifiesta el mismo comportamiento; En la zona axial II y III hay una disminución del No. de Reynolds de diez veces, comparada con la zona axial I. Comparando ambos fluidos, el No. de Reynolds es diez veces mayor durante el secado de leche que durante la evaporación de agua; esto se debe a que las partículas de leche ejercen una mayor turbulencia a causa de la coalescencia entre las partículas sólidas.

El No. de Reynolds en cada uno de los fluidos es mayor en un 20% en la zona axial I que en el resto de las demás, ya que es en esta en donde el aire entra con una mayor magnitud a la cámara de secado como se puede observar en la figura 12. Este comportamiento ocurre de igual manera en la primer zona radial.

El tipo de flujo que se da en los dos fluidos es de tipo semi-turbulento, de acuerdo a los valores del cuadro 5.

3.4.2. NUMERO DE NUSSELT.

En las figuras 34 y 35 se muestra el comportamiento del No. de Nusselt para los dos fluidos en estudio.

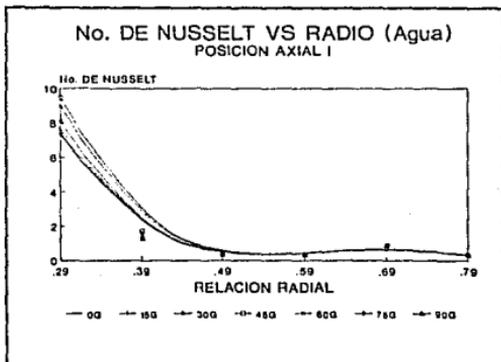


Figura 34. No. de Nusselt en posición axial I durante la evaporación de agua

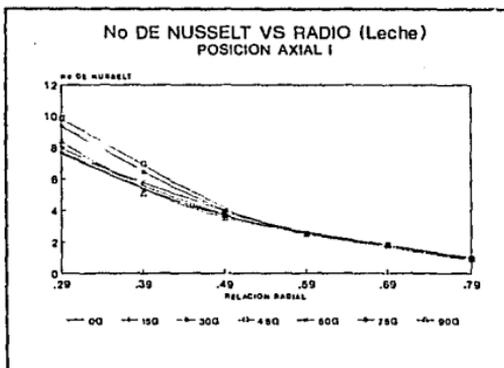


Figura 35. No. de Nusselt en zona axial I, durante el secado de leche.

Las figuras 34 y 35 son las más representativas del proceso de los dos fluidos, ya que también al igual que en el No. de Reynolds, en las zonas axiales II y III se tiene un comportamiento semejante a la zona I.

El valor de este número adimensional durante la evaporación de agua es 15 veces menor en las zonas axiales II y III comparadas con la I. En el caso del secado de leche en la posición axial II el Nusselt disminuye 10 veces de la posición I y del valor de la posición II a la III disminuye al 75%. Comparando ambos fluidos en la primera posición axial el número de Nusselt es prácticamente igual; durante el secado de leche la posición II es 10 veces mayor al de la misma posición durante la evaporación de leche, y 13 veces mayor en la posición III.

El número de Nusselt tiene un mayor valor cerca del disco aspersor que en el resto de la cámara, ya que existe una mayor transferencia del aire caliente a la gota asperjada y es mayor durante el secado de leche a causa de la turbulencia y choque de las partículas.

3.4.3. OBTENCION DE UNA ECUACION EMPIRICA.

Para evaluar la ecuación empírica que representa a la transferencia de calor en cada una de las zonas de estudio se partió de la relación que existe entre los números adimensionales.

$$Nu = F (Re, Pr) \quad (\text{Ec. 3.03})$$

De acuerdo a los estudios anteriores, en la sección 1.1.3.2 del primer capítulo se observa que la relación existente entre el número de Nusselt y el número de Reynolds es de tipo exponencial como lo muestra la expresión 1.17.

$$Nu = 2 + K_z Re^x Pr^y \quad (\text{Ec. 1.17})$$

Donde: $x = 0.5$ $y = 0.3$

En base a estas referencias se analizaron cada una de las curvas experimentales y se obtuvo que la relación que existe entre los números adimensionales es mas significativa entre el Nusselt y el Reynolds, esto se atribuye a que durante la experimentación se encontró que el número de Prandalt se comporta de una manera independiente, las variaciones durante el proceso de secado por aspersión del Pr son mínimas, ya que estadísticamente no hay diferencia significativa en cada una de las zonas de estudio, en el caso de poder existir una variación, ésta es tan pequeña que puede ser despreciable puesto que no afecta la correspondencia entre el Nusselt y el Reynolds.

