

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

DISEÑO DE UNA TORRE DE SECADO
POR ASPERSION (SPRAY DRYER)

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA

POR

LUIS ARNOLDO ROMA BAQUIAX

AL CONFERIRSELE EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 1996

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

08
TC(3852)
c.4

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

DISEÑO DE UNA TORRE DE SECADO
POR ASPERSION (SPRAY DRYER)

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química.

LUIS ARNOLDO ROMA BAQUIAX

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

MIEMBROS DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Herberth René Miranda Barrios
VOCAL 1°	Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
VOCAL 2°	Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano
VOCAL 3°	Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez
VOCAL 4°	Br. Fernando Waldemar de León Contreras
VOCAL 5°	Br. Pedro Ignacio Escalante Pastor
SECRETARIO	

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN

GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Jacinto Quan Chu
EXAMINADOR	Ing. Julio Rivera
EXAMINADOR	Ing. Eduardo Calderón
EXAMINADOR	Ing. Vinicio Cojulún
SECRETARIO	Ing. Efraín Boburg Castellanos

Guatemala,
25 de noviembre de 1.996.

Doctor
Adolfo Gramajo
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

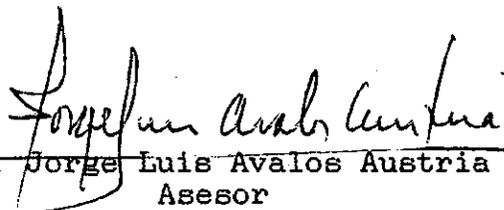
Doctor Gramajo:

Por medio de la presente hago constar que he revisado la Tesis de Graduación de Luis Arnoldo Roma Baquix, denominada "DISEÑO DE UNA TORRE DE SECADO POR ASPERSION (SPRAY DRYER)".

Considero que el trabajo ha sido adecuadamente desarrollado, por lo que considero procedente que pase a revisión final previo a su aprobación como Tesis de Graduación.

Agradezco mucho su atención.

Atentamente.


Ing. Jorge Luis Avalos Austria
Asesor



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 8 de noviembre de 1,996.

Doctor
Adolfo Gramajo
Director, Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

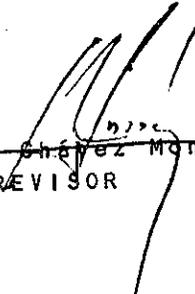
Doctor Gramajo.

Hago de su conocimiento que he revisado el Informe Final de Tesis del estudiante LUIS ARNOLDO ROMA BAQUIAX; titulado: **DISEÑO DE UNA TORRE DE SECADO POR ASPERSION (SPRAY DRYER)**, de la cual dejo constancia de mi aprobación, para proceder a la autorización del respectivo trabajo.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Julio Chávez Montúfar
REVISOR



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Química, después de
conocer el dictamen con el Visto Bueno del Jefe de Departamento,
al trabajo de Tesis del estudiante; **LUIS ARNOLDO ROMA BAQUIAX**
titulado: **DISEÑO DE UNA TORRE DE SECADO POR ASPERSION (SPRAY
DRYER)**, procede a la autorización del mismo.



Dr. Adolfo Gramajo
DIRECTOR

ESCUELA INGENIERIA QUIMICA

Guatemala, 8 de noviembre de 1,996



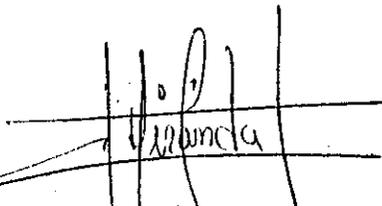
FACULTAD DE INGENIERIA

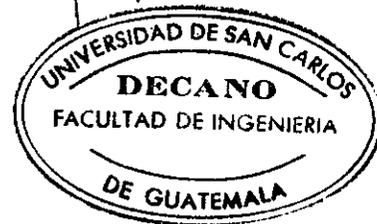
Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de Tesis titulado: **DISEÑO DE UNA TORRE DE SECADO POR ASPERSION (SPRAY DRYER)**, del estudiante **LUIS ARNOLDO ROMA BAQUIAX**, procedea la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:


Ing. Herbert René Miranda Barrios
DECANO



Guatemala, 8 de noviembre de 1,996.

DEDICATORIA

A DIOS

A MIS PADRES

José Luis Roma González

Rufina Baquiáx de Roma

A MIS HERMANOS

Héctor Oswaldo, Sandra Elizabeth,
Ligia del Rosario,

Claudia Fabiola, Mario Enrique,

Pedro Rolando, José Alfredo,

Manuel de Jesús

A MI FAMILIA

A MIS AMIGOS

PARTE 1
INDICE

	Página
Sumario	1
Introducción	2
Antecedentes	3
Principios Básicos	4
Los 4 Procesos Estado del Secado por Aspersión	7
Atomización	8
Contacto del Aire y el Atomizado. Mezclado y Flujo.	25
Secado del Atomizado. Evaporación de la Humedad.	38
Separación y Recuperación del Producto seco a partir del Aire Exhausto.	41
Diseño de un Spray Dryer	46
Equipo para Recuperación de Producto Seco	57
Conclusiones	72
Recomendaciones	73
Referencia Bibliográfica	74
Anexos	75

SUMARIO

El presente trabajo se inicia exponiendo los principios básicos y definiciones propios del proceso de secado por atomización o aspersión (spray drying).

Esta operación de secado consta de cuatro procesos estado, los que se explican uno a uno. Después pasa al diseño del secador, para lo cual se fijan las dimensiones del aparato y las condiciones de la alimentación. El material que se va a secar es una solución de Sulfato de Zinc al 35% de concentración, para obtener un Sulfato de Zinc Monohidratado ($ZnSO_4 \cdot H_2O$). El diseño no incluye los ductos de entrada y salida del aire, la cámara de combustión, ni los aparatos de recuperación de producto seco que arrastra el aire a la salida del secador.

Finalmente se hace una presentación de los equipos que se utilizan para recuperar o captar polvos, de los cuales dos de ellos son frecuentemente usados en una planta de secado por aspersión: ciclones y filtros de mangas o bolsas.

I- INTRODUCCION

El secado por aspersión o atomización es usado para la producción de material seco en forma de polvos, granulados o aglomerados, a partir de una alimentación líquida como soluciones, emulsiones y suspensiones bombeables.

Esta operación de secado consiste en la atomización de una alimentación líquida que entra en contacto con aire caliente en una cámara de secado. La atomización es producida por atomizadores rotatorios centrífugos o boquillas de presión. El rápido contacto del material atomizado con la corriente de aire caliente, asegura un secado rápido, sin sobrecalentamiento del material a secar. Este aspecto es muy importante, principalmente cuando el material que se está secando es sensible a la temperatura, es decir, que se puede descomponer a temperaturas altas.

La evaporación de la humedad y la formación de las partículas secas, se realizan bajo condiciones controladas de temperatura y flujo de aire. El producto seco es descargado continuamente en el fondo de la cámara de secado.

Las condiciones de operación y diseño del secador son seleccionados de acuerdo con las características y especificaciones del material a secar. Sin embargo, estos secadores son muy flexibles, y se pueden acondicionar para el secado de materiales de distintas características.

La Torre de Secado por Aspersión, que aquí se diseña, se utilizará principalmente para el secado de sulfato de zinc, por lo que los cálculos están basados en las características de este producto.

Con este trabajo, se pretende estimular el diseño y construcción de equipo, con lo que se estaría ayudando a desarrollar la industria y tecnología guatemaltecas, y hacer posible inversiones menos caras, las cuales aumentarían, y crearían nuevas fuentes de trabajo.

Guatemala es un país que tecnológicamente se ha desarrollado poco y su industria ha hecho poco esfuerzo por favorecer ese desarrollo, más aún, no lo promueve. El presente trabajo pretende también estimular a la industria a diseñar y construir su propio equipo para que sea menos dependiente de tecnología foránea, con lo que el desarrollo sería más acelerado, y dar lugar a mayores fuentes de trabajo y, como consecuencia, mayor desarrollo económico.

Guatemala posee una gran cantidad de recursos naturales que debido a la escasa tecnología con la que se cuenta, estos recursos no son debidamente aprovechados o explotados.

Definitivamente diseñar y construir equipo industrial supone un riesgo, fundamentalmente económico, pero que vale la pena correr porque los beneficios que trae consigo, siempre serán mayores que los aparentes fracasos que puedan resultar.

- ANTECEDENTES

Hasta el momento de iniciar el presente trabajo de diseño de una Torre de Secado por Atomización (Spray Dryer), no existe ningún otro que trate este tema en particular. Hay algunos trabajos que van dirigidos fundamentalmente a la operación del secador.

Tampoco hay mucha bibliografía que se refiera concretamente al diseño de este tipo de secadores. Existe un libro que se refiere específicamente al diseño y operación de torres de secado por atomización, que ha servido de base para el desarrollo del presente trabajo.

Casi toda la información que se puede encontrar sobre el particular, menciona solamente aspectos teóricos, los cuales, debido a su importancia, también se han tomado en cuenta para realizar el actual trabajo.

Otro tipo de información utilizada fue proporcionada por algunos fabricantes de torres de secado. Esta información se refiere fundamentalmente a criterios de operación.

PARTE 2

PRINCIPIOS BASICOS

2.1 Secado por Atomización (Spray Drying)

El secado por atomización (spray drying) es, por definición, la transformación de una alimentación fluida en un producto seco, que se alimenta atomizado dentro de un medio caliente. La alimentación puede ser una solución, suspensión o pasta y como producto final se pueden obtener polvos, granulados o aglomerados. Estas formas dependen de las propiedades físicas y químicas de la alimentación y del diseño y operación del secador. La atomización es producida por atomizadores rotatorios o centrífugos y boquillas. La evaporación de la humedad a partir de las gotas y la formación de partículas secas es un proceso bajo condiciones controladas de temperatura y flujo de aire. Los polvos se descargan continuamente de la cámara de secado. Las condiciones de operación y el diseño del secador son seleccionados de acuerdo a las características de la alimentación y las especificaciones del producto final.

El secado por atomización es un procedimiento por el cual muchas industrias encuentran productos secos cuyas especificaciones son deseables para subsecuentes procesos o para consumirlos directamente. La investigación intensiva y desarrollo en los últimos años ha dado como resultado que este tipo de secado sea un gran y competitivo medio para el secado de una gran variedad de productos.

Hay muchos productos y artículos en uso a nuestro alrededor que ejemplifican el uso extensivo del secado por atomización. Productos que, entre otros, podemos encontrar: café instantáneo, leche en polvo, sopas, alimentos para bebés, fertilizantes, productos farmacéuticos, etc.

Cada secador (spray dryer) consiste de bomba de alimentación, atomizador, calentador de aire, dispersor de aire, cámara de secado y recuperadores de polvos que arrastra el aire exhausto (4).

Normalmente la cámara del secador termina en forma cónica, en cuyo fondo, el producto seco se colecta. Esta forma ayuda a que el material que cae por las paredes de la cámara se recoja también en el punto de descarga. En algunos casos, para coleccionar el producto en fondos planos o conos pequeños se ayuda de una retama de aire o trapeador mecánico. (2).

2.2 Gotas

Esto se refiere al estado de subdivisión de la alimentación a partir de el atomizador. Mientras la superficie húmeda permanezca en el atomizado, éste está compuesto por gotas.

2.3 Polvos

Esto se refiere al estado de subdivisión del producto seco. La forma de estos polvos depende principalmente de cómo fueron formadas las gotas durante la atomización y de su comportamiento durante el secado.

2.4 Aglomerados

Un aglomerado está compuesto por dos o más gotas adheridas una a la otra. Con frecuencia la aglomeración es deseada en el secado por aspersión debido a que presenta mejores características de dispersabilidad. Los aglomerados pueden ser formados por dos o más gotas coalesciendo y secándose en este estado, o por la adherencia de gotas parcialmente secas en la región más baja de la cámara debido a sus superficies pegajosas. Cuando específicamente los aglomerados son deseados, se forman en la cámara de secado por: a) contacto de la aspersión secándose con finos del producto seco, o b) instalando un equipo especial para aglomeración. Ejemplo: fluid-bed instantizer.

2,5 Granulados

En casos especiales, la técnica del secado por aspersión es también usada para aumentar el tamaño de las partículas más allá de lo que se puede obtener en un equipo convencional. Con esta intención se producen los granulados, los que actualmente son muy utilizados en la producción de fertilizantes.

Para producir los granulados es necesario instalar un lecho fluidizado en la cámara del secador por aspersión. "Semilla" de material seco se fluidiza con los gases de secado, las cuales son humedecidas por partículas parcialmente secas, producto de la aspersión.

Los productos granulados pueden ser directamente obtenidos a partir de polvos secos o a partir de materiales húmedos como soluciones, suspensiones y pastas. Este proceso incluye los siguientes pasos:

1. Mezclado de las partículas sólidas en un lecho fluidizado.

2. Atomización del material húmedo.
3. Humedecimiento de las partículas sólidas.
4. Evaporación parcial de la humedad.
5. Aglomeración de las partículas.
6. Secado de las partículas.

El problema más importante es el de obtener un determinado tamaño de partículas y propiedades físicas del producto. Se conocen dos mecanismos del proceso: aumento de tamaño de gránulos debido a la acumulación de las subsiguientes capas, y aglomeración de finas partículas. En el primer caso, el proceso se desarrolla lentamente, pero el producto obtenido es muy homogéneo. La aglomeración de finas partículas es muy rápida, pero el producto obtenido no es homogéneo. En el lecho fluidizado, ambos procesos tienen lugar simultáneamente.

Algunos criterios a tomar en cuenta cuando se desean materiales granulados:

1. Productos de baja solubilidad en agua (10 g/lt) no son adecuados para granular; productos o mezclas de productos cuya solubilidad esté en el rango de 100 a 500 g/lt pueden ser granulados. La calidad del granulado es influenciada por la tensión superficial y la viscosidad del material a secar.
2. Materiales húmedos, como soluciones o suspensiones, deberían poseer buenas propiedades de unión.
3. Productos secos en la forma de gránulos deben ser quebradizos. (5)

PARTE 3

LOS 4 PROCESOS ESTADO DEL SECADO POR ASPERSION

El secado por aspersión consiste de cuatro procesos estado (fig. 3.1):

- 3.1 Atomización
- 3.2 Aire de Secado (mezcla y flujo)
- 3.3 Secado (evaporación de la humedad)
- 3.4 Separación de producto seco que sale con el aire. (1)

Cada proceso se lleva a cabo de acuerdo al diseño y operación del secador y que, juntamente con las propiedades físicas y químicas de la alimentación, determina las características del producto seco. La homogeneidad de la atomización y los altos rangos de humedad evaporada, permiten que la temperatura del producto seco sea considerablemente más baja que la del aire de secado saliendo del secador. De este modo el producto no está sujeto a altas temperaturas y cuando es separado del aire de secado está libre de cualquier calor que pueda degradarlo.

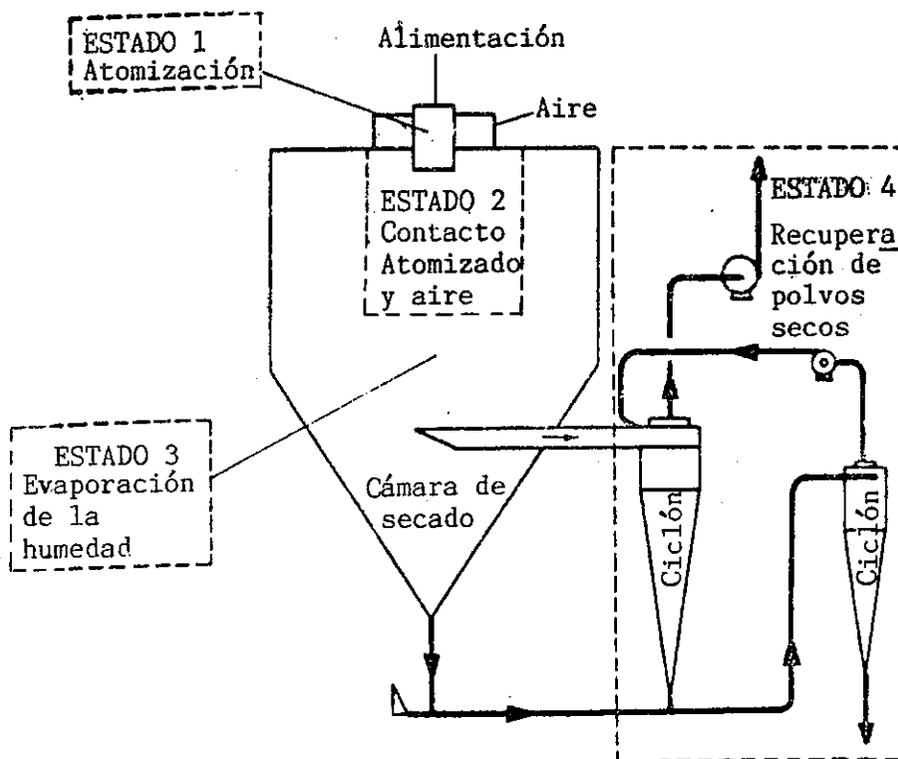


Figura 3.1. Los procesos estado del secado por aspersión

3.1 Atomización

La atomización en un secador por aspersion produce a partir de una alimentación líquida pequeñas gotas, las cuales disponen de una gran superficie de contacto lo que permite el secado rápido.

El atomizado ideal es el que produce pequeñas gotas, todas ellas del mismo tamaño. La transferencia de calor y masa y el tiempo de secado, son los mismos para todas las gotas en el atomizado, asegurando un producto seco con características uniformes. Las gotas de un atomizado evaporan rápidamente y el corto tiempo de secado implica mantener temperaturas bajas en las gotas, debido al efecto del enfriamiento que acompaña a la evaporación. El producto no se deteriora debido al calor, si una correcta atomización es combinada con un apropiado diseño de la cámara de secado, para dar al producto un tiempo de residencia lo suficientemente justo para completar la evaporación de la humedad.(1)

La atomización es consecuencia de la energía que actúa sobre un volumen de líquido. Resultan fuerzas que dan lugar a que el líquido se rompa y desintegre, creando un atomizado de pequeñas gotas. Las diferentes técnicas de atomización conciernen a las diferentes formas de energía aplicada a la alimentación líquida. Común a todos los atomizadores es el efecto de romper y desintegrar el producto a evaporar.(1)

La formación de la atomización y el contacto de la misma con el aire de secado son las características que distinguen el secado por aspersion. La selección y operación del atomizador es de gran importancia para la económica producción de un material de calidad.

El atomizador es el corazón del Spray Dryer. La atomización forma las partículas y afecta los parámetros de diseño y operación del secador. El arte de diseñar el atomizador consiste en seleccionar uno que satisfaga las características del producto requerido y que opere eficientemente con la alimentación líquida que se secará. (2)

Fundamentalmente existen tres tipos de atomizadores:

- 3.1.1 Atomizadores Rotatorios
- 3.1.2 Boquillas de Presión
- 3.1.3 Atomizadores de dos Fluidos

3.1.1 Atomizadores Rotatorios

Estos atomizadores son llamados también ATOMIZADORES CENTRIFUGOS. Hay 4 tipos básicos de estos atomizadores: rueda agujereada, rueda paleteada o tipo hélice, rueda ranurada y rueda ahuecada en forma de taza. Todos estos atomizadores trabajan bajo los mismos principios. Las ruedas rotan a gran velocidad, típicamente entre 6,000 y 20,000 rpm. (2)

La alimentación es introducida en el centro del plato/disco/copa, la cual, es centrífugamente acelerada a gran velocidad antes de ser descargada en una atmósfera aire-gas. La fuerza centrífuga hace que se forme una fina película sobre la superficie del atomizador, la que se rompe en la periferia de la rueda en finas gotas. El grado de la atomización rotatoria depende de la velocidad periférica, velocidad de la alimentación, propiedades del líquido cuando este alcanza la velocidad periférica del disco/rueda, anterior a la descarga. Si un disco plano está rotando a gran velocidad y el líquido es alimentado en su superficie superior, ocurre un severo deslizamiento entre la alimentación y el disco.

