



UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA

CIENCIAS BASICAS E INGENIERIA

INGENIERIA DE PROCESOS E HIDRAULICA

SECADO DE ESPUMA DE GUAYABA (*Psidium guajava*)
POR FLUIDIZACION

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE :

MAESTRO EN INGENIERIA QUIMICA

P R E S E N T A :

HIPOLITO ROMERO TEHUITZIL

MEXICO, D.F

1995

SECADO DE ESPUMA DE GUAYABA
(*Psidium guajava*) POR FLUIDIZACION.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

DENOMINACION DE LA TESIS

SECADO DE ESPUMA DE GUAYABA

(PSIDIUM GUAJAVA) POR FLUI-

DIZACION

En México, D. F. se presentaron a las 12:00 horas del día 04 del mes de AGOSTO del año 1995 en la Unidad IZTAPALAPA de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del Jurado.

DR. RICHARD STEVE RUIZ MARTINEZ;

M. EN C. IGNACIO CESAR BERISTAIN GUEVARA;

DR. EDUARDO JAIME VERNON CASTER Y

DR. MARIO GONZALO VIZCARRA MENDOZA

bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretario el último se reunieron para proceder al examen de grado de



Maestro en: INGENIERO QUIMICO

HIPOLITO ROMERO TEHUITZIL

presentó una comunicación de resultados, cuya denominación aparece al margen y de acuerdo con el artículo 33 fracciones I, II, III y V del Reglamento de Estudios de Posgrado de esta Universidad, los miembros del Jurado resolvieron:

- APROBARLO -

Acto continuo, el Presidente del Jurado comunicó al interesado el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

[Handwritten signature of Hipolito Romero Tehuitzil]

FIRMA DEL INTERESADO

REVISO

[Handwritten signature of R. V.]

DIRECCION DE SISTEMAS ESCOLARES

[Handwritten signature of Dr. Richard Steve Ruiz M.]

DR. RICHARD STEVE RUIZ M. PRESIDENTE

[Handwritten signature of Dr. Eduardo Jaime Vernon C.]

M. EN C. I. CESAR BERISTAIN G. DR. EDUARDO JAIME VERNON C. VOCAL

[Handwritten signature of Dr. Mario Gonzalo Vizcarrá M.]

DR. MARIO GONZALO VIZCARRA M. SECRETARIO

El suscrito Director de División de C.B.I. hace constar que las firmas que aparecen son auténticas y corresponden a los señores Miembros del Jurado cuyos nombres aparecen en esta acta.

[Handwritten signature of Dr. Luis Mier y Terán C.]

DR. LUIS MIER Y TERAN C. DIRECTOR DE DIVISION

DEDICO ESTE TRABAJO A:
MIS PADRES Y HERMANOS
CON MUCHO CARIÑO.

A :
ANGELES
POR SU GRAN APOYO

DESEO AGRADECER EL APOYO BRINDADO A:

•

DR. E. JAIME VERNON CARTER POR SU SINGULAR AMISTAD Y
DIRECCION DE ESTE TRABAJO.

*

AL DR. MARIO G. VIZCARRA MENDOZA,
AL M. C. IGNACIO C. BERISTAIN GUEVARA ,
AL DR. RICHARD S. RUIZ MARTINEZ

Y

LAS INSTITUCIONES:
CONACYT Y UAM-I

■

INDICE

I. RESUMEN.....	i
II. JUSTIFICACION.....	ii
III. OBJETIVOS.....	iii

MARCO TEORICO

1.1	Espumas.....	2
1.1.2	Formación de una espuma.....	3
1.1.3	Estabilidad de la espuma.....	4
1.1.4	Emulsificantes.....	6
1.1.5	Balance hidrofílico-lipofílico.....	8
1.2	Teoría del secado de materiales con aire caliente.....	9
1.3	Fluidización (definición).....	15
1.3.1	Tipos de lechos fluidizados.....	15
1.3.2	Secado en lechos fluidizados.....	18
1.3.2.1	Comparación entre secadores tipo flash, por aspersión y en lechos fluidizados.....	19
1.4	Esquematización del secado de espuma en un horno de secado y en un lecho fluidizado.....	20

METODOLOGIA

2.1	Obtención de espuma.....	26
2.2	Secado de espuma en un horno de convección forzada.....	28
2.3	Secado de espuma por fluidización.....	28

2.3.1	Equipo de fluidización.....	28
2.3.2	Características de las esferas empleadas como lecho de fluidización.....	29
2.3.2.1	Porosidad del lecho fijo con esferas.....	31
2.3.2.2	Selección del lecho de fluidización para el secado de espuma.....	31
2.3.3	Curvas de secado.....	33

RESULTADOS

3.1	Espumas.....	36
3.2	Secado de espumas en un horno de convección forzada.....	40
3.3	Fluidización.....	44
3.3.1	Curvas de secado de espuma en lecho fluidizado combinado.....	49

CONCLUSIONES.....	53
--------------------------	-----------

RECOMENDACIONES.....	57
-----------------------------	-----------

NOMENCLATURA.....	59
--------------------------	-----------

BIBLIOGRAFIA.....	62
--------------------------	-----------

APENDICE A.....	65
------------------------	-----------

APENDICE B.....	66
------------------------	-----------

I. RESUMEN

El presente trabajo tuvo la finalidad de probar a nivel laboratorio el proceso de secado de espumas de fruta por fluidización. Para alcanzar dicho objetivo el estudio comprendió las siguientes partes:

Determinación de las condiciones para producir espuma con las mejores cualidades de estabilidad. En la producción de espuma se selecciono pulpa de guayaba y en base a estudios precedentes de espumado con sorbac 60 y polisorbac 80 se decidió probar los mismos emulsificantes o tensoactivos para el espumado de la pulpa de guayaba. La metodología para la producción de la espuma consistió en formar mezclas con los emulsificantes arriba mencionados para obtener valores de los balances hidrofílicos-lipofílicos (HLB) de 6 y 8 que tuvieron mayor capacidad para la incorporación de aire y poder espumar la pulpa de guayaba, ya que los emulsificantes empleados con sus valores originales de HLB no son adecuados en la producción de espuma cuando estos se aplicaron de manera independiente a la pulpa de guayaba. Una vez obtenidas las mezclas con los nuevos valores de HLB estos se agregaron en diferentes niveles de concentración a la pulpa de fruta y se les adicionó maltodextrina (DE-10) como coadyuvante de secado, se agitó la mezcla conteniendo la pulpa, los emulsificantes y la maltodextrina con una batidora doméstica, para cada nivel de concentración de emulsificante se obtuvieron datos de densidad de la espuma a diferentes tiempos de agitación y se graficaron para HLB-6 y HLB-8, también se midió el incremento de volumen producido por los emulsificantes. Para la medición de la estabilidad de las espumas se hizo en función de la velocidad de líquido drenado en una hora. Una vez conocidas las condiciones a las cuales la espuma fué más estable y por ende apropiada para el manejo en el proceso de secado se procedió a la realización de pruebas de secado en un horno de convección forzada y en un lecho fluidizado. En el primer caso la espuma se depositó en cajas de Petri con espesores de 3 y 5 mm a temperaturas de 60 y 70°C con un flujo de aire de 0.15 m/s. Las muestras fueron sacadas y pesadas a lo largo del proceso de secado para conocer la humedad pérdida a través del tiempo. Con esto también se obtuvo la cinética de secado, para su posterior comparación con la cinética de secado obtenida por el método de lecho fluidizado.

Para las pruebas de secado de espuma en lecho fluidizado se realizó la siguiente secuencia:

Selección del lecho de fluidización; para esto se recurrió al uso de esferas de polipropileno de 10 mm de diámetro y también se usaron esferas de vidrio de 3 mm de diámetro.

Dado que no fue satisfactorio el proceso de secado con lechos constituidos con un solo tipo de esferas, entonces se decidió probar con combinaciones de los dos tipos de esferas en diferentes proporciones en volumen.

Se probaron combinaciones variando el porcentaje en volumen ocupado por las esferas de vidrio y de polipropileno. Conservando la relación diámetro/ longitud del lecho ($L/D=1$). La más adecuada resultó ser la proporción 70% en volumen de vidrio y 30 % de polipropileno.

El análisis de la cinética de secado se realizó para la combinación 70% en volumen de esferas de vidrio, dado que presentó las mejores características de fluidización y de secado.

Las curvas de la cinética de secado se construyeron a partir de los datos de humedad incorporada en el aire durante el proceso de secado a través del tiempo, se representaron en forma de gráficas de humedad base seca (W) vs tiempo y de velocidad de secado vs. tiempo. La cinéticas obtenidas del secado de espuma en horno de convección y en lecho fluidizado fueron comparadas para su análisis.

Finalmente, se midió el contenido de humedad y la dispersabilidad para los productos secados proveniente del proceso de secado por horno de convección forzada y del proceso de fluidización.

II. JUSTIFICACION

Las frutas tropicales constituyen uno de los principales recursos naturales del país. Sin embargo, la mayor parte de su comercialización se da como producto fresco, existiendo pocos canales comerciales para consumirse como producto procesado. Basta mencionar que la República Mexicana ocupa el segundo lugar en consumo de refrescos embotellados en América, de los cuales aproximadamente un 15% corresponden a bebidas refrescantes que contienen pulpa [United Nations, 1990].

Dicha pulpa tradicionalmente se conserva en frío, resultando en elevadísimos costos energéticos y en características sensoriales muy variables, debido a la estacionalidad de la fruta y a su rotación en los cuartos fríos. Alternativamente, se ha intentado mantener las pulpas en envases asépticos, pero se carece de una vida de anaquel adecuada. También se ha empleado el secado por aspersión, pero ésta técnica involucra la utilización de temperaturas muy altas de secado y el empleo de coadyuvantes en altas concentraciones para darle fluidez a las pulpas, como resultado se obtiene un producto seco con bajo aroma y poco sabor. Una alternativa es el secado por espumas, en donde a la pulpa se le imparte una textura esponjosa debido a la acción de agentes tensoactivos en bajas concentraciones, de manera que se favorecen los procesos de transferencia de calor y masa, y por lo tanto, temperaturas y tiempos de secado menores, que se reflejan en una mejor calidad del producto seco. Sin embargo, el proceso de secado tradicional de estas espumas es por charolas o bandas, requiriéndose grandísimas áreas, lo cual hace incosteable el proceso (Rockwell et al. 1962; Cooke et al., 1976).

Con esta problemática en mente, en el presente proyecto se buscó aumentar el área superficial de secado y disminuir el tiempo de secado utilizando un sistema de lecho fluidizado implementado con esferas de polipropileno y con esferas de vidrio con 10 y 3 mm de diámetro respectivamente, con el objeto de hacer del secado por espumas una opción tecnológica viable.

III. OBJETIVOS

GENERALES

- Determinar la factibilidad del secado de espumas de jugo de fruta por fluidización empleando como lecho de fluidización esferas de polipropileno y esferas de vidrio con 10 y 3 mm de diámetro respectivamente que tienen como función principal la distribución de la espuma sobre la superficie esférica y disminuir el tiempo de secado como una consecuencia de aumentar el área superficial de secado.

PARTICULARES

Conocer las condiciones de mayor estabilidad en la producción de espuma como son:

- Los balances hidrofílico-lipofílico (HLB) más apropiados y evaluar los niveles de concentración de los emulsificantes para producir espuma.

-Tiempos de agitación y velocidad de agitación

Conocer las condiciones de fluidización para el secado de la espuma en lechos fluidizados constituidos con esferas de vidrio y polipropileno.

Comparación y análisis de la cinética de secado de espuma en horno de convección forzada y en lecho fluidizado.

*Propiedades de dispersabilidad de los productos secos obtenidos.

MARCO TEORICO

1.1 ESPUMAS

Se entiende por espuma una dispersión de burbujas de gas en una fase líquida o semisólida (Phillips et al., 1990). De este modo, las burbujas están separadas entre sí por paredes líquidas o semisólidas, también denominadas películas o lamelas, de espumas estables que son elásticas. Los diámetros de las burbujas de la espuma oscilan desde aproximadamente 1 mm a varios centímetros. Según el tamaño de las burbujas y el espesor de la pared, una espuma puede ser casi tan densa como la fase continua líquida, o casi tan ligera como la gaseosa dispersa (Badui, 1982). Entre las espumas alimenticias típicas se incluyen la crema batida, los helados, bizcochos, pan, el dulce de malvavisco, el merengue y la espuma de cerveza.

Las características de las espumas alimenticias típicas son: primera, contener gran cantidad de gas retenido (baja densidad); segunda, tener gran superficie entre la fase gaseosa y la continua líquida; tercera, poseer mayor concentración de soluto en la superficie que en la masa líquida; cuarta, sus paredes son túrgidas y rígidas o semirígidas y elásticas; y quinta, reflejar la luz, por que su aspecto es opaco. Para conseguir las propiedades de textura y que el producto sea agradable a la vista, las espumas alimenticias deben poseer una o más de las propiedades mencionadas, e inclusive pueden ser esenciales para los procesos tecnológicos. Por ejemplo, baja densidad, pared delgada y estructura túrgida son esenciales para la suavidad, propiedad de textura que es significado de la sensación táctil agradable en la boca y de la sensación que se tiene cuando las burbujas estallan al presionar la lengua y la espuma contra el paladar. El que una espuma sea blanda, por ejemplo, un bizcocho, depende del volumen de las burbujas así como del espesor y de las propiedades reológicas de las laminillas. La desecación por formación de espuma consiste en evaporar rápidamente el agua de las paredes alveolares, que presentan gran superficie por unidad de volumen. La introducción de aire en la nata durante el batido es capaz de originar complejos lipoprotéicos en las superficies aire-líquido y eliminar así las sustancias estabilizadores de la emulsión de la interface aceite-agua.

1.1.2 FORMACIÓN DE UNA ESPUMA

La formación de una espuma depende de la presencia de un espumante en la fase continua, antes de la dispersión del gas. Los líquidos puros y las soluciones saturadas (excepto los tensoactivos) no producen espumas. El espumante debe ser adsorbido en la superficie para reducir la tensión superficial y proporcionar determinada capa superficial que resista la coalescencia de las burbujas de gas. Los espumantes se clasifican en: lípidos tensoactivos, glucósidos, derivados de la celulosa y proteínas. La selección del tipo de espumante depende de las propiedades que se deseen, como, por ejemplo, características de textura, densidad y estabilidad.

Las espumas se forman por dispersión o condensación. En el primer método, se inyecta el gas en solución espumante a través de orificios o se introduce por batido de la solución con paletas o cintas giratorias. En el de condensación, se disuelve gas a presión, en la solución que interesa espumar. Cuando disminuye la presión, parte del gas disuelto la abandona y se expande todo el gas del sistema para crear espuma. La crema batida procedente de un recipiente aerosol se obtiene por este método.

Las burbujas de las espumas de baja densidad se deforman, adoptan forma poliédrica y hay una gran presión interna. La presión del gas, ligeramente positiva, en la pared interior de la burbuja del gas, proporciona turgencia que disminuye cuando baja la tensión superficial. La presión del gas en una burbuja se expresa mediante la ecuación de Laplace (Cheftel et al., 1987, Fennema, 1985):

$$P = P_a + \frac{4\gamma}{R} \quad (1.1)$$

De esta ecuación resulta claro que las burbujas pequeñas tienen grandes presiones internas cuando R es pequeño.

El tamaño de la burbuja influye en la estabilidad y densidad de una espuma. En espumas formadas por inyección vertical de gas a través de un orificio, el tamaño de la burbuja se calcula a partir de la ecuación (Fennema, 1985):

$$R^3 = \frac{3r\gamma}{2g\rho} \quad (1.2)$$

Es evidente que el tamaño de la burbuja es proporcional al radio del orificio y a la tensión superficial e inversamente proporcional a la densidad. Si se introduce el gas en la solución por agitación mecánica, el tamaño de la burbuja depende prácticamente de la tensión superficial, así como de la velocidad y duración de la ruptura.

1.1.3 ESTABILIDAD DE LA ESPUMA.

La persistencia de una espuma, definida como el período de tiempo que una unidad de volumen de gas puede permanecer en una espuma, está relacionada con la resistencia de las paredes de los alvéolos a las fuerzas de ruptura. Las espumas son termodinámicamente inestables, puesto que la energía libre total disminuye al descomponerse. La causa principal para que se desmorone una espuma es que el líquido de las paredes de la burbuja disminuya hasta que una porción de la pared alcance el grosor crítico, entre 50 y 150 Å, con lo cual se produce la coalescencia. Causan la pérdida de líquido en las paredes la fuerza de gravedad, el efecto de succión en la periferia de la pared debida a la elevada curvatura, la evaporación del disolvente y las fuerzas de deformación efectuadas por los movimientos del gas (difusión) desde las burbujas pequeñas a otras mayores.

Para elevar la estabilidad de la espuma se incrementa la elasticidad de la pared de la burbuja, se aumenta la viscosidad de la solución y de la superficie de la pared o se introduce materia en forma de partículas. La elasticidad guarda relación con el cambio de tensión superficial que ocurre en respuesta a la deformación de la pared de espuma. Se calcula el grado de elasticidad a partir de la ecuación de Gibbs (Kirk-Othmer, 1966; Kinsella, 1990):

$$E = 2A \frac{d\gamma}{dA} \quad (1.3)$$

Para que una espuma sea estable, la tensión superficial debe cambiar rápidamente para oponerse a cualquier fuerza que deforme las laminillas. Si la superficie de una laminilla contiene moléculas adsorbidas de un espumante, cualquier dilatación por una fuerza conduce a disminución de la concentración de las moléculas superficiales. Como resultado, aumenta la tensión superficial y se contrarresta la fuerza externa para inhibir una posterior dilatación. Después, las moléculas de la superficie del espumante se desplazan desde una región de baja tensión superficial a una de alta y arrastran con ellas a las moléculas de agua subyacentes, con lo que se restablece el grosor inicial de la pared. Sin ninguna molécula adsorbida en la superficie, la solución carecería de elasticidad. Un líquido puro pertenece a esta categoría y, en consecuencia, no forma espuma.

Si durante la deformación de la espuma, las moléculas del espumante se desplazan de manera demasiado rápida desde la masa de la solución hasta las laminillas, se destruye rápidamente el gradiente de tensión superficial y el agua que transfiere es insuficiente para recuperar el grosor inicial de la laminilla. Sucede una situación de este tipo en soluciones que contienen elevadas concentraciones de espumante y éstas muestran baja estabilidad de la misma (Schukin et al., 1988).

Se puede reducir la velocidad de desecación de una espuma incrementando la viscosidad del líquido en las laminillas y en la capa superficial. Las gomas y proteínas (como gelatina) son excelentes estabilizadores que a bajas concentraciones (alrededor de 0.5 al 2 %) aumentan fuertemente la viscosidad de una solución (Haiming et al., 1994). Algunas veces se incorporan azúcares a las espumas para incrementar la viscosidad y también para que actúen de edulcorantes. Para desestabilizar una espuma se reduce la viscosidad del líquido en las laminillas por incremento de la temperatura o se degradan los polímeros fijadores de agua que puedan estar presentes.

Crece la viscosidad de las capas superficiales de las espumas por adición de un estabilizador polar de la espuma a la solución que contiene el espumante. Como consecuencia de ello se prolonga considerablemente la "vida" de la espuma. Se ha comprobado que los alcoholes primarios, la glicerina y los éteres de glicerina son especialmente eficaces para incrementar la viscosidad de la superficie y la estabilidad de la espuma (Fennema, 1985).

Las proteínas iniciales de la interface agua-aire se desnaturalizan (desenrollan) y se orientan por sí mismas, con sus grupos hidrófobos dirigidos hacia la fase aérea y los hidrófilos,

hacia la acuosa. La agrupación de moléculas protéicas desnaturalizadas constituye una “piel”, que incrementa la viscosidad de la superficie y la estabilidad de la espuma (Arteaga, 1993).

Las materias finamente divididas, como especias y cacao, de naturaleza lo suficientemente hidrófoba, son susceptibles de ascender a la superficie de la espuma, incrementar la viscosidad de la superficie y elevar la estabilidad de la misma. La cantidad de materia en forma de partículas que pueden concentrarse en la superficie, depende del equilibrio hidrofílico-lipofílico de las partículas, tamaño de las mismas y concentración del espumante.

1.1.4 EMULSIFICANTES

Los emulsificantes son un grupo de aditivos orgánicos de origen natural o sintético utilizados en los alimentos. La característica peculiar de este grupo de producto es que su molécula exhibe una doble solubilidad, una parte es soluble en sustancias polares y otra en no polares. Esta característica los hace capaces de mantener unidos a 2 o más compuestos inmiscibles, entre ellos aire y agua, aceite y agua, etc.