La expresión a la que se llegó fue del tipo de:

$$Nu = e^{(m Re)} * e^{(Ln B)} \quad (Ec. 3.04)$$

Reordenando:

$$Nu = B * e^{(Ln B)} \quad (Ec. 3.05)$$

Donde:

- Nu = Número de Nusselt
- Re = Número de Reynolds
- m = Pendiente de la curva
- B = Ordenada al origen

En las figuras 36 y 37 se muestra la correspondencia que existe entre estos dos números adimensionales. Estas figuras son las mas representativas del proceso y relacionan el número de Reynolds y el número de Nusselt para las diferentes posiciones axiales y radiales, tomando en cuenta solo dos posiciones angulares que fueron las de 45 y 60° respectivamente, ya que como se ha observado a lo largo del análisis son las posiciones angulares más representativas en donde el perfil de aire y velocidad de secado tienen un mejor desarrollo.

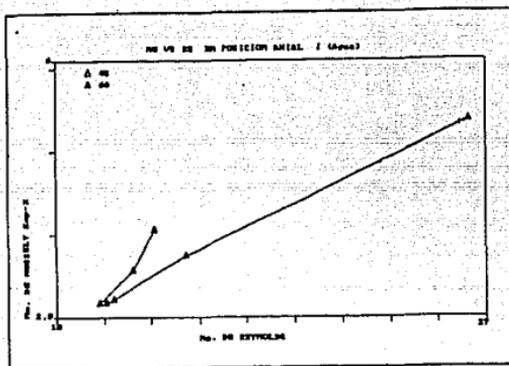


Figura 36. Nusselt VS Reynolds en posición axial I durante la evaporación de agua.

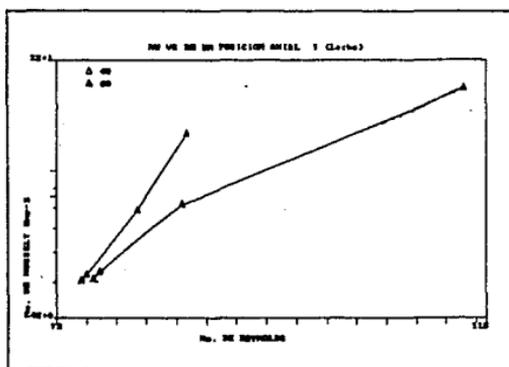


Figura 37. Nusselt VS Reynolds en posición axial I durante el secado de leche.

Los valores para cada una de las variables en las diferentes

zonas radiales y axiales se resumen en los cuadros 29 y 30.

POSICION	EVAPORACION DE AGUA	SECADO DE LECHE
Axial		
I	$Nu = 7.88 e^{(0.21 Re)}$	$Nu = 6.25 e^{(0.05 Re)}$
II	$Nu = 7.09 e^{(0.19 Re)}$	$Nu = 9.52 e^{(0.08 Re)}$
III	$Nu = 5.84 e^{(0.12 Re)}$	$Nu = 4.71 e^{(0.02 Re)}$
Radial		
1	$Nu = 8.19 e^{(0.24 Re)}$	$Nu = 7.97 e^{(0.06 Re)}$
2	$Nu = 6.34 e^{(0.14 Re)}$	$Nu = 7.68 e^{(0.06 Re)}$
3	$Nu = 8.02 e^{(0.19 Re)}$	$Nu = 10.60 e^{(0.10 Re)}$
4	$Nu = 6.17 e^{(0.14 Re)}$	$Nu = 14.25 e^{(0.15 Re)}$
5	$Nu = 5.23 e^{(0.09 Re)}$	$Nu = 12.47 e^{(0.12 Re)}$
6	$Nu = 6.06 e^{(0.13 Re)}$	$Nu = 10.02 e^{(0.09 Re)}$

Cuadro 29 . Ecuaciones empíricas de transferencia de calor evaluada a 45° .