La velocidad del líquido en el extremo del disco es mucho más baja que la velocidad periférica del mismo. Las condiciones para que no ocurra deslizamiento se dan a velocidades muy bajas, pero la energía centrífuga disponible permite solamente la más pequeña velocidad de alimentación para ser satisfactoriamente atomizada. Para prevenir este fenómeno en los atomizadores comerciales, se utilizan aspas radiales. El líquido es confinado en la superficie del aspa y, en la periferia, la máxima velocidad de descarga es obtenida. Esta velocidad es la resultante de las componentes radial y tangencial alcanzadas por el líquido.

La desintegración del líquido en gotas a partir de la rueda o disco es gobernada por:

- a- la viscosidad y tensión superficial del líquido.
- b- inercia del líquido en la periferia de la rueda.
- c- efecto de la fricción entre las gotas del líquido y el aire circundante, en el punto en que éstas abandonan la rueda o disco.
- d- reajuste de los esfuerzos de corte dentro de la gota de líquido una vez que ésta es transportada por el aire.(1)

A bajas velocidades periféricas del disco, la viscosidad y tensión superficial del líquido son factores determinantes.

La mayor velocidad del disco, la mayor inercia y fricción del aire contribuyen al mecanismo de formación de las gotas.

Cuando la viscosidad y tensión superficial predominan sobre el mecanismo de la atomización, ésta se compone por gotas que se forman al abandonar el líquido el filo del disco. Esto se aprecia en la figura 3.2(a). La velocidad de alimentación y la velocidad del disco son muy bajas, y el atomizado consiste de dos o tres tamaños predominantes de gotas. Por ejemplo: gota madre y dos satélites.

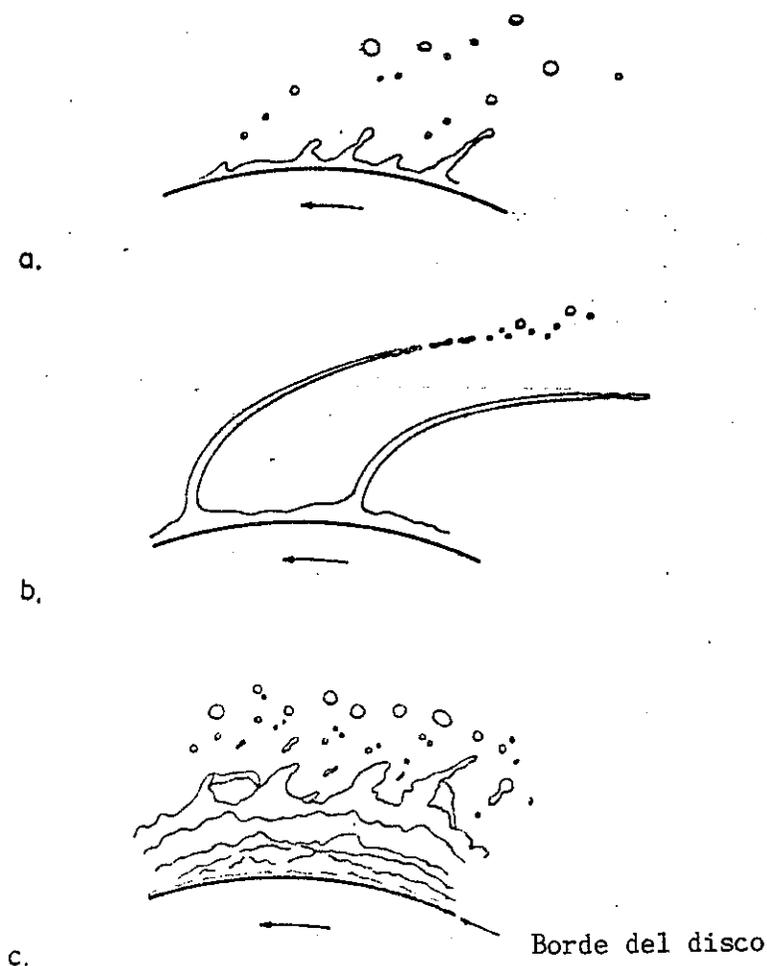


Fig. 3.2. Mecanismos de atomización. a) Formación directa de gotas. b) Formación de ligamentos. c) Formación de hojas.

Con un continuado incremento en la velocidad del disco y a una mayor velocidad de alimentación, el mecanismo de la formación de la gota cambia por el de un ligamento que se rompe. El punto de concentración de líquido que da lugar a la formación de gotas contiene más concentración del mismo, formando ligamentos que se extienden a partir del filo del disco. Los ligamentos se desintegran en gotas madres y satélites, como se ilustra en la figura 3.2(b). Grandes gotas madres son formadas a partir de alimentaciones muy viscosas y con alta tensión superficial. El aumento en la viscosidad de la alimentación incrementa la proporción de gotas satélites en el atomizado. Gotas esféricas son formadas independientemente del valor de la tensión superficial.

Los mecanismos ilustrados en las figuras 3.2(a y b) son controlados por las propiedades físicas de la alimentación líquida. La transición entre el predominio de las propiedades del líquido y las fuerzas de inercia ocurre cuando los ligamentos se juntan para formar una extensión en forma de hojas o láminas que se extienden más allá del filo o borde del disco. Ver figura 3.2(c). Este mecanismo se acentúa cuando la viscosidad del líquido es alta. Las hojas o láminas se desintegran dando un atomizado compuesto por una amplia distribución de gotas de distintas dimensiones.

Los atomizadores centrífugos son extensamente usados en sistemas de secado de corriente paralela (cocurrent), con algunas pocas excepciones (3). El tamaño de partícula es determinado por la geometría y velocidad de la rueda y las propiedades físicas de la alimentación. El tamaño de partícula es controlado por el atomizador y es relativamente independiente de la velocidad de producción del secador, haciendo del secado con atomización centrífuga el más flexible para variados tipos de producto (2). Estos se colocan en la parte alta de la torre, rodeados por el dispersor de aire.

3.1.2. Boquillas de Presión

El material a secar es alimentado a la cámara de secado por una boquilla bajo presión. La presión es convertida a energía cinética, y el líquido sale del orificio de la boquilla a una gran velocidad como una fina película que rápidamente se desintegra dando lugar al atomizado. La alimentación se hace rotar dentro de la boquilla resultando un cono que emerge del orificio. La aspersión producida por las boquillas de presión maneja grandes cantidades de alimentación y son generalmente menos homogéneos y amplios que los atomizados producidos por un atomizador centrífugo. A bajos rangos de alimentación las características del atomizado a partir de boquillas de presión y atomizadores centrífugos son

comparables. Las boquillas permiten la formación de finos atomizados, pero estas son generalmente usadas para formar gruesas partículas de polvo. La variación de la presión permite tener control sobre la cantidad de alimentación y las características del atomizado. Estos atomizadores pueden operar con presiones arriba de 10,000 p.s.i. (680 atm).(1)

Estas boquillas tienen la ventaja de ser baratas y son deseables para alimentaciones con baja viscosidad. Pueden producir partículas grandes a bajas velocidades de alimentación, pero requieren que ésta sea constante para mantener el atomizado. Múltiples boquillas pueden utilizarse para obtener grandes velocidades de alimentación (2). Otra ventaja es que requieren de una torre que ocupe poco espacio de piso o suelo, pero esto usualmente es compensado por una mayor altura. Los diámetros de las torres varían entre 3 a 40-50 pies.(6)

Estos atomizadores son una buena alternativa para manejar alimentaciones con bajo contenido de sólidos (menos del 20%) (4).

3.1.2.1. Características de Operación de las Boquillas

i) Relación entre el Flujo, Presión y Densidad.

El funcionamiento de las boquillas es afectado por presión, densidad y viscosidad del líquido. La velocidad del flujo es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la presión, y varía inversamente proporcional con la raíz cuadrada de la densidad del líquido. Esta relación solamente es una aproximación.

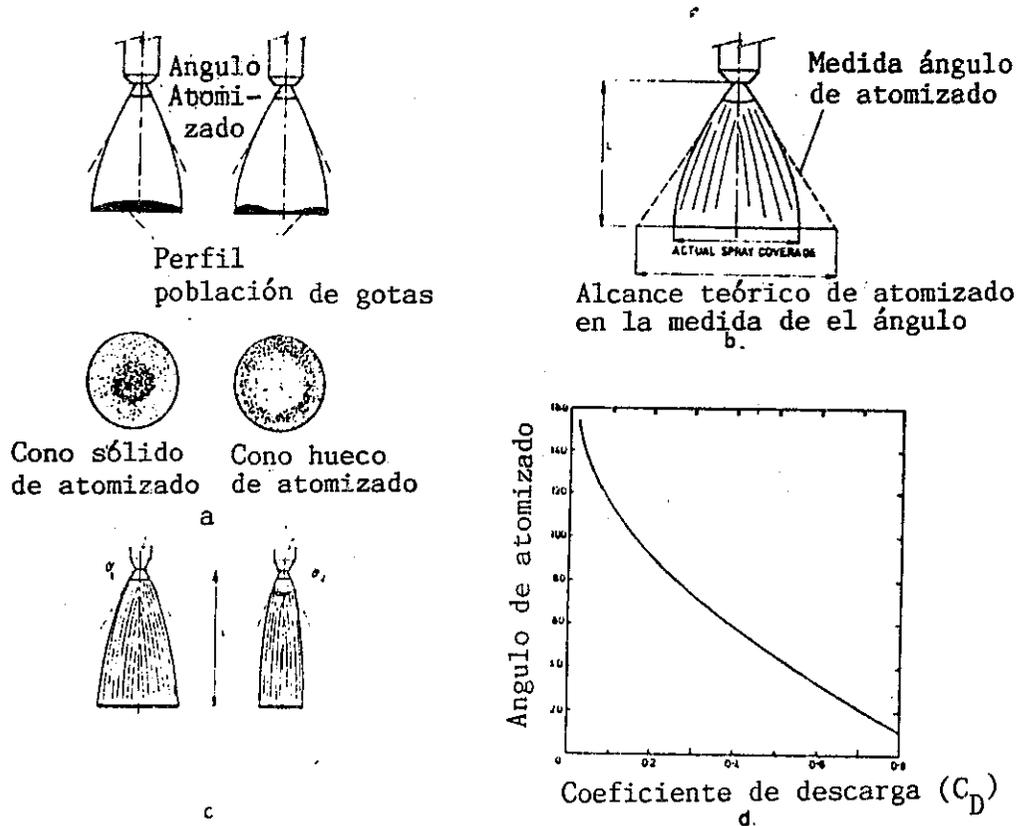
$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{(P_2)^{1/2}}{(P_1)^{1/2}} = \frac{(d_1)^{1/2}}{(d_2)^{1/2}}$$

Cualquier cambio en la densidad del líquido es usualmente asociado con cambios en otras propiedades del mismo, y de este modo la relación anterior no aplica en todos los casos. El efecto de la viscosidad sobre el flujo no puede ser claramente definido porque esto depende del diseño específico de la boquilla y las condiciones a las que se lleve a cabo la operación. El efecto exacto debe ser determinado por experimentación para un diseño de atomizador y condiciones de operación dados.(1)

ii) Angulo del Atomizado

Una mínima presión es requerida para desarrollar cualquier ángulo de la aspersión. Esta presión mínima es

aproximadamente 20 psig (1.4 atm). El incremento en la presión disminuye el ángulo de la atomización, pero su influencia es despreciable, especialmente si se mide cerca del orificio de la boquilla. A mayores presiones de trabajo, arriba de 200 psig (14 atm), el ángulo de la aspersión empieza a reducirse debido al efecto del aire que entra. La viscosidad tiene un efecto significativo cuando un incremento en la misma produce un ángulo estrecho. Si la viscosidad es muy grande el ángulo del atomizado se reduce significativamente debido a taponamiento de la corriente, dando lugar a que la atomización cese. (el efecto de la presión sobre el ángulo es ilustrado en la figura 3.3(c)).



Fiura 3.3. Características ándulo de atomizado. a) Población de gotas en cono sólido y cono hueco de atomizado. b) Angulo de atomizado de la boquilla. c) Efecto de la presión en el ángulo de atomizado. d) Relación entre coeficiente de descarga y ángulo de atomizado para un típica boquilla de presión centrífuga usada en el secado por aspersión.

iii) Efecto de las Variables de Operación en el Tamaño de las Gotas.

- Efecto de la capacidad en el tamaño de gota. Grandes gotas acompañan el incremento en la velocidad de alimentación, debido al aumento de la misma dentro del rango de la boquilla. Esto es ilustrado en la figura 3.4(a). Si la velocidad de alimentación inicial es muy baja, la atomización es incompleta, debido a que la velocidad del líquido dentro de la boquilla es inadecuado. En este caso al aumentar la velocidad de la alimentación, el tamaño de gota decrecerá hasta que la capacidad de la boquilla es alcanzada.(1)

- Angulo del atomizado y tamaño de gota. A medida que aumenta el ángulo de la aspersión, el tamaño de gota disminuye. Ver figura 3.3(d). Esto se debe a que el coeficiente de descarga de la boquilla se hace pequeño con el aumento del ángulo de la aspersión. Si el coeficiente de descarga disminuye, la velocidad de alimentación se hace menor y, como se trabaja a presión constante, el tamaño de gota disminuye.

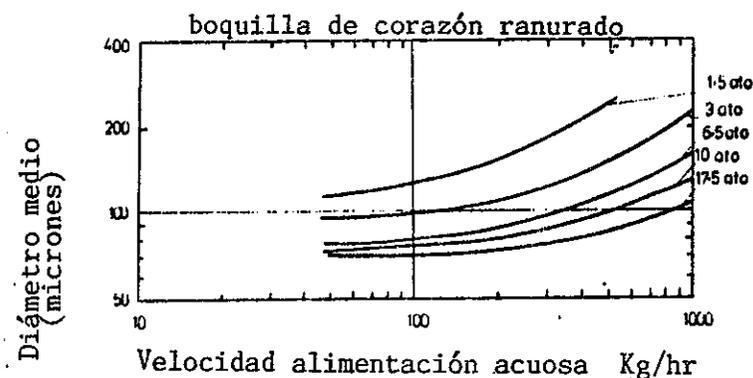
- Efecto de la presión en el tamaño de gota. En virtud de la mayor energía en presiones altas, el tamaño de gota disminuirá con el incremento de la presión. Sin embargo, hay varias opiniones al respecto. A presiones muy altas, ulteriores incrementos en la misma practicamente no tiene efecto en la atomización. La figura 3.4(a) ilustra el efecto del incremento de la presión en el tamaño de la gota.

- Efecto de la viscosidad de la alimentación sobre el tamaño de gota. Una ineficiente atomización puede resultar debido a un incremento en la viscosidad de la alimentación. La exacta relación entre el diámetro de gota en el atomizado, la distribución del tamaño de gota y la viscosidad de la alimentación es particular a cada diseño y tamaño de la boquilla. A una presión dada, la capacidad aumentará hasta que la boquilla opere sin aire en el corazón. En todo caso el incremento de la capacidad es pequeño. Materiales con viscosidades muy altas, no pueden ser atomizados por boquillas de presión.

- Efecto de la tensión superficial sobre el tamaño de gota. La energía suministrada en la boquilla debe superar las fuerzas debidas a la viscosidad y a la tensión superficial. Por esta razón los líquidos con alta tensión superficial presentan mayor dificultad para ser atomizados. La tensión superficial de líquidos que son atomizados con boquillas de presión varían en un rango relativamente pequeño y, de este modo, el efecto de los cambios de la tensión superficial sobre

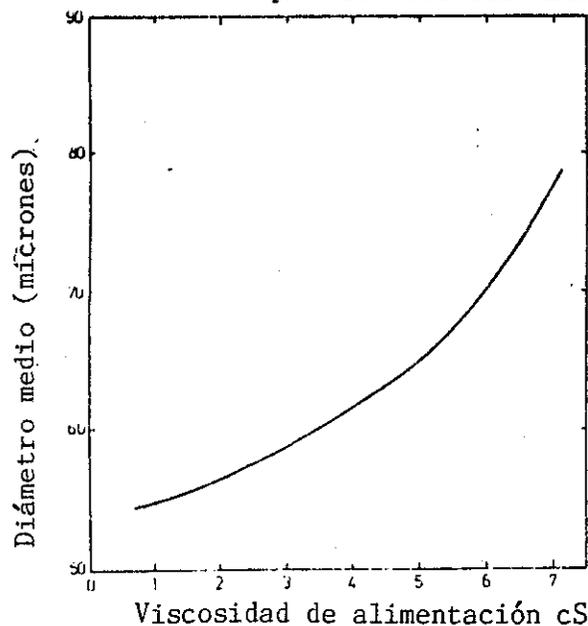
el tamaño de gota es mucho menos significativo que los producidos por los cambios en la viscosidad.

- Efecto del tamaño del orificio de la boquilla sobre el tamaño de gota. El tamaño de gota aumenta con el cuadrado del diámetro del orificio.(1)



(a)

Boquilla de corazón ranurado Alimentación 0.715 lt/min
Presión de boquilla: 29.5 atm Diámetro orificio: 0.79 mm



(b)

Figura 3.4. Efecto de a) velocidad de alimentación y b) viscosidad
iv) Ensamble de las boquillas para uso comercial.

Una sola boquilla puede ser usada siempre que la capacidad y tamaño de la partícula para los que está diseñado el secador puedan ser satisfechos sin duplicación de boquillas. Una boquilla facilita la operación por su fácil control y fácil observación.

En los secadores para uso industrial y que utilizan boquillas de atomización, un arreglo de múltiples boquillas es invariablemente instalado para manejar altos rangos de alimentación. Estos arreglos son diseñados para que las condiciones de operación de las boquillas sean las mismas para asegurar una uniforme atomización. Hay dos lugares de ensamblaje de las boquillas comúnmente usados en torres de secado de flujo paralelo: Los atomizadores son montados alrededor de la cámara, o forman un racimo y son colocados en la parte alta del secador rodeados por el dispersor de aire. Ambas disposiciones tienen sus ventajas y desventajas. El ensamble en la pared de la cámara permite fácil acceso a las boquillas, lo que da lugar a que el cambio y mantenimiento de las mismas pueda hacerse simple y rápidamente. De todos modos, esta forma de colocar los atomizadores es extensamente usado y con mucho éxito. La forma de colocar las boquillas en racimo reclama condiciones de evaporación bien controladas para que el contacto aire-aspersión sea óptimo. El acceso a las boquillas dispuestas en esta forma y la inspección de las mismas es más complicado, pero estas desventajas se ven compensadas con una distribución más uniforme de la alimentación para cada boquilla.

El arreglo de los atomizadores alrededor de la pared de la cámara es empleado en secadores de flujo en contra corriente y flujo mixto. El arreglo de las boquillas en racimo con una sola tubería de alimentación no es común utilizarlo. Para secadores de flujo en contra corriente, la corriente de aire no es rotacional y la posición individual de las boquillas en la pared de la cámara permite hacerles convenientes ajustes para producir un atomizado que cubra el área transversal de ésta. Para secadores de flujo mixto, un racimo de atomizadores con una sola tubería de alimentación proporciona una pobre accesibilidad a los mismos. Las boquillas son normalmente montadas individualmente en la pared cónica del secador, permitiendo utilizar tubería de alimentación más pequeña para colocar cada atomizador en el centro de la cámara.

Cualquiera que sea el arreglo para colocar los atomizadores, éste debe contribuir a obtener lo siguiente:

- 1- Fácil acceso a las boquillas.
- 2- Fácil remoción de las boquillas.
- 3- Distribución uniforme de la alimentación.
- 4- Posibilidad de apartar cada boquilla.
- 5- Posibilidad de observar las boquillas en operación.