Existen diversos criterios por medio de los cuales puede clasificarse un emulsificante (Del Vecchio, 1975); sin embargo las clasificaciones más importantes son:

1) Por su carga , de acuerdo a su estructura y comportamiento electroquímico estos pueden ser Iónicos y no Iónicos.

2) Por su solubilidad, de acuerdo a la dispersión que estos tengan en agua debido a que una parte de su molécula está constituida por un grupo polar; el grupo OH, por ejemplo; pero también es posible dispersarlos en aceite, debido a que la parte covalente de la molécula es un grupo no polar; el grupo $(CH_2-CH_2)_n$, por ejemplo.

3) Por su grupo químico estos pueden ser: emulsificantes primarios, aquellos que son obtenidos por la reacción de un ácido graso y una base para obtener el éster característico de los emulsificantes, y emulsificantes secundarios para aquellos que toman como punto de partida el éster ya formado para hacer algunas modificaciones.

Los emulsificantes empleados en el presente trabajo pertenecen al grupo de emulsificantes no iónicos los cuales no se disocian en agua debido a sus enlaces covalentes, también se incluyen: monoglicéridos, monoglicéridos etoxilados, ésteres de sorbitán, polisorbatos, ésteres de poliglicerol y ésteres de sacarosa (Chávez,1987; Pomeranz,1991). El Sorbac 60 y Polisorbac 80 son producidos por Arancia de México S.A de C.V. En la tabla 1.1 se resumen sus principales funciones.

Tabla 1.1 Emulsificantes empleados		
NOMBRE DEL EMULSIFICANTE	FUNCIÓN	HLB
Monoestearato de Sorbitan (Sorbac 60).*	Auxiliar en la dispersión de ingredientes en polvo. Retarda la transición cristalina. Mejoramiento del brillo, sabor y recubrimiento en confitería.	4.7
Monooleato de Polioxietileno de Sorbitan (Polisorbac 80).*	Actúa como agente espumante en concentraciones mayores a 0.005%. Mejoramiento de textura, tersura y volumen. Mejoramiento de la estabilidad en emulsiones. Imparte firmeza y sequedad en helados.	14.9

*La estructura química se muestra en la figura 1.1.

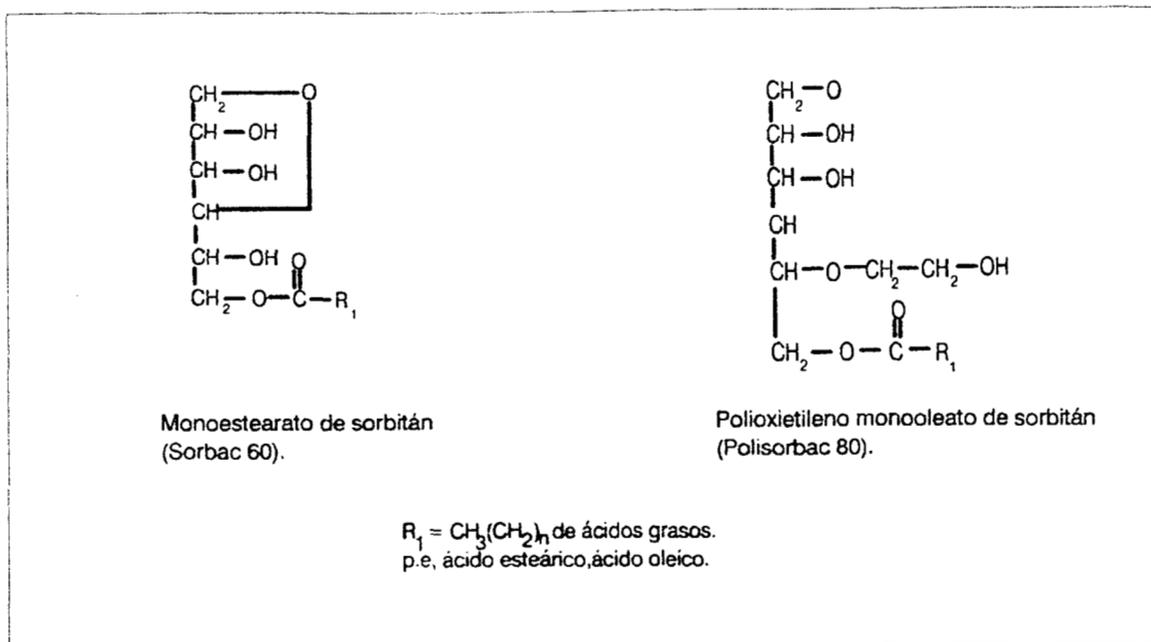


Figura 1.1 Representación de la estructura química del sorbac 60 y polisorbac 80

1.1.5 BALANCE HIDROFILICO-LIPOFILICO (HLB)

EL sistema de balance hidrofílico-lipofílico se usa en la selección y clasificación de emulsificantes. William Griffin (1949) es considerado como el enunciador del sistema de números HLB. Esta basado en el concepto de la solubilidad que un emulsificante tiene en agua o en aceites e indica si una emulsión es del tipo aceite en agua (O/W) o agua en aceite(W/O), el término aceite se refiere a la fase inmisible en agua. Los valores de HLB están generalmente determinados por métodos empíricos o por cálculos directos de su estructura molecular del emulsificante (Dziezak,1988). Para la medición del HLB existe una escala de valores con un rango del 1 al 20 (apéndice A). La selección del emulsificante esta basada en su solubilidad en la fase continua de la emulsión. Los emulsificantes con bajos valores de HLB (menores a 9) tienden a ser solubles en aceite y son más efectivos para la preparación de emulsiones agua en aceite(W/O); Los emulsificantes con un valor alto de HLB (mayores a 11) tienden a ser más solubles en agua y tienen mayor eficacia en la preparación de emulsiones aceite en agua (O/W).

El uso del sistema HLB tiene limitaciones en alimentos complejos de hoy en día por la presencia de compuestos que pueden afectar la emulsificación.

La evaluación del HLB requerido para mezclas puede obtenerse realizando diferentes combinaciones y seleccionando la que proporcione una mayor estabilidad de la emulsión; puede calcularse por medio de las relaciones siguientes:

$$\%(M) = \frac{100(X - HLB_N)}{HLB_M - HLB_N} \quad (1.4)$$

$$\%(N) = 100 - \%(M) \quad (1.5)$$

1.2 TEORIA DEL SECADO DE MATERIALES HUMEDOS CON AIRE CALIENTE

Durante el secado de sólidos húmedos con aire caliente, el aire proporciona el calor latente y sensible de evaporación a la humedad y a la vez actúa como un gas acarreador para remover el vapor de agua formado en la vecindad de la superficie de evaporación.

Considera la situación donde un sólido inerte, humedecido con agua pura, está siendo secado en una corriente de aire caliente fluyendo paralelo a la superficie de secado. Suponga que la temperatura, humedad y velocidad de aire arriba de la superficie de secado permanece constante a través del ciclo de secado y que todo el calor necesario es provisto al material por convección. Si el cambio en el contenido de humedad del material es registrado a través del secado, los datos pueden ser representados en forma de curvas (Figs. 1.2a, 1.2b y 1.2c). Un estudio de esas curvas muestran que el ciclo de secado puede ser considerado en las siguientes etapas (Brennan y Butters, 1991; Rao y Rizvi, 1986):

ETAPA A-B. Esta etapa representa un periodo de "decaimiento", durante el cual las condiciones de la superficie del sólido alcanzan el equilibrio con el aire de secado. Es frecuentemente de una proporción despreciable del ciclo total de secado pero en algunos casos es significativo.

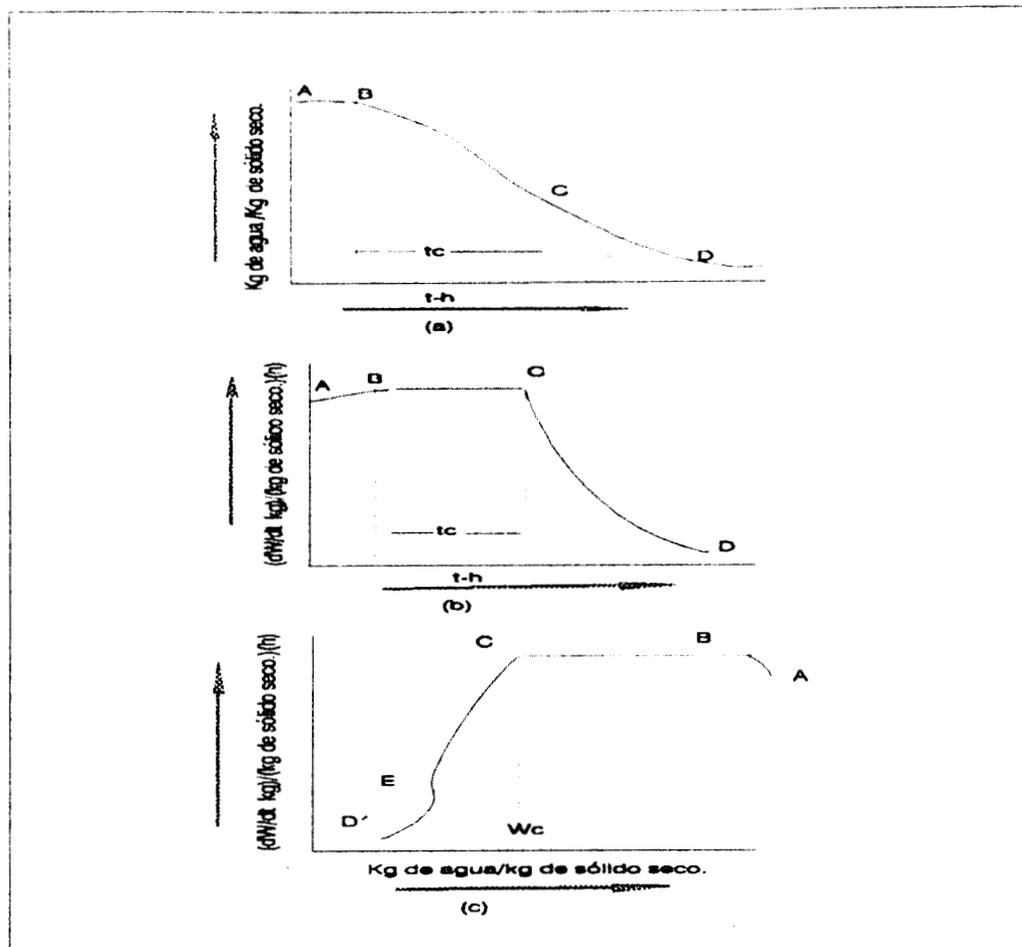


Fig. 1.2. Secado de materiales sólidos a temperatura y humedad constante.

ETAPA B-C. Esta etapa es conocida como período de velocidad constante de secado. Durante este período la superficie del sólido permanece saturada con agua por el hecho de que el movimiento de agua dentro del sólido hacia la superficie toma lugar a velocidad tan grande como la velocidad de evaporación de la superficie. El secado toma lugar por el movimiento del vapor de la superficie saturada a través de la película de aire estancada dentro de la corriente principal

del aire de secado. La velocidad de secado es dependiente de la velocidad de transferencia de calor en la superficie de secado. La razón del balance de transferencia de masa, la transferencia de calor, y también la temperatura de secado permanecen constantes. La superficie del sólido puede ser comparada con la mecha de un termómetro de bulbo húmedo y bajo condiciones específicas, la temperatura constante en la superficie correspondería a la temperatura de bulbo húmedo del aire de secado.

La fuerza motriz causante del movimiento de agua a través de la película de aire estancado es el gradiente de la presión del vapor del agua entre la superficie de secado y la corriente principal del aire de secado. La velocidad de transferencia de masa puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$\left(-\frac{dW}{dt}\right)_c = K_g A_s (p_s - p_v) \quad (1.6)$$

La ecuación (1.6) puede escribirse en la forma:

$$\left(-\frac{dW}{dt}\right)_c = K_g A_s (H_s - H_a) \quad (1.7)$$

Ya que existe un estado de equilibrio entre la velocidad de transferencia de calor a el cuerpo y la velocidad de transferencia de masa, entonces se pueden relacionar así:

$$\left(-\frac{dW}{dt}\right)_c \lambda_s = \left(\frac{dQ}{dt}\right)_c \quad (1.8)$$

Donde la velocidad de transferencia de calor en la superficie de secado puede expresarse así:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_c = h_c A_s (T_G - T_s) \quad (1.9)$$

En la situación considerada aquí, i.e. calentamiento convectivo, T_s es la temperatura de bulbo húmedo del aire. Combinando las ecuaciones (1.8) y (1.9) obtenemos:

$$\left(-\frac{dW}{dt}\right)_c = \frac{h_c A_s}{\lambda_s} (T_G - T_s) \quad (1.10)$$

Para una porción de material húmedo de profundidad d , evaporándose solo de la parte superior de la superficie, suponiendo que no hay goteo durante el secado:

$$\left(-\frac{dW}{dt}\right)_c = \frac{h_c}{\rho_s \lambda_s d} (T_G - T_s) \quad (1.11)$$

Los factores controlantes durante el periodo de secado constante son según Perry, 1973 .

- 1.- Área superficial de secado.
- 2.- La diferencia en temperaturas o humedad entre el aire y la superficie de secado.
- 3.- Coeficientes de transferencia de calor o masa.

Y, la velocidad del aire y las dimensiones del sistema influyen en el periodo de velocidad constante de secado.

ETAPA C-D. Siguiendo con el proceso de secado se alcanza un punto en el cual la velocidad de remoción de humedad dentro del material hacia la superficie es reducido hasta el grado que esta le permita secarse. En el punto C, la velocidad de secado empieza a caer y da inicio al periodo de velocidad decreciente. La humedad contenida en el material en el punto C es conocida como contenido de humedad crítica (W_c). Desde el punto C hacia adelante la temperatura en la superficie empieza a aumentar y continua llevándose a cabo el secado, aproximándose a la temperatura de bulbo seco del aire y dejando la superficie cada vez más reseca. Frecuentemente el periodo de velocidad decreciente se considera en dos partes conocidas como el primer y segundo periodo de velocidad decreciente, C-E y E-D respectivamente. En el primer periodo de velocidad de secado decreciente la superficie es secada exteriormente y la velocidad de secado disminuye. En el punto E el plano de evaporación se mueve dentro del sólido y la velocidad de secado cae

aún más. El período de secado a velocidad decreciente está influenciado principalmente por la velocidad de remoción de la humedad dentro del sólido y los efectos de factores externos, en particular la velocidad del aire, son reducidos, especialmente en la última etapa. Generalmente el período de secado a velocidad decreciente representa la mayor proporción del tiempo total de secado.

La naturaleza del mecanismo del movimiento de humedad dentro del sólido ha recibido mucha atención en la literatura (Geankoplis, 1989; Treybal, 1981; Rizvi et al, 1992). Parece ser que existen cuatro modos probables de llevarse a cabo la transferencia: movimiento líquido causado por fuerzas capilares, difusión líquida debida a los gradientes de concentración, difusión de vapor debido a los gradientes de presión parcial y difusión en el estrato líquido adsorbido en la interface sólida. Los mecanismos de capilaridad y difusión líquida han recibido el tratamiento más detallado. En general el primero es más aplicable a material granular y el último a sólidos de una sola fase con estructuras gel o coloidales. En muchos casos parece ser que los dos mecanismos pueden ser aplicables a operaciones de una sola fase, i.e. capilaridad llevándose a cabo por el movimiento de humedad en las etapas iniciales de secado mientras que un mecanismo difusional se aplica a contenidos de humedad baja. Perry sugiere para sistemas donde existe un mecanismo de flujo capilar, que la velocidad de secado puede expresarse con razonable exactitud por una ecuación del tipo:

$$\left(-\frac{dW}{dt}\right)_f = K(W_e - W_c) \quad (1.12)$$

donde $-(dW/dt)_f$ = velocidad de secado al tiempo t desde el inicio del período de velocidad decreciente; W_e = contenido de humedad del material cuando esta en equilibrio con el aire seco (contenido de humedad de equilibrio). Esto representa el contenido de humedad más bajo, teóricamente, en el aire a temperatura, T_G y humedad, H_a especificadas; K es una constante y esta relacionada con el período de secado de velocidad decreciente en la siguiente forma:

$$K = \frac{\left(-\frac{dW}{dt}\right)_c}{W_c - W_e} \quad (1.13)$$

Combinando las ecuaciones (1.11), (1.12) y (1.13) da:

$$\left(-\frac{dW}{dt}\right)_f = \frac{h_c(T_G - T_s)(W - W_e)}{\rho_s \lambda_s d (W_c - W_e)} \quad (1.14)$$

Por diferenciación de la ecuación (1.14) y considerando que la difusión del líquido (D_L) controla el movimiento interno de la humedad, Perry (1973) sugiere la siguiente expresión:

$$\left(-\frac{dW}{dt}\right)_f = \frac{D_L \pi^2}{4d^2} (W - W_e) \quad (1.15)$$

Las ecuaciones de velocidad (1.11), (1.14) y (1.15) se aplican cuando el secado toma lugar de un solo lado del material.

Para establecer si existe o no una relación simple durante el período de velocidad decreciente ($W - W_e$) / ($W_c - W_e$) puede graficarse contra t en papel semilogaritmico. Si resulta una línea recta la ecuación (1.14) se aplica y la pendiente de la curva se relacionará con el período de secado a velocidad constante de la ecuación (1.13). Si la gráfica resulta ser asintótica a una línea recta cuando t crece, la ecuación (1.15) puede aplicarse y D_L puede ser calculada de la pendiente de la asintota. El efecto del espesor d en la velocidad de secado puede determinarse experimentalmente y ser usada para la distinción entre los dos mecanismos.

Existen algunos datos disponibles sobre contenido de humedad crítica de materiales no alimenticios pero pocos para alimenticios. La humedad crítica generalmente depende de la velocidad de secado, dimensiones del material y el mecanismo de remoción de humedad. Normalmente se incrementa con la velocidad de secado y el espesor del material.

1.3 FLUIDIZACION

La fluidización es la operación por la cual las partículas sólidas son llevadas a un estado similar al de un líquido a través de la suspensión en un gas o líquido (Kunii y Levenspiel, 1991).

1.3.1 TIPOS DE LECHOS FLUIDIZADOS.

Si un fluido es pasado hacia arriba a través de un lecho de partículas finas, como se ilustra en la Fig. 1.3(a) a una velocidad de flujo baja, el fluido solo se percola a través de los espacios huecos entre las partículas estacionarias. Esto es un *lecho fijo*. Con un incremento en la velocidad del flujo, las partículas se mueven apartándose y generando en ellas un poco de vibración y moviéndose en regiones restringidas. Este es el *lecho expandido*.

A una velocidad todavía más alta, se alcanza un punto donde todas las partículas son suspendidas por el flujo ascendente del gas o líquido. En este punto la fuerza de fricción entre partícula y fluido se encuentran en un contrabalance con el peso de las partículas, la componente vertical de la fuerza compresiva entre las partículas adyacentes desaparecen, y la caída de presión a través de cualquier sección del lecho iguala el peso del fluido y partículas en esa sección. El lecho se considera fluidizado y se le considera un *lecho fluidizado incipiente o con fluidización mínima*; Fig. 1.3 (b).

En sistemas líquidos-sólidos, un incremento en la velocidad del flujo por arriba de la mínima de fluidización se ve reflejado en una expansión progresiva y suave del lecho, Fig. 1.3(c). En sistemas gas-sólido, tales lechos pueden ser observados solamente bajo condiciones especiales de partículas finas, livianas y con un gas denso a alta presión. En general los sistemas gas-sólidos se comportan diferente. Con un incremento en el flujo en el nivel de fluidización mínima, se observan grandes inestabilidades con burbujeos y acanalamientos dentro del lecho.

A flujos más altos, la agitación llega a ser más violenta y el movimiento de sólidos se hace más vigoroso. Además, el lecho no se expande más allá del volumen correspondiente a la fluidización mínima. De tal forma que a este tipo de lechos se les conoce como *lechos fluidizados*

agregativos, *heterogéneos* o *burbujeantes*; ver Fig.1.3(d). En pocos casos, un sistema líquido-sólido también se comporta como un lecho burbujante. Esto ocurre solo con sólidos densos fluidizados por líquidos con densidad más baja.