En el análisis para la obtención de cada una de estas ecuaciones empíricas se encontró que el error que presentan en la variación de los datos es menor al 10% ya que las correlaciones de cada una de las curvas es mayor a 0.99, por lo tanto son confiables.

En la expresión 1.17 se observa que existe un valor constante para el número de Nusselt igual a 2 y este se manifiesta cuando el Reynolds es igual a cero, además representa las condiciones iniciales del producto en un estado de flujo estacionario. La aplicación de esta ecuación esta limitada a las siguientes condiciones:

- Es aplicable para un diámetro de partícula teórico en un intervalo de 11.5 a 38.5 μm .

- Aplicación cuando existan Reynolds superiores a 100 y menores a 1000.
- El empleo de la ecuación en un proceso de secado en donde la velocidad de evaporación sea baja.

POSICION	EVAPORACION DE AGUA	SECADO DE LECHE
Axial		
I	$Nu = 8.22 e^{(0.11 Re)}$	$Nu = 6.35 e^{(0.11 Re)}$
II	$Nu = 5.33 e^{(0.13 Re)}$	$Nu = 5.39 e^{(0.10 Re)}$
III	$Nu = 4.89 e^{(0.13 Re)}$	$Nu = 4.89 e^{(0.10 Re)}$
Radial		
1	$Nu = 9.53 e^{(0.14 Re)}$	$Nu = 4.89 e^{(0.08 Re)}$
2	$Nu = 8.39 e^{(0.14 Re)}$	$Nu = 7.63 e^{(0.06 Re)}$
3	$Nu = 4.46 e^{(0.13 Re)}$	$Nu = 6.65 e^{(0.07 Re)}$
4	$Nu = 6.12 e^{(0.13 Re)}$	$Nu = 5.50 e^{(0.10 Re)}$
5	$Nu = 4.65 e^{(0.12 Re)}$	$Nu = 4.30 e^{(0.10 Re)}$
6	$Nu = 5.42 e^{(0.10 Re)}$	$Nu = 3.85 e^{(0.09 Re)}$

Cuadro 10. Ecuaciones empíricas de transferencia de calor evaluada a 60° .

En los cuadros 28 y 29 se observa que las ecuaciones obtenidas a partir de datos experimentales determinan un comportamiento diferente de la correspondencia que marca la expresión 1.17 y las diferencias son las siguientes:

Las partículas que son atomizadas tienen un diámetro mayor que el que refiere la teoría, lo que ocasiona que el área de transferencia sea menor.

Existe un gradiente de temperatura mayor en las zonas

cercanas al disco atomizador, lo que indica que existe una mayor transferencia de calor, por ello todas las ecuaciones adquieren un valor diferente en cada una de las posiciones axiales, radiales y angulares.

En el ángulo de 45° la expresión obtenida representa valores mayores que en el ángulo de 60° , esto se debe a que el perfil de flujo de aire manifiesta un mejor desarrollo en el primer valor angular.

En el caso del secado de leche se observa que las ecuaciones obtenidas presentan valores menores que las que se obtuvieron para la evaporación de agua, esto se debe a que durante la evaporación de agua existe una mayor evaporación en la zona que se ha marcado como la crítica.

La ecuación mas representativa en base a la importancia de la zona crítica de secado es la expresión 3.05.

$$Nu = 7.55 e^{0.2Re} \quad (\text{Ec. 3.05})$$

Esta expresión se obtuvo en base al análisis de los resultados de cada uno de los perfiles, en donde se ha determinado la zona crítica de secado tanto para el secado de leche como para la evaporación de agua, en donde se ha observado que las zonas mas representativas son las posiciones radiales 1 y 2 y la posición axial I.

La aplicación de esta ecuación está limitada al diámetro de la partícula, como se ha observado a lo largo del capítulo el efecto de los sólidos que implican un aumento en el tamaño de la gota asperjada. Los límites se encuentran entre 100 y $200\mu\text{m}$ de diámetro y para un flujo en estado transitorio con un número de Reynolds menor a 120, y para velocidades de secado bajas del orden de $1 \text{ E-}7 \text{ kg H}_2\text{O/hr}$.