Ver fig. 3.5

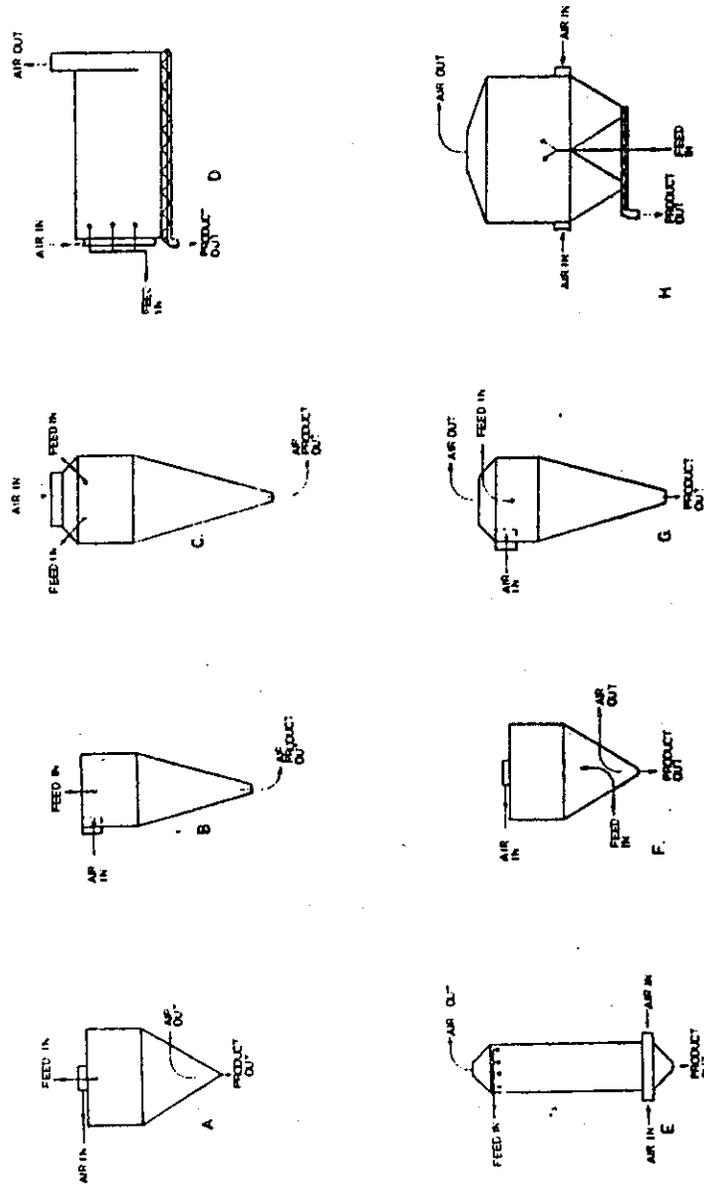


Figura 3.5. Posición de las boquillas en relación al dispersador de aire.

3.1.4. ATOMIZADORES DE DOS FLUIDOS

Estos atomizadores son también llamados Boquillas Neumáticas. Los atomizadores de dos fluidos son usados para flujos de alimentación muy pequeños y para materiales abrasivos o altamente corrosivos. Su flujo de aire puede controlar el tamaño de partícula aun cuando la corriente de alimentación varíe. El tamaño de partícula del producto final es menos uniforme que el producido por otros métodos de atomización.(2)

Las boquillas de atomización neumáticas comprenden el impacto de la masa líquida con la corriente de gas a gran velocidad. El mecanismo de la atomización consiste en un gas a alta velocidad la que crea grandes fuerzas de fricción sobre la superficie del líquido provocando la desintegración de éste en pequeñas gotas.

La desintegración del líquido en presencia de un flujo gaseoso comprende situaciones complejas de inestabilidad del mismo, pero se puede considerar que todos los procesos ocurren en dos fases. La primera fase comprende el rompimiento del líquido en filamentos y gotas grandes. La segunda fase completa la atomización por el rompimiento del líquido en gotas cada vez más pequeñas. Todo el proceso es influenciado por la magnitud de las propiedades del líquido; tensión superficial, densidad y viscosidad, y por las propiedades del flujo gaseoso; velocidad y densidad. El medio gaseoso normalmente utilizado en un atomizador neumático es aire o vapor de agua. Un gas inerte, como el Nitrógeno, es seleccionado en sistemas cerrados de secado por aspersión. Una gran velocidad relativa entre el líquido y el aire debe ser generada para que el primero esté sujeto a óptimas condiciones de fricción. Esas condiciones son generadas por: a) aumento de la velocidad del gas a niveles sónicos o supersónicos previo al contacto con el líquido, o b) dirigiendo el flujo de aire sobre la película de líquido formada por la rotación de éste dentro de la boquilla. El líquido se rompe rápida y eficazmente y el atomizado de pequeñas gotas es formado. En este sistema pueden manejarse líquidos con bajas o grandes viscosidades.(1)

Para pequeños flujos de líquido, su rotación dentro de la boquilla no es esencial para completar la atomización. El aire a alta velocidad puede fácilmente penetrar en un chorro de líquido a baja velocidad, causando la necesaria turbulencia y transferencia de energía para formar un atomizado de ángulo estrecho. Los atomizados se caracterizan por ser muy homogéneos. Para grandes cantidades de alimentación, el aire a gran velocidad no puede penetrar el espeso y sólido chorro

que se forma. La atomización es incompleta y hay una gran distribución de tamaño de gota durante toda la aspersión. Un alto porcentaje del líquido permanece en el centro del atomizado como un sólido chorro el cual, cuando abandona la boquilla, es expulsado a grandes distancias. Para que el líquido se rompa en filamentos o en gotas, deben formarse en primer lugar finas películas que le dan inestabilidad, permitiendo que el contacto aire-líquido sea efectivo.

Hay dos tipos de atomizadores de dos fluidos: los de mezcla interna y los de mezcla externa. Comercialmente hay varios diseños de cada uno, pero la mayor diferencia entre los dos tipos se da por el lugar en el que el aire y el líquido se juntan o combinan.

1. Si el contacto aire-líquido se da dentro de la cabeza de la boquilla se llaman de combinación interna.

2. Si el contacto aire-líquido se da fuera de la cabeza del atomizador, entonces se llaman de combinación externa.(3)

Estos tipos de atomizadores se ilustran en la fig. 3.6 (ver tabla 3.1).

Los atomizadores de combinación interna ofrecen la ventaja de que se obtiene mayor transferencia de energía que con los de combinación externa. Sin embargo, estos últimos permiten mayor control de la atomización debido que tanto el líquido como el aire se controlan independientemente.(1)

a) Características del atomizado.

El atomizado de alimentaciones de baja viscosidad se caracteriza por obtener pequeñas gotas, entre 15 y 20 micrones, y un alto grado de homogeneidad. Con materiales más viscosos el tamaño de gota es mayor, pero la homogeneidad no lo es tanto. La operación de estos atomizadores es muy flexible, produciendo pequeñas o grandes gotas sobre un amplio rango de alimentación de acuerdo con la presión de aire aplicado.

b) Efecto de variables sobre el tamaño de gota

Estudios realizados han mostrado que la media del tamaño de gota producido por atomización neumática sigue la relación:

$$D = \frac{A}{(V^2 * d_a)^x} + B \frac{(M_{air})^y}{(M_{liq})^y}$$

donde: V = velocidad relativa entre aire y líquido en la cabeza de la boquilla, M_{air}/M_{liq} = razón de masa de aire a líquido.

Los exponentes x e y son funciones del diseño de la boquilla y, A , B son constantes debidas al diseño de la boquilla y propiedades del líquido.

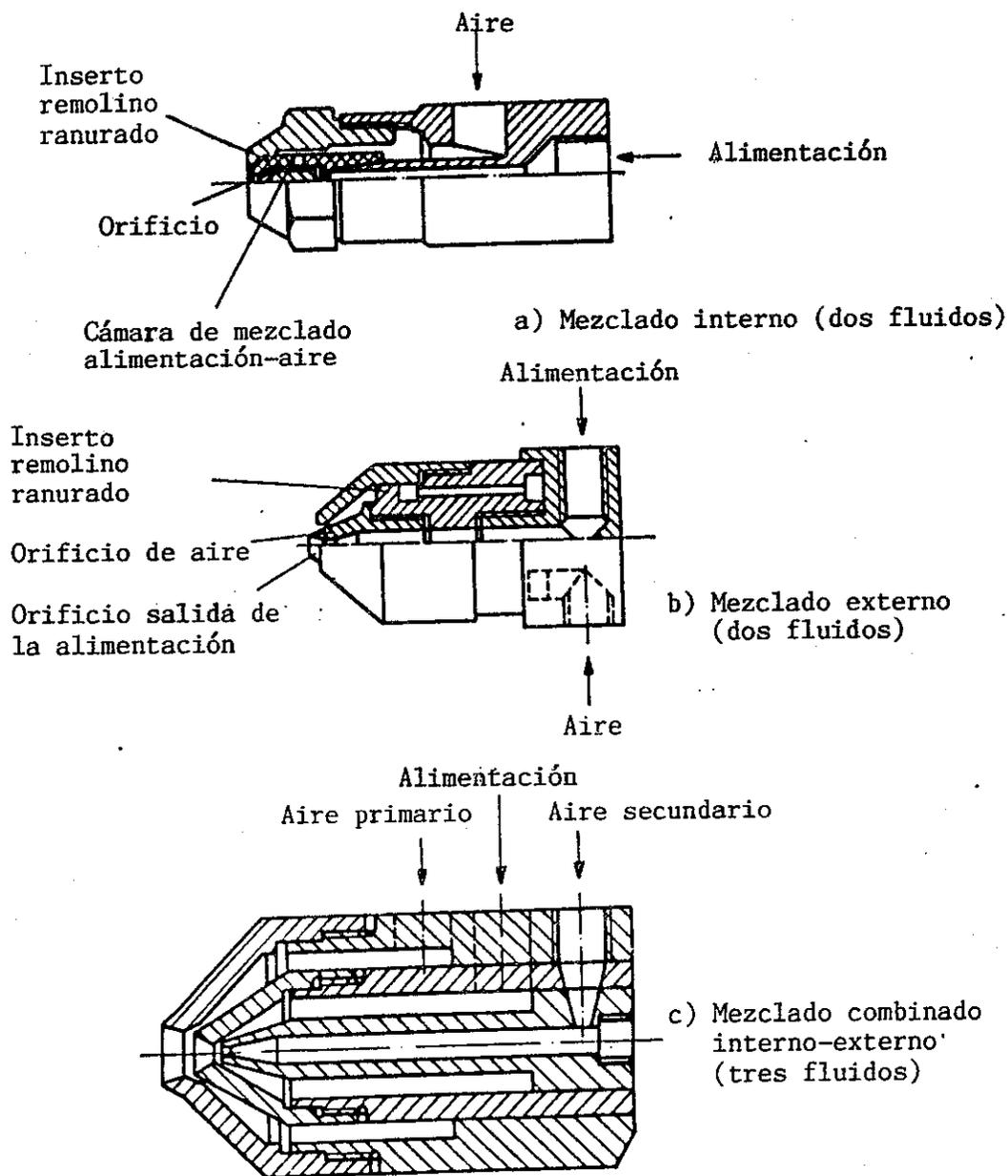


Figura 3.6. Diseños de cabezas de boquillas neumáticas.

Tabla 3.1 Funcionamiento Típico de Boquillas de Mezclado Interno

Velocidad de alimentación (lb/hr)	Velocidad del aire (cfm)	Presión del aire (atm)	Angulo del atomizado (grados)	Variable constante
50	2.00	1.35	45	presión del aire constante
100	0.85	1.35	75	
150	0.25	1.35	80	
1150	12.50	3.40	40	
1300	11.50	3.40	50	
1400	10.00	3.40	55	
200	1.45	1.35	70	velocidad alimentac constante
200	2.50	2.05	60	
200	3.80	2.70	50	
1150	10.0	2.6	45	ángulo atomizado constante
1250	12.0	3.4	45	
1350	14.4	4.1	45	

i) Efecto de la razón Aire/Líquido (M_{air}/M_{liq}).

Esta razón es una de las más importantes variables que afectan el tamaño de gota. Cuando ésta se hace grande el tamaño de gota se hace pequeño. El valor de esta razón debe estar entre 0.1 y 10.0. Abajo de 0.1 la atomización se deteriora rápidamente con líquidos que son fácilmente atomizados. 10.0 es el límite para obtener gotas pequeñas. Arriba de este valor, la atomización procede con exceso de energía sin una marcada disminución en el tamaño de gota. Investigadores han indicado que gotas de 5 micrones no se desintegran en gotas más pequeñas en presencia de aire a gran velocidad, pero pruebas experimentales muestran que gotas de hasta 1 micrón son obtenidas.(1)

ii) Efecto de la velocidad relativa

La media del tamaño de gota decrece con el aumento de la velocidad relativa. Esto puede verse en la fig 3.7. El incremento de la velocidad relativa entre el aire y el líquido en el punto de contacto, incrementa la fuerza dinámica y más energía es necesaria para la atomización. El efecto de la velocidad relativa empieza a ser más pronunciado cuando finos

atomizados son formados a bajas velocidades de alimentación. Por lo tanto, la media del tamaño de gota esta directamente relacionada con la velocidad del aire. De hecho la media del tamaño de gota varía inversamente con la velocidad del aire a la potencia de 1.14, e inversamente a la potencia de 0.57 de la fuerza dinámica del aire.

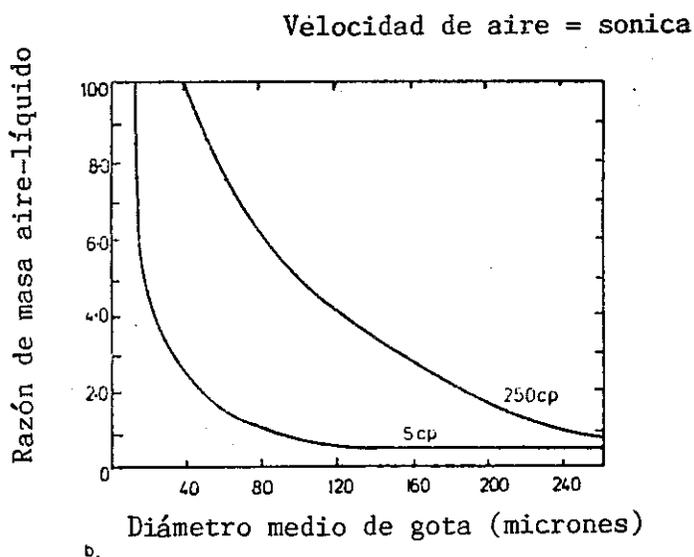
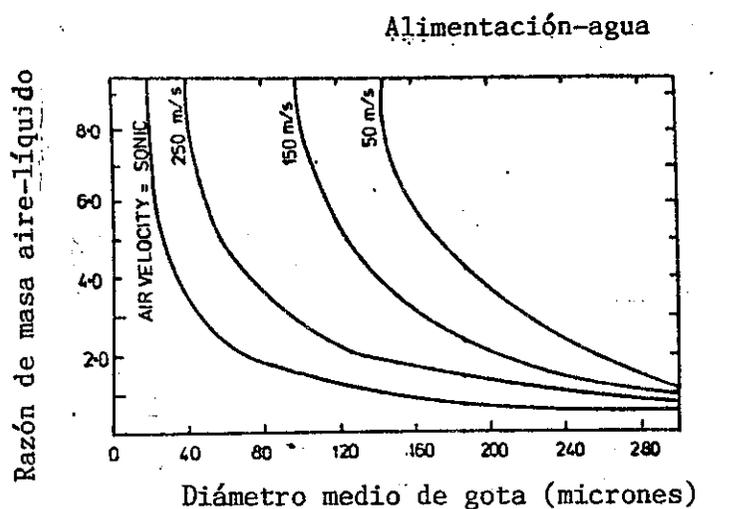


Figura 3.7. Efecto de las variables de operación sobre el tamaño medio de gota. a) Efecto de la razón aire-líquido y la velocidad de aire. b) Efecto de la razón aire-líquido y viscosidad de el líquido.

iii) Efecto de la viscosidad

El incremento en la viscosidad aumenta la media del tamaño de gota. La complejidad del mecanismo de atomización evita una precisa variación a ser establecida. El exponente de la viscosidad está en el rango 0.30 - 0.37.(1)

iv) Efecto de la densidad del aire

El incremento de la densidad del aire a velocidad constante aumenta su fuerza dinámica, resultando una disminución en la media del tamaño de gota.

c) Ensamble de las boquillas neumáticas y su operación

Estos atomizadores son montados individualmente alrededor de la pared o en el techo de la cámara de secado, o en forma de racimo colocados muy cerca del dispersor de aire. Este montaje es similar al que se describió para las boquillas de presión. El acceso y remoción de los atomizadores es complicado debido a que cada uno tiene dos líneas. Una de la alimentación y la otra del aire.

En donde se quiera que estén colocadas las boquillas en la cámara de secado, la tubería en el cuerpo de éstas está cubierta por una funda. Esta forma un arreglo compacto. Todas las conexiones de abastecimiento se hacen fuera de la cámara de secado, con el objeto de que el arreglo completo de las boquillas o atomizadores pueda ser limpiado y dar el mantenimiento adecuado con facilidad.

El sistema de alimentación para las boquillas neumáticas comprende controles separados del fluido a secar y del medio gaseoso (aire/vapor). En la práctica, se hace pasar el flujo de aire antes que la alimentación líquida, para evitar escupidos en el arranque. Dos condiciones se deben cuidar al empezar la operación: que el atomizado sea uniforme y que la cabeza de las boquillas estén limpias. Durante el arranque hay depósitos de la alimentación, la que se incrementa durante la operación causando deterioro de la atomización.

El control puede ser manual o automático. Aire comprimido a partir de una línea general de abastecimiento o de un compresor local es filtrado y la presión ajustada por una válvula reductora. El flujo de aire es ajustado por una válvula de control y es fácilmente observado en un medidor. Cuando se usa vapor para atomizar la alimentación, este debe pasar por un filtro o colador para evitar que cualquier partícula se aloje en el atomizador y provocar una mala distribución del atomizado.

Para los atomizadores neumáticos de mezclado interno, la presión de la alimentación y de la línea de aire son prácticamente iguales. Para los de mezclado externo, el aire y la alimentación son independientes y la presión dependerá del flujo que se requiera.

d) Ventajas y desventajas de las boquillas neumáticas.

Las ventajas de las boquillas neumáticas están en su capacidad de producir atomizados de gran homogenidad y de pequeñas gotas. Esas características pueden ser obtenidas sobre un amplio rango de condiciones de operación, mientras se manejen alimentaciones con alta o baja viscosidad. El hecho de que sean de orificio grande comparadas con otro tipo de atomizadores, reduce la probabilidad de que el atomizador se estreche o atasque, bajo condiciones normales de operación. De cualquier manera, el orificio para el flujo gaseoso es más pequeño y toda materia extraña que pueda alojarse en la boquilla debe ser atrapada en la cabeza de la misma. Filtrar el aire comprimido o tener vapor limpio es esencial. Las boquillas neumáticas no requieren equipo de bombeo de gran presión.

Las desventajas de las boquillas neumáticas son principalmente: i) el alto costo del compresor de aire, ii) la reducción en la capacidad del secador debido al aire frío de atomizado que entra a la cámara y iii) muy baja eficiencia del atomizador. (1)

e) Aplicaciones

Las boquillas neumáticas son usadas principalmente para formar atomizados muy finos de líquidos newtonianos de baja viscosidad. Todos los fabricantes ofrecen boquillas que cubren un amplio rango de capacidades. Estas boquillas también encuentran aplicación en el atomizado de líquidos altamente viscosos, ya sea que exhiban características de flujo newtoniano o no newtoniano. Los materiales de la alimentación pueden ser slurries o pastas, gelatinas, plásticos, gomas y escamas pre-gelatinizadas de maíz. Las boquillas neumáticas son deseables para productos cuyas propiedades de flujo causan un agudo incremento en la viscosidad debido a esfuerzos de corte.

Debido a la gran variedad de fluidos que se desean secar por atomización, se han desarrollado también atomizadores neumáticos de tres fluidos y atomizadores neumáticos rotatorios.

3.1.5 Selección del Atomizador

La función de todo atomizador es producir un atomizado lo más homogéneo posible. Cuando se selecciona entre varios tipos, debe tomarse en cuenta el diseño que económicamente proporcione las más favorables características de la aspersión y que se ajuste a las condiciones de operación dadas.

Las características más deseables para todo atomizador son:

- a. Simple construcción
- b. Diseño que favorezca un fácil mantenimiento
- c. Capaz de producir pequeños y grandes tamaños de gota, según se desee.
- d. Permita controlar la distribución del atomizado ajustándolo a las condiciones de operación.
- e. Que no sea necesario utilizar equipo complicado de bombeo.
- f. Manejo de la alimentación sin desgaste interno.