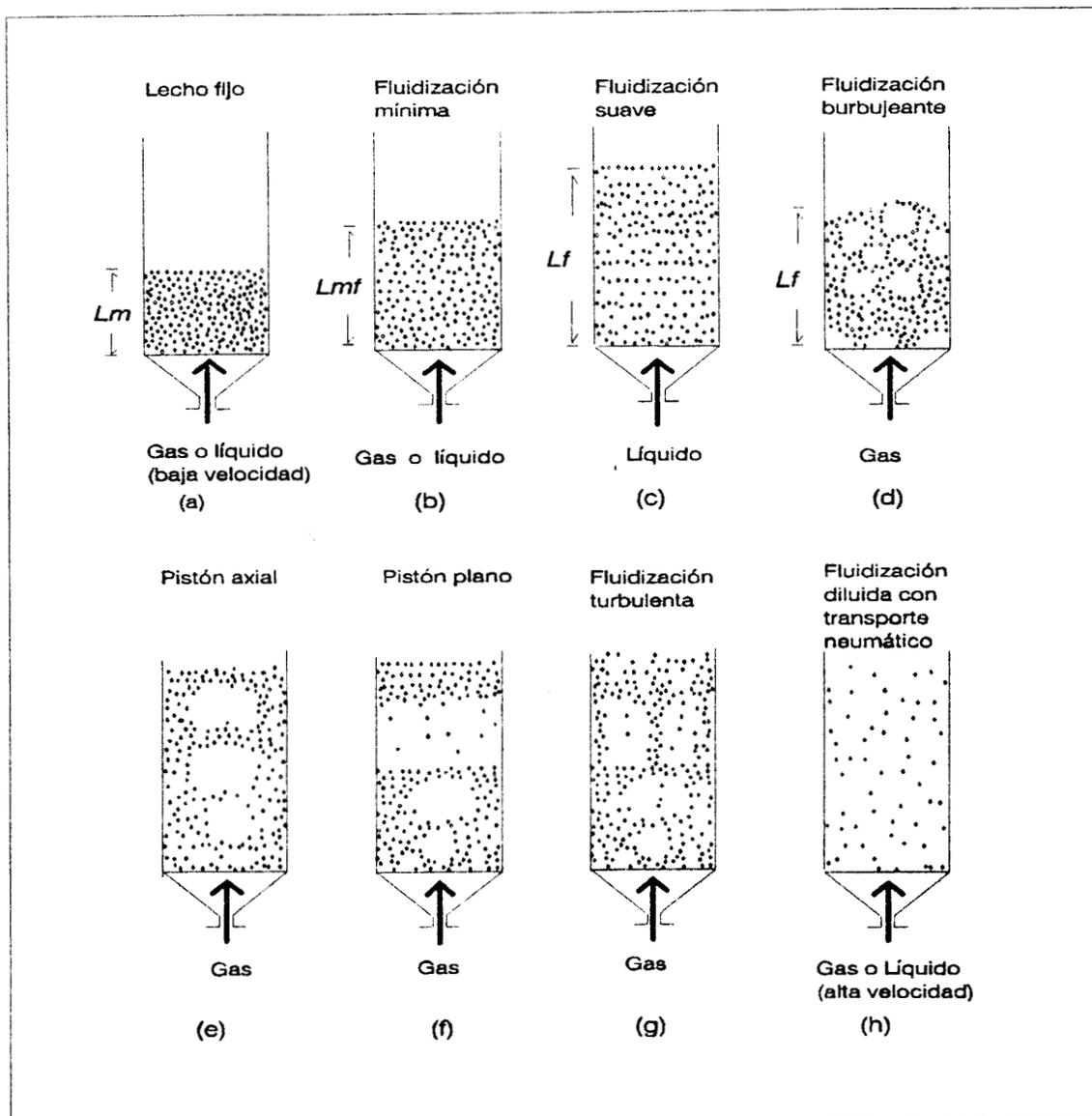


Fig. 1.3 Representación de diversos tipos de contactamiento de un sólido con un fluido.

Ambos lechos líquidos y gases son considerados como lechos fluidizados de fase densa y que están caracterizados generalmente por el aspecto superficial del lecho.

En sistemas gas-sólido, las burbujas de gas coalescen y crecen a medida que suben, y en un lecho profundo, de diámetro pequeño estas pueden eventualmente llegar a ser lo suficientemente grandes que se esparcen a través de la vasija. En el caso de partículas finas, ellas fluyen suavemente hacia abajo por la pared alrededor de los huecos crecientes de gas. Esto es lo que se conoce como *pistón (pistones axiales)*, se muestra en la Fig. 1.3(e). Para partículas gruesas, la porción del lecho por arriba de la burbuja es empujada hacia arriba, como un pistón. Las partículas llueven del pistón, el cual finalmente se desintegra. A la vez que otro tapón se está formando, y este movimiento oscilatorio inestable se repite. Esto es conocido como *pistón plano*; ver Fig. 1.3 (f). El taponamiento es considerable en lechos largos y estrechos.

Cuando las partículas finas son fluidizadas a un flujo suficientemente alto, la velocidad terminal de los sólidos es excedida, la superficie más alta del lecho desaparece el tren de partículas se vuelve apreciable, y en vez de burbujas, se observa un movimiento turbulento de grupos de sólidos y huecos de gas de varios tamaños y formas. Esto es un *lecho fluidizado turbulento*, se muestra en la Fig. 1.3 (g). Con un incremento adicional en la velocidad del gas, los sólidos son llevados fuera del lecho con el gas. En este estado tenemos un *lecho fluidizado diluido, disperso o de fase delgada con transporte neumático de sólidos*; Fig. 1.3(h).

En ambas fluidizaciones ya sea en fase dispersa y turbulenta, una gran cantidad de partículas se entrelazan, evitando operaciones en estado estable. Para operaciones en estado estable en estos tipos de contactamiento, el tren de partículas tienen que ser colectadas por ciclones y regresadas al lecho. En lechos fluidizados turbulentos, ciclones internos pueden conducir con la velocidad moderada el tren de partículas, este sistema se conoce como *lecho fluido*. Por otro lado, la velocidad del tren de partículas es tan grande en lechos fluidizados de fase diluida, los cuales generalmente necesitan del uso de grandes ciclones colectores por fuera del lecho, este sistema se llama *lecho fluidizado rápido*.

1.3.2 SECADO EN LECHO FLUIDIZADO.

La fluidización con aire caliente es un medio atractivo para el secado de muchos polvos húmedos y productos granulares. La técnica ha sido usada industrialmente desde 1948, y ahora gozan de amplia popularidad para el secado de minerales triturados, arenas, polímeros, fertilizantes, farmacéuticos, alimentos, materiales cristalinos, y muchos otros productos industriales (Boizan,1986; Brown,1985; Jones 1985). Las principales razones de su popularidad son expuestas en Geldart,1986 :

(a) Contactamiento eficiente gas-sólido que conduce al compactamiento de unidades y costo capital relativamente bajo con eficiencias térmicas altas.

(b) El manejo de partículas es más cuidadoso comparado con otros tipos de secadores. Esto es importante en el tratamiento de cristales frágiles.

(c) La casi nula movilidad de partes mecánicas, a excepción de los mecanismos de alimentación y descarga, lo hace muy confiable y con costos de mantenimiento muy bajos.

El límite principal de su aplicabilidad en secadores de lechos fluidizados es precisamente que el material a ser secado debe ser fluidizable. Y es que existen productos que contienen mucha humedad para ser fluidizados satisfactoriamente. Esto es muy común debido a una cantidad excesiva de humedad superficial de las partículas, provocando que estas se aglomeren.

Este problema puede resolverse flasheando la superficie húmeda en un secador neumático previamente al secado en lechos fluidizados. Otra limitación es encontrada si el producto tiene una amplia distribución del tamaño de partícula, así que mientras altas velocidades fluidizan fácilmente partículas grandes, las partículas pequeñas son arrastradas fuera del lecho. Algunas de estas limitaciones pueden resolverse con el empleo de vibrofluidizadores. Pero en este proyecto esta última limitación presenta ventajas pues las partículas pequeñas representan la espuma secada que se quiere colectar.

1.3.2.1 COMPARACIÓN ENTRE SECADORES TIPO FLASH, POR ASPERSIÓN Y LECHOS FLUIDIZADOS.

Existen 3 procesos de secado que tienen similitud con el proceso desarrollado en esta tesis los cuales se resumen en la tabla 1.2 (Dittman, 1977).

TABLA 1.2 SECADORES		
TIPO DE SECADOR	FORMA DE ALIMENTACIÓN	TIEMPO DE RESIDENCIA DE LOS SÓLIDOS
Secador Flash	En forma de partículas . El mecanismo de alimentación proyecta sólidos húmedos no conglomerados dentro de una corriente de aire.	0.5s a 30s
Secador por aspersion	La alimentación se hace por bombeo de líquidos, un atomizador especial que alcanza el tamaño de la gota deseada y por lo tanto el tamaño de partícula.	3s a 60s.
Secado por lecho fluidizado	Suministro del líquido o el sólido húmedo dentro del lecho.	2 a 10 min.

Ventajas y desventajas de los tres sistemas de secado: Debido a que en el secador flash la alimentación es en forma de partículas húmedas el problema principal lo constituye si la alimentación es pegajosa, este equipo es el más caro de los tres.

El secador por aspersión se alimenta por bombeo en forma líquida y ofrece la ventaja importante y única por su habilidad de mezclar la composición homogénea del líquido en cada partícula secada.

En los secadores de lecho fluidizado se distinguen en parte por el tamaño relativamente grande de las partículas que manejan, de 0.15 cm a 0.635 cm, además de las ventajas antes expuestas.

Por otro lado, el binomio temperatura-producto son críticos en la mayoría de los secadores ya que la temperatura determina la humedad del producto más que cualquier otra cosa. Si la temperatura de un sólido húmedo en un gas caliente depende de la velocidad de evaporación, la clave para analizar esos tipos de secadores es la psicometría o la relación de las mezclas gas-vapor.

Las cartas psicrométricas simplifican los cálculos de cuanto calor debe agregarse y cuanta humedad se incorpora al aire, pero tiene sus limitaciones este procedimiento en cuanto intervienen calores de reacción, calores de cristalización, o análisis de temperaturas más altas que las proporcionadas por las cartas. Otro inconveniente es la presión del sistema que no puede manejarse a otra que no sea la que se indica en las cartas y que generalmente son a condiciones estándar (760 mm de Hg ó a nivel del mar) (Belcher ,1977; Perry y Chilton,1973; Treybal,1981), no obstante estas pueden calcularse y obtenerse para las presiones deseadas, en nuestro caso se emplearon cartas psicrométricas a 585 mm de Hg correspondientes a la Cd. de México.

1.4 ESQUEMATIZACIÓN DEL SECADO DE ESPUMA EN UN HORNO DE SECADO Y EN UN LECHO FLUIDIZADO.

En la Fig. 1.4(a) se consideran los principales factores que intervienen en el secado de la espuma cuando se usa un horno de convección forzada. En este caso se considera la sección de un material (espuma) que se esta secando en una corriente de gas. La espuma de un espesor Z_e se coloca sobre una bandeja metálica de espesor Z_M . Todo el conjunto se pone en contacto con una

corriente de gas secante a temperatura T_G , a humedad H , (masa húmeda /masa de gas seco) y con un flujo másico G (masa /tiempo). La evaporación de humedad tiene lugar desde la superficie superior, A_s , que está a una temperatura T_s . La superficie que se esta secando recibe calor de diferentes fuentes: (1) Por convección desde la corriente gaseosa, q_c ; (2) por conducción a través del sólido, q_k ; (3) por radiación directa, q_R , de una superficie caliente a la temperatura T_R , todos expresados como un Flux (energía / tiempo). Considerando un período de velocidad constante. La rapidez de evaporación y la temperatura superficial pueden entonces obtenerse mediante un balance de calor. Si q representa el calor total que llega a la superficie entonces:

$$q = q_c + q_R + q_k \quad (1.16)$$

Despreciando el calor necesario para sobrecalentar la humedad evaporada hasta la temperatura del gas y considerando solo el calor latente de evaporación. N_A y el de calor q se relacionan como (Helman, 1982):

$$N_A \lambda_s = q \quad (1.17)$$

Combinando la ecuación de rapidez de evaporación :

$$N_A = k_y (H_s - H) \quad (1.18)$$

y la ecuación 1.17 con los coeficientes de transferencia de calor que involucra q , la rapidez de secado se expresa según Geankoplis, 1989:

$$N_A = \frac{q}{\lambda_s} = \frac{(h_c + U_k)(T_G - T_s) + h_R(T_R - T_s)}{\lambda_s} = k_y(H_s - H) \quad (1.19)$$

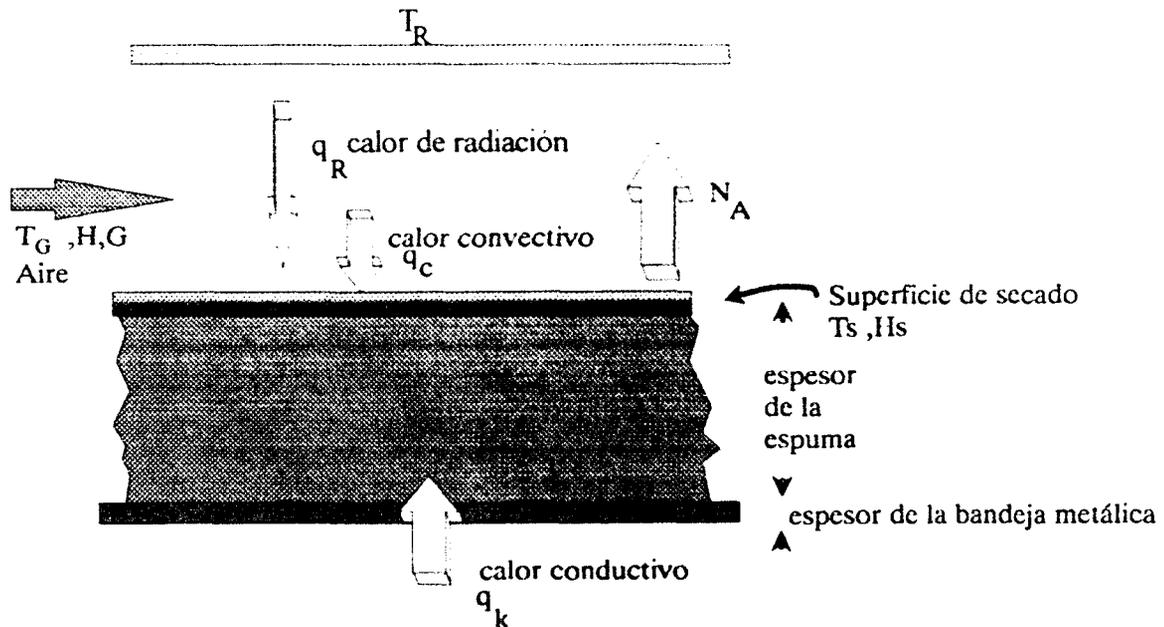


Fig. 1.4(a). Esquemización del secado de espuma en un horno de convección forzada

Para el caso del secado por lecho fluidizado se considera que la espuma recubre la superficie de la esfera no porosa como se muestra en la figura 1.4 (b), la radiación y la conducción a través del sólido son despreciables y solo interviene el fenómeno de la convección determinado por el flujo de aire el cual realiza la operación de secado, además se considera que el secado esta controlado por mecanismos externos, de tal forma que el flux de secado constante N_F y el coeficiente de transferencia de calor en el lecho fluidizado quedan relacionados por la siguiente expresión (Geldart 1986):

$$N_F = (h_g / \lambda_s) * (T - T_s) \quad (1.20)$$

Como la temperatura de la partícula no aumenta durante este periodo, todo el calor transferido a través de la capa limite del gas a la partícula debe ser usado para la evaporación. Para sistemas aire-agua la temperatura de bulbo húmedo del aire es casi igual a la temperatura de saturación

adiabática, la cual es leible sin mucha dificultad en cartas psicrométricas (Mujumdar,1987; Foust et al., 1990).

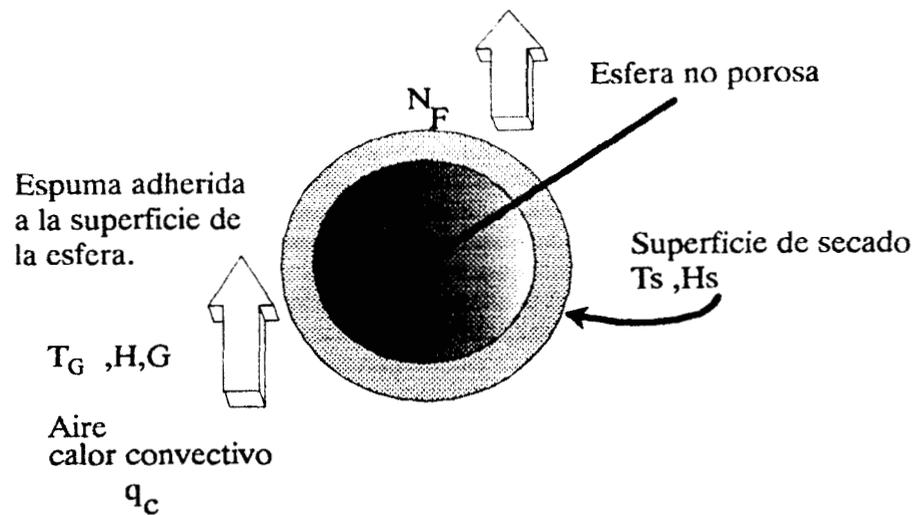
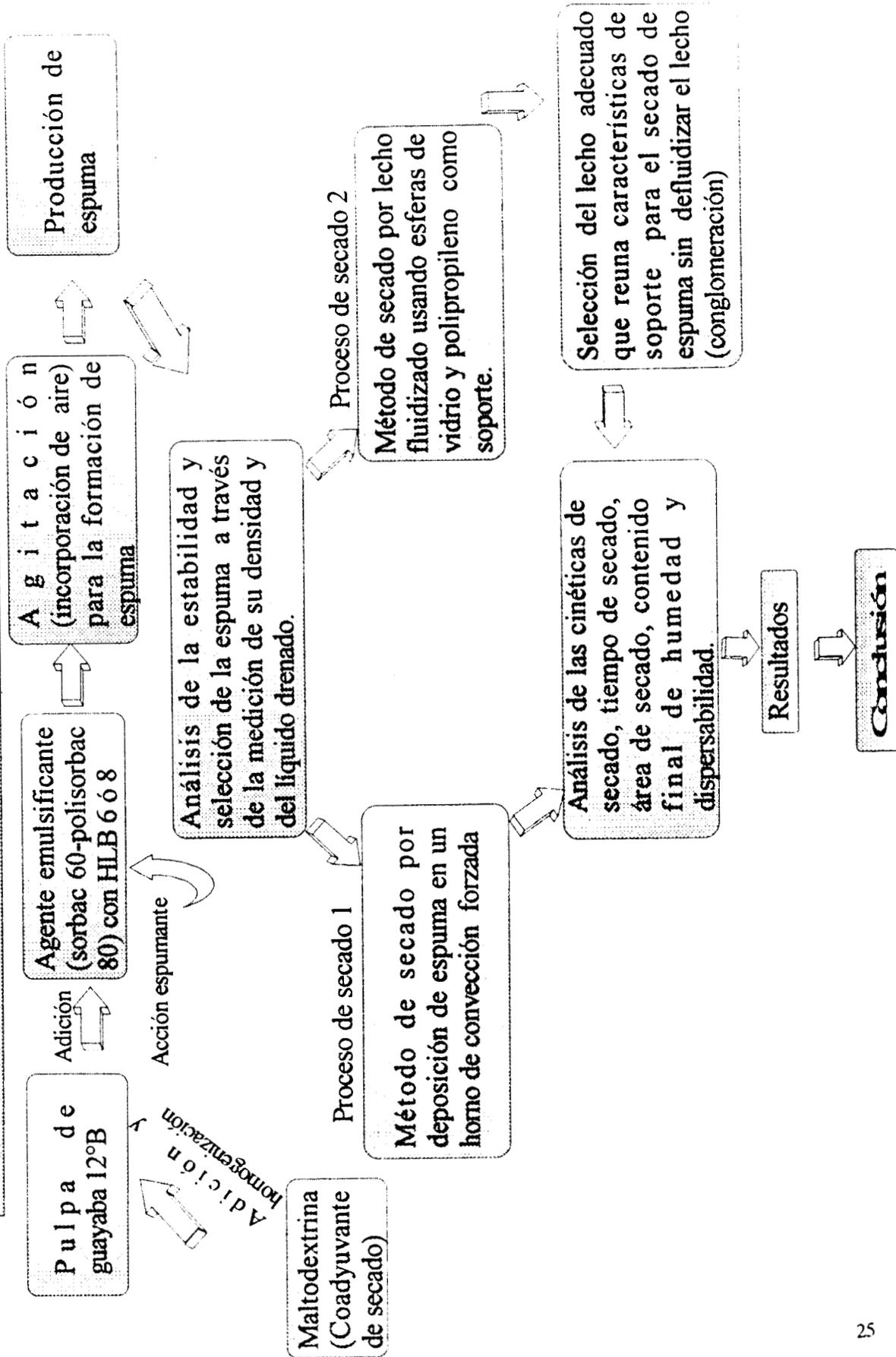


Fig. 1.4(b) Esquemización del secado de espuma en un lecho fluidizado constituido por esferas no porosas.