La transferencia de calor en términos del coeficiente se manifiesta como una transferencia de tipo convectiva forzada, tomando un valor entre 1 y 25 kcal/hr m^2C durante la evaporación de

agua y de 2 a 17kcal/hr $m^{2}C$ durante el secado de leche. Este coeficiente teóricamente adquiere un valor entre 15 y 172 kcal/hr $m^{2}C$, lo cual indica que es posible determinar el coeficiente a partir de la ecuación empírica obtenida.

La aplicación de los números adimensionales en el diseño de equipo puede realizarse, pero tomando en cuenta las limitaciones que pueda marcar la expresión que se obtuvo a un nivel de planta piloto.

CONCLUSIONES

El perfil de velocidades del aire tiene un mejor desarrollo en la zona radial el perfil se manifiesta hasta el 49% en una distancia radial de 25.5 cm, a una altura total del cilindro del equipo de 67 cm., y va disminuyendo sobre un radio de 13.5 cm a una altura total de 47 cm, en la zona central del equipo bajo el disco aspersor, no se manifiestan valores de la velocidad del aire a causa de que el perfil del aire forma una espiral.

La zona angular que registra una mayor velocidad son los ángulos de 45 y 60 grados, lo que implica que la espiral toma estas inclinaciones para formar el perfil de aire dentro de la cámara de secado.

La velocidad del aire tiene gran influencia sobre la gota atomizada, puesto que la velocidad terminal de la gota es dominada por la corriente de aire, el comportamiento de la gota sigue el que manifiesta la corriente de aire.

El crecimiento del perfil de la TBS a una altura de 67 cm del cilindro se presenta hasta los 25.5 cm y 43.5 cm de radio para agua y leche respectivamente; mientras que a 13.5 cm de radio para la evaporación de agua hasta una altura de 47 cm en las dos primeras distancias radiales disminuyendo gradualmente hasta una altura de 67 cm; para el caso de secado de leche desde una altura de 37 cm en las dos primeras distancias radiales disminuyendo hasta una altura de 47 cm.

El perfil de la humedad relativa tiene un comportamiento igual al de la temperatura de bulbo seco, de igual manera, la humedad absoluta con la temperatura de bulbo húmedo.

En la zona axial I, la velocidad de secado durante la

evaporación de agua tiene una mayor magnitud desde un radio de 31.5 cm hasta los 43.5 cm de éste, esto se debe a que el diferencial de temperatura es mayor en esta zona, a diferencia de la distancia radial mas cercana al disco aspersor la cual manifiesta una menor velocidad, pero esto no indica que no se lleve a cabo la mayor parte de la evaporación, como se ha estado observando en los análisis anteriores, sino que, existe una mayor turbulencia por efecto del perfil que sigue la velocidad del aire y de la saturación de este por la presencia de una gran masa de agua libre.

En el resto de las zonas axiales se obtiene una mayor velocidad de secado en las primeras posiciones radiales, y se mantiene constante a partir de 40% del radio, o sea a 20 cm del centro a la pared.

El tipo de flujo durante el proceso de secado es de tipo transitorio de acuerdo al número de Reynolds.

En las alturas de 47 y 57 cm el número de Reynolds manifiesta un mismo comportamiento; En estas alturas hay una disminución del No. de Reynolds de diez veces, comparada con la parte más alta. Comparando ambos fluidos, el No. de Reynolds es diez veces mayor durante el secado de leche que durante la evaporación de agua; esto se debe a que las partículas de leche ejercen una mayor turbulencia a causa de la coalescencia entre las partículas sólidas.

El número de Nusselt tiene un mayor valor cerca del disco aspersor que en el resto de la cámara, ya que existe una mayor transferencia del aire caliente a la gota asperjada y es mayor durante el secado de leche a causa de la turbulencia y choque de las partículas.

La ecuación mas representativa en base a la importancia de la zona crítica de secado que relaciona los números adimensionales es:

$$Nu = 7.55 e^{0.2Re}$$

(Ec. 3.05)

La aplicación de esta ecuación está limitada al diámetro de la partícula, como se ha observado a lo largo del capítulo el efecto de los sólidos que implican un aumento en el tamaño de la gota asperjada. Los límites se encuentran entre 100 y 200 μ m de diámetro y para un flujo en estado transitorio con un número de Reynolds menor a 120, y para velocidades de secado bajas del orden de 1 E-7 kg H₂O/hr.