Ciertos atomizadores, a pesar de presentar algunas o todas estas características, no son apropiados para ciertas aplicaciones debido a condiciones indeseables que se obtienen por el tipo de fluido que se esté operando.(1)

3.2 Contacto del Aire y el Atomizado. Mezclado y Flujo

3.2.1 Principios Generales

La predicción y control del movimiento atomizado-aire dentro de la cámara de secado son importantes requerimientos para el diseño y desarrollo del secador. La forma como la aspersión, saliendo del atomizador, se combina con el aire de secado determina la velocidad y extensión de la operación. El resultado del movimiento atomizado-aire determina el tiempo que cada gota permanece dentro de la cámara. El diseño de la cámara de secado y del dispersor de aire deben crear un flujo que evite la deposición de producto parcialmente seco en las paredes y en el atomizador. Los depósitos en las paredes son causados por gotas que viajan rápidamente y, de este modo, no permiten un tiempo suficiente de secado. Los depósitos en el atomizador resultan por remolinos locales. Los remolinos también causan reincorporación o re-entrada de partículas secas en las regiones de aire caliente en el secador, e igualmente en el dispersor de aire donde la partículas parecen quemarse contaminando el producto final seco.

Todavía hay mucho por conocer sobre la mejor forma de

combinar las variables de operación y diseño para producir el movimiento atomizado-aire, que proporcione las mejores condiciones de secado.

La cantidad de datos publicados sobre el movimiento atomizado-aire es limitada y es aplicable principalmente a secadores pequeños. La determinación del flujo de aire depende de una conveniente técnica experimental, y pocos son considerados exitosos. Datos para secadores de pequeños diámetros han sido obtenidos a partir de observaciones visuales de polvos finos suspendidos en la corriente de aire.

La mejor forma de aproximarse al movimiento de las gotas es calcular su trayectoria a partir del atomizador en la pared de la cámara, usando algunos métodos que ya han sido ensayados. El flujo de aire se puede predecir y obtener experimentalmente en un equipo que tenga características análogas de flujo. La velocidad del aire puede ser medida en una planta piloto usando un anemómetro.

El movimiento atomizado-aire es clasificado de acuerdo a su recorrido a lo largo de la cámara de secado: flujo paralelo, flujo a contracorriente y flujo mixto. Este movimiento es gobernado por la localización y diseño del dispersor de aire, la localización y operación del atomizador y por la forma de comportarse las gotas del atomizado cuando se están secando, dimensiones de la cámara de secado y el método de descarga del polvo y el aire exhausto. En todo caso, es el dispersor de aire el que determina el movimiento atomizado-aire durante el primer período crítico de secado de las gotas. Una correcta dispersión del aire surge como un condición esencial para obtener una exitosa operación del secador por aspersion.(1)

El contacto del atomizado y el aire de secado es un factor importante en el diseño de la torre de secado por aspersion. El contacto atomizado-aire es determinado por la posición del atomizador en relación al aire de secado que entra a la cámara. Se puede disponer de varias posiciones:

a) Sistemas de Flujo Paralelo (Cocurrent)

El atomizado puede ser dirigido dentro del aire caliente entrando a la cámara de secado como se ve en la fig. 3.8(a). El producto y el aire pasan a través del secador en flujo paralelo. Este arreglo es ampliamente usado especialmente en casos en que se manejan productos sensibles al calor. La evaporación es rápida, el aire de secado enfría consecuentemente y el tiempo de evaporación es corto. El producto no está sujeto a descomposición por calor, su

temperatura es baja durante la evaporación y la temperatura de las gotas se aproxima a la temperatura de bulbo húmedo. Cuando el contenido de humedad se está aproximando al deseado, la temperatura de las partículas de producto no sube sustancialmente debido a que éstas están en contacto con aire más frío. En efecto, las condiciones de temperatura baja prevalecen a lo largo de toda la cámara de secado, a pesar de que aire muy caliente está entrando a la misma. La figura 3.9(a) ilustra una típica distribución de la temperatura del aire en un secador de flujo paralelo. En este tipo de flujo pueden usarse tanto las boquillas como los atomizadores rotatorios. Con el anterior tipo de corriente, la trayectoria radial de las gotas a partir de la periferia del atomizador puede ser controlada, con lo que una excesiva deposición del producto en las paredes del secador se puede evitar.

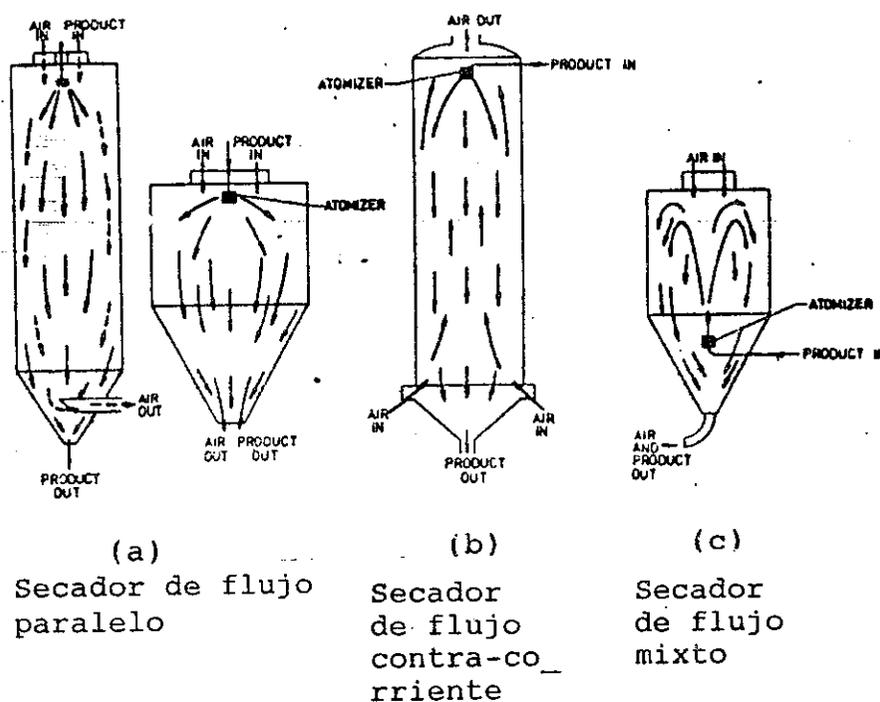


Figura 3.8 Flujo producto-aire en secadores por aspersión.

b) Sistemas de Flujo en Contra-corriente. (Counter-current).

Alternativamente, el atomizado puede entrar en contacto con el aire de secado en flujo a contra-corriente (figura 3.8(b)). La aspersión y el aire entran a la cámara de secado en lugares opuestos: La aspersión por arriba y el aire de secado por abajo. Este arreglo ofrece un excelente aprovechamiento del calor, pero no es aconsejable su utilización en el secado de productos sensibles al calor, debido a que los polvos secos que caen entran en contacto con aire más caliente. El arreglo contra-corriente comunmente usa boquillas de atomización. El flujo de aire que sube reduce la velocidad de caída de las gotas, proporcionando un tiempo de residencia suficiente para completar la evaporación.

Algunas aplicaciones en donde este tipo de arreglo es usado: secado de detergentes y, en menor grado, secado de productos cerámicos.

Otras principales características de este arreglo son:

- utiliza boquillas de presión.
- son más difíciles de controlar y consecuentemente, son más susceptibles a trastornos debido a deposición de producto en las paredes de la cámara.
- tienen considerablemente un mayor tiempo de residencia.
- los materiales a procesar son relativamente insensibles a la temperatura y tienden a ser más duros al final.

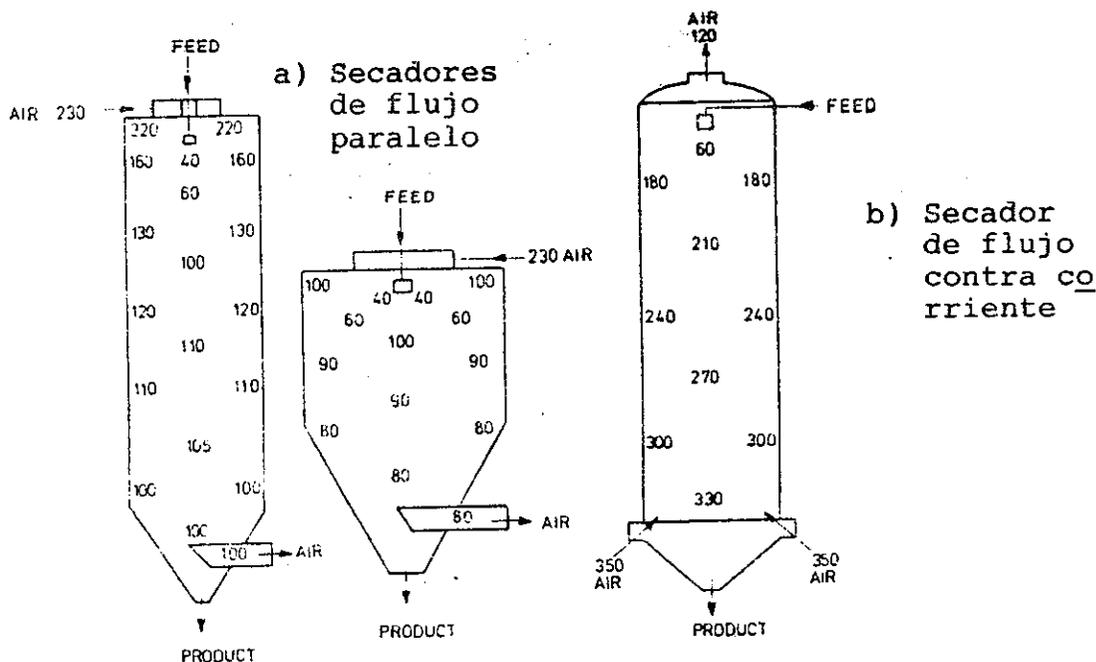


Figura-3.9. Distribución de la temperatura de aire de secado en secadores por aspersión de flujo en contra-corriente y flujo paralelo.

c) Sistemas de Flujo Mixto (Mixed-flow)

Los sistemas de flujo mixto son representados por varias combinaciones de los sistemas de flujo paralelo y el contra corriente. En este arreglo el material atomizado entra en el fondo de la cámara, formándose como una fuente con el aire caliente que entra en la parte alta de la torre. Inicialmente la trayectoria del atomizado es a contra-corriente y posteriormente es en flujo paralelo. Las partículas atomizadas recorren dos veces la cámara de secado, permitiendo que ésta sea más pequeña y por lo tanto menos costosa. Por otro lado, tiene la desventaja que la densidad de producto final tiende a ser un poco más baja que la que se obtiene en un arreglo en contra-corriente. Tiene la ventaja que el control de la operación es más sencillo.

Otras características del arreglo de flujo mixto son las siguientes:

- utilizan boquillas para la atomización
- casi todo el producto se descarga en la base de la cámara del secador
- la temperatura del producto final es mayor que la del aire exhausto
- las dimensiones de la cámara, normalmente, corresponden a la relación de 1/3 a 1 entre el diámetro y la altura total.

Ultimamente se han desarrollado otros tipos de secadores de flujo mixto entre los cuales cabe mencionar el horizontal, de caja rectangular, el cual ha sido extensamente usado para secar leche y productos relacionados. La principal razón para su elección es la de su bajo costo inicial.(6)

En cualquier caso, el movimiento del aire predetermina el rango y grado de la evaporación por influencia de: a) el paso del atomizado a través de la zona de secado, b) la concentración del producto en la región de las paredes del secador, y c) el grado en que las gotas semisecas entran nuevamente al área caliente alrededor del dispersador de aire.

La selección del tipo de contacto del aire con el atomizado depende, sobre todo, del producto que se va a secar. Por ejemplo, en el arreglo en contra-corriente, el aire muy caliente entra en contacto con partículas secas que están saliendo de la cámara. Si el producto seco puede permanecer en presencia de temperaturas muy altas sin riesgo a que se descomponga, y si se desea una densidad alta del mismo, este arreglo es el más deseable. Las partículas secas serán de baja porosidad debido a que la tendencia de las gotas a expandirse rápidamente es reducida, evitando la fractura de las mismas

Tabla 3.2 Relaciones de la Trayectoria del Atomizado para Atomizadores Rotatorios

Autor	Ecuación
Friedman, Gluckert, Marshall	$R_{10} = 0.4 \left[\frac{d.N.M}{2} \right]^{0.25}$
Frazer, Eisenklam, Dombrowski	$R_{max} = \frac{7.2d^{0.21}M^{0.2}}{No.16}$
Herring, Marshall	$Re_{99} = \frac{12d^{0.2}M^{0.25}}{No.16}$

3.2.3 Dispersores de Aire y Cámara de Secado

El aire entra a la cámara de secado a través del dispersor de aire. La función de éste es la de proveer el calor requerido para el secado, controlar el recorrido de las gotas o partículas durante el secado y remover la humedad vaporizada de la cámara. Donde el dispersor de aire y el atomizador son colocados juntos, el flujo de aire puede influir en la distribución del tamaño de gota del atomizado. La función de la cámara de secado es la de proveer al aire y a las partículas el tiempo de residencia suficiente para obtener el producto con los niveles de humedad deseados sin degradación por calor y sin los indeseables depósitos de producto en la pared. El producto debe ser descargado continuamente y el método de descarga conduce a la forma deseada del producto seco. Las cámaras de secado son diseñadas para descargar la mayor cantidad del producto en la base (descarga primaria del producto) o transportarlo todo con el aire exhausto a las unidades de separación y recuperación (descarga total del producto). (1)

Los diseños de los secadores caen en tres categorías: de flujo paralelo, contra-corriente y flujo mixto, como ya se definieron anteriormente. La figura 3.10 ilustra cuatro tipos de cámaras de secado de flujo paralelo. El dispersor de aire y

el atomizador están localizados en lo alto, base o final de la cámara. Los tipos (a) y (b) son los más comunes. El tipo

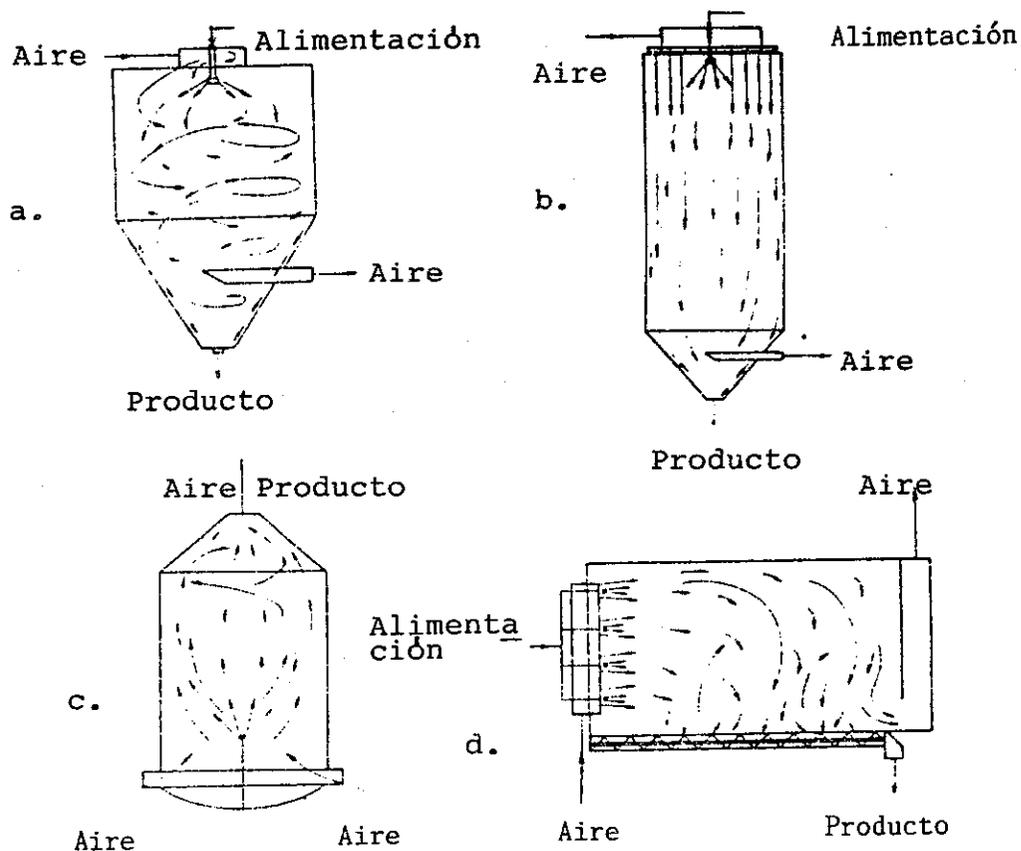


Figura 3.10 Secadores de flujo paralelo. a) Flujo rotacional hacia abajo. b) Flujo hacia abajo. c) Flujo hacia arriba. d) Flujo horizontal.

(a) tiene un atomizador centrífugo con flujo hacia abajo. El dispersor de aire provoca rotación del aire en la entrada tangencial y/o flujo sobre paletas inclinadas. El atomizado es rápidamente llevado en movimiento circular o rotatorio. Algunos diseños de dispersores de aire se muestran en la fig. 3.11. El tipo (b) tiene un flujo hacia abajo. El dispersor de aire provoca un flujo no rotacional por el uso de platos perforados y/o vanes rectos. El atomizado adquiere un flujo en

línea recta una vez que la desaceleración de las gotas a partir de las boquillas es completada. En el tipo (c) el aire impide que las partículas secas se salgan del flujo que cae. En el tipo (d) normalmente el flujo de aire permite que las partículas secas caigan fuera del aire y se depositan en la base de la cámara. En un secador de flujo a contra-corriente (fig 3.12) el atomizador y el dispersor de aire están colocados en los extremos opuestos de la cámara de secado. El flujo en contra-corriente es restringido principalmente para el uso de boquillas atomizadoras colocadas en lo alto de la cámara y permite disminuir el diámetro de la torre. El dispersor de aire crea varios grados de rotación del aire en la entrada de la cámara (ver fig. 3.13) pero debido a la altura de la misma, el movimiento rotatorio no puede ser mantenido en la región alta de la cámara. En un secador de flujo mixto, el aire y el producto están expuestos tanto a las condiciones del flujo paralelo como a las del flujo en contra-corriente durante su paso a través de la cámara de secado. Los dos tipo de flujo mixto son:

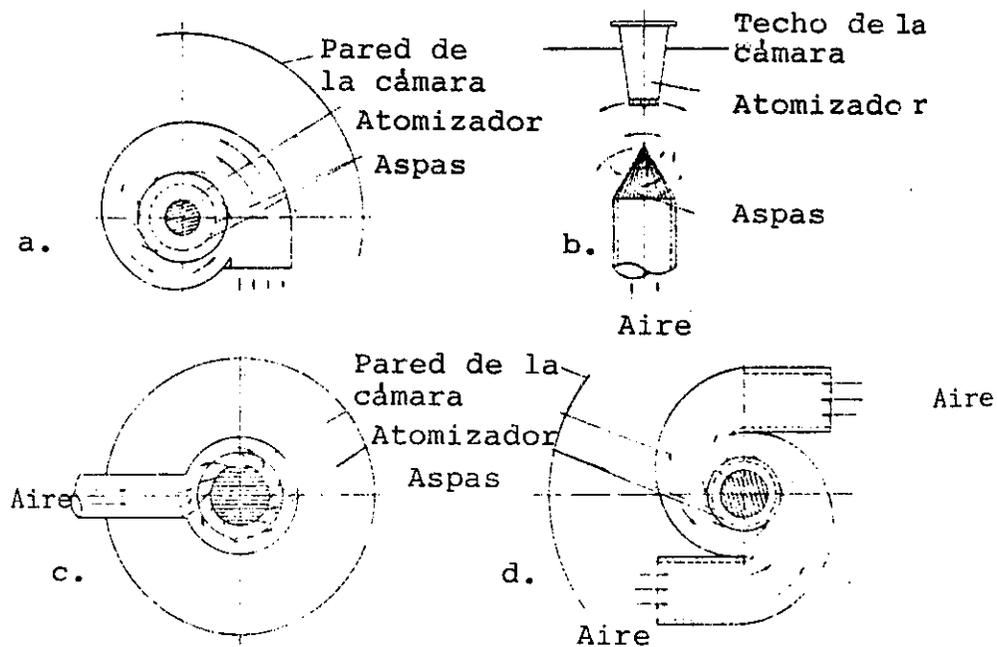


Figura 3.11 Tipos de dispersores de aire de flujo rotacional alrededor del atomizador. a) Entrada tangencial. b) Aspas inclinadas provocando torbellino. c) Aspas inclinadas. d) Entrada tangencial; doble entrada.