METODOLOGIA

PROCESO DEL SECADO DE ESPUMA DE GUAYABA POR LECHO FLUIDIZADO.



2.1 OBTENCION DE LA ESPUMA.

Se desarrolló un método para la obtención de espuma con características apropiadas para su secado en horno de convección forzada y en lecho fluidizado. Las características apropiadas consistieron en encontrar estabilidad a través de mediciones de su densidad, velocidad de drenado y que además resistieran el manejo durante los procesos de secado antes mencionados.

Haciendo uso de los datos reportados en la literatura y a experiencias previas (Dziezak,1988; Kinsella,1990; Beristáin et al., 1991,1993), se emplearon los siguientes emulsificantes:

Emulsificante:	HLB:
Monoestearato de Sorbitan (Sorbac 60)	4.7
Monooleato de Polioxietileno de Sorbitan (Polisorbac 80)	14.9

Se empleó pulpa de guayaba con 12° Brix; los grados Brix se midieron con el refractómetro Bausch y Lomb, Abbe-31. Como coadyuvante de secado se usó maltodextrina con grado dextrosa=10 o Amidex-10 (Pomeranz,1991).

Una vez seleccionados los agentes emulsificantes se procedió a la búsqueda del HLB adecuado para la producción de espuma y conocer las condiciones a las cuales se comportaba con mayor estabilidad. Para el cálculo del HLB se emplearon las siguientes relaciones:

$$\%(M) = \frac{100(X - HLB_N)}{HLB_M - HLB_N} \quad (1.4)$$

$$\%(N) = 100 - \%(M) \quad (1.5)$$

Utilizando las relaciones 1.4 y 1.5 para balances hidrofílicos-lipofílicos de 6 y 8 se requirieron las siguientes cantidades:

HLB requerido	Emulsificante (% en peso)	
	Sorbac 60	Polisorbac 80
HLB 6	87.38	12.62
HLB 8	67.96	32.03

Las cantidades obtenidas para cada emulsificante se mezclaron y se diluyeron al 10 % en agua.

El procedimiento para producir espuma fue el siguiente: se emplearon vasos de precipitados de 600 ml, a la pulpa de guayaba se le agregó 10% en peso de amidex-10 se mezcló homogéneamente y posteriormente se le agregó a diferentes concentraciones la mezcla de emulsificantes con HLB-6 ó HLB- 8 para completar lotes de 100 g. Se selecciono la velocidad de agitación de 4600 r.p.m correspondiente a la velocidad 5 en la batidora. A las espumas producidas se les hicieron las siguientes mediciones:

La estabilidad se determinó a través de la medición de su densidad y la velocidad de drenado (Waniska y Kinsella,1979).

La densidad de la espuma se midió por diferencia de pesadas de la espuma contenida en un vaso de precipitado de 10 ml. Se graficaron los datos densidad de la espuma vs tiempo de agitación.

La velocidad de drenado se determinó vertiendo la espuma obtenida en un embudo de filtración rápida y el líquido drenado se midió en una probeta al término de una hora.

Finalmente se hicieron mediciones de la tensión superficial (γ) a la pulpa de guayaba y la espuma con el equipo para medir tensión superficial Du Noüy, Cat. No. 70545.

Durante los ensayos se mantuvo constante la cantidad de Amidex adicionada a la pulpa (10 % en peso) y los grados Brix de la pulpa de guayaba. Los parámetros que se variaron fueron:

*El balance hidrofílico-lipofílico (6 y 8).

*Las concentraciones de las mezclas emulsificantes agregadas a la pulpa de guayaba para observar su influencia en la formación de la espuma , su densidad y velocidad de drenado.

*El tiempo de agitación para lograr la incorporación de aire a la pulpa de fruta usando para ello una batidora doméstica Oster, Mod. 4450-08 de cinco velocidades, agitando a la velocidad 5 (máxima) equivalente a 4600 r.p.m.

La velocidad de agitación seleccionada para producir espuma se hizo por pruebas preliminares usando la posición 1 (3200 r.p.m) y la 5 (4600 r.p.m) . Se relaciono la velocidad de agitación con el mayor incremento de volumen producido (Cheftel et al., 1987) a 10 , 20 y 30 minutos y a concentraciones de 0.4 y 0.7 % peso de emulsificante con HLB-6. Las r.p.m se midieron con el estroboscopio Ametek, modelo 964A.

2.2 SECADO DE ESPUMA EN HORNO DE CONVECCION FORZADA

Se realizó el secado de espuma utilizando un horno de convección forzada Ríos Rocha, Modelo HSCF-41, con ventilador a 3160 r.p.m y suministra un flujo horizontal de 0.15 m/s el cual se midió con el Omnisensor TSI , Modelo 1640. El secado se llevó a cabo a temperaturas de 60 y 70 °C. Se emplearon cajas de Petri para depositar las muestras de 3 a 4 g aprox. con espesores de cama de 3 y 5 mm respectivamente. Las cajas de Petri se retiraron cada 10 minutos para determinar el contenido de humedad. Las mediciones se realizaron por triplicado. Los datos obtenidos se graficaron para construir las curvas de secado, graficando humedad (gramos de H₂O / gramos de sólido seco) vs tiempo. Al producto final se le determinó el contenido de humedad. La espuma seleccionada para el secado fue la que presentó una mayor estabilidad y resistencia al manejo durante el secado.

2.3 SECADO DE ESPUMA POR FLUIDIZACION

2.3.1 EQUIPO DE FLUIDIZACIÓN

Para el secado de espuma por lecho fluidizado se empleó el siguiente equipo el cual fué construido en los talleres de la U.A.M-I y está diseñado en base a anteriores desarrollos experimentales (Vizcarra y Vernon, 1985; Peraza et al., 1986), en el presente proyecto al equipo se le adaptó una nueva columna de acrílico incluyendo el plato distribuidor y un ciclón. El equipo quedó constituido de la siguiente manera:

El aire se suministra a través de una línea proveniente de un compresor (1) que pasa por un filtro (2) y un manómetro (3), el aire pasa por una válvula (4) antes de llegar al rotámetro (5) y un banco de resistencias (6) que suministra el calor necesario para obtener las temperaturas de trabajo, está controlado por un regulador de temperaturas (7) Chromalox, Mod. 3910-11208. Luego el aire se hace pasar por el plato distribuidor de aluminio (8) con 10 cm de diámetro, con orificios de 2 mm de diámetro en arreglo rómbico de tal forma que entre cada orificio hay distancias de 5 y 6 mm. El sistema tiene una columna de acrílico (9) de 10 cm de diámetro y 132 cm de longitud que alberga el lecho (15). A la salida de la columna se encuentra un ciclón (10) o también pueden adaptarse filtros para recolectar el producto seco. Existen tomas para medir la caída de presión antes y después del plato distribuidor, las caídas de presión se miden con un manómetro diferencial de agua (11). Otras tomas son para la medición de temperaturas por medio de termopares (12) conectados a un registrador de temperaturas (13) Kipp-Zonen, Tipo BD112 en el cual se puede medir temperatura de bulbo seco y húmedo para luego en una carta psicrométrica leer la humedad del flujo de aire. A 30 cm del plato perforado se encuentra una entrada para la alimentación de espuma y que también puede usarse para introducir alguna varilla para desaglomerar el lecho (14) y finalmente el recolector de espuma seca (15). El equipo se muestra en la Fig. 2.1

2.3.2 CARACTERISTICAS DE LAS ESFERAS EMPLEADAS COMO LECHO DE FLUIDIZACION

Para el lecho de fluidización se seleccionaron esferas de vidrio de 3 mm de diámetro y de polipropileno de 10 mm de diámetro con densidades empacadas de 1.3 g/cm^3 y 0.3 g/cm^3 respectivamente. Las esferas de polipropileno son huecas, no tóxicas y resistentes químicamente; las de vidrio no son huecas y ambas generalmente se utilizan en los laboratorios para transferir el calor de manera homogénea en los fluidos. Las partículas empleadas no son porosas.

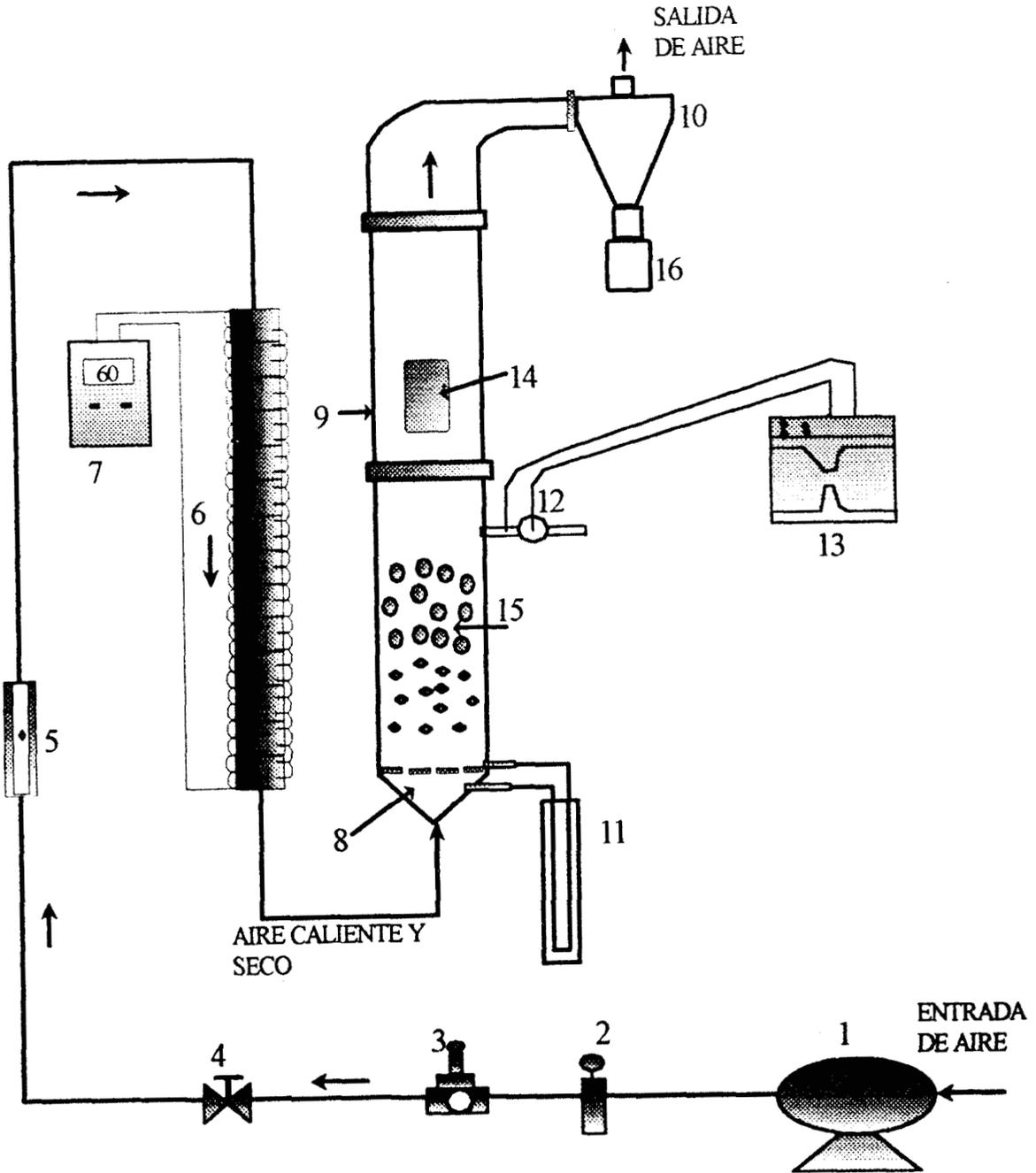


FIG 2.1. EQUIPO DE FLUIDIZACIÓN PARA EL SECADO DE ESPUMA.
 1.-Compresor, 2.-Filtro, 3.-Manómetro, 4.-Válvula, 5.-Rotámetro, 6.-Banco de resistencias, 7.-Controlador de temperatura, 8.-Plato distribuidor, 9.- Columna de fluidización, 10.- Ciclón, 11.- Manómetro diferencial de agua, 12.-Termopares, 13.-Registrador de temperaturas, 14.- Entrada para alimentación de espuma, 15.-Lecho de esferas con espuma, 16.-Recolector de polvo.

2.3.2.1 POROSIDAD (ϵ) DEL LECHO FIJO CON ESFERAS.

a) **La geometría de la partícula**, a valores pequeños de la esfericidad (φ) corresponde una porosidad (ϵ) mayor (Geldart 1986,1990). En nuestro caso tomando $\varphi = 1$, para empacado aereado $\epsilon = 0.41$ y para empacado compacto $\epsilon = 0.32$.

b) **Tamaño de partícula**. A partículas más grandes corresponde el valor mínimo de ϵ para empacado aereado, el valor de ϵ para empacado compacto no es dependiente del tamaño (Geldart 1986,1990). Para el caso de las esferas empleadas: $\epsilon = 0.386$ para valores mayores a 3 mm de diámetro (diámetro de las esferas de vidrio = 3mm, diámetro de las esferas de polipropileno = 10 mm).

c) **Distribución del tamaño**. Entre mas amplia es la distribución del tamaño de partícula la porosidad disminuye (Geldart 1986,1990).

En nuestro caso, se notó durante el desarrollo experimental que lo anterior no resulta tan cierto cuando se mezclan las partículas de vidrio y las de polipropileno porque existe una diferencia de densidades, obstaculizándose el completo mezclado del lecho. Manteniendo más independencia con la relación establecida de tamaño de partícula-porosidad (inciso b).

2.3.2.2 SELECCION DEL LECHO DE FLUIDIZACION PARA EL SECADO DE ESPUMA.

Para la realización de la parte experimental de secado el lecho empleado conservó la relación Longitud del lecho/ Diámetro =1 ($L/D = 1$) y se graficó caída de presión (ΔP) vs velocidad superficial del flujo del aire para los lechos constituidos con esferas de vidrio y

polipropileno, a estos se les determinó la velocidad mínima de fluidización sin agregarles o impregnarles espuma.

Una vez conocidas las características de fluidización de las esferas de vidrio y las de polipropileno se les agregó la espuma y se observó el comportamiento que tienen durante su secado. La espuma depositada en el lecho se hizo introduciendo las esferas en cilindros que contenían aprox. 500 g de espuma y luego las esferas impregnadas se depositaron en la cámara de fluidización para ser secadas. Otra forma y la más adecuada para hacer el seguimiento de la cinética de secado consistió en introducir 61 g de espuma al lecho ya fluidizado.

Dado que el secado de la espuma no fue realizado con eficacia por los lechos constituidos con un solo tipo de esferas se realizaron pruebas de secado con lechos combinados en diferentes proporciones de volumen de esferas de vidrio y de polipropileno, se observó el comportamiento de secado y de fluidización de los lechos. Para lechos combinados también se conservó la relación $L/D=1$, pero se varió la proporción en volumen del lecho ocupada por cada tipo de esfera. En la tabla 2.1 se muestran las combinaciones de porcentaje en volumen ocupado por cada tipo de esferas:

Tabla 2.1 VOLUMEN (%) OCUPADO POR CADA TIPO DE ESFERA	
Esferas de vidrio	Esferas de polipropileno
50	50
30	70
70	30

Para lechos con espuma que presentaron opción para ser utilizados en el secado de espuma se graficó caída de presión vs. velocidad superficial del aire que entra al lecho y conocer los rangos a los cuales fluidizan y obtienen su velocidad mínima de fluidización. La temperatura del flujo de aire fue de 60 °C.

2.3.3 CURVAS DE SECADO.

El seguimiento de las curvas de secado se realizó para el lecho combinado con 70 % en volumen de esferas de vidrio y relación $L/D = 1$, que presentó un mejor comportamiento de fluidización y de secado. Se midieron las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo del aire antes de la introducción de la espuma al lecho y durante el proceso de secado de la espuma usando el graficador Kipp-Zonen, tipo BD112 y en cartas psicrométricas a 585 mm de Hg, presión atmosférica de la Cd. de México, se leyó la humedad total (H) contenida en el aire saliente del equipo de fluidización durante el secado. Con los datos de humedad se calculó:

Volumen húmedo (V_h) de una mezcla vapor-gas, es el volumen de masa unitaria de gas seco y de su vapor acompañante a la temperatura y presión dominantes. Para una mezcla de humedad absoluta H , en T_G (temperatura del gas) y P_o presión atmosférica, la ley de los gases ideales da el volumen húmedo (V_h en m^3 / Kg de aire seco) como:

$$V_h = \frac{0.08208 T_G + 22.41}{P_o} \left(\frac{1}{29} + \frac{H}{18} \right) \quad (2.1)$$

El flujo volumétrico de aire F , (Kg de aire seco / s), es:

$$F = G \left(\frac{1}{V_h} \right) \quad (2.2)$$

La rapidez de evaporación R_{evap} , (Kg de agua evaporada / s), es

$$R_{evap} = F (H_r H) \quad (2.3)$$

Los valores de rapidez de evaporación representan la cantidad de agua que se desprende de la espuma al ser secada por el lecho fluidizado, a partir de estos datos y de la humedad en base seca de la espuma se obtuvo la cinética de secado y se realizó el análisis de las curvas de secado para su comparación y discusión con las obtenidas para el secado de espuma en horno de convección forzada.

Posteriormente se midió el contenido de humedad del polvo obtenido. Así como también el área estimada de secado por la superficie de las esferas de vidrio y polipropileno. Al producto seco obtenido del secado de espuma en el horno de convección forzada y por fluidización se les midió la dispersabilidad. La dispersabilidad es el tiempo que tardan en disolverse 2 g de producto seco en 100 ml de agua destilada a la velocidad 5 de una parrilla con mecanismo de agitación de acuerdo con Alkahtani et al., 1990.

RESULTADOS

3.1 ESPUMAS

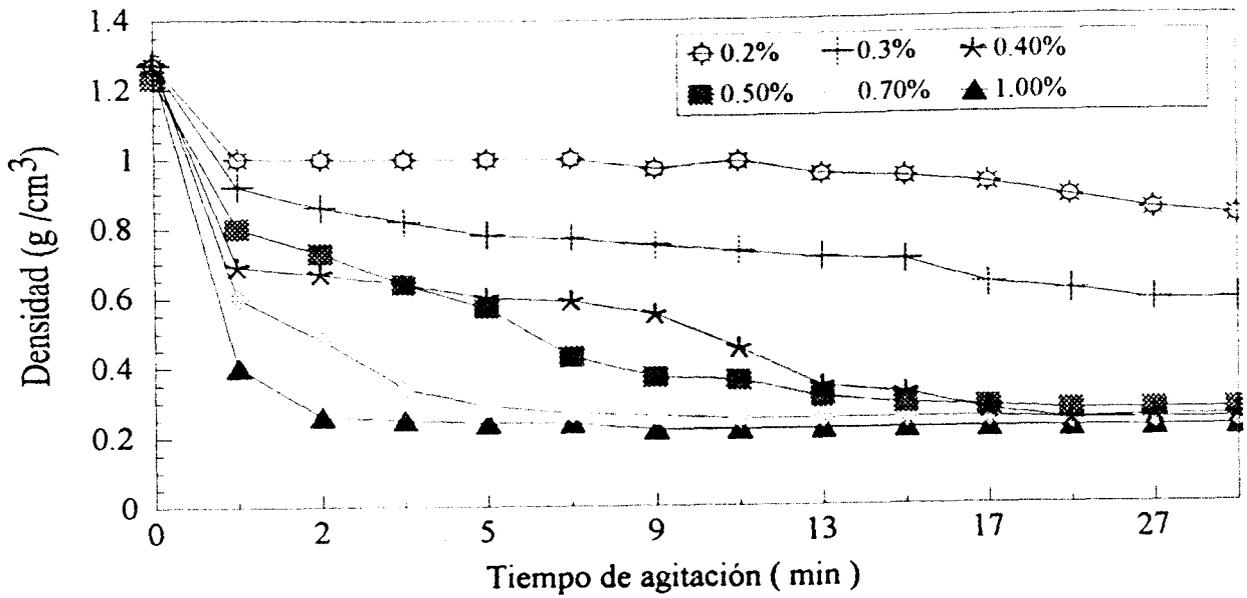
Los emulsificantes empleados (sorbac 60 y polisorbac 80) con su valores originales de HLB tienen especificaciones en su uso como se muestran en el apéndice A, los cuales no corresponden a la producción de espuma por que estos tienen valores de HLB de 4.7 con funciones de emulsificante tipo W/O y 14.9 con funciones emulsificantes tipo O/W , por tal motivo los emulsificantes se mezclaron para obtener HLB de 6 y 8 para aplicarse a la pulpa de guayaba y lograr mejores resultados en la formación de espuma como consecuencia de una mayor capacidad de la mezcla de emulsificantes para incorporar aire en la pulpa de guayaba.