La aplicación de los números adimensionales en el diseño de equipo puede realizarse, pero tomando en cuenta las limitaciones que pueda marcar la expresión que se obtuvo a un nivel de planta piloto.

APENDICE.

- T_{a_1} = Temperatura del aire a la entrada del secador ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{a_2} = Temperatura del aire a la salida del secador ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{s_1} = Temperatura del sólido a la entrada del secador ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{s_2} = Temperatura del sólido a la salida del secador ($^{\circ}\text{C}$)
 G_a = Flujo másico de aire (kg a.s./hr)
 G_s = Flujo másico del producto (kg s.s./hr)
 Y_1' = Humedad absoluta del aire a la entrada del secador ($^{\circ}\text{C}$)
 Y_2' = Humedad absoluta del aire a la salida del secador ($^{\circ}\text{C}$)
 X_{s_1} = Humedad del sólido a la entrada del secador ($\text{kg H}_2\text{O/kg s.s}$)
 X_{s_2} = Humedad del sólido a la salida del secador ($\text{kg H}_2\text{O/kg s.s}$)
 h = Coeficiente convectivo de transferencia de calor ($\text{kcal/hr m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
 A = Area expuesta al secado (m^2)
 K_G = Coeficiente de transferencia de masa ($\text{kg/hr m}^2 \text{ atm}$)
 T = Temperatura del gas secante ($^{\circ}\text{C}$)
 T_w = Temperatura de bulbo húmedo ($^{\circ}\text{C}$)
 P_v = Presión de vapor del agua a la temperatura de la superficie (kN/m^2)
 P_o = Presión parcial del vapor de agua en el gas (kN/m^2)
 U = Coeficiente global de transferencia de calor
 D = Diámetro de la gota (m)
 K = Conductividad térmica del aire ($\text{kcal/m hr }^{\circ}\text{C}$)
 V = Velocidad puntual del aire (m/s)
 g_c = Constante dimensional = 0.999 kg m/Ns^2
 P_d = Presión dinámica (kN/m^2)
 P_e = Presión estática (kN/m^2)
 ρ = Densidad del fluido manométrico (kg/m^3)
 C = Coeficiente en función de la graduación de los tubos del manómetro.
 ρ_1 = Densidad de la alimentación (kg/m^3)
 N = Velocidad angular del disco atomizador rpm

r = Radio del disco aspersor (m)
 μ_1 = Viscosidad de la alimentación (pa s)
 σ = Tensión superficial (Dina/cm²)
 L_w = Perímetro mojado (m)
 V_r = Velocidad radial del aire (m/s)
 V_a = Velocidad axial (m/s)
 V_t = Velocidad tangencial (m/s)
 M_A = Masa molecular del agua (kg)
 M_B = Masa molecular del aire (kg)
 P = Presión atmosférica (torr)
 P^o = Presión parcial de vapor (torr)
 μ_a = Viscosidad del aire (poise)
 ρ_a = Densidad del aire (kg/m³)
 K = Conductividad térmica
 Q = Calor transferido (kcal/hr)
 V_H = Volumen húmedo

V. BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Badger Walter, "Introducción a la Ingeniería Química". 4ta. Ed., Mc Graw-Hill, México 1981.
- 2.- Ch. Alais, "Ciencia de la Leche". Principios de Técnica Lechera, Editorial Reverté, Barcelona 1987.
- 3.- Charlesworth and Marshall, "Evaporation from Drops Containing Dissolved Solids". Part I and II, AICHE Journal, Vol. 6, No. 1, March 1960.
- 4.- Chi González Aurelio, "Determinación de las Condiciones Óptimas para el secado de leche en una instalación de sistema por pulverización". Tesis, UNAM, 1966.
- 5.- Coulson J.M., "Unit Operations". Chemical Engineering Vol II, 3ra. Ed., Editorial Reverte S. A. Barcelona España 1981.
- 6.- E. Spreer, "Lactología Industrial". Editorial Acribia S. A., Segunda edición, España 1991.
- 7.- "Estudio de la Instantaneización de Leche Entera en Polvo Darel por fluidización". Tesis, UNAM>
- 8.- Gauvin and Katta, "Basic Concepts of Spray Drying Desing". AICHE Journal, Vol 22, No. 4, Jul 1976.
- 9.- Gluckert and Marshall, "Centrifugal Disk Atomization". Chem Ing. Prog. Vol 48, No. 4, April 1952.
- 10.- Heldman D, "Introduction to Food Engineering"
- 11.- Hougen y Watson, "Balances de materia y energía". Principios de los procesos químicos, Vol 1, Editorial Reverte S.A., Barcelona España 1982.
- 12.- J. Amiot, "Ciencia y Tecnología de la Leche". Editorial Acribia S. A. Segunda edición, España 1991.
- 13.- Jan Dlowhy and Gauvin, "Heat and Mass Transfer in Spray Drying". AICHE Journal, Vol. 6, No. 1, March 1960.
- 14.- Katta and Gauvin, "Some Fundamental Aspects of Spray Drying". AICHE Journal, Vol. 21, No. 1, January 1975.
- 15.- K. L. Core and J. C. Mulligan, "Heat Transfer and Population