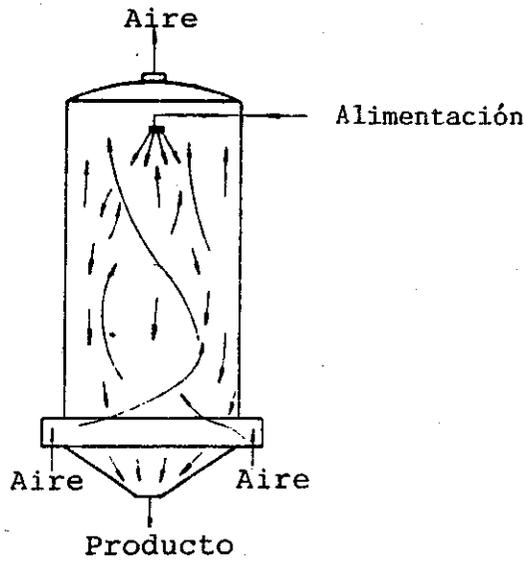


Figura 3.12. Secador de flujo contra-corriente.

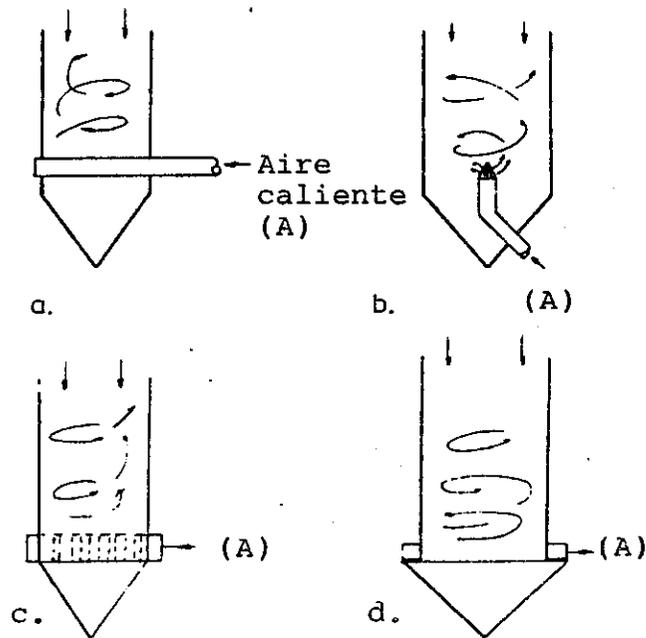


Figura 3.13 Dispersores de aire para secadores de flujo contra-corriente. a) Dispersor de aire de pared; entrada tangencial. b) Dispersor central de aire, aspas inclinadas. c) Dispersor móvil de aire, aspas inclinadas. d) Dispersor móvil de aire de pared, aspas inclinadas.

i) El aire fluye en dos direcciones mientras que el producto fluye en una sola. El aire entra y sale por ductos colocados en la parte de arriba y el atomizador está colocado también en esa región de la cámara de secado. (ver fig. 3.14(a)).

ii) El aire fluye en una sola dirección mientras que el producto fluye en dos. El atomizador atomiza el producto hacia arriba en la base de la cámara, dentro del aire de secado que entra. El producto seco se descarga en la base de la cámara. Ver fig. 3.14(b).

En la figura 3.14(a) la gran velocidad de entrada desarrolla un torbellino para obtener altos rangos de evaporación. El tiempo de residencia dentro del secador es muy corto (5-10 seg). El vigoroso movimiento ciclónico creado

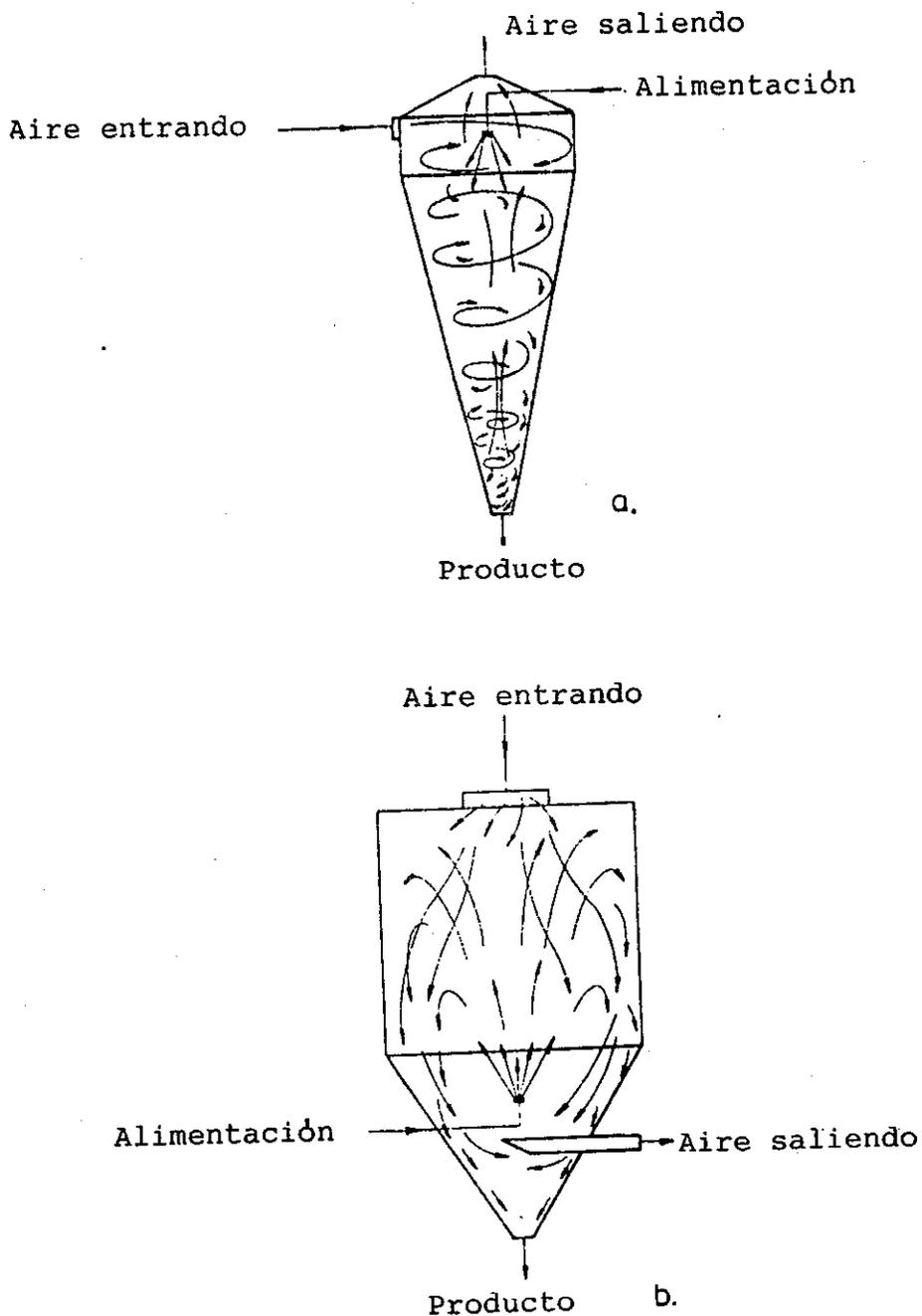


Figura 3.14 Secadores de flujo mixto. a) Ciclónico. b) Fuente.

dentro de la cámara barre las paredes y al mismo tiempo separa el producto del aire. El producto es descargado en la base de la cámara. Un porcentaje del producto como polvos secos permanecen en la corriente de aire y son llevados fuera del secador hacia los recuperadores de polvos. En la figura 3.14(b) la alimentación es atomizada hacia arriba dentro de una corriente de aire con movimiento circular, provocado por el dispersador de aire localizado en el cielo de la cámara. La aspersión viaja hacia arriba y al desacelerar fluye hacia abajo, dando lugar a un flujo similar al de una fuente.

En la mayoría de diseños de las cámaras, el producto seco es dirigido a su base la cual puede estar equipada para una descarga primaria del producto seco o para una descarga total. En la descarga primaria (ver fig. 3.15), el mayor porcentaje de producto seco es descargado directamente de la base del secador. Solamente unos pocos finos permanecen en el aire exhausto los que son recuperados en las unidades de separación de polvos.

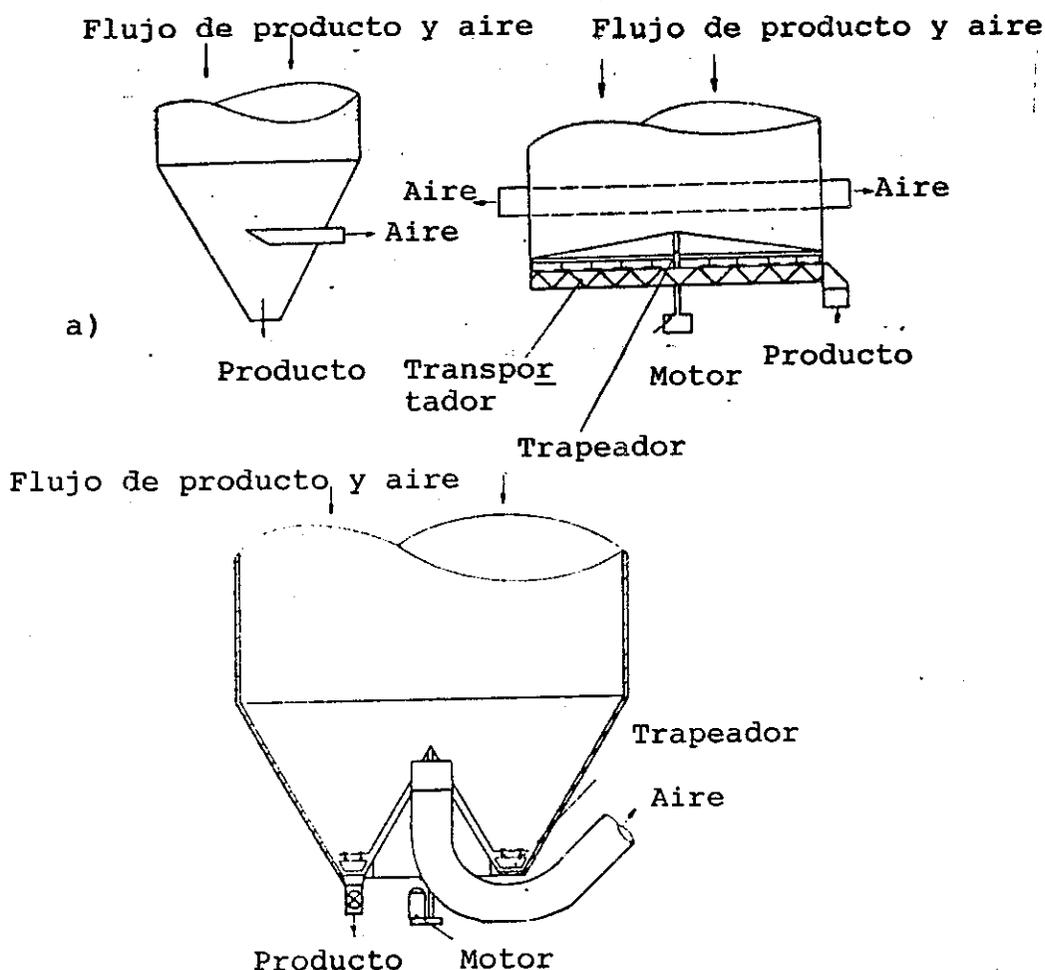


Figura 3.15 Descarga primaria de el producto. a) De la base cónica de la cámara. b) De el fondo de la cámara con trapeador mecánico. c) De la base cónica doble con trapeador.

En los secadores con descarga total del producto (ver fig. 3.16), la velocidad de aire en los ductos debe ser lo suficientemente grande para transportar todo el material seco a las unidades de separación. Debido a los requerimientos para la transportación neumática, esta forma de descarga es recomendable principalmente para polvos.

Como se puede ver en la fig. 3.16, hay otros diseños de cámaras para descarga total del producto que utilizan escobas mecánicas. Sin embargo, los más usados son como los de la fig. 3.16(a).

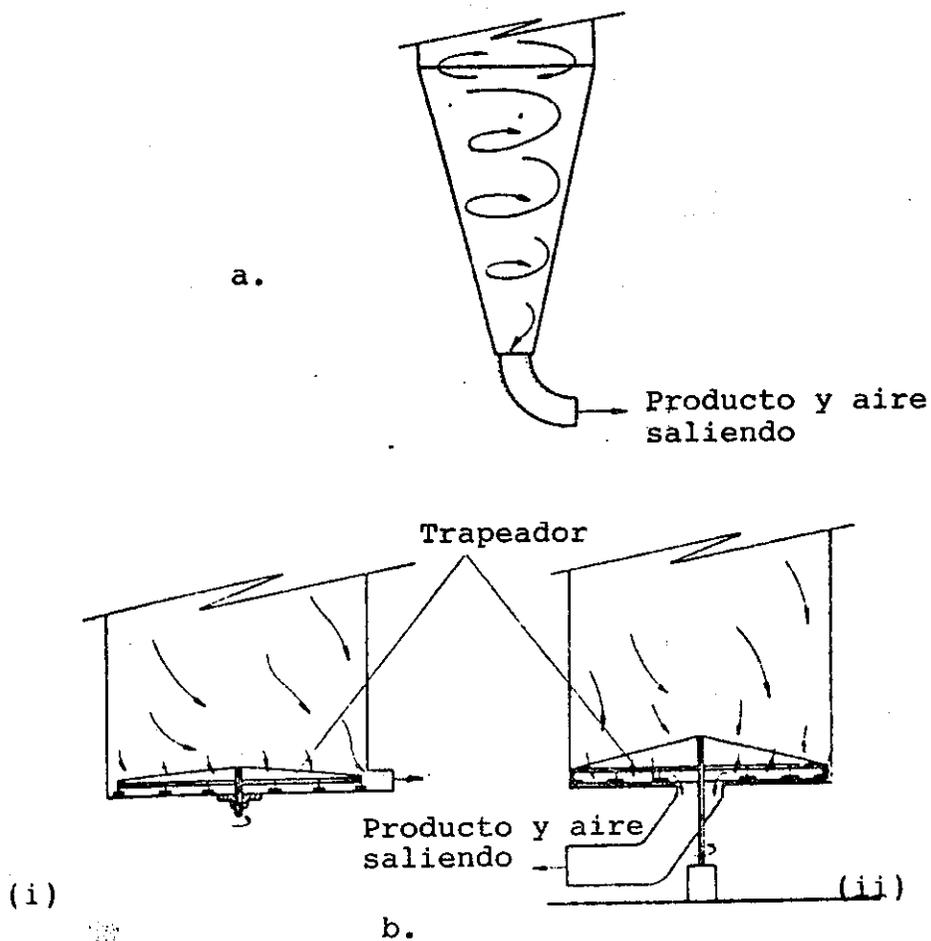


Figura 3.16 Descarga total del producto. a) De la base cónica de cámara. b) de la base plana de la cámara; i) trapezoidal con descarga lateral, ii) trapezoidal con descarga central.

3.3 Secado del Atomizado (Evaporación de la Humedad)

Luego que las gotas del atomizado entran en contacto con el aire de secado, la evaporación tiene lugar a partir de la película de vapor saturado, la cual es establecida rápidamente en la superficie de la gota. La temperatura en la superficie de la gota se aproxima a la temperatura de bulbo húmedo del aire de secado. La evaporación tiene lugar en dos estados. En el primero hay suficiente humedad dentro la gota para cubrir lo que se pierde en la superficie. La difusión de la humedad a partir del interior de la gota mantiene las condiciones de superficie saturada y mientras esto dure, la evaporación se lleva a cabo a una velocidad constante. Esto es lo que se ha llamado el primer periodo de secado. Cuando el contenido de humedad es reducido a un nivel en el que es insuficiente mantener las condiciones de saturación, el llamado punto crítico es alcanzado y se forma una corteza seca en la superficie de la gota. La evaporación depende ahora de la velocidad de difusión de la humedad a través de la superficie seca. Lo pegajoso de la corteza seca se incrementa con el tiempo causando un decrecimiento en la velocidad de evaporación. Esto es lo que se le ha llamado el segundo periodo de secado.

De este modo una parte sustancial de la evaporación de la gota se realiza cuando su superficie está saturada y fría. El diseño de la cámara de secado y el flujo de aire determinan el tiempo de residencia de la gota, permitiendo que la evaporación de la humedad deseada se complete y que el producto sea removido del secador antes que alcance la temperatura del aire saliendo de la cámara. Aquí existe la posibilidad que el producto pueda dañarse con el calor.

Durante la evaporación, la distribución del atomizado sufrirá cambios. Distintos productos exhiben diferentes características de evaporación. Algunos tienden a expandirse, otros a colapsar, fracturarse o desintegrarse, formándose partículas porosas y de forma irregular. Otros conservan una forma esférica o se contraen, produciéndose partículas densas.(1)

La evaporación de volátiles (usualmente agua) de un atomizado, involucra simultáneamente transferencia de calor y masa. Con el contacto entre la aspersión y el aire de secado, el calor es transferido por convección del aire hacia las gotas, y convertido en calor latente durante la evaporación de la humedad. Esta humedad evaporada es transportada por el aire por convección a través de la capa que rodea a cada gota. La velocidad de las gotas saliendo del atomizador difiere

grandemente por la velocidad del aire que las rodea y, simultáneamente, con el calor y transferencia de masa.

La velocidad de transferencia de calor y masa es función de la temperatura, humedad y las propiedades de transporte del aire que rodea a cada gota. Es también función del diámetro de gota y la velocidad relativa entre las gotas y el aire.

La historia de la evaporación para las gotas atomizadas comienza con remover la humedad a una velocidad más o menos constante y a temperatura constante de la superficie de las gotas (primer período de secado) seguido por la declinación de la velocidad de evaporación hasta que el secado se haya completado (segundo período de secado). Aquí la velocidad de evaporación comienza a desaparecer hasta que el contenido de humedad de las gotas llega al nivel conocido como el contenido crítico de humedad. (1)

La mayor cantidad de humedad de las gotas es removida durante el primer período de secado. La humedad emigra del interior de las gotas a una velocidad suficiente para mantener la saturación de la superficie. La temperatura de bulbo húmedo representa la temperatura de la gota. La velocidad de evaporación puede ser considerada constante, aunque esto no es estrictamente verdadero. En la operación de secado por aspersión la evaporación de las gotas empieza con el contacto inmediato atomizado-aire, y la rápida transferencia de humedad en el aire es acompañada por la disminución de la temperatura del aire. Cualquier disminución de la temperatura reduce la fuerza de transporte por transferencia de calor, la velocidad de evaporación puede empezar a decaer y simultáneamente la saturación en la superficie se mantiene. Sin embargo, es común referir a la fase inicial del secado de gota como la velocidad constante de período de secado.

La migración de la humedad baja el nivel de la misma dentro de la gota a un punto que es eventualmente alcanzado cuando la velocidad de migración a la superficie se convierte en el factor limitante en el período de secado. La superficie húmeda no puede mantenerse más, dando como resultado una caída en la velocidad de secado. La velocidad de migración de humedad es afectada por la temperatura del aire circundante. (1)

Si la temperatura del aire es más alta que la velocidad de las fuerzas de transporte, permite que la evaporación comience a una velocidad en la que la migración de humedad no puede mantener la superficie húmeda, la gota experimentará una pequeña velocidad constante de secado. Una capa seca se formará instantáneamente en la superficie de la gota.

Esta capa seca presenta una formidable barrera para la transferencia de humedad y actúa reteniendo a la misma dentro de la gota. Así la temperatura de secado que entra puede fácilmente influir en las características del producto seco. El incremento de la temperatura del aire que entra puede, con frecuencia, dar lugar a una rápida formación de la capa seca. Esto somete a la gota a temperaturas de superficie mayores que cuando se emplea aire de secado con temperaturas menores. Una menor temperatura de aire podría significar una menor velocidad inicial de secado, con el sostenimiento de una temperatura de superficie (equivalente a la temperatura de bulbo húmedo) por más largo tiempo.