La mezcla de emulsificantes se diluyó al 10% en agua antes de aplicarla a la pulpa para facilitar la producción de espuma dadas las características físicas de los emulsificantes empleados. El sorbac 60 se encuentra en forma de hojuelas y el polisorbac 80 en forma líquida.

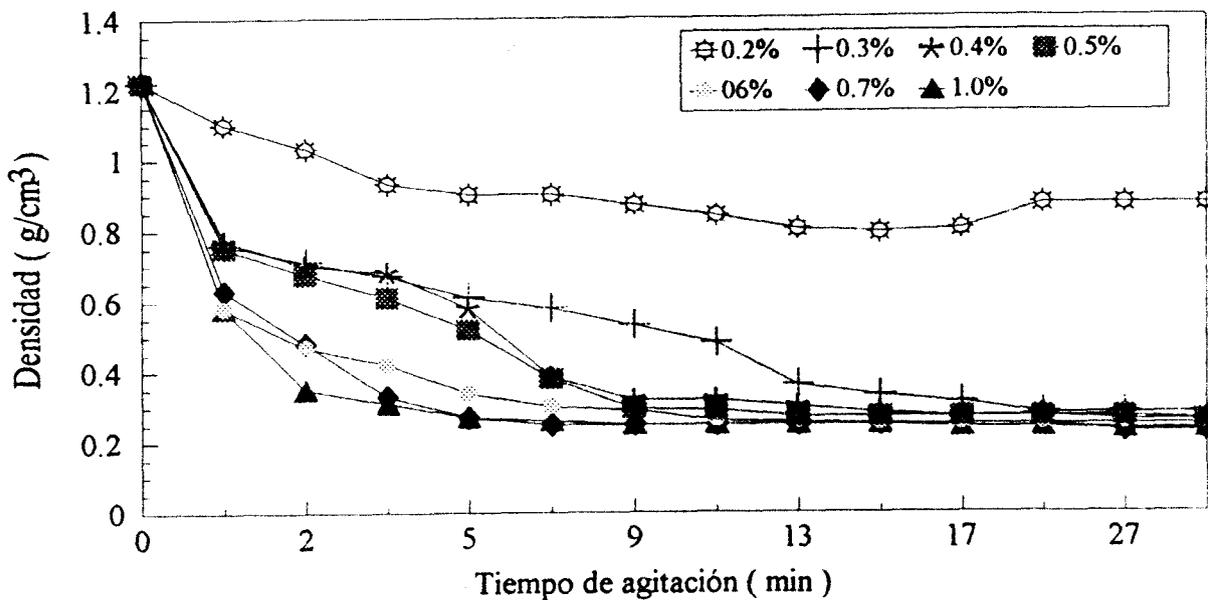
La determinación de los niveles de concentración óptima de la mezcla de emulsificantes se hizo construyendo gráficas de densidad de la espuma a distintos tiempos de agitación. En las gráficas 3.1 y 3.2 se puede notar que la aplicación de concentraciones mayores a 0.4% y menores a 1.0% de emulsificante con HLB de 6 o 8 tienen comportamientos similares con respecto al comportamiento de la densidad vs el tiempo de agitación, lográndose estabilizar su densidad en rangos de 0.25 a 0.35 g/ cm³ con tiempos de agitación mayores a 9 minutos (a velocidades de agitación de 4600 r.p.m.)

Para concentraciones menores al 0.4% se hace más difícil la estabilización en la densidad y esto es debido en gran parte a la eficiencia de la mezcla de emulsificantes la cual no tiene la capacidad suficiente para incorporar aire a la pulpa, lo cual se ve reflejado en el valor de su densidad y su velocidad de drenado que la hace inadecuada para el manejo en los procesos de secado, pues tiende a escurrirse.

Incremento de volumen, se obtuvieron resultados del porcentaje incrementado de volumen con respecto al volumen inicial de la pulpa cuando se aplica la mezcla emulsificante con HLB = 6. Estos datos se reportan en las tablas 3.1 y 3.2 .



Gráfica 3.1 Obtención de espuma a diferentes concentraciones de emulsificante y variando el tiempo de agitación; HLB (6) , Amidex (10 %).



Gráfica 3.2 Obtención de espuma a diferentes concentraciones de emulsificante y variando el tiempo de agitación; HLB (8), Amidex (10 %).

Tiempo de agitación (min)	10		20		30	
Concentración del emulsificante(p.p)	0.4	0.7	0.4	0.7	0.4	0.7
Incremento del volumen (%)	9.99	25	14.9	49.99	15	50

Tabla 3.1 Incremento del volumen con respecto al volumen original agitado a 3200 r.p.m (velocidad 1).

Tiempo de agitación (min)	10		20		30	
Concentración del emulsificante (p.p)	0.4	0.7	0.4	0.7	0.4	0.7
Incremento del volumen (%)	49.99	100	89.6	150	90	150

Tabla 3.2. Incremento del volumen con respecto al volumen original agitado a 4600 r.p.m (velocidad 5).

Como se puede ver el incremento de volumen esta relacionado con la concentración del agente emulsificante y la velocidad de agitación pero limitado por el tiempo de agitación. Esto último, es explicable si se toma en cuenta que la espuma formada en vez de incorporar más aire empieza a coalescer porque las burbujas de aire dispersas en el medio líquido se rompen más rápido de lo que se forman.

La tensión superficial de la espuma fue medida con el equipo CSC-Du Nouy. El rango de medición de este instrumento es de 0 a 90 dinas/cm. Sin embargo, no fue posible realizar la medición en la espuma por que esta se encuentra a valores menores a 1 dina/cm que es imperceptible al instrumento empleado así lo demuestran los valores obtenidos para espuma producida a diferentes tiempos de agitación y con concentraciones de 0.5 % de mezcla emulsificante, ver tabla 3.3. Se puede notar que a tiempos de agitación mayores a 1 minuto la tensión superficial resulta difícil de medir. Esto se debe probablemente a la cantidad de aire que se incorpora a la pulpa formando un tipo de emulsión aire -líquido que disminuye la tensión superficial del líquido original.

Concentración del emulsificante (% en peso) adicionada a la pulpa	Tiempo de agitación (minutos) 4600 r.p.m	Tensión superficial , γ (dinas/cm) a 25 °C.
0.5	8	no detectable
0.5	5	no detectable
0.5	1	1.2
pulpa sola	0	12.1

Tabla 3.3. Efecto de la incorporación de aire en la tensión superficial de la pulpa a diferentes tiempos de agitación.

La estabilidad de la espuma evaluada por la técnica de drenado para espumas provenientes de diferentes concentraciones de emulsificantes y con distintos valores de densidad mostraron que a concentraciones de emulsificante menores a 0.4% y densidades mayores de 0.5 g/cm³ presentaron drenado de líquido, en promedio de 5ml/hora. Para espumas con densidades menores a 0.4 g/cm³ y concentraciones de emulsificante mayores a 0.4 % presentaron nula cantidad de líquido drenado. Estos resultados fueron idénticos para HLB-6 y HLB-8.

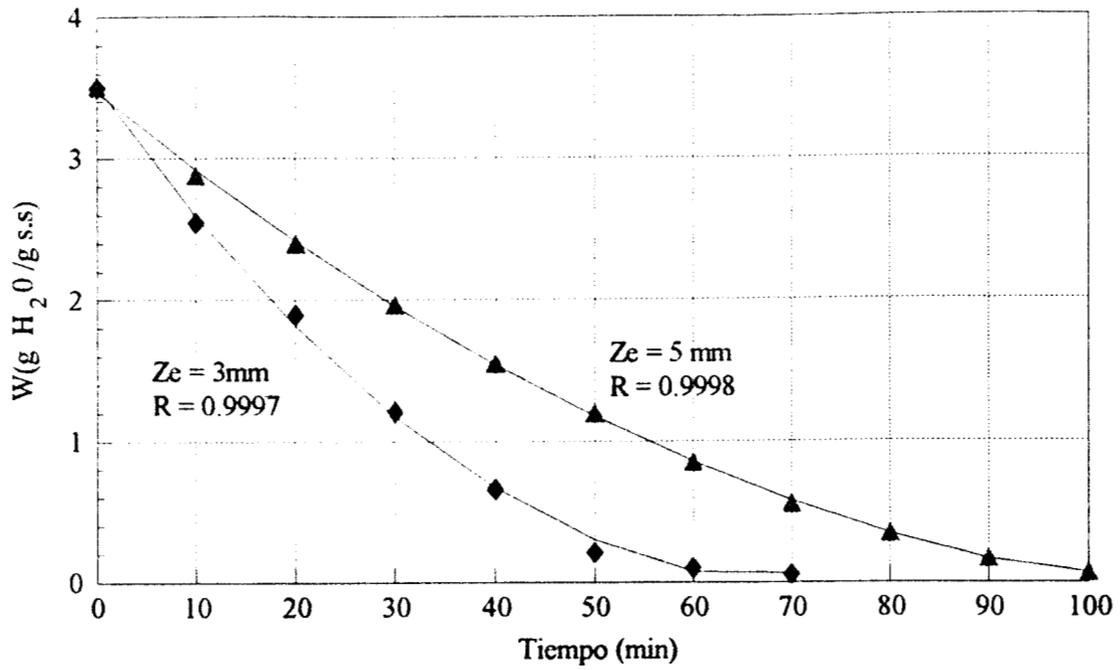
Como se puede observar la densidad de la espuma y la velocidad de líquido drenado representaron los parámetros para medir la estabilidad de la espuma producida y se encontró que las espumas que observaron mayor estabilidad son las que se obtuvieron a concentraciones de emulsificantes de 0.5% a 1.0 % con tiempos de agitación mayores a 9 minutos y que dieron densidades de 0.25 a 0.35 g/cm³ tanto para balances hidrofílicos-lipofílicos de 6 y 8 de los emulsificantes empleados.

Finalmente la espuma que se empleo para el secado en lecho fluidizado y en el horno de secado corresponde a las siguientes características (ver tabla 3.4):

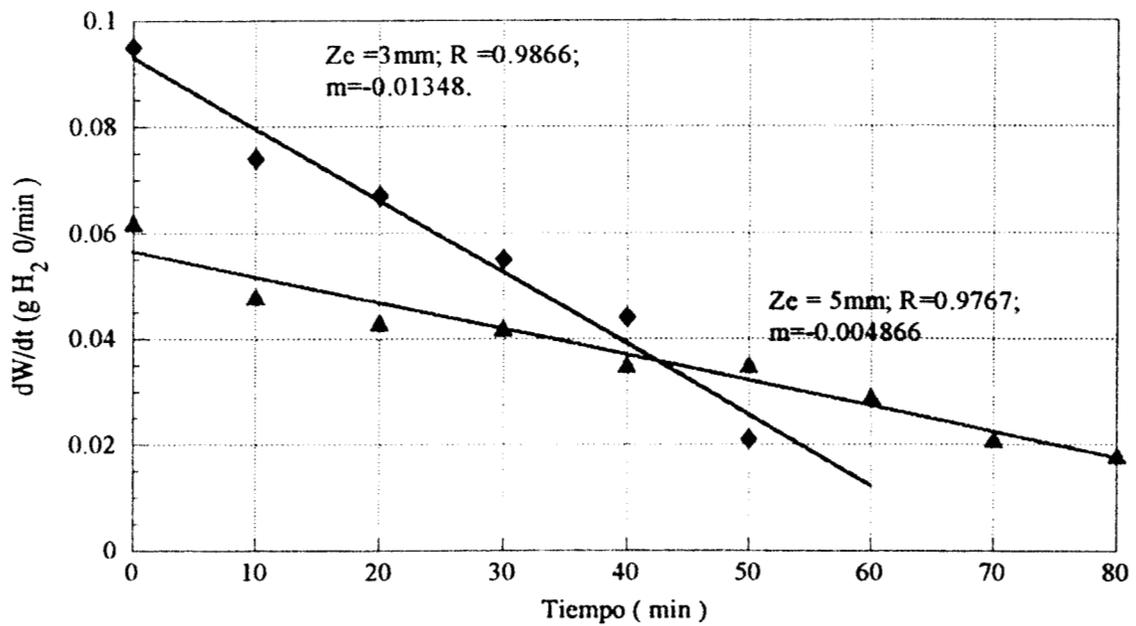
Tabla 3.4 Características de la espuma empleada en el secado	
Densidad	0.25 a 0.35 g/cm ³
Concentración del emulsificante	0.5%
Concentración de amidex-10	10%
Grados Brix de la pulpa de guayaba	12 ^o
Tiempo de agitación	10 minutos
Agitación	4600 r.p.m
HLB	6

3.2 SECADO DE ESPUMA EN HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA.

Se secó espuma en un horno de convección forzada con flujo horizontal (velocidad de 0.15 m/s) a 60 y 70 °C. La espuma se depositó en cajas de Petri con espesores de cama de 3 y 5 mm. La pérdida de humedad en la espuma se midió cada 10 minutos para cada una de las muestras y se obtuvieron las curvas de secado humedad W (b.s) vs tiempo que se muestran en las gráficas 3.3, 3.3a y las curvas de velocidad de secado dW/dt vs tiempo se muestran en la gráficas 3.4, y 3.4a. Las curvas 3.3 y 3.4 se ajustaron a modelos polinómicos de segundo grado, los cuales se reportan en los apéndices B3 y B5. En la tabla 3.5 se encuentran los tiempos de secado a los cuales las muestras alcanzaron un contenido de humedad aprox. de 3.6 % (b.h), se puede notar que para espesores de 3 mm el tiempo de secado es menor que para espesores de 5 mm tanto a 60 como a 70°C y para un mismo espesor se ve afectado por la temperatura también pero en menor medida para espesores de 3mm. Lo anterior evidencia que el tiempo de secado esta influenciado en mayor medida por el espesor de cama.



Gráfica 3.3 Representación de las curvas de secado W vs tiempo para espuma depositada a espesores (Z_e) de 3 y 5 mm a 60°C .



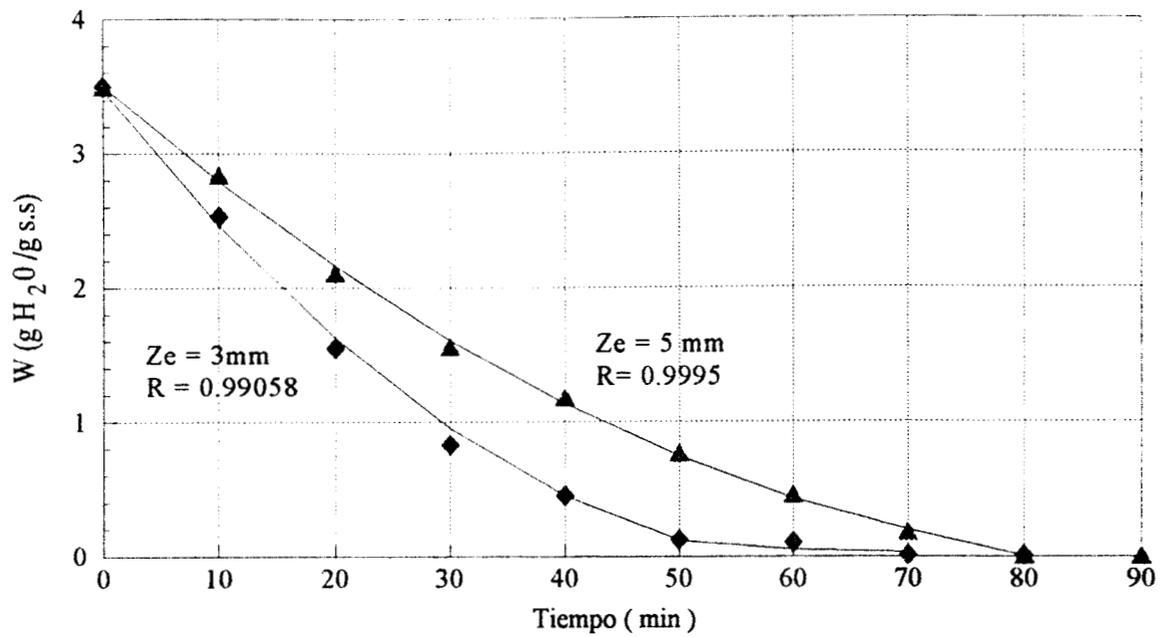
Gráfica 3.3a Representación de las velocidades de secado para espuma depositada a espesores de 3 y 5 mm a 60°C .

Tabla 3.5 Secado de espuma en horno				
Temperatura	60 °C		70 °C	
Espesor (mm.)	3	5	3	5
Tiempo (min.)	60	100	50	80
% Humedad	3.7	3.7	3.5	3.5

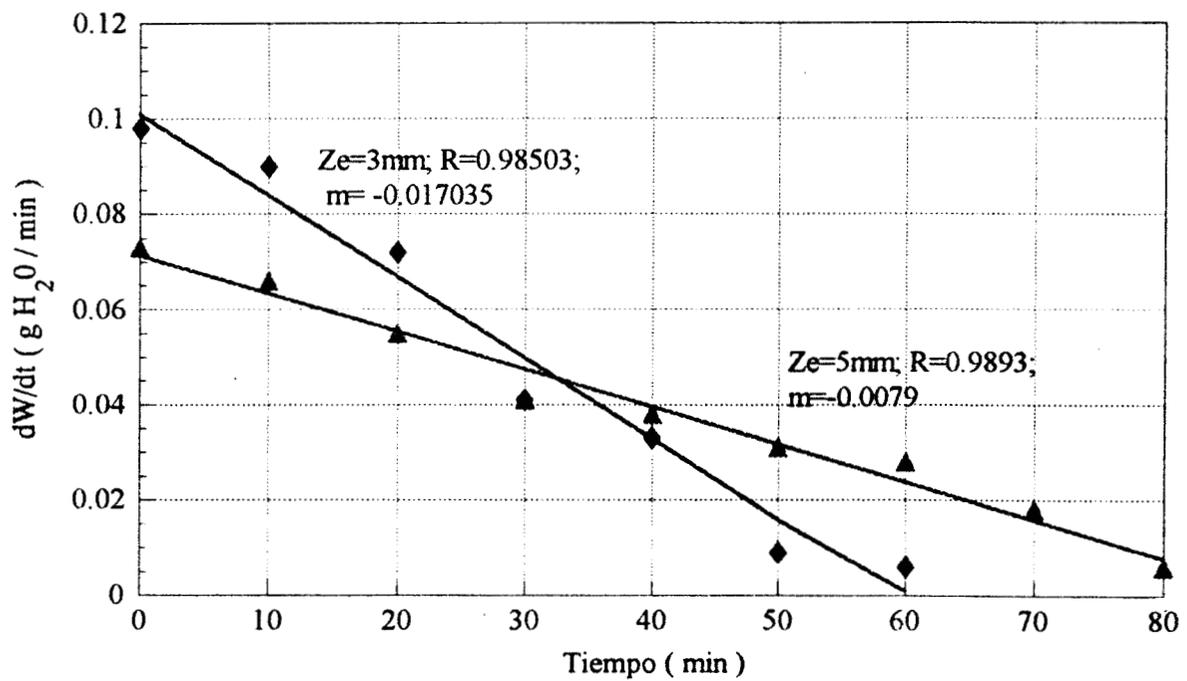
En la gráfica 3.3a y 3.4a se muestran las velocidades de secado (dW / dt) vs el tiempo de secado a 60 y 70°C, en estas se puede ver que predomina el periodo de secado de velocidad decreciente y que el periodo de secado a velocidad constante no fue muy notorio lo que favorece una retención de volátiles según lo reportado por Menting y Hoogstad, 1967 y Kerkhof y Thijssen, 1977. Este comportamiento en la cinética de secado se debe probablemente a la naturaleza de la espuma que es un tipo de emulsión aire-líquido (burbujas de aire en un medio líquido) la cual al ponerse en contacto con aire caliente hace que la superficie de la espuma se deseque rápidamente provocando la formación de una costra que impide que la evaporación se pueda llevar a una velocidad constante y que probablemente un fenómeno de difusión del líquido a través de la costra controla la velocidad de secado.