- Characteristics of Dispersed Evaporating Droplets''. AICHE Journal, Vol. 36, No. 8, August 1990.
- 16.- Leninger H., ''Food Process Engineering''. AVI Publishing, USA 1
 - 17.- Leon Baltas and Gauvin, ''Transport Characteristics of a Cocurrent Spray Dryer''. AICHE Journal, Vol. 15, No. 5, September 1969.
 - 18.- Manning and Gauvin, ''Heat and Mass Transfer to Decelerating Finely Atomized Sprays''. AICHE Journal, Vol. 6, No. 1, March 1960.
 - 19.- Marshall, ''Atomization and Spray Drying''. Chem Ing. Prog. Vol. 5, No. 2, 1954.
 - 20.- Marshall and Seltzer, ''Principles of Spray Drying''. Part I Chem. Eng. Prog. Vol. 46 No. 10, oct 1950.
 - 21.- Marshall and Selzer, ''Principles of Spray Drying''. Part. II, Chem. Eng. Prog. Vol. 46, No. 11, Nov. 1950.
 - 22.- Masters, ''Spray Drying''. John Wiley and sons New York, 1976.
 - 23.- Maynard Joslyn, ''Food Processing Operations''. Vol 2, AVI Publishing, 3rd. Ed., USA 1963.
 - 24.- Mc Cabe y Smith, Operaciones Básicas de la Ingeniería Química'' 6ta. Ed ,Editorial Reverte, Barcelona España 1968.
 - 25.- Miller, ''Probabilidad y Estadística para Ingenieros''. Mc Graw-Hill, 6a. Ed. 1985.
 - 26.- Niro Atomizer, ''La Planta de Secado por Atomización de Gran Versatilidad''. Folleto.
 - 27.- Niro Atomizer, ''Spray Drying''. Folleto
 - 28.- N. P. Preobrazhenski, ''Mediciones Termotécnicas''. Tomo I, URSS, 1980.
 - 29.- Ocon Vian, ''Operaciones Básicas''. Elementos de Ingeniería Química, 5ta. Ed. Ediciones Aguilar S. A.,Madrid España, 1979.
 - 30.- Perry and Chilton, ''Biblioteca del Ingeniero Químico'', Mc Graw-Hill, 5a. Ed, 1987.
 - 31.- ''Pitot Static Tube''. Operating Instructions, Airflow Developments Limited. England.
 - 32.- Stanley E. Charm. ''Fundamentals of Food Engineering''. AVI Publishing, 2nd. Ed. 1971.
 - 33.- Treybal Robert, ''Operaciones de Transferencia de Masa''. Mc Graw-Hill, 2da. Ed, 1980.

- 34.- Vagn Westergaard, "Tecnología de la Leche en Polvo, Evaporación y Secado por Aspersión". Manual Niro Atomizer, 1ra. Ed. 1984.
- 35.- Valenzuela Osuna, "Diseño de un Secador por Aspersión para Jugos". Tesis UNAM, 1987.
- 36.- Warner, James, "Principios de la Tecnología de Lácteos". AGT Editor S. A., México 1979.
- 37.- White, "Mecánica de Fluidos". Mc Graw-Hill, 1986.