El tiempo actual de evaporación para gotas contactadas en una temperatura de aire fija depende principalmente de la forma de la gota, composición química, estructura física y concentración de sólidos. El tiempo actual es la suma de los periodos de velocidad constante y de la caída de velocidad hasta que el nivel de humedad deseado es alcanzado.

Las características generales de secado son ilustradas por una curva, como la que presenta la fig. 3.17.

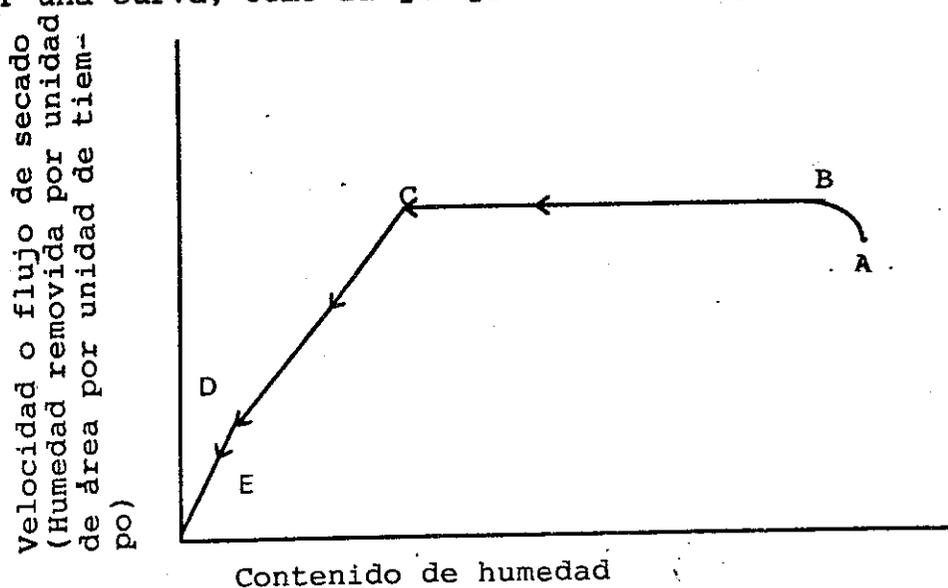


Figura 3.17 Curva de velocidad de secado

En la fase A.B, la velocidad de secado es establecida inmediatamente por el contacto de la gota con el aire de secado. A ello sigue un pequeño incremento de la temperatura en la superficie de la gota, y la velocidad de secado aumenta en las milésimas de segundo requeridas para la transferencia de calor a través de la interfase gota-aire para establecer equilibrio.

En la fase B.C, las condiciones de equilibrio dinámico son representadas. El secado procede a velocidad constante, siendo esta la más alta alcanzada durante toda la historia de evaporación de la gota. La superficie se mantiene saturada por la adecuada migración de humedad del interior de la gota a la superficie.

En la fase C.D, en el punto C, el punto crítico es alcanzado y la humedad dentro de la gota no puede mantener más la saturación en la superficie. La velocidad de secado empieza a decaer, iniciándose la caída de velocidad del período de secado. Este período puede formar más de una fase si en la superficie de la gota permanecen áreas húmedas. La fase C.D continúa hasta que éstas desaparezcan.

En la fase D.E, la resistencia para la transferencia de masa es completa en la capa sólida. La evaporación continúa a una velocidad decreciente hasta que el contenido de humedad de la gota esté en equilibrio con el aire que la rodea. Próximo al equilibrio el contenido de humedad en el punto E es bajo. En la operación del secado por aspersión, el producto es usualmente removido del secador antes que el equilibrio sea alcanzado. La temperatura de la gota sube a lo largo de las dos fases de la caída de velocidad del período.

La figura 3.17 es diagramática. En realidad la curva de secado puede no tener puntos claramente definidos. Algunas de las zonas de secado como las que se muestran pueden no ocurrir. Por ejemplo, en el secado por aspersión de productos que son sensibles al calor, la temperatura del aire aplicado es baja y la fase A.B puede extenderse hasta que el punto crítico es alcanzado. Del secado en este caso se puede decir que no se parece al usual período de velocidad constante.(1)

3.4 Separación y Recuperación del Producto seco a partir del Aire Exhausto.

El cuarto y último proceso estado de la operación de secado por aspersión es la separación del producto seco del aire. A la separación sigue la remoción del producto del secador. Esta operación reclama dos importantes requerimientos

del secador; (a) una económica recuperación de los sólidos secos y (b) un aire exhausto libre de partículas suspendidas. Una económica recuperación implica recuperar el producto en su más usual y/o más comercial forma. El aire exhausto limpio en un secador de ciclo abierto es necesario para prevenir la descarga de polvos suspendidos en cantidades que excedan los estándares de contaminación locales o nacionales. En un secador de ciclo cerrado también es necesario un aire exhausto limpio para que el aire/gas de secado retorne al calentador de aire sin riesgo de resecar los polvos suspendidos. Lo quemado puede ser fuente de ignición o que pasen partículas oscuras a la cámara de secado. (1)

La separación del producto seco se puede llevar a cabo en primer lugar, en la base de la cámara (separación primaria del producto -descarga-), seguida por la separación de finos en el equipo de colección (separación secundaria del producto -descarga-). Alternativamente, todo el producto puede ser transportado al equipo de colección (separación total del producto -descarga-) (fig. 3.18). La cantidad de producto en la separación primaria depende principalmente del diseño de la cámara, atomización del producto y flujo del aire de secado. El material puede ser separado por el flujo ciclónico del aire que sube en la base cónica de la cámara, o por la capacidad de las partículas a caer del aire en la base plana de cámara de secado. Cualquiera que sea el método de separación que se use, siempre se requerirá algún equipo de colección después de la cámara de secado.

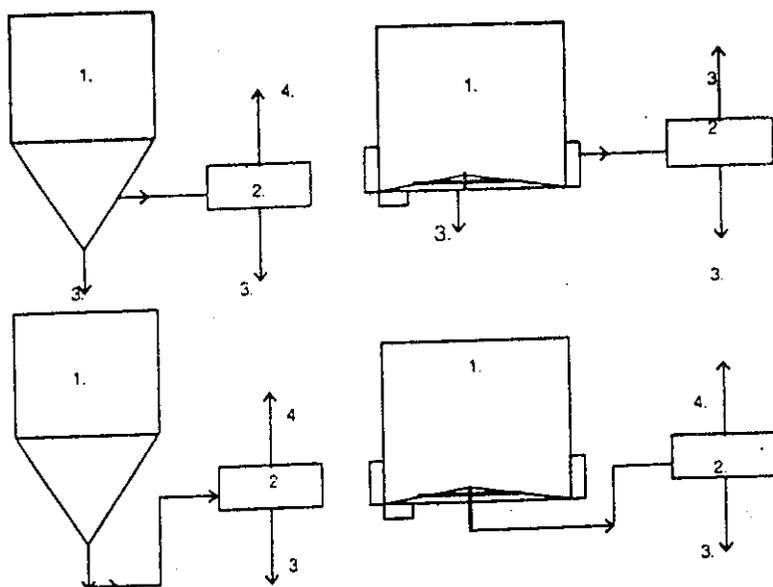


Figura 3.18 Descarga de producto de cámaras con base cónica y plana.
 a) Descarga primaria en la cámara y secundaria en la unidad de colección de polvos. b) Descarga total del producto en la unidad de colección de polvos. 1. Cámara de secado. 2. Colector. 3) Descarga. 4) Aire limpio.

La recuperación del producto seco conlleva el uso de válvulas para descargarlo en silos, máquinas de empaque o a un sistema de transporte. La selección de válvulas depende principalmente del tipo de descarga: si es intermitente o continua.

Para secadores con descarga primaria del producto, el grado de separación en la cámara de secado está relacionado con la localización y diseño del ducto de salida de la cámara. Esto se da principalmente para las cámaras de secado con base cónica. (fig. 3.19). El arreglo que se selecciona depende de la forma del producto y del equipo de colección instalado. Con ciclones, por ejemplo, una muy baja carga de finos resulta en una baja eficiencia de colección y apreciable pérdida de finos. Pero usando cargas más grandes de finos incluyendo tamaños de partículas ligeramente grandes, se podrían recuperar algunos de esos finos debido a la facilidad de las partículas grandes o finos aglomerados a entrar, que de otra manera podrían perderse. De los arreglos que se muestran en la fig. 3.19, los que hacen que el aire retorne a 180 grados (tipos A, F, G, H) para entrar al ducto, transportan polvos más grandes que los que requieren solamente 90 grados o menos para retornar. Este es particularmente el caso del tipo A, porque este arreglo tiene el ducto de entrada en un área de alta carga de polvos. Los arreglos F, G y H no son apropiados para transportar polvos grandes, estos son incorporados cuando se usan boquillas atomizadores que producen atomizados gruesos.

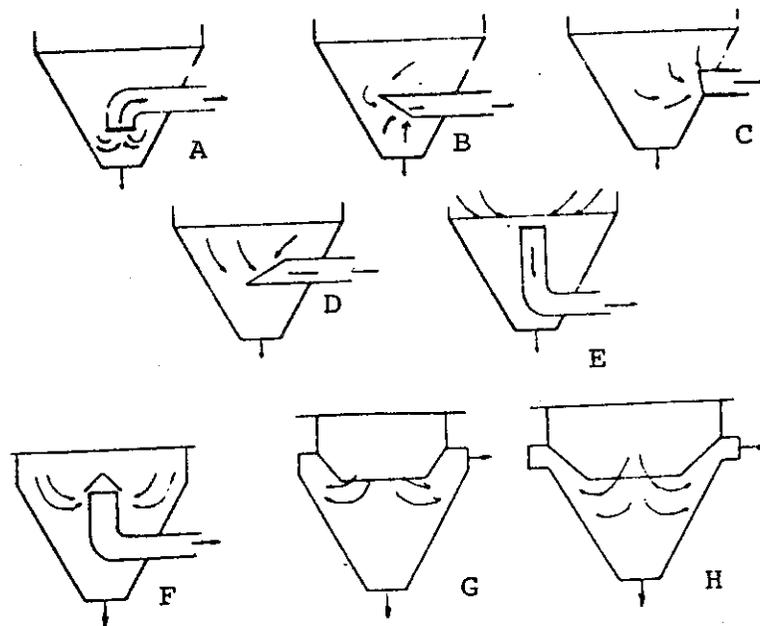


Figura 3.19 Arreglos de el ducto de salida con descarga primaria de producto en la base cónica de la cámara.

El arreglo tipo A parece una cubierta hacia abajo en lo profundo de la base cónica. Con la proximidad de la pared y el aumento de la velocidad del aire sobre el ducto de entrada, el arreglo es susceptible a la re-entrada de polvos que están listos para ser separados en las paredes o en la base de la cámara. El efecto de re-entrada puede ser severo donde el aire escapa hacia la base de la cámara (la cámara opera bajo presión atmosférica) y fluidiza polvos alcanzando la base del punto de descarga. Este efecto de fluidización comienza a perder importancia con el arreglo tipo B, en donde el aire retorna a 90 grados y la entrada esta más distante de las paredes y la base de la cámara. De todas maneras, los tipos A y B parecen ser puntos favorables. Ellos utilizan el volumen total de la cámara para la evaporación, del mismo modo que el aire debe fluir en todo el volumen. Estos dan el máximo tiempo de residencia, y permiten que el flujo de aire creado por el dispersor se mantenga a lo largo de la cámara. La tapadera hacia abajo del ducto de salida tiene una mínima interferencia sobre este flujo de aire, y en efecto, actúa para mantener el flujo de aire bajando dentro del cono de la cámara. El tipo C, por el contrario, atrae el aire hacia el lado de la cámara, interfiriendo mucho con el flujo del aire producido por el dispersor por provocar un desequilibrio en el mismo. Además la succión está en la proximidad de polvos presentes en las paredes. El tipo C es usado solamente cuando se manejan productos que son pegajosos o sensibles al calor, o en casos donde la superficie exterior del ducto proyectado, da lugar a la formación de depósitos que inciden en el deterioro de la calidad del producto y cesa el secado del mismo.

El tipo D, con la tapadera del ducto hacia arriba puede lograr transportar cantidades más bajas de polvo que el tipo B, puesto que el aire es atraído de un área de baja concentración de polvos. Sin embargo el volumen de la cámara es más escasamente utilizado. El tipo E, no requiere que el aire retorne hacia el ducto y la posición de la entrada del ducto asegura transportar menos polvos, pero también la utilización de la cámara es escasa. Este aspecto puede ser mejorado por la adición de una tapa al ducto. (tipo F). La tapa mantiene el flujo rotatorio del aire en la parte baja de la cámara. La presencia de la tapa requiere que al aire retorne a 90 grados. El transporte de polvos se incrementa, pero la tapa impide que el producto caiga dentro del ducto. El uso de la tapa solamente es posible para polvos no pegajosos. El ducto arreglado de esta manera causa problemas de accesibilidad para la limpieza. Los tipos G y H difieren de los anteriores debido a que la separación es realizada por educación del aire del secador en el área de pared localizada en la base de la sección cilíndrica de la cámara. El ducto

puede ser tangencial a la pared o salir en forma de un anillo. Con estos dos arreglos, el aire es agotado donde los polvos separados se congregan en la pared. El polvo es continuamente estregado por el aire, y la re-entrada es inevitable. Sin embargo, esos arreglos son usados con polvos gruesos, y si la velocidad del aire en la pared más baja o en el anillo se mantiene, la separación primaria del producto puede ser muy grande. (1)

PARTE 4

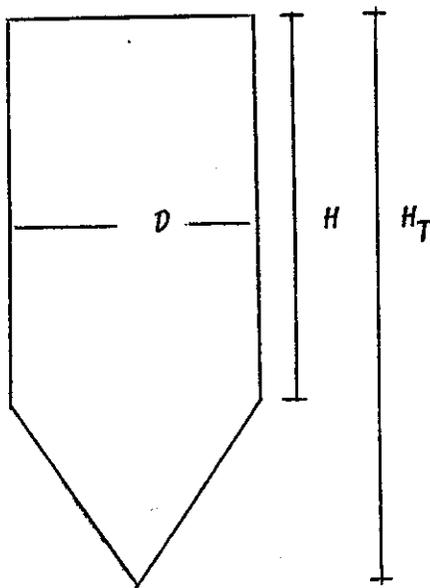
DISEÑO DE UN SPRAY DRYER

Para poder diseñar la torre de secado se fijaron las dimensiones de la misma. Esto se debe a que no se encontró la información necesaria para poderlas calcular. Para resolver este inconveniente, se pidieron cotizaciones a distintos fabricantes de spray dryers y todos coincidieron en las dimensiones que aquí se utilizaron. Las dimensiones son las siguientes:

$$\text{Altura (H)} = 19.7 \text{ p (6 m)}$$

$$\text{Diámetro (D)} = 9.84 \text{ p (3 m)}$$

$$\text{Altura Total (H}_T\text{)} = 29 \text{ p (8.84 m)}$$



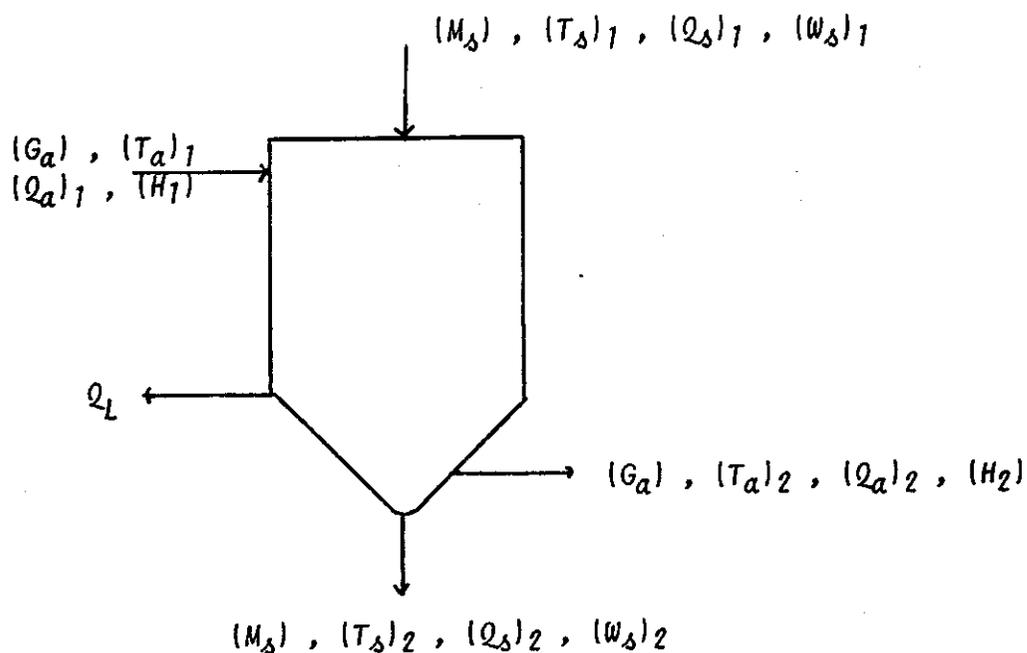
Es oportuno mencionar que los equipos de secado se especifican por la cantidad de humedad a evaporar y no por la cantidad de producto seco.

El material a secar es una solución de Sulfato de Zinc al 35% de concentración y se trata de obtener 500 kg/hr de

Sulfato de Zinc monohidratado ($\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) con un 4% de humedad máximo.