Al final del secado la espuma presentó el aspecto de una hojuela que suele pegarse a la superficie y fue necesario desprenderla con espátula para su almacenamiento, determinación de su contenido final de humedad y la medición del tiempo de dispersabilidad. El contenido de humedad fue aprox. de 3.6 % (b.h) en promedio y el tiempo de dispersabilidad de 1.40 minutos.

El área superficial de secado expuesta tomando como base de cálculo las dimensiones máximas del horno de secado de convección forzada son largo 30 cm y ancho 30 cm lo que da un área equivalente de 900 cm².



Gráfica 3.4 Representación de las curvas de secado W vs tiempo para espuma depositada a espesores (Ze) de 3 y 5 mm y a T= 70 °C



Gráfica 3.4a Representación de las velocidades de secado para espuma depositada a espesores de 3 y 5 mm a 70°C.

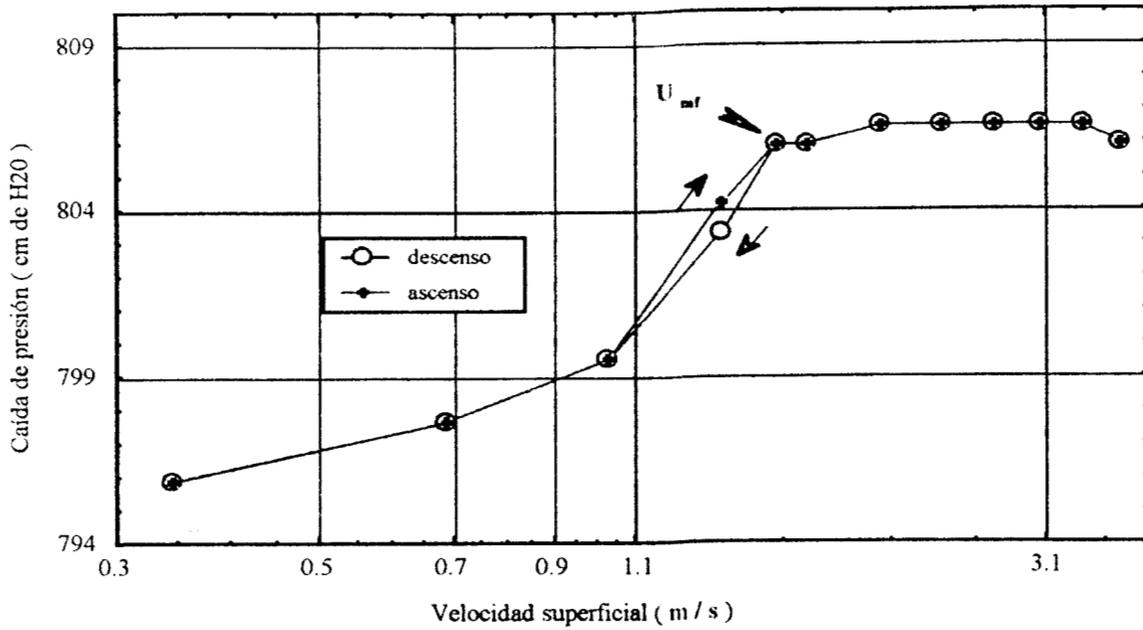
3.3 FLUIDIZACION

Ya se ha mencionado en la sección 1.3 que existe información para el secado de sólidos por fluidización (Kunii y Levenspiel, 1991; Brennan et al., 1991; Mujumdar, 1987) pero que para materiales muy húmedos presentan problemas de aglomeración que imposibilitan el secado por lo que se buscaron materiales inertes que pudieran funcionar como lechos que soportaran la espuma y a la vez la distribuyeran sobre su superficie para poder lograr el objetivo de tener grandes áreas de secado y que al mismo tiempo se pudiera desprender una vez seca la espuma e incorporarse al flujo de aire como ocurre en los lechos fluidizados con transporte neumático, ver Fig. 1.4(h). Los resultados logrados de esta iniciativa se exponen a continuación.

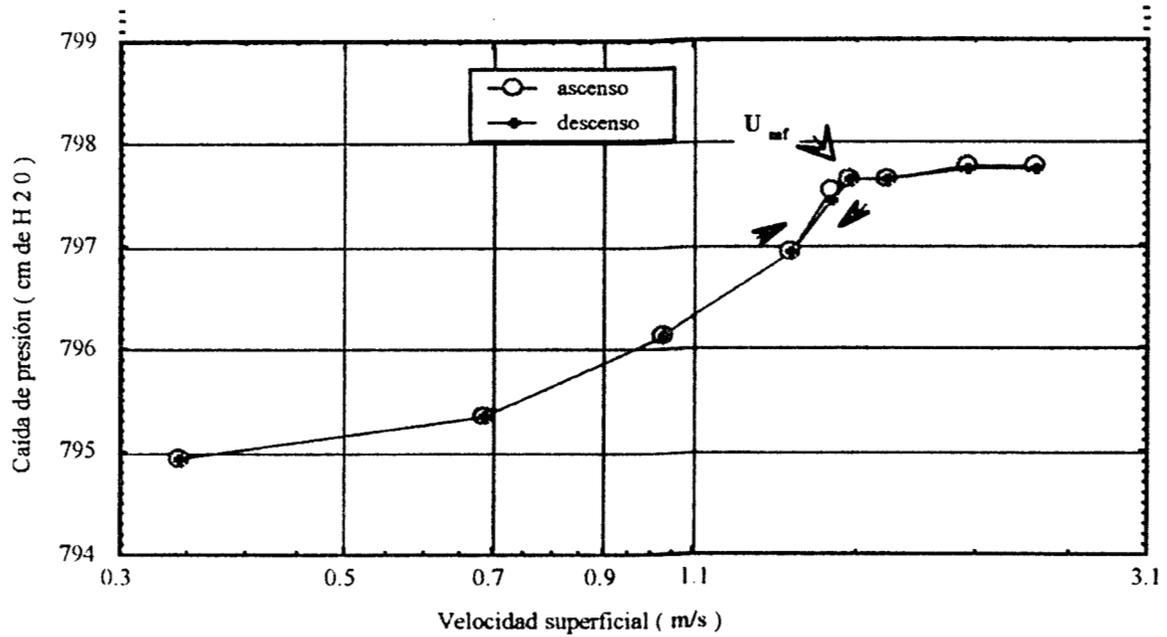
Caídas de presión para lechos sin espuma. En las gráficas 3.5 y 3.6 se muestran las caídas de presión vs la velocidad superficial para lechos constituidos con esferas de vidrio de 3 mm de diámetro y para esferas de polipropileno de 10 mm, ambas son caracterizadas sin la introducción de espuma para una estimación aproximada de la velocidad necesaria del flujo de aire a ser utilizada durante las pruebas posteriores con impregnación de espuma.

Una vez que se obtuvieron las condiciones a las cuales se puede producir espuma más estable esta se trató de secar en lechos constituidos con las esferas de polipropileno y de vidrio de 10 y 3 mm de diámetro respectivamente y lechos combinados con los dos tipos de esferas en diferentes proporciones. La relación del lecho fue de $L/D=1$ tanto para los lechos constituidos por un tipo de esfera como para lechos combinados en los que se varió la proporción de volumen.

Considerando los resultados obtenidos de introducir espuma a los lechos de la tabla 3.6, se puede notar que secar la espuma en un lecho combinado con 70 % en volumen de esferas de vidrio y 30 % de esferas de polipropileno presentó relativamente las características más aceptables para llevar a cabo el secado de espuma, y el cual fue tomado como referencia para el desarrollo de los cálculos de secado. En la figura 3.7 se muestran las caídas de presión vs velocidad superficial para un lecho combinado sin espuma.



Gráfica 3.5 Efecto de la velocidad de fluidización en la caída de presión y velocidad mínima de fluidización (U_{mf}) para esferas de vidrio de 3 mm de diámetro.



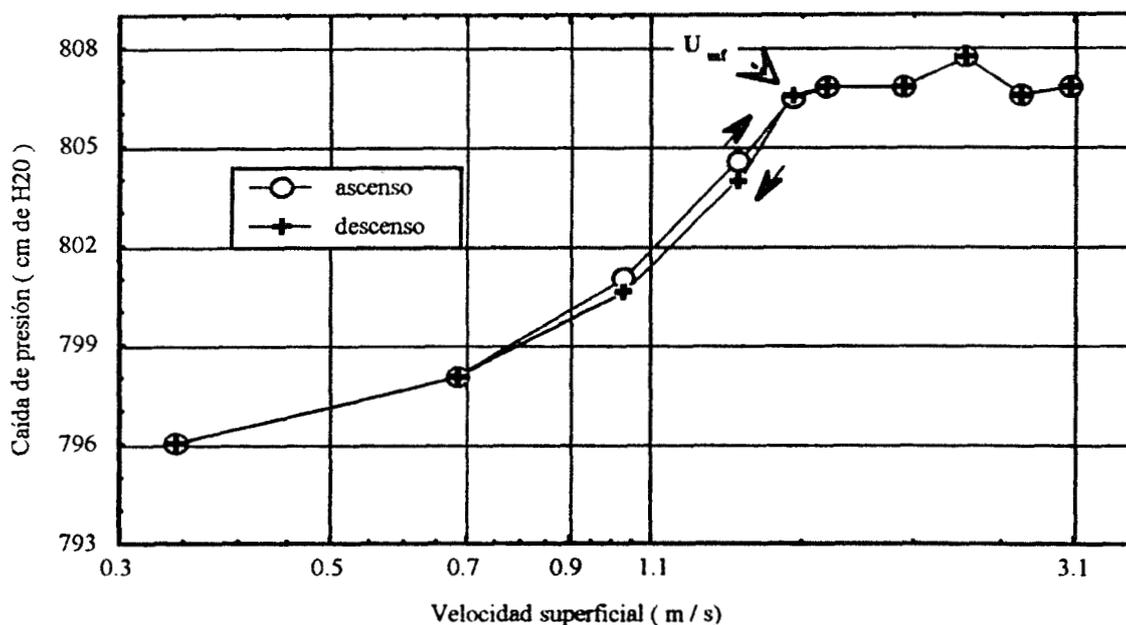
Gráfica 3.6 Efecto de la velocidad de fluidización en la caída de presión y la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}) para esferas de polipropileno 10 mm de diámetro.

Tabla 3.6.-Pruebas preliminares para secado de espuma en lechos de vidrio y polipropileno de espuma; L=10 cm; D=10 cm.

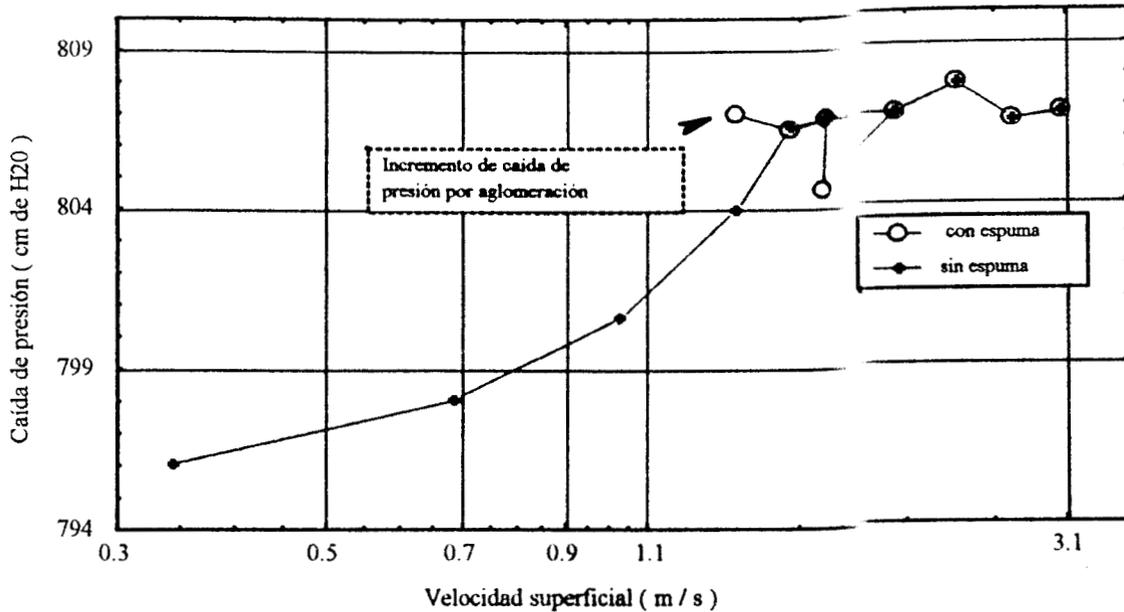
TIPO DE LECHO L / D = 1	COMPORTAMIENTO
Vidrio (100 % Vol.)	Al introducir la espuma esta puede distribuirse en forma rápida (15 seg.) sobre toda la superficie, pero también se adhiere y seca en la superficie dificultándose el transporte neumático de las partes secas y desprendiéndose pero en forma de partículas muy finas que no fueron totalmente capturadas para su análisis de contenido de humedad y dispersabilidad.
Polipropileno (100 % Vol.)	La espuma se distribuye sobre la superficie pero se necesita 1.5 la velocidad mínima de fluidización para poder romper las conglomeraciones que se llegan a formar entre la espuma que esta secándose y las esferas de polipropileno. Debido a que la espuma se pega en las esferas este proceso no se pudo alimentar en forma continua porque se aglomeraba y secaba impidiendo la fluidización. Aproximadamente el 50% del producto se queda pegado en la superficie de las esferas y las paredes de la columna. El que se logra recolectar tiene color amarillo claro y aroma muy semejante a la de guayaba, no se obtuvieron datos sobre sabor.
LECHO COMBINADO (% EN VOLUMEN)	
PROPORCION: 70% vidrio, 30% de polipropileno.	El lecho combinado constituido por 70 % de esferas de vidrio y 30 % de esferas de polipropileno presentó menos problemas en cuanto al comportamiento de fluidización porque fue más constante en la distribución de la espuma y mantuvo en forma constante la fluidización, disminuyendo las pérdidas por adhesión de la espuma seca en la superficie y de este tipo de lecho se presenta el análisis de secado y sus características de fluidización.
PROPORCION: 50 % vidrio, 50 % polipropileno.	El lecho se conglomeró, no fluidizó
PROPORCION: 30% vidrio, 70 % polipropileno.	El lecho se conglomeró, no fluidizó

Caída de presión para el lecho combinado con espuma. Con respecto al comportamiento de fluidización presentado se midieron las caídas de presión desde el momento de introducir la espuma en el lecho fluidizado hasta que se seca esta espuma. En la gráfica 3.8 se

puede ver que existe una caída de presión momentánea que corresponde a la introducción de la espuma efecto que se va haciendo despreciable cuando se emplean velocidades mayores a 1.7 m/s, a velocidades mayores a 1.7 m/s la espuma se distribuye inmediatamente por la superficie de las esferas favoreciendo el proceso de secado. Pero a velocidades menores a esta el lecho se conglomeró impidiendo la fluidización del lecho y el transporte neumático de la espuma secada como consecuencia de que la espuma ocupa los huecos entre las esferas e impide el movimiento de las esferas contribuyendo a que se peguen entre si. Por otra parte, la caída de presión aumenta al impedir que el flujo de aire fluya libremente por los huecos entre las esferas (ver gráfica 3.8).



Gráfica 3.7 Efecto de la velocidad de fluidización en la caída de presión y la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}) para un lecho combinado con esferas de vidrio (70 % vol.) de 3 mm de diámetro y esferas de polipropileno (30 % vol.) de 10 mm de diámetro .



Gráfica 3.8 Influencia en la caída de presión por la introducción de espuma al lecho fluidizado combinado (70 % vol con esferas de vidrio y 30 % con esferas de polipropileno).

Del estudio hidrodinámico realizado, se seleccionó como velocidad de fluidización, 2.28 m/s, la cual favorece el secado adecuado de la espuma. El lecho así fluidizado, presentó características del tipo flujo pistón.

En la tabla 3.6, se presentan las observaciones a las pruebas preliminares que se realizaron antes de fijar las condiciones correspondientes a la velocidad de 2.28 m/s.

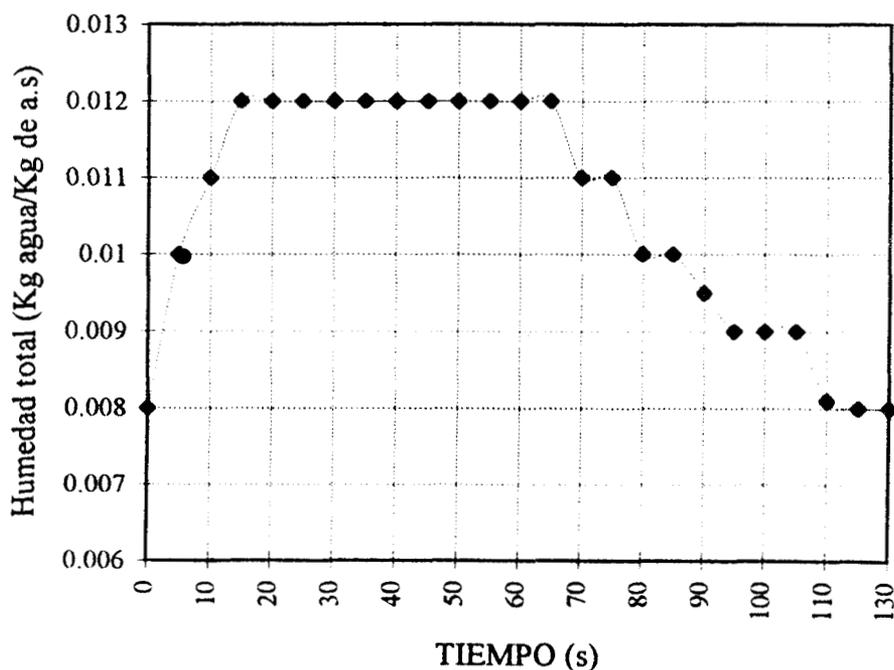
Con las condiciones anteriores se secó la espuma y a partir de datos de temperatura de bulbo seco y húmedo del flujo de aire secante se obtuvieron:

*La humedad o cantidad de agua que se incorporó al flujo de aire y que fue leída en una carta psicrométrica (los valores se encuentran en el apéndice B.11). En la gráfica 3.9 se muestra la incorporación de la humedad total leída en carta psicrométrica en la corriente de aire que atraviesa el lecho y el lapso de tiempo en el que se lleva a cabo el secado. El tiempo estimado de secado es aquel que está relacionado con el punto que alcanza la humedad inicial del flujo de aire antes de introducir la espuma al lecho fluidizado.

*La rapidez de evaporación (R_{evap}) del agua de la espuma a un flujo de aire de entrada constante; estos valores están reportados en el apéndice B.12. Los datos de R_{evap} se transformaron a humedad base seca y se graficaron contra el tiempo de secado para obtener la cinética de secado para su análisis y comparación.

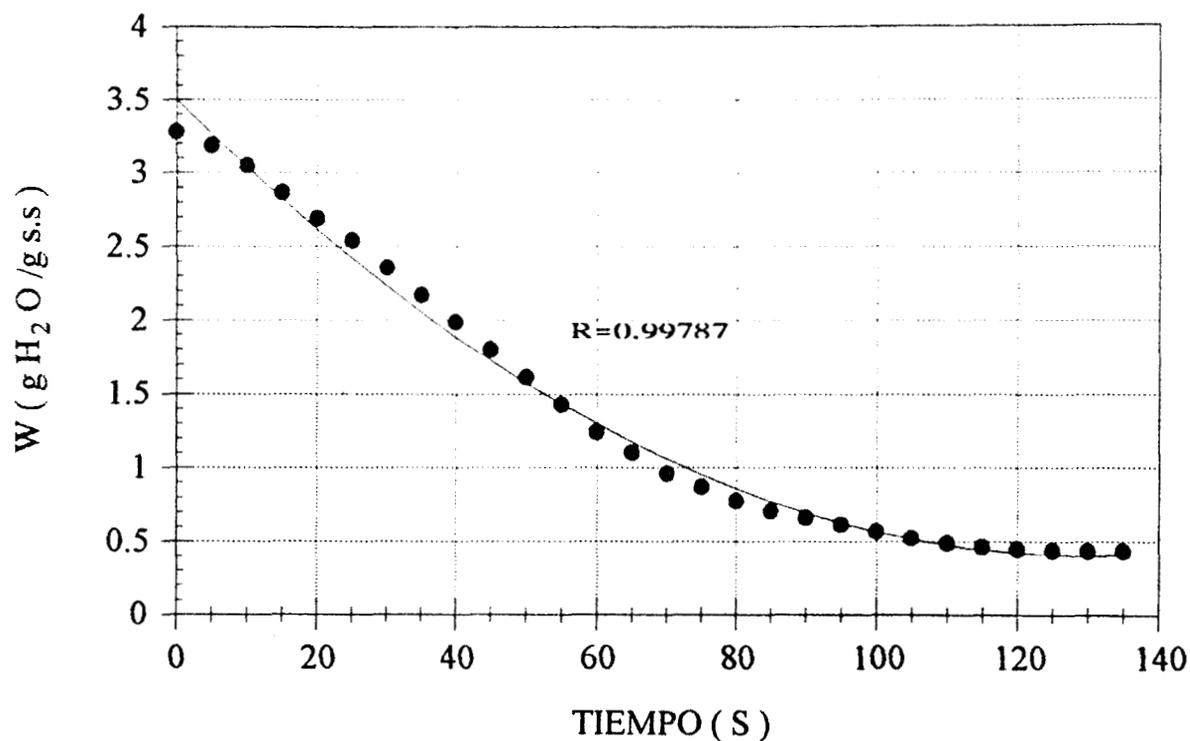
3.3.1.-CURVAS DE SECADO DE ESPUMA EN UN LECHO FLUIDIZADO COMBINADO.