4.1 BALANCE DE CALOR Y MASA

Base: 1,100 lbs de $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ con 4% de humedad
(Se asume que no hay pérdidas de calor)



- Alimentación (M_s):

Porcentaje de sólidos = 38.9 %

$$M_s = \frac{1,100 * 96}{100} * \frac{100}{38.9} = 2,714.65 \text{ lb/h}$$

- Humedad en la alimentación (W_s)₁:

$$(W_s)_1 = \frac{61.1 \text{ (agua)}}{38.9 \text{ (sólidos)}} = 1.57 \text{ lb humedad/lb sólido seco}$$

- Humedad en el producto seco (W_s)₂:

$$(W_s)_2 = \frac{4}{96} = 0.042 \text{ lb humedad/libra de s\u00f3lico seco}$$

- Capacidad calor\u00edfica del $ZnSO_4 \cdot H_2O$: 0.35 BTU/lb $^{\circ}F$

- Humedad absoluta del aire entrando (H_1):

$$H_1 = 0.0125 \text{ lb agua/lb aire seco (carta psicrom\u00e9trica)}$$

- Entalp\u00eda del aire entrando (Q_a)₁:

$$(Q_a)_1 = (0.24 + 0.45H_1)((T_a)_1 - 32) + (1075.2H_1)$$

$$(Q_a)_1 = [90.24 + 0.45(0.0125)](752-32) + \\ + [1075.2(0.0125)]$$

$$(Q_a)_1 = 190.29 \text{ BTU/lb}$$

- Entalp\u00eda del aire saliendo (Q_a)₂:

$$(Q_a)_2 = (0.24 + 0.45H_2)(392 - 32) + 1075.2H_2$$

$$(Q_a)_2 = 86.4 + 1237.20H_2$$

- Entalp\u00eda de la alimentaci\u00f3n entrando al secador (Q_s)₁:

$$(Q_s)_1 = C_{Ds}\Delta T + (W_s)_1 * C_w \Delta T$$

$$(Q_s)_1 = 0.35(80 - 32) + 1.57(80 - 32)$$

$$(Q_s)_1 = 92.16 \text{ BTU/lb}$$

- Entalp\u00eda del producto seco saliendo del secador (Q_s)₂:

$$(Q_s)_2 = C_{Ds}\Delta T + (W_s)_2 * C_w \Delta T$$

$$= 0.35(257 - 32) + 1.57(257 - 32)$$

$$(Q_s)_2 = 88.2 \text{ BTU/lb}$$

- BALANCE DE HUMEDAD

$$\text{BASE: s\u00f3licos secos/hr} = \frac{1100 * 96}{100} = 1056 \text{ lb/hr} = M_s$$

- Humedad entrando en la alimentación=

$$= 1056 * 1.57[Ms * (Ws)_1]$$
- Humedad saliendo con el producto=

$$= 1056 * 0.042[Ms * (Ws)_2]$$
- Humedad evaporada

$$= 1056(1.57 - 0.042)$$

$$= 1613.57 \text{ lb/h}$$
- Humedad ganada por el aire = humedad perdida por la alimentación

De ecuación (4.3)

$$Ms(Ws)_1 + Ga(H_1) = Ms(Ws)_2 + GaH_2$$

$$Ga(H_2 - H_1) = Ms [(Ws)_1 - (Ws)_2] \quad Ga = \text{Flujo de aire}$$

$$Ga(H_2 - 0.0125) = 1613.57 \text{ lb/h} \quad \text{Ec. (A)}$$

- BALANCE DE ENTALPIA

- Entalpía entrando al secador:

$$(Qa)_1 Ga + Ms(Qs)_1$$

$$190.29(Ga) + 1,056(92.17)$$

$$\Rightarrow 190.29(Ga) + 97,321 \text{ BTU/h}$$

- Entalpía saliendo del secador:

$$(Qs)_2(Ms) + Ga(Qa)_2$$

$$88.2(1,056) + Ga(86.4 + 1,237.2H_2)$$

$$\Rightarrow 93,139.2 + Ga(86.4 + 1,237.2H_2)$$

De ecuación 4.5

$$Ga(Qa)_1 + Ms(Qs)_1 = Ga(Qa)_2 + Ms(Qs)_2 + Q_L$$

$$Q_L = \text{Calor perdido} = 0$$

$$\text{Ga}(190.29) + 1,056(92-16) = \text{Ga}(86.4 + 1,237.2\text{H}_2) + \\ + 1,056(88.2)$$

$$190.29\text{Ga} + 97320.96 = 86.4\text{Ga} + 1,237.2\text{H}_2\text{Ga} + 93,139.2$$

$$1,237.2\text{H}_2\text{Ga} - 103.89\text{Ga} = 4,181.76 \quad \text{Ecuación B}$$

Combinando ecuaciones A y B:

$$\text{De ec. (A): } \text{GaH}_2 - 0.0125\text{Ga} = 1,613.57$$

$$\Rightarrow \text{GaH}_2 = 1,613.57 + 0.0125\text{Ga} \quad \text{Ec. (D)}$$

$$\text{De ec. (B): } 1,237.2\text{H}_2\text{Ga} = 103.89\text{Ga} + 4,181.76$$

$$\Rightarrow \text{GaH}_2 = \frac{103.89\text{Ga} + 4.181.76}{1,237.2} \quad \text{Ec. (C)}$$

$$D = C$$

$$1,613.57 + 0.0125\text{Ga} = \frac{103.89\text{Ga} + 4.181.76}{1,237.2}$$

$$1,996,308 + 15.465 = 103.89\text{Ga} + 4,181.76$$

$$1,992,126.24 = 88.425\text{Ga}$$

$$\Rightarrow \text{Ga} = 22,529 \text{ lb/h}$$

De ec. (D):

$$22,529 \text{ H}_2 = 1,613.57 + 0.0125(22,529)$$

$$22,529 \text{ H}_2 = 1,895.1825$$

$$\Rightarrow \text{H}_2 = 0.084 \text{ lb de agua/lb de aire seco}$$

- CALOR NECESARIO PARA CALENTAR EL AIRE

$$Q = m c_p \Delta T$$

$$m = \text{Ga} = 22,529 \text{ lb/hr de aire}$$

$$Q = 22,529(0.24 + 0.45\text{H}_2)(752-80.6)$$

$$Q = 3,715,317 \text{ BTU/hr}$$

Poder calorífico del diesel, aprox. 132,000 BTU/gal

$$\text{Consumo de diesel} = \frac{3,715,317 \text{ BTU/hr}}{132,000 \text{ BTU/gal}}$$

$$\text{Consumo de diesel} = 28.15 \text{ gal/hr}$$

4.2 EFICIENCIA DEL SECADOR

La temperatura del aire caliente que entra a la cámara de secado cae durante el paso del aire a través de ésta. Si la cámara está bien aislada, se puede asumir que no hay pérdidas de calor hacia los alrededores, y la temperatura del aire cae siguiendo la línea de enfriamiento adiabático. La máxima evaporación posible a partir de un flujo de aire dado, se obtiene si el aire sale en su estado saturado. Esto nunca ocurre en la realidad, aunque hay casos en los que el aire de salida está muy cercano a su punto de saturación. La humedad relativa es generalmente baja en la salida del secador.

Si se considera que el aire que entra al secador lo hace a una temperatura T_1 después de haber sido calentado a partir de la temperatura atmosférica T_0 , y que durante el proceso de secado la temperatura del aire cae y este sale a una temperatura T_2 , la eficiencia del proceso se puede expresar de la siguiente forma:

a) Eficiencia Térmica Total.

Es definida como la fracción del calor total que se da al secador utilizado en el proceso de evaporación.

$$\eta_{\text{total}} = \left[\frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_0} \right] 100$$

donde T_2 = la temperatura del aire saliendo si la operación fue verdaderamente adiabática.

b) Eficiencia de Evaporación:

Se define como la razón de la capacidad de evaporación obtenida a la capacidad de evaporación en el caso ideal de que el aire salga del secador saturado.

$$n_{\text{evap}} = \left[\frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{\text{sat}}} \right] 100$$

donde T_{sat} = Temperatura de saturación adiabática correspondiente a la temperatura del aire entrando (T_1).

Aunque altas eficiencias se obtienen a altas temperaturas del aire entrando, hay limitaciones como lo son las temperaturas altas que se pueden producir y que, aparentemente, ayudan a un mejor funcionamiento del aparato. En primer lugar, hay un nivel de temperatura arriba del cual el calor afecta el atomizado y el producto podría degradarse. En segundo lugar, el costo extra del calentamiento del aire más allá de un nivel económicamente justificado.

4.3 TIEMPO DE RESIDENCIA EN LA CAMARA DE SECADO

- Volúmen de la cámara

$$V_c = 0.7854D^2(h + 0.2886D)$$

* Ecuación para secadores de base cónica y cuerpo cilíndrico (1)

Donde:

D = diámetro de la cámara (p) = 9.84 p

h = altura del cuerpo cilíndrico (p) = 19.7 p

$$\Rightarrow V_c = 0.7854(9.84)^2[19.7 + 0.2886(9.84)]$$

$$V_c = 1,714 p^3$$

- Tiempo mínimo de residencia

Temperatura del aire a la salida = 200 °C = 392 °F

Densidad del aire a 392 °F = 0.046648 lbm/p³ (7)

$$\begin{aligned} \text{Caudal de aire} &= \frac{22,529}{60} * \frac{p^3}{0.046648 \text{ lbm}} = \\ &= 8049.29 p^3/\text{min} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tiempo mínimo de residencia} &= \frac{V_c * 60}{\text{Caudal}} \\ &= \frac{1,714 * 60}{8049.29} = 12.78 \text{ s} \end{aligned}$$

4.4 CALCULO DE LOS VENTILADORES

El sistema de ventilación a usar es el de un solo ventilador, el cual, estará a la salida de la cámara de secado y después del aparato captador de polvos. Por aquí pasará el aire de secado exhausto, más la cantidad de humedad evaporada a una temperatura de 200 °C..

Para el cálculo de este ventilador se tomará como base el libro Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas de Claudio Mataix (10). El ventilador es de paletas rectas.

4.4.1 Cálculo del ventilador a la salida de la Cámara de Secado.

Se fijarán los siguiente parámetros:



- Anchos del rodete a la entrada b_1 y a la salida b_2 de los álabes.

$$b_1 = 11 \text{ cm} \text{ y } b_2 = 19 \text{ cm}$$

- Diámetros de entrada D_1 y salida D_2 de los álabes

$$- D_1 = 117.475 \text{ mm} \text{ y } D_2 = 727.7425 \text{ mm}$$

$$- n = 1780 \text{ rpm}$$

1- Caudal total a la salida de la cámara de secado.

- Flujo de aire = 22,529 lb/hr = 2.8446 kg/s
- Densidad del aire a 200 °C = 0.6689 kg/m³
- Cantidad de agua evaporada 1613.57 lb/hr = 0.2037 kg/s
- Densidad del vapor a 200 °C y 680 mm Hg = 0.4728 kg/m³

$$Q_{\text{aire}} = \frac{2.8446 \text{ kg/s}}{0.6689 \text{ kg/m}^3} = 4.2526 \text{ m}^3/\text{s}$$

Corrigiendo este valor tomando el aire en estas condiciones como un gas ideal:

$$Q_{\text{aire}} = 4.2576 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{vapor}} = \frac{0.2037 \text{ kg/s}}{0.4728 \text{ kg/m}^3} = 0.4308 \text{ m}^3/\text{s}$$

Corrigiendo también este valor, tomando el vapor como gas ideal bajo las actuales condiciones, en las que se encuentra sobrecalentado y no muy cerca de la T de saturación. De otra forma no se puede usar la ecuación de los gases ideales.

$$Q_{\text{vapor}} = 0.491 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_T = Q_{\text{aire}} + Q_{\text{vapor}}$$

$$Q_T = 4.2576 \text{ m}^3/\text{s} + 0.491 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_T = 4.7486 \text{ m}^3/\text{s}$$

2- Triángulo de Velocidades de Entrada.

(Este triángulo es recto. Entrada radial, $c_{1u} = 0$)

$$u_1 = (\pi)D_1n/60$$

$$u_1 = (\pi)(0.117475)(1,780)/60 = 10.95 \text{ m/s}$$

$$Q = (\pi)D_1b_1c_{1m}$$

$$\text{luego } c_{1m} = c_1 = \frac{4.7486}{\pi(0.117475)(0.11)}$$

$$c_{1m} = 116.97 \text{ m/s}$$

$$\text{tg} B_1 = c_1/u_1 = 116.97/10.95$$

$$\Rightarrow B_1 = 84.65^\circ$$

3- Triángulo de Velocidades de Salida

$$u_2 = \frac{D_2}{D_1} u_1 = \frac{0.7277425}{0.117475} 10.95$$

$$u_2 = 67.83 \text{ m/s}$$

Siendo las paletas del ventilador rectas:

$$\frac{R_1}{\cos B_2} = \frac{R_2}{\cos B_1} \Rightarrow \cos B_2 = \frac{R_1}{R_2} \cos B_1$$

$$\cos B_2 = \frac{58.7375}{363.87125} \cos 84.65$$

$$B_2 = 89.13^\circ$$

- Por la ecuación de continuidad

$$Q = (\pi)D_1 b_1 c_{1m} = (\pi)D_2 b_2 c_{2m}$$

$$c_{2m} = \frac{D_1 b_1}{D_2 b_2} c_{1m} = \frac{(117.475)(110)}{(727.7425)(190)} (116.97)$$

$$c_{2m} = 10.93 \text{ m/s}$$

$$c_{2u} = u_2 - \frac{c_{2m}}{\text{tg} B_2} = 67.83 - \frac{10.93}{\text{tg} 89.13}$$

$$c_{2u} = 67.66 \text{ m/s}$$

4- Presión producida por el ventilador

Como se asume que no hay pérdidas se puede usar la ecuación de Euler para Ventiladores. (10)

$$P = \delta(u_2c_{2u} - u_1c_{1u}) \quad \text{donde } \delta = d/g$$

$$\delta_{prom} = \frac{\delta_{aire} * 1.93 + \delta_{vapor} * 0.07}{2}$$

(porcentaje del vapor respecto del aire = 7%)

$$\delta_{prom} = \frac{0.6689 * 1.93 + 0.4728 * 0.07}{2}$$

$$\delta_{prom} = 0.6620 \text{ kg/m}^3$$

$$P = \delta_{prom}u_2c_{2u} \quad \text{puesto que } u_1c_{1u} = 0$$

$$P = (0.0676)(67.83)(67.66)$$

$$P = 310.24 \text{ kg/m}^2 + 125 \text{ (pérdidas)} = 453.24 \text{ kg/m}^2$$

4- Cálculo de la Potencia

$$N = QP/75$$

$$N = \frac{4.7486 * 453.24}{75}$$

$$N = 27.55 \text{ cv} \Rightarrow 36.74 \text{ cv con eficiencia del 75\%}$$

Por tanto se escogerá el ventilador de 40 cv.

PARTE 5

EQUIPO PARA RECUPERACION DE PRODUCTO SECO

5.1- CLASIFICACION DE LOS METODOS DE CAPTACION DE POLVO

Para la captación de polvo se utilizan los aparatos cuyo funcionamiento se basa en diferentes modos de separación de las partículas de la corriente de gas. A continuación aparece la clasificación de los captores de polvo y están expuestos en forma breve los principios de su trabajo.

1- Equipo cuyo funcionamiento está fundado en el aprovechamiento de la fuerza de la gravedad: cámaras de polvo, gasoductos.

Las partículas de polvo bajo la fuerza de la gravedad tienden hacia el fondo del aparato o gasoducto. Además de esta fuerza, en ellas influyen la fuerza del gas en movimiento y la resistencia del ambiente de gas. Esta resistencia depende de muchos factores incluyendo el tamaño de las partículas. La sedimentación de las partículas menudas es pequeña. Las cámaras de polvo son útiles solamente para la captación de partículas gruesas.

2- Aparatos basados en la utilización de la fuerza centrífuga: ciclones, filtros de celosías y de inercia.

En el caso de un viraje en el movimiento de la corriente de gas o en su movimiento curvilíneo (rotación), además de las fuerzas de la gravedad y del flujo de gas, en las partículas acciona la inercia. Bajo su acción las partículas tienden a mantener el movimiento rectilíneo, o sea, se botan del flujo. Este fenómeno se usa en ciclones, en ciclones tipo batería, filtros de celosías, etc. Estos equipos son aplicables fundamentalmente para la separación de partículas relativamente grandes ($>10 \mu\text{m}$).

3- Captores de polvo por vía húmeda: lavadores de gas, filtros de espuma, captadores turbulentos (rápidos).

Al contactar con las gotas u otra superficie del líquido bajo la acción de una o varias fuerzas físicas (golpe de inercia, difusión turbulenta o browniana, etc.), las partículas se mojan, y en la mayoría de los casos se hunden y como resultado de esto, se captan. La experiencia demuestra que la captación por vía húmeda purifica los gases, fundamentalmente de las partículas gruesas (mayores de 3-5 μm). Las pequeñas, sobre todo de los sublimados, se captan mal

por el líquido, incluso si por su naturaleza se mojan bien con el líquido dado. Este fenómeno se explica por dos causas: primero, las partículas menudas (gotitas) se mueven junto con la corriente de gas y, al encontrar el líquido (gotas u otra superficie húmeda), no se ponen en contacto, sino pasan a su lado. Segundo, entre una partícula y la superficie del líquido hay una película de gas o de aire la cual no puede ser superada por una partícula pequeña.

En los últimos años fueron elaborados los captores de polvo rápidos o turbulentos, por vía húmeda, en los cuales el gas a una gran velocidad desintegra el líquido hasta unas gotas pequeñas. Las partículas se pegan más fácilmente a las gotas pequeñas y se captan bastante bien, incluso los sublimados.

Las ventajas de los captores por vía húmeda en comparación con los de por vía seca son las siguientes: la posibilidad de purificar de polvos los gases a altas temperaturas; las dimensiones relativamente pequeñas de algunos tipos de equipo; el menor peligro de explosión e incendio que surgen cuando se enciende polvo seco; la posibilidad de purificar de polvo los gases húmedos y con sustancias adhesivas; las bajas inversiones básicas pese a que los gastos de explotación pueden ser mayores.

Los defectos con los siguientes: el empeoramiento de dispersión en la atmósfera de gases húmedos purificados, sobre todo, con los componentes agresivos; la necesidad de elaborar y evacuar una gran cantidad de desechos y lodos; grandes consumos de energía eléctrica (sobre todo, por los captadores turbulentos); la necesidad de utilizar los materiales de construcción anticorrosivos y, en muchos casos, costosos y escasos, para fabricar los aparatos.

4- Electrofiltros: aparatos para la separación del polvo en el campo electrostático.

Los electrofiltros se aplican ampliamente para captar las partículas de polvo y neblinas de cualquier tamaño, incluyendo de 1 μ m aproximadamente.

La eficiencia de trabajo de los electrofiltros incluso para el polvo tan menudo es muy alta (hasta el 99%). En los electrofiltros actualmente se purifican con buenos resultados los gases calientes, hasta 450 - 500 °C, con componentes agresivos (por ejemplo, un 30% o más de anhídrido sulfuroso).

5- Filtros de tela

En estos aparatos el gas con polvo lo hacen pasar por una tela de filtrado, entonces las partículas de polvo bajo el golpe de inercia, difusión y otros mecanismos de sedimentación quedan en las fibras de la tela. Se puede lograr un alto grado de purificación (más del 99%) en el caso de bajas velocidades.

En los últimos años la esfera de utilización de los filtros de tela se ha ampliado notablemente en relación con la producción de los tejidos sintéticos más resistentes a las acciones térmicas y ácidas en comparación con los tejidos naturales.

Para la filtración de gases con polvo también se utilizan cartón especial, algodón, materiales de fibras o granos (arena, gravilla, coque).(9)

De todos estos sistemas de captación de polvos, los más utilizados en las torres de secado por aspersion son los ciclones, filtros de tela y captores de polvo por vía húmeda (wet scrubbers)

5.2 Ciclones

Los ciclones representan un tipo muy difundido de los captores de polvo. Durante decenas de años los utilizan para separar de la corriente de gas las partículas sólidas. En los ciclones de construcción más perfecta se puede captar bastante bien partículas de 5 μm y más. Como se ha señalado anteriormente, la captación de polvo en ciclones se basa en la inercia de movimiento de las partículas (fuerza centrífuga).

El flujo de gas con polvo se suministra a la parte superior del ciclón que es, en muchos casos, un cilindro de radio R_2 y cónico en la parte inferior (fig. 5.1). La tubuladora de entrada en el ciclón, en general de forma rectangular, se sitúa sin falta según la tangente a la circunferencia de la parte cilíndrica. Los gases salen del aparato por un tubo redondo de radio R_1 , situado a lo largo del eje del ciclón.

Al entrar en el ciclón los gases fluyen de arriba hacia abajo, girando al principio, en el espacio anular entre la superficie cilíndrica exterior del ciclón y el tubo central de salida y luego en el cuerpo del ciclón, formando un torbellino rotatorio exterior.

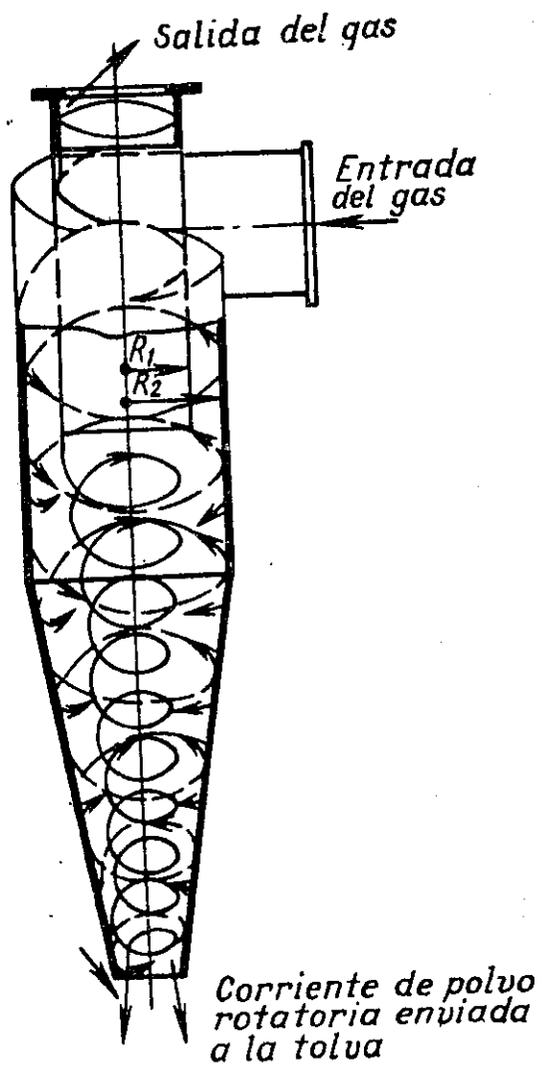


Figura 5.1 Esquema del movimiento del gas con polvo en el ciclón.