Las lecturas de humedad total (ver gráfica 3.9) del flujo de aire durante el secado fueron extraídas a intervalos de 5 segundos de las gráficas de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo registradas en el graficador Kipp-Zonnen y expresadas en unidades de humedad base seca (g H₂O / g sólido seco) para obtener gráficos de humedad base seca (W) vs tiempo, ver gráfica 3.10 y Velocidad de secado (dW/dt) vs tiempo, gráfica 3.10 (a).



Gráfica 3.9 Humedades totales obtenidas a partir de lecturas de bulbo seco y húmedo del graficador Kipp-Zonnen durante el secado de espuma en el lecho fluidizado.

Las condiciones del secado fueron: velocidad del flujo de aire, 2.28 m/s y Temperatura, 60 °C.



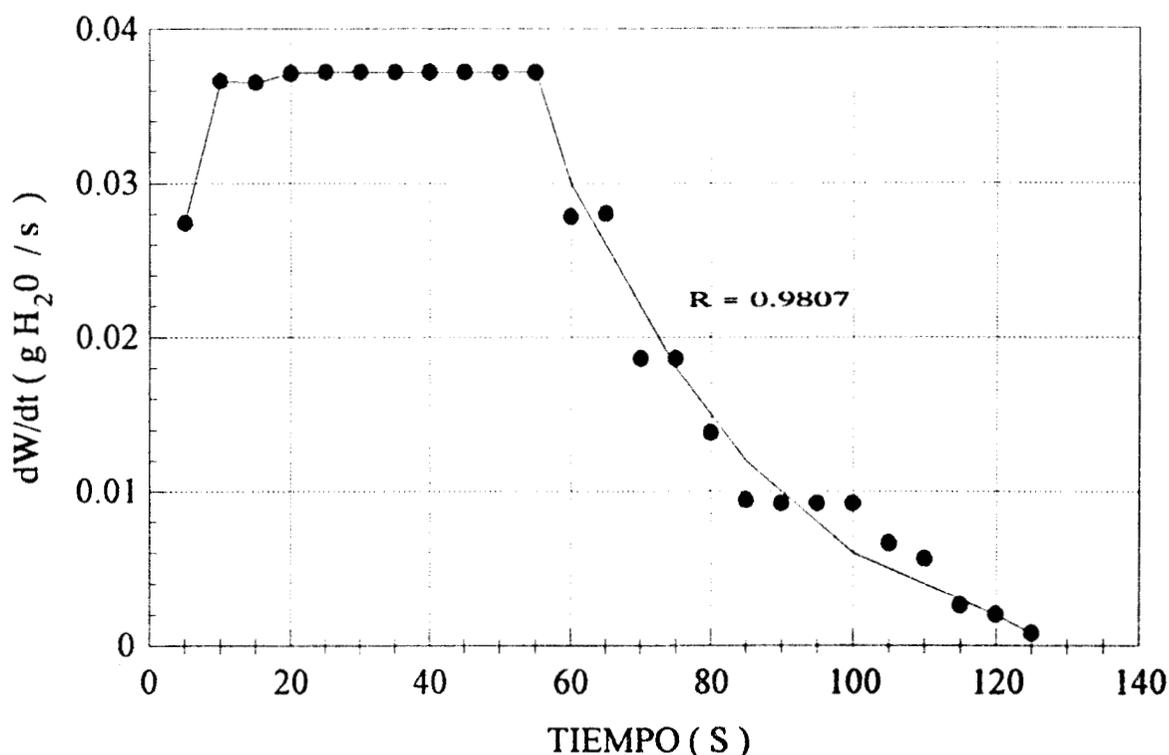
Gráfica 3.10 Representación de la pérdida de humedad W (b.s) de la espuma depositada en el lecho fluidizado combinado (70 % esferas de vidrio y 30 % esferas de polipropileno). La curva se ajusto a un modelo polinómico de 2do. grado correspondiente a $W = 3.58 + (-0.05016) t + (0.000199) t^2$.

El análisis de los puntos experimentales obtenidos para la construcción de la cinética de secado y expuestos en la gráfica 3.10 evidencian en los primeros 10 segundos un período de equilibrio entre las condiciones de la superficie de las esferas en el lecho y las del aire que esta fluyendo en el sistema.

De 10 a 55 segundos los puntos experimentales muestran una tendencia rectilínea que se asocia con un periodo de secado a velocidad constante lo cual se llega a corroborar en la gráfica 3.10(a).

Por último, de los 55 a los 130 segundos el comportamiento muestra una tendencia de secado de velocidad decreciente lo cual también corresponde a la pendiente de los puntos experimentales mostrados en la gráfica 3.10(a).

Recopilando lo anterior se observa que el periodo de secado constante es menor que el periodo de secado decreciente lo cual favorecería la retención de volátiles según por Menting y Hoogstad, 1967 y Kerkhof y Thijssen, 1977.



Gráfica 3.10(a) Representación de la velocidad de secado (dW/dt) para espuma secada en un lecho fluidizado combinado (70 % esferas de vidrio y 30 % esferas de polipropileno)

El comportamiento observado es muy probable que se deba a la estructura de la espuma la cual esta constituida por burbujas de aire dispersa en la fase liquida (pulpa); esta estructura facilita el secado, el cual se ve favorecido en primer lugar por la velocidad del aire secante que

es mucho mayor que el manejo en un horno de convección forzada. En segundo lugar, la superficie disponible de secado se incrementa por la geometría esférica usada para el soporte de la espuma y la distribución que se da en el lecho al estar en continuo movimiento. Como consecuencia de las dos anteriores el espesor de la espuma se reduce drásticamente exponiendo una superficie con mayor transferencia de calor y masa, disminuyéndose también el tiempo de secado, pues se llevó a cabo en 130 segundos aproximadamente, además de que el proceso puede llevarse a cabo alimentando el lecho con espuma de manera continua sin que existan problemas de aglomeración.

*El producto obtenido es en polvo y se le determinó la dispersabilidad. El tiempo necesario para dispersar las partículas en agua destilada para 6 muestras fue de 1.19 s

*Los contenidos de humedad promedio fueron de 3.7 % (b.h).

CONCLUSIONES

1.- OBTENCIÓN DE ESPUMA :

Usando emulsificante con HLB 6 o 8 y aplicado a la pulpa de guayaba se obtuvieron espumas estables y con una consistencia adecuada para su manipulación durante el proceso de secado en un horno de convección forzada y en el lecho fluidizado. Las espumas más adecuadas se obtuvieron con una concentración de 0.5% de agente emulsificante con más de 9 minutos de agitación a $24 \pm ^\circ\text{C}$ y 585 mm Hg. y presentaron una densidad de 0.25 a 0.35 g/cm^3 , condiciones bajo las cuales no se observó drenado y mantuvieron su estructura sin sufrir colapso.

2.- PROCESOS DE SECADO :

La espuma obtenida a las condiciones arriba mencionadas se secaron usando un horno de convección forzada con flujo horizontal y un lecho fluidizado. La finalidad de llevar a cabo el proceso de secado en un horno fue para obtener datos de tiempos y cinéticas de secado que se pudieran comparar con los obtenidos en un lecho fluidizado. De esta manera, usando el horno, la espuma se secó en cajas de Petri a espesores de 3 mm y 5 mm para temperaturas de 60 y 70°C . Los tiempos de secado a 60°C para espesores de 3mm y 5mm fueron de 60 y 100 min, a 70°C fueron de 50 y 80 min respectivamente con contenidos finales de humedad del 3.6 % (b.h). En las cinéticas de secado no se pudo apreciar el período de velocidad constante de secado pero fue muy notorio y predominante el período de velocidad decreciente de secado. Esto se debe probablemente a la constitución de la espuma que al ponerse en contacto con el aire caliente empezó a formarse una costra que impide la difusión del agua interna a la superficie, siendo este fenomeno el factor controlante en la difusión, ver Fig. 3.3 (a) y 3.4 (a). Con respecto al área disponible de secado en un horno de convección forzada fué de 900 cm^2 .

El segundo proceso a probar como tecnológicamente viable consistió en secar espuma en un lecho constituidos por esferas de vidrio de 3mm de diámetro y/o con esferas de polipropileno de 10 mm de diámetro; la relación L/D del lecho fue de 1. La temperatura del flujo de aire fue de 60°C y la velocidad del flujo manejados fue de 2.28 m/s. El procedimiento de secado por

lecho fluidizado consistió en colocar lechos constituidos con esferas de polipropileno(A), de vidrio (B), y lechos combinados (% en volumen) constituidos de la siguiente manera: 30% de esferas de vidrio y 70% de esferas de polipropileno (C); 50% de esferas de vidrio y 50% de esferas de polipropileno (D) y 70% de esferas de vidrio y 30 % de esferas de polipropileno (E). El lecho (E), fue el que presento alternativas para realizar el secado de la espuma, pues la recolección de la espuma seca no presento más dificultad que la adaptación de filtros adecuados. El proceso de secado puede hacerse en continuo pues no presenta problemas de aglomeración al ponerse en contacto con la espuma. Este tipo de lecho permitió hacer el análisis de la cinética de secado. Las curvas de secado expuestas en las gráficas 10 y 10(a) presentaron características de período de secado constante desde el inicio hasta los 55 segundos pero después de este tiempo hasta los 130 segundos el comportamiento fue de periodo de velocidad decreciente de secado y que favorece la retención de volátiles (Menting y Hoogstand,1967 y Kerkhof y Thijssen 1977). Por otra parte este tipo de proceso facilita el secado siendo favorecido por: el flujo de aire que es mayor comparado con el suministrado a un horno de convección forzada; la distribución de la espuma en la superficie de las esferas, la cual hace que se logren espesores menores a 1 mm que facilitan la evaporación del agua contenida en las espumas y limitando el efecto de las costras en el secado y que tienen gran influencia en el secado realizado en un horno de convección. A estas condiciones los tiempos de secado fueron aproximadamente de 130 segundos. El área total de secado constituida por el lecho de esferas de polipropileno y de vidrio contribuyen con 662 cm^2 y 6835.31 cm^2 respectivamente, que sumadas dan un valor de 7498.18 cm^2 que resultan en un 800% de ventaja comparada con la aprovechable en un horno de secado.

El contenido de humedad final para la espuma seca fue de 3.7 % (b.h), el cual es un valor similar al obtenido en un horno de secado (3.6% b.h).

Finalmente, los tiempos para dispersar la espuma seca en agua fue de 1.40 min para espuma secada en horno de convección y de 1.20 min para lecho fluidizado, no existiendo gran diferencia en este valor y significa que la cantidad de aditivos que se tengan que agregar al polvo para su rehidratación sería mínima.

A manera de conclusiones finales y considerando las mejores condiciones de secado de la espuma por ambos procesos estas se resumen en el siguiente cuadro:

	HORNO de C.F	LECHO FLUIDIZADO
Tiempo de secado	50 minutos	2 minutos aprox.
Temperatura	70°C	60°C
Area superficial de secado	0.09 m ²	0.7498m ²
Espuma alimentada	1.89 g/min	30 g/min
Espesor de la espuma depositada	3mm	menor a 1mm
Producto seco	0.44186 g/min	7.315 g/min
Dispersabilidad	1.40 min	1.20 min

Es necesario considerar que durante el secado de la espuma por lecho fluidizado se presentan pérdidas de producto debido a los finos que se adhieren a la pared de la columna de fluidización y a las mismas esferas, las pérdidas se consideran de un 20 % con respecto a la cantidad final obtenida.

RECOMENDACIONES

No obstante que el presente proyecto representa grandes ventajas en el secado de espuma, es necesario considerar aspectos como los que se señalan a continuación para mejorar el producto final.

A) Para encontrar las características óptimas de la espuma sería conveniente:

- 1.- Explorar más agentes emulsificantes con funciones espumantes y llevar a cabo estudios para conocer los balances hidrofílicos-lipofílicos y las concentraciones óptimas para producir espumas.
- 2.- Conocer tiempo y velocidad de agitación.
- 3.- Conocer la influencia que tiene la temperatura durante la producción de la espuma.
- 4.- Conocer la viscosidad y la densidad óptima que permitan al mismo tiempo una rápida adherencia a las esferas del lecho sin que exista escurrimiento que dificulte el secado.

B) Para el secado de la espuma por fluidización.

Durante el desarrollo experimental se observó que sería conveniente mejorar los siguientes aspectos:

- 1.-Sustituir las esferas de vidrio por otro material con características similares de densidad, tamaño y no porosas a fin de evitar la atricción que se pudiera dar con las esferas de vidrio durante la fluidización y que podrían afectar la composición del producto.
- 2.-Estudiar más detenidamente la influencia que tiene la diferencia de densidades y tamaños de las esferas que constituyen el lecho fluidizado durante el secado de espuma.
- 3.-Procurar tener suministro de aire limpio y de flujo constante en el fluidizador que permitan un mayor control de calidad en el producto.

4.-Otro aspecto a estudiar son las características sensoriales como sabor, olor, color y las pérdidas de las características nutritivas al efectuarse el secado por ambos procesos.

5.- Reducir las pérdida de finos que se adhieren a las paredes de la camara de fluidización y a las esferas . Esto se podría solucionar por la adición de antiapelmazantes (Badui, 1982 ; Lucas Meyer-México, 1992; Central soya, 1993) en la preparación de la espuma que inhiba este efecto.

NOMENCLATURA

A	área superficial de la burbuja (cm^2)
A_s	área superficial de secado (m^2)
D	diámetro del lecho (cm)
D_L	difusividad del líquido (m^2/h)
d	espesor del material húmedo (m)
$-(dW/dt)_f$	velocidad de secado al tiempo t , desde el inicio del periodo de velocidad decreciente ($\text{Kg H}_2\text{O}/\text{min}$) y ($\text{Kg H}_2\text{O}/\text{s}$)
$-(\frac{dW}{dt})_c$	velocidad constante de secado ($\text{Kg H}_2\text{O}/\text{min}$) y ($\text{Kg H}_2\text{O}/\text{s}$)
$(\frac{dQ}{dt})_c$	velocidad de transferencia de calor para el periodo constante ($\text{cal}/\text{m}^2\text{-h}$)
F	gasto másico del aire secante del lecho fluidizado (Kg aire seco/s)
E	elasticidad de la pared de la burbuja
G	flujo volumétrico de aire para fluidizar el lecho (m^3/s).
g	aceleración gravitacional (m/s).
H	humedad total ($\text{Kg H}_2\text{O}/\text{Kg aire seco}$).
H_a	humedad en el aire ($\text{Kg H}_2\text{O}/\text{Kg aire seco}$).
H_i	humedad inicial del aire en la entrada del lecho fluidizado ($\text{Kg H}_2\text{O}/\text{Kg aire seco}$).
h_c	coeficiente de transferencia de calor por convección ($\text{W}/\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}$)
h_R	coeficiente de transferencia de calor por radiación ($\text{W}/\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}$)
H_t	humedad del aire secante a la salida del lecho fluidizado al tiempo t ($\text{Kg H}_2\text{O}/\text{Kg aire seco}$).
H_s	humedad en la superficie o humedad de saturación del aire a la temperatura superficial ($\text{Kg H}_2\text{O}/\text{Kg aire seco}$).
HLB	balance hidrofílico lipofílico
HLB_M y HLB_N	valores de HLB de los emulsificantes M y N respectivamente

K	constante relacionada con el período de secado de velocidad decreciente (h^{-1})
K_g	coeficiente de transferencia de masa ($Kg / m^2 \cdot h \cdot atm$)
M y N	son emulsificantes conocidos
N_A	flux de evaporación (energía / tiempo).
N_F	flux de secado constante en lechos fluidizados
O/W	emulsión del tipo aceite en agua
P	presión del gas en la burbuja (atm.)
P_a	presión atmosférica (atm.)
p_s	presión de vapor de agua en la superficie (atm.)
p_v	presión parcial del vapor de agua en el aire (atm.)
q_c	flux de calor por convección ($cal / m^2 \cdot h$)
q_k	flux de calor por conducción ($cal / m^2 \cdot h$)
q_R	flux de calor por radiación directa desde una superficie caliente ($cal / m^2 \cdot h$).
R	radio de curvatura de la burbuja (mm)
r	radio del orificio del inyector de gas (mm)
R_{evap}	rápidez de evaporación ($Kg H_2O / s$)
T	temperatura ($^{\circ}C$)
T_G	temperatura del gas (aire) o de bulbo seco ($^{\circ}C$)
T_R	temperatura de radiación
T_s	temperatura de saturación o de la superficie de secado ($^{\circ}C$)
t	tiempo (min) y (segundos)
t_c	tiempo del período de secado constante (min)
U_k	coeficiente global de transferencia de calor por conducción ($W / m^2 \cdot ^{\circ}C$)
V_h	volumen húmedo (m^3 / Kg aire seco)
W	contenido de humedad base seca ($g H_2O / g$ sólido seco) y ($Kg H_2O / Kg$ sólido seco)
W/O	emulsión del tipo agua en aceite

W_o	humedad inicial contenida en los sólidos (g H ₂ O /g sólido seco) y (Kg H ₂ O /Kg sólido seco)
W_c	humedad crítica contenida al final del período de secado constante (g H ₂ O /g sólido seco) y (Kg H ₂ O /Kg sólido seco).
W_e	contenido de humedad de equilibrio (g H ₂ O /g sólido seco) y (Kg H ₂ O /Kg sólido seco)
X	balance hidrofílico-lipofílico del emulsificante que se desea obtener
Z_e	espesor de la espuma depositada en la caja de Petri (mm)
Z_M	espesor de la bandeja metálica (mm)

símbolos

ε	porosidad del lecho
φ	esfericidad de la partícula
γ	tensión superficial (dina / cm)
ρ_s	densidad del material seco (kg /m ³), (g /cm ³)
ρ	densidad de la espuma (kg /m ³), (g /cm ³)
π	constante pi (3.1416)
λ_s	calor latente de evaporación a la temperatura de saturación

BIBLIOGRAFIA

- Al-Kahtani, H.A and Hassan, B.H.,1990. Spray drying of Roselle (*Hibiscus sabdariffa L.*) extract. Journal of Food Science. 55(4) 1073-1076.
- Arteaga, G.E., Nakai, S. 1993. Predicting protein functionality with artificial neural networks: foaming and emulsifying properties. Journal of Food science. 58(5) 1152-1156.
- Badui, D.S., 1982. Química de los alimentos., Alhambra Universidad
- Belcher, D.W., Smith, D.A., y Cook, E.M., 1977. Analizing suspended particle dryers with pycrometric charts., Chemical Engineering., 17(6), 112.
- Beristáin, C.I., Cortés , R., Casillas,M.A. y Díaz, R., 1991. Obtención de jugo de piña en polvo por el método de secado por espumas , ALAN, 41(2), 238-245.
- Beristáin, C.I., García, H. y Vázquez, A., 1993. Foam-mat dehydration of jamaica (*Hibiscus sabdariffa L.*) Instant Drink, Drying Technology., 11(1), 221-228.
- Boizán, J.A.:M., Vladimir ,I.Z., 1986. Secado fluidizado de productos alimenticios, Ed. Oriente Santiago de Cuba.
- Brennan, J.G., Butters, N.D., Cowell., Lily, A.E.V., 1991. Food Engineering Operations, Applied Science Publisher.
- Brown, G.G., 1985. Operaciones básicas de la Ingeniería Química., Editorial Marín.España.
- Chávez, C.S.A., 1987. Funciones de los Emulsificantes en Productos Alimenticios, Tesis de Licenciatura, U.N.A.M, F.E.S- Cuatitlán.
- Cheftel, J.C., Cuq, J.L., Lorient, D., 1987. Proteínas alimentarias, Ed. Acribia, S.A, España.
- Central Soya Chemurgy Division, 1993. P.O Box 2507, Fort Wayne, Indiana 46801-2507.
- Cooke, R.D., Breag, G.R., Ferber, C.E.M., Best, P.R and Jones, J. 1976. Studies of mango processing I. "The foam-mat drying of mango (Alphonso cultivar) puree". Journal Food Technology. 11 (5) 463-473.
- Dittman, F. W., 1977. Classifying a drying process, Chemical Engineering, 17(6), 106.
- Dziezak, J.D., 1988. "Emulsifiers: The interfacial key to emulsion stability". Food Technology. 42(10); 172-186.

- Del Vecchio, A. 1975. "Emulsifiers and their use in soft wheat products". Baker Digest., 49(28).
- Fennema, O.R., 1985. Introducción a la ciencia de los alimentos, Ed. Reverté.
- Foust, A.S., Wenzel, A. L., Clump, C.W., Maus, L., Andersen, B.L., 1990. Principios de operaciones unitarias, Second Edition, Cía. Editorial Continental, S.A de C.V, México.
- Geankoplis, C. J., 1989. Procesos de transporte y operaciones unitarias., Cía Editorial Continental, S.A de C.V. México.
- Geldart, D., 1986. Gas Fluidization Technology, John Wiley & Sons. New York.
- Geldart, D., 1990. Estimation of basic particle properties for use in fluid-particle process calculations, Powder Technology 60 (1)1-13.
- Helman, J., 1982. Farmacotecnia teórica y práctica, Cía editorial Continental, S.A de C.V. México.
- Haiming, Z and Srinivasan D., 1994. Proteose peptones and physical factor affect foaming properties of whey protein isolate. Journal of Food Science 59 (3) 554-560.
- Jones, D. M., 1985. Factors to consider in fluid-bed processing, Pharmaceutical Technology, 1 (4)50-62
- Joye, D.D., 1985. A sequential design laboratory experiment for separating particles by fluidization principles, Chemical Engineering Education, (12) 30-34..
- Kerkhof P.J.A.M and Thijssen A.A.C., 1977, Quantitative study of the effects of processing variables on aroma retention during the drying of liquid foods, AIChE Symposium series 73 (163),33.
- Kinsella, J.E., 1990. Advances in food and nutrition, Research Vol. 34, Academic Press Inc. San Diego, California.
- Kirk-Othmer. 1966. Encyclopedia of Chemical Technology, Vol.9, 884-901. John Wiley and Sons. New York.
- Kunii, D. y Levenspiel, O., 1991. Fluidization Engineering, Butterworth-Heinemann, Second Edition.
- Lucas Meyer México, Lecitin people, Alimentos Framex, S.A de C.V, Amores 1112-2. Col. del Valle, México. 03100 D.F.
- Mujumdar, A.S., 1987. Handbook of industrial drying, Marcel Dekker, Inc. New York.

Menting L.C and Hoogstad D.B., 1967. Volatiles retention during the drying of aqueous carbohydrates solutions. *Journal of Food Science*. 32, 87.

Peraza, A.L., García , P.J., Segura J. S., y Vizcarra, M. M., 1986. Dehydration and separation of grape pomace in a fluidized bed system., *Journal of Food Science*, Vol. 51. No. 1, 206-210.

Perry, R.H., y Chilton, C. H., 1973. *Chemical Engineers Handbook*, 5a. Ed.; Macgraw Hill, Inc. New York.

Phillips, L.G., German, J.B., O'Neila, T.E., Foegeding, E.A., Harwalkar, V.R., Kilara, A., Lewis, B.A., Mangino, M.E., Morr, C.V., Regentein, J.M., Smith, D.M and Kinsella , J.E. 1990. Standarized procedure for measuring foaming properties of three proteins. A collaborative study. *Journal of Food Science* 55 (5) 1441-1444,1453.

Pomeranz, Y., 1991. *Funcional properties of food components*. Academic Press, Inc, 2nd edition. San Diego, California.

Rao, M.A., Rizvi, S.S.H., 1986. *Engineering properties of foods.*, Marcel Dekker, Inc. New York.

Rizvi, S.S.H., Mittal, G. S., 1992. *Experimental methods in food Engineering*, Van Nostrand Reinhold. New York.

Rockwell, W.C., Lowe, E., Morgan, A.I. Jr., Graham, R.P., y Ginnette, L.F., 1962. How foam-mat dryer is made. *Food Engineering*. 34(8), 86-88.

Schukin, E.D., Pertsov, A.V., Améline, E.A. 1988. *Química Coloidal*. Ed. Mir. Moscú.

Treybal, R.E., 1981. *Operaciones de transferencia de masa*, Mc Graw Hill. México.

United Nations, 1990. *Industrial Statistics Yearbook*, Vol. 2., New York.

Vizcarra, M. M. G., y Vernon, C. E.J., 1985. Acondicionamiento, secado, desinfestación y desinfección post-cosecha de granos empleando sistemas de lecho fluidizado. *Síntesis de propuesta de trabajo SARH / UAM-I*.

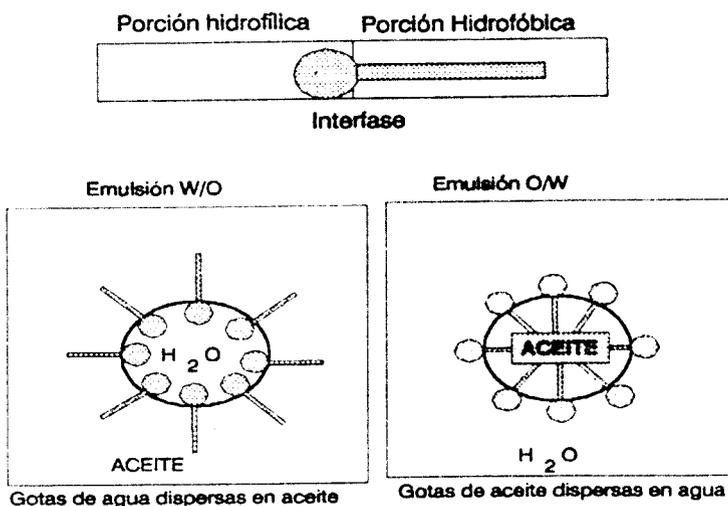
Waniska , R.D., and Kinsella, J. E., 1979. Foaming properties of proteins; Evaluation of a column aeration apparatus using ovalbumin. *Journal Food Science.*, 44 (1398-1402).

APENDICE A

$HLB = \frac{H_M}{T_M} * 20$ <p>H_M = parte molecular hidrofílica T_M = peso molecular total</p>		$HLB = \frac{H}{5}$ <p>H = parte hidrofílica (%)</p>		$HLB = 20\left(1 - \frac{VS}{VA}\right)$ <p>VS = Valor de saponificación VA = Valor de acidez</p>	
porcentaje de grupo		valor HLB	Comportamiento en agua	Campo de aplicación	
hidrofílico	lipofílico				
0	100	0	sin	1 a 3 agentes antiespumantes de 3 a 6 son emulsificantes tipo W/O 7 a 9 humidificadores de 8 a 18 son emulsificantes tipo O/W actúan como agentes solubilizadores en el rango 15 a 18.	
10	90	2	dispersión		
20	80	4	dispersión		
30	70	6	pobre		
40	60	8	dispersión lechosa		
50	50	10	dispersión lechosa estable		
60	40	12	dispersión clara y		
70	30	14	transparente		
80	20	16	solución		
90	10	18	coloidal		
100	0	20	clara		

Tabla A.1 de valores típicos de HLB para emulsificantes.

Estructura esquemática de la molécula de un emulsificador.



APENDICE B

TABLA B.1 Datos de la gráfica 3.1 para HLB-6, con 10 % de amidex-10

t(min)	Concentración del emulsificante (% en peso)					
	0.20%	0.30%	0.40%	0.50%	0.70%	1.00%
0	1.27	1.27	1.27	1.23	1.28	1.26
1	1	0.92	0.69	0.8	0.6	0.4
2	1	0.86	0.67	0.73	0.48	0.26
3	1	0.82	0.64	0.64	0.34	0.25
5	1	0.78	0.6	0.57	0.29	0.24
7	1	0.77	0.59	0.43	0.27	0.24
9	0.97	0.75	0.55	0.37	0.26	0.22
11	0.99	0.73	0.45	0.36	0.25	0.22
13	0.95	0.71	0.34	0.31	0.25	0.22
15	0.94	0.7	0.32	0.29	0.25	0.22
17	0.92	0.63	0.27	0.28	0.25	0.22
22	0.88	0.61	0.24	0.27	0.24	0.22
27	0.84	0.58	0.25	0.27	0.24	0.22
32	0.82	0.58	0.25	0.27	0.24	0.22

TABLA B.2 Datos de la gráfica 3.2 para HLB-8, con 10 % de amidex-10

t(min)	Concentración del emulsificante (% en peso)						
	0.2%	0.3%	0.4%	0.5%	0.6%	0.7%	1.0%
0	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
1	1.1	0.76	0.77	0.75	0.58	0.63	0.58
2	1.03	0.71	0.7	0.675	0.47	0.48	0.35
3	0.93	0.67	0.68	0.61	0.42	0.33	0.31
5	0.9	0.61	0.58	0.52	0.34	0.27	0.27
7	0.9	0.58	0.385	0.38	0.3	0.25	0.26
9	0.87	0.53	0.32	0.295	0.29	0.25	0.25
11	0.84	0.48	0.32	0.29	0.26	0.25	0.25
13	0.8	0.36	0.3	0.27	0.255	0.25	0.25
15	0.79	0.33	0.28	0.27	0.25	0.25	0.25
17	0.8	0.31	0.27	0.27	0.25	0.25	0.24
22	0.87	0.28	0.275	0.27	0.25	0.25	0.24
27	0.87	0.28	0.26	0.27	0.25	0.23	0.235
32	0.87	0.28	0.26	0.26	0.25	0.23	0.235

TABLA B.3 Datos de humedad (base seca) y tiempo para la gráfica 3.3, T= 60°C

t (minutos)	W (g H ₂ O / g sólido seco)			
	Ze = 3mm	Ze = 5mm	R=0.9997; W(3)	R=0.99983 W(5)
0	3.5	3.5	3.509	3.471
10	2.55	2.88	2.594	2.92
20	1.894	2.4	1.817	2.415
30	1.21	1.968	1.176	1.956
40	0.66	1.55	0.672	1.542
50	0.21	1.2	0.304	1.175
60	0.1	0.849	0.073	0.853
70	0.055	0.558		0.577
80		0.345		0.347
90		0.169		0.163
100		0.071		0.069

Los puntos se ajustaron a los siguientes modelos polinómico de 2do. grado para 3 y 5 mm.

$$W(3) = 3.5 + (-0.98286) t + 0.000684 t^2$$

$$W(5) = 3.47 + (-0.05739) t + (0.000229) t^2$$

TABLA B.4 Datos de velocidad de secado (dW/dt) en g H₂O vs tiempo (min) para espuma a T = 60°C de la gráfica 3.3(a),

t (min)	dW/dt para Ze = 3mm R= 0.9866	dW/dt para Ze = 5mm R= 0.9767
0	0.095	0.062
10	0.074	0.048
20	0.067	0.043
30	0.055	0.042
40	0.044	0.035
50	0.021	0.035
60		0.029
70		0.021
80		0.018

TABLA B.5 Datos de humedad (base seca) y tiempo para la gráfica 3.4 , T= 70°C .

t (min)	W (g H ₂ O / g sólido seco)			
	Ze = 3 mm	Ze = 5 mm	R=0.99058; W(3)	R=0.99955; W(5)
0	3.5	3.5	3.471	3.505
10	2.53	2.84	2.464	2.793
20	1.55	2.11	1.625	2.161
30	0.83	1.56	0.954	1.608
40	0.45	1.18	0.451	1.136
50	0.12	0.767	0.116	0.744
60	0.1	0.459	0.05	0.432
70	0.009	0.18		0.2
80	0.003	0.003		0.002

Los puntos se ajustaron a los siguientes modelos polinómico de 2do. grado para 3 y 5 mm.

$$W(3) = 3.54 + (-0.11957)t + (0.00103)t^2$$

$$W(5) = 3.51 + (-0.07522)t + (0.0004)t^2$$

TABLA B.6 Datos de la velocidad de secado (dW/dt) en g H₂O vs tiempo (min) para espuma a 70°C de la gráfica 3.4(a)

t (min)	dW/dt para Ze = 3mm, R=0.98503	dW/dt para Ze=5mm, R=0.9893
0	0.098	0.073
10	0.09	0.066
20	0.072	0.055
30	0.041	0.041
40	0.033	0.038
50	0.009	0.031
60	0.006	0.028
70		0.018
80		0.006

TABLA B.7 Datos de caída de presión (cm de H₂O) vs velocidad superficial (m/s) para esferas de vidrio de 3 mm de diámetro de la gráfica 3.5

Velocidad superficial (m / s)	Presión total en cm de H ₂ O	
	medición de ascenso	medición de descenso
0.346	795.84	795.84
0.684	797.64	797.64
1.025	799.54	799.54
1.364	803.34	804.24
1.566	805.94	805.94
1.702	805.94	805.94
2.041	806.54	806.54
2.382	806.54	806.54
2.722	806.54	806.54
3.062	806.54	806.54
3.402	806.54	806.54
3.744	805.94	805.94

TABLA B.8 Datos de caída de presión (cm de H₂O) vs velocidad superficial (m/s) para esferas de polipropileno de 10 mm de diámetro de la gráfica 3.6

Velocidad superficial (m/s)	Presión total en cm de H ₂ O	
	medición en ascenso	medición en descenso
0.343	794.94	794.94
0.685	795.34	795.34
1.027	796.14	796.14
1.369	796.94	796.94
1.505	797.54	797.44
1.574	797.64	797.64
1.711	797.64	797.64
2.053	797.78	797.74
2.395	797.78	797.74

TABLA B.9 Datos de caída de presión vs velocidad superficial para lecho combinado de esferas de polipropileno y de vidrio de 10 mm y 3 mm de diámetro respectivamente de la fig.3.7.

	Presión total en cm de H ₂ O	Presión total en cm de H ₂ O
Velocidad superficial (m/s)	medición en ascenso	medición en descenso
0.3425	796.04	796.04
0.684	798.04	798.04
1.024	801.04	800.64
1.363	804.54	803.94
1.565	806.44	806.54
1.7	806.84	806.84
2.041	806.84	806.84
2.379	807.74	807.74
2.722	806.54	806.54
3.062	806.84	806.84

TABLA B.10 Influencia en la caída de presión al lecho combinado con la introducción de espuma al lecho combinado (70 % vol ; 30 % vol) de la gráfica 3.8

	Presión total en cm de H ₂ O	Presión total en cm de H ₂ O
Veloc. sup.-s(m/s)c	con espuma	sin espuma
0.3425		796.04
0.684		798.04
1.024		800.64
1.363	808	803.94
1.565	806.44	806.54
1.701	806.84	806.84
1.7	804.54	806.84
2.041	806.84	806.84
2.379	807.74	807.74
2.722	806.54	806.54
3.062	806.84	806.84

TABLA B.11. Datos de la humedad incorporada al flujo de aire durante en proceso de secado en lecho fluidizado gráfica 3.9.

t (seg)	Humedad (kg. agua/kg. a.s)
1	0.008
5	0.01
10	0.011
15	0.012
20	0.012
25	0.012
30	0.012
35	0.012
40	0.012
45	0.012
50	0.012
55	0.012
60	0.012
65	0.012
70	0.011
75	0.011
80	0.01
85	0.01
90	0.0095
95	0.009
100	0.009
105	0.009
110	0.008
120	0.008
130	0.008

TABLA B.12 Datos para el cálculo de la curva W vs t, del secado de espuma por lecho fluidizado de la gráfica 3.10 (585 mm de Hg)

t (s)	T _{bh}	T _{bs}	H _n (Kg. agua / kg a.s)	H _i (Kg agua / kg a.s)	V _h (m ³ / K g a.s)	V _h (Kg aire seco/seg)
0	64.667	24.67	0.0080	0.008	1.370506542	0
5	64.169	25.17	0.01	0.008	1.372839761	0.0130387
10	63.047	25.42	0.011	0.008	1.370443151	0.0130617
15	61.926	25.54	0.012	0.008	1.368036144	0.0130844
20	60.182	25.42	0.012	0.008	1.360916245	0.0131529
25	58.935	25.29	0.011	0.008	1.353682399	0.0132231
30	57.814	25.04	0.012	0.008	1.351248858	0.013247
35	57.44	24.92	0.012	0.008	1.349721999	0.0132619
40	57.191	24.67	0.012	0.008	1.348705454	0.0132719
45	57.191	24.55	0.012	0.008	1.348705454	0.0132719
50	57.191	24.42	0.012	0.008	1.348705454	0.0132719
55	57.191	24.30	0.012	0.008	1.348705454	0.0132719
60	57.565	24.17	0.012	0.008	1.350232313	0.0132569
65	57.939	24.048	0.011	0.008	1.349622644	0.0132629
70	58.313	23.92	0.011	0.008	1.35114709	0.013248
75	58.562	23.86	0.01	0.008	1.350021481	0.0132590
80	58.936	23.85	0.01	0.008	1.351543513	0.0132441
85	59.434	23.79	0.0095	0.008	1.35249709	0.0132347
90	59.8	23.67	0.009	0.008	1.352911117	0.0132307
95	60.057	23.67	0.009	0.008	1.353955347	0.0132205
100	60.31	23.67	0.009	0.008	1.354983325	0.0132104
105	60.68	23.67	0.009	0.008	1.356486691	0.0131958
110	61.054	23.67	0.0087	0.008	1.357359322	0.0131873
115	61.177	23.67	0.0086	0.008	1.35764311	0.0131846
120	61.552	23.67	0.0083	0.008	1.358517872	0.0131761
125	61.8	23.67	0.0082	0.008	1.35930827	0.0131684
130	62.175	23.67	0.0081	0.008	1.36061363	0.0131558
135	62.3	23.67	0.008	0.008	1.360904332	0.0131530

TABLA B.12 CONTINUACIÓN.

R_{evap} (H ₂ O/s)	t (seg)	Humedad de la espuma (g de H ₂ O)	W (base seca)
0	0	4.6752	
0.13038666	5	4.54481333	3.18643577
0.19592202	10	4.34889131	3.04907194
0.26168899	15	4.08720231	2.86559792
0.26305806	20	3.82414424	2.68116402
0.19834785	25	3.62579639	2.54209941
0.26494009	30	3.3608563	2.356346
0.26523980	35	3.09561649	2.17038245
0.26543972	40	2.83017677	1.98427874
0.26543972	45	2.56473705	1.79817503
0.26543972	50	2.29929733	1.61207132
0.26543972	55	2.0338576	1.42596761
0.26513955	60	1.76871805	1.24007435
0.19894449	65	1.56977355	1.10059142
0.19872003	70	1.37105351	0.96126587
0.13259048	75	1.23846303	0.86830472
0.13244116	80	1.10602186	0.77544827
0.09926084	85	1.00676102	0.70585502
0.06615364	90	0.94060737	0.65947373
0.06610262	95	0.87450475	0.6131282
0.06605247	100	0.80845228	0.56681784
0.06597926	105	0.74247301	0.5205588
0.04615579	110	0.69631721	0.48819828
0.03955384	115	0.65676337	0.4604665
0.01976418	120	0.63699919	0.44660954
0.01316846	125	0.62383072	0.43737694
0.00657791	130	0.61725281	0.43276506
0	135	0.61725281	0.43276506

TABLA B.13. Datos de la curva (dW/dt) vs t
del secado de espuma por lecho fluidizado de la gráfica 10(a)

t (s)	W (g H ₂ O/g s.s)	dW/dt
0	3.278	0.0184
5	3.186	0.0274
10	3.049	0.0366
15	2.866	0.0365
20	2.681	0.0371
25	2.542	0.0372
30	2.356	0.0372
35	2.17	0.0372
40	1.984	0.0372
45	1.798	0.0372
50	1.612	0.0372
55	1.426	0.0372
60	1.24	0.0278
65	1.101	0.028
70	0.961	0.0186
75	0.868	0.0186
80	0.775	0.0138
85	0.706	0.0094
90	0.659	0.0092
95	0.613	0.0092
100	0.567	0.0092
105	0.521	0.0066
110	0.488	0.0056
115	0.46	0.0026
120	0.447	0.002
125	0.437	0.0008