----- torbellino exterior
———— torbellino interior

Por lo tanto se desarrollan las fuerzas centrífugas gracias a las cuales las partículas de polvo suspendidas en la corriente de gas rotatoria, se empujan hacia las paredes del cuerpo del ciclón, tanto de su parte cilíndrica como cónica. Al acercarse al cono, el flujo de gas se retorna hacia el tubo de salida, formando un torbellino rotatorio interior.

Las partículas de polvo que alcanzan las paredes del ciclón se mueven junto con los gases para abajo y de ahí se evacuan del ciclón por una tubería de salida de polvo.

El movimiento de las partículas de polvo hacia la tubuladura se debe no solamente a la fuerza de la gravedad, sino en primer lugar, a que la corriente de gas no sólo gira cerca de las paredes de las partes cilíndrica y cónica, sino que se mueve a lo largo del eje del ciclón hacia el vértice del cono.

Por esta razón se puede situar el ciclón no solamente el cono abajo, sino en dirección inclinada, horizontal y hasta el cono arriba, echando el gas para arriba en espiral.(9)

La forma más común del ciclón usado en conjunto con una torre de secado por aspersion es el tipo flujo inverso. Esto significa que el ciclón puede operar a sobre presión (ventilador en la entrada del ciclón) o a baja presión (ventilador en la salida del ciclón). En el arreglo del secador, el ventilador es montado a la salida de la torre. El polvo y el aire pasan tangencialmente al ciclón, prácticamente a la misma velocidad. Giran en forma de espiral hacia la base del ciclón, separándose los polvos en las paredes del aparato y salen por la base. El aire limpio sube a lo largo del eje del ciclón y sale por la parte alta del mismo. El flujo a través del ciclón es esencialmente una doble espiral. La presencia de la espiral hacia arriba forma el corazón central. El diámetro del corazón central ha sido relacionado con el diámetro del ducto de salida (Dexit), y cuyo tamaño varía entre $1D_{exit}$ a $1/2D_{exit}$. Los polvos que no han sido separados durante el tiempo que el aire fluye en el ciclón, saldrán de éste junto con el aire. El concepto de flujo de doble espiral es solamente una justa representación del verdadero arreglo de flujos en el ciclón. Este arreglo es complejo porque hay flujos de aire secundario entre las dos espirales. El flujo de aire secundario se debe a la interacción de las componentes axial y radial de la velocidad, pero hay mucha discusión en cuanto si el flujo es un sólo vórtice cubriendo todo el largo del ciclón o un doble vórtice. La complejidad del flujo dentro del ciclón resulta en que los tamaños de partículas separadas son más pequeñas que lo predicho teóricamente. Partículas arriba de 20 micrones pueden ser removidas en la práctica. La

posibilidad de que partículas menores de 20 micrones sean colectadas cae rápidamente con la disminución de tamaño. Para obtener altas eficiencias y remover partículas de 10-20 micrones se requiere que las proporciones de las dimensiones de los ciclones sean muy precisas.(1)

En el diseño básico de ciclones industriales el flujo polvo-aire entra tangencialmente estableciendo un movimiento en espiral dentro del ciclón. Una modificación de este diseño básico es el de entrada alrededor de la voluta, en el que mayores eficiencias de colección son demandadas debido a un flujo en espiral más uniforme y controlable que se alcanza en la parte superior del ciclón. Los diseños de entrada tangencial y entrada alrededor de la voluta (figura 5.2) son extensamente adaptados en las instalaciones de secadores por aspersión. La mayoría de polvos transportados en el aire que salen de la cámara de secado tienen una distribución de tamaño que esos diseños pueden manejar. La entrada alrededor de la voluta es frecuentemente usada para manejar cantidades de aire más grandes y lograr mayores eficiencias de colección.

El funcionamiento de los ciclones cuando manejan materiales secados por atomización tiene gran importancia en el diseño, arreglo y operación de la planta de secado. Su funcionamiento depende de factores tales como: tamaño de partícula, forma y distribución, densidad y carga de polvos en el aire. Las características que establecen si los ciclones son deseables para un arreglo de una torre de secado incluye: a) un parámetro del tamaño de partícula para que pueda ser colectado en un ciclón, b) La eficiencia total del ciclón cuando maneja un producto con tamaño de partícula conocido y su forma, c) la presión de gota sobre el ciclón. Esas características determinan si un solo ciclón o una batería de ciclones puede bastar y operar como una sola unidad, o si equipo secundario es requerido después de los ciclones.

Dos son los parámetros usados para definir el tamaño de partícula que un ciclón puede remover. Esos son el diámetro crítico de partícula y tamaño de corte.

El diámetro crítico de partícula se define como el tamaño de partícula que será completamente removida del flujo de aire (100% eficiencia de colección). Este diámetro ha sido adoptado como un medio para definir la separación que se espera de un diseño de ciclón dado.

El tamaño de corte o corte del ciclón, representa mejor la separación obtenible. Es definido como el tamaño por el cual el 50% de eficiencia de colección es conseguido. Curvas del grado de eficiencia, obtenidas experimentalmente, son las

más seguras fuentes de información para obtener datos del tamaño de separación.(1)

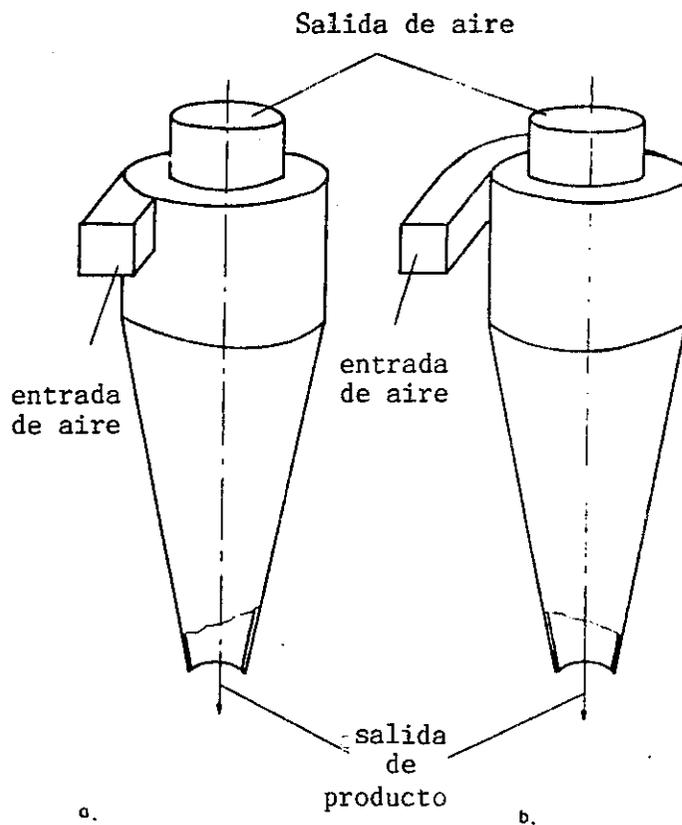


Figura. 5.2 Diseños básicos de ciclones industriales.
a) Entrada tangencial. b) Entrada alrededor de la voluta.

5.3 Filtros de Tela (Bag Filters)

Los filtros de tela o de bolsas filtrantes es con frecuencia el equipo más favorecido para la colección y recuperación de polvos que salen con el aire de calentamiento de la torre de secado. Un filtro de bolsas o mangas, consiste de numerosas bolsas instaladas de tal manera que cada una reciba aproximadamente la misma cantidad de aire. El simple principio de pasar aire cargado de polvos a través de tejidos cerrados es uno de los métodos más antiguos para limpiar el aire, y actualmente permanece como uno de los medios más eficientes para la separación y recuperación de polvos, siendo posible remover partículas menores de 10 micrones. Si las telas son bien tejidas, partículas de 1 micrón pueden ser colectadas. El funcionamiento de estos filtros depende principalmente de: a) el tipo de producto que se maneje, b) la carga de polvos que entran con el aire, c) fabricación de las bolsas y d) el procedimiento de limpieza de las bolsas. Modernos diseños son muy confiables en la operación, pero están sujetos a estricto mantenimiento e inspección para asegurar que en las bolsas no habrán escapes. Pequeños escapes disminuirán rápidamente los niveles de eficiencia que las unidades son capaces de alcanzar. Una típica curva del grado de eficiencia de un filtro de bolsas se muestra en la fig. 5.3. Más del 99% de eficiencia es obtenida con 5 partículas de 5 micrones y el 99% de eficiencia es obtenido con tamaños de 1-2 micrones.

Los filtros de bolsas pueden ser clasificados en tres tipos. Cada tipo se clasifica de acuerdo a la operación de limpieza de las bolsas.

- Tipo A: Limpieza manual en pare.
- Tipo B: Limpieza semicontinua (periódica)
- Tipo C: Limpieza continua.

El filtro tipo A se saca de operación para limpieza. El tiempo entre cada parada dependerá del área de las bolsas y de la rapidez con que se forme una capa del producto sobre las bolsas. Como la operación de secado por aspersion se requiere que sea continua, la práctica de frecuentes paradas no es aceptable. Este tipo de filtro es pocas veces usado, a no ser que la torre de secado sea operada por batch.

La limpieza del filtro tipo B se puede realizar sin sacar de operación el equipo. Esta limpieza se puede realizar de dos formas:

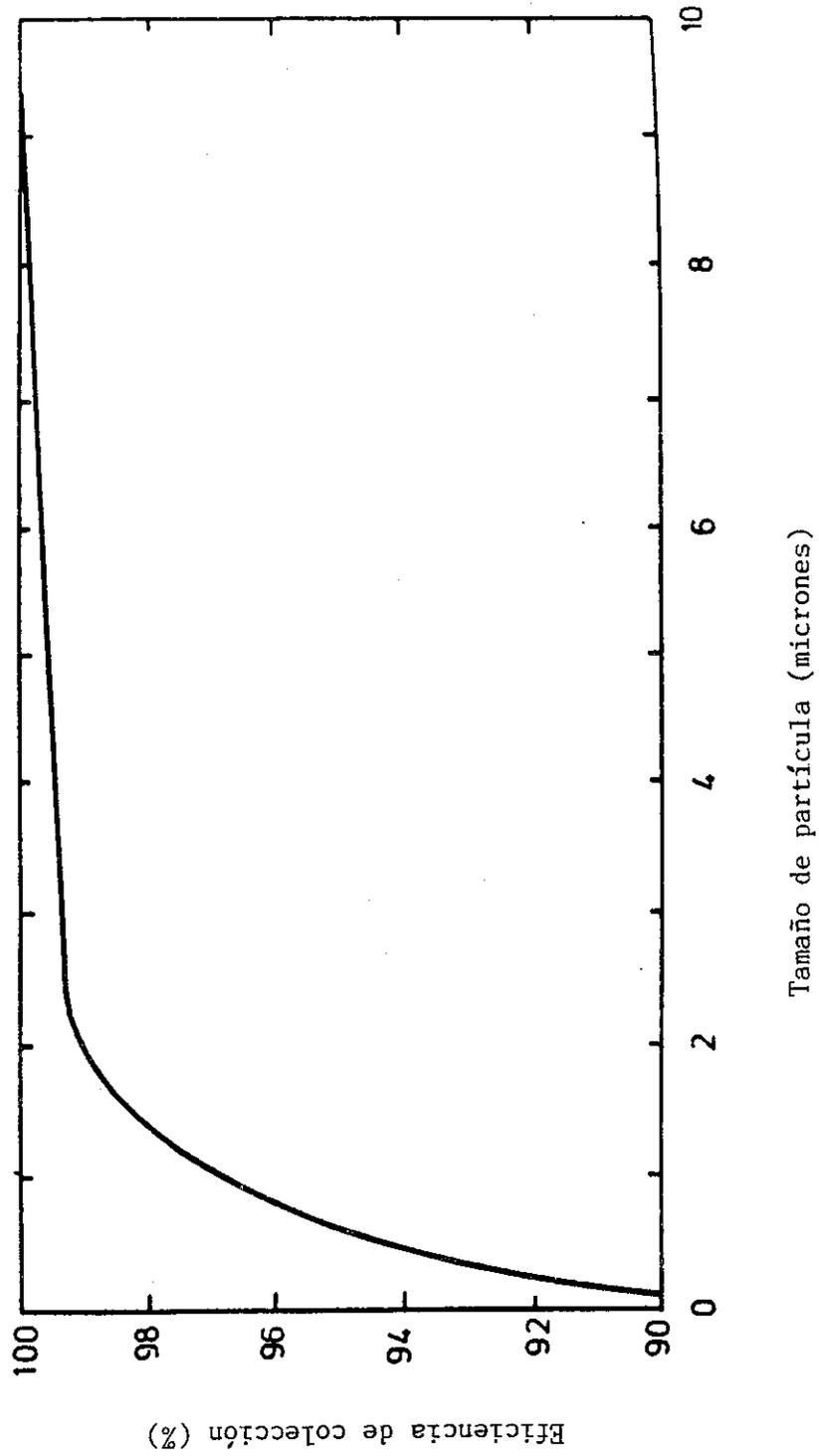


Figura 5.3 Curva grado de eficiencia para un filtro de mangas estandar.

1- El filtro de bolsas consiste de una serie de lotes de bolsas montadas en paralelo. Cada unidad compuesta por muchas bolsas. Periodicamente una de las unidades se saca de servicio para limpieza, mientras que por el resto de lotes pasa todo el flujo de aire. Cada unidad se saca de servicio por turno para llevar a cabo su correspondiente limpieza. Esta puede ser realizada sacudiendo las bolsas, aplicar violenta vibración en el plano vertical o por la aplicación de alguna forma de movimiento excentrico. La secuencia de limpieza es controlada por un dispositivo sincronizador. El ciclo normal de limpieza es de 30-45 minutos

2- El filtro de bolsas puede consistir de una sola unidad, en la que cada bolsa es limpiada periodicamente durante la operación. No es necesario parar ninguna parte del filtro para la limpieza. Comunmente para la limpieza de este tipo de filtros se usa un chorro de aire a gran presión que puede ser dirigido a cada bolsa para sacudirla. La presurización de la bolsa impide que fluya aire a travez de ésta, provocando que vibre o se infle y desaloje el producto. Esta operación se hace durante tiempos muy cortos de duración, 10-15 segundos y aire 90-100 PSI usualmente es suficiente. Una válvula solenoide actúa la boquilla de aire.

En el filtro tipo C, un chorro de aire limpia el sistema con pulsos de corta duración, la que puede ser considerada como una operación continua de limpieza, aunque hay diseños que son completamente continuos. Un diseño establecido es el que utiliza anillo de sopladores. En lugar de un chorro de aire pulsado se usa continuamente un flujo de aire que parte del anillo soplador que recorre las bolsas de abajo hacia arriba. El aire del anillo de sopladores se lleva el producto de las bolsas. La presión de aire está en el orden de 25-35 pulgadas WG. La ventaja del sistema de anillo de sopladores es que, aparte de que se logra descargar continuamente el producto y tener un sistema de baja presión, se pueden manejar volúmenes altos de polvos cargados en el aire por unidad de área de las bolsas. La limpieza continua también mantiene condiciones de baja presión de gota sobre las bolsas.

El funcionamiento de un filtro de bolsas, juzgado por la eficiencia total de colección de polvos transportados por el aire de secado, es lo mejor en equipos de colección usado en una planta de secado por aspersión. Lograr y mantener el buen funcionamiento del equipo depende también de: a) mantener un sistema contra escape de polvos, b) alta durabilidad de la bolsa para resistir el desgaste debido al trato mecánico que se le da durante la limpieza, c) un efectivo procedimiento de limpieza. La falla de esos puntos puede llevar a pérdidas de producto mayores que lo que se tiene en los ciclones.

La velocidad del aire a través de la bolsa se mantiene baja (1-15 p/min, 0.5-7.5 m/s). Para polvos finos, la velocidad del aire está en el orden de 1.5-3.0 p/min, pero en el caso de polvos más gruesos, se puede utilizar velocidades mayores de aire. Además, tiempos más cortos de limpieza por bolsa permite emplear mayores velocidades de aire. Si la velocidad del aire es muy alta, causa compactación del producto en la tela, provocando que la presión de gota sobre la bolsa aumente y puede dar lugar a penetración del producto a través de la tela. El incremento de fuerzas sobre la bolsa conduce también a que la tela de la falle antes y por lo tanto la demanda de limpieza aumenta. Los filtros de bolsas que se usan con torres de secado de gran capacidad evaporativa, son grandes.

La presión de gota sobre los filtros de tela usados en torres de secado por aspersión, generalmente están entre 1.5 - 8 plg WG (40 - 200 mm WG). Los valores de la presión de gota son difíciles de predecir. Los datos son obtenidos experimentalmente y los fabricantes de filtros de tela los suministran cuando se usan con secadores por aspersión.

Los filtros de bolsas son utilizados cuando se requiere el 100% de eficiencia en la colección de polvos. Si la tela de bolsa es de alta calidad y la resistencia al escape se mantiene, el filtro de bolsas resulta ser un equipo muy eficiente. Ciertamente su costo puede ser una cinco veces mayor que el de un ciclón, pero esto se compensa completamente por la mayor cantidad de producto que se recupera, principalmente si su valor es alto. Los casos en los que un filtro de bolsas no es recomendado son: 1) si se usa aire con contenido de humedad alto (aire cerca a su punto de rocío), 2) si las partículas transportadas son higroscópicas, 3) si los estándares de higiene y limpieza del producto son muy altos, 4) la temperatura del aire es muy alta y 5) cuando el producto se aglomera en forma de fibra. (1)

5.4 Captadores de polvo por vía húmeda (Wet Scrubbers)

El wet scrubbers remueve las partículas sólidas que arrastra una corriente de aire con un medio líquido. El contacto entre las partículas y el líquido se lleva a cabo mediante cualquiera de las siguientes métodos: A) El flujo de aire cargado de polvos se hace pasar por el líquido atomizado en una cámara, B) el flujo de aire pasa a través de platos sobre los cuales una corriente de líquido (usualmente agua) se mantiene, C) el flujo de aire pasa a través de un venturi en cuya garganta el líquido es inyectado.

Los tipos A y B consumen poca energía, mientras que el

tipo C consume alta energía. Cualquiera de los tres tipos son usados en las plantas de secado por aspersión, aunque el tipo B no se considera si los polvos no son fácilmente solubles en el líquido o puede causar posibles obstrucciones en los platos. Para operaciones en las que se requiere higiene y limpieza el tipo C es el generalmente preferido debido a la relativa facilidad de limpieza y mantenimiento de la unidad, lo que permite mantener al equipo por tiempos más largos libre de depósitos de material. (1)

Los wet scrubbers son invariablemente usados como una unidad secundaria para remover las partículas que escapan de la colección primaria, usualmente ciclones. Los polvos menores de 1 micron se pueden colectar, y un 99.5% de eficiencia es generalmente alcanzable en partículas de unos 5 micrones.

Los wet scrubbers se usan más para limpiar el aire que para recuperar producto, esto se debe a que el material se recupera en forma húmeda. El contenido de sólidos captados deben posteriormente secarse para ser recuperados. Aunque en muchos casos es posible recircular el líquido y de ese modo incrementar su contenido de sólidos. En muy pocos casos es posible alcanzar un nivel de contenido de sólidos que permita regresarlos directamente a la cámara de secado, lo que permitiría un secado más económico. (1)

Tipos de Wet Scrubber.

Tipo Cámara Atomizada. Un wet scrubber de cámara atomizada se muestra en la figura 5.4(a), El aire cargado de polvos entra en la base de la cámara y pasa hacia arriba a través de agua atomizada. El agua se atomiza por boquillas colocadas alrededor de la circunferencia y/o en el centro de la cámara. El aire sube a una velocidad entre 1.5-4 p/s (0.4-1.2 m/s). La velocidad se selecciona de acuerdo al tamaño de gota formada por las boquillas atomizadoras. La velocidad del aire debe permitir que las gotas atomizadas caigan en la base de la cámara y evitar que éstas puedan ser arrastradas en el aire limpio que sale del aparato. El agua utilizada en el scrubber puede ser recirculada o descargarse directamente al drenaje.

Como las gotas caen a través del aire cargado de polvos, el contacto y colección de las partículas se lleva a cabo por un mecanismo de impactación inercial e intercepción. Para gotas de agua entre 100-1000 micrones, la eficiencia de colección de partículas de unos 10 micrones está entre 70-80%. Para partículas de 3 micrones, la eficiencia de colección es baja, arriba de un 20%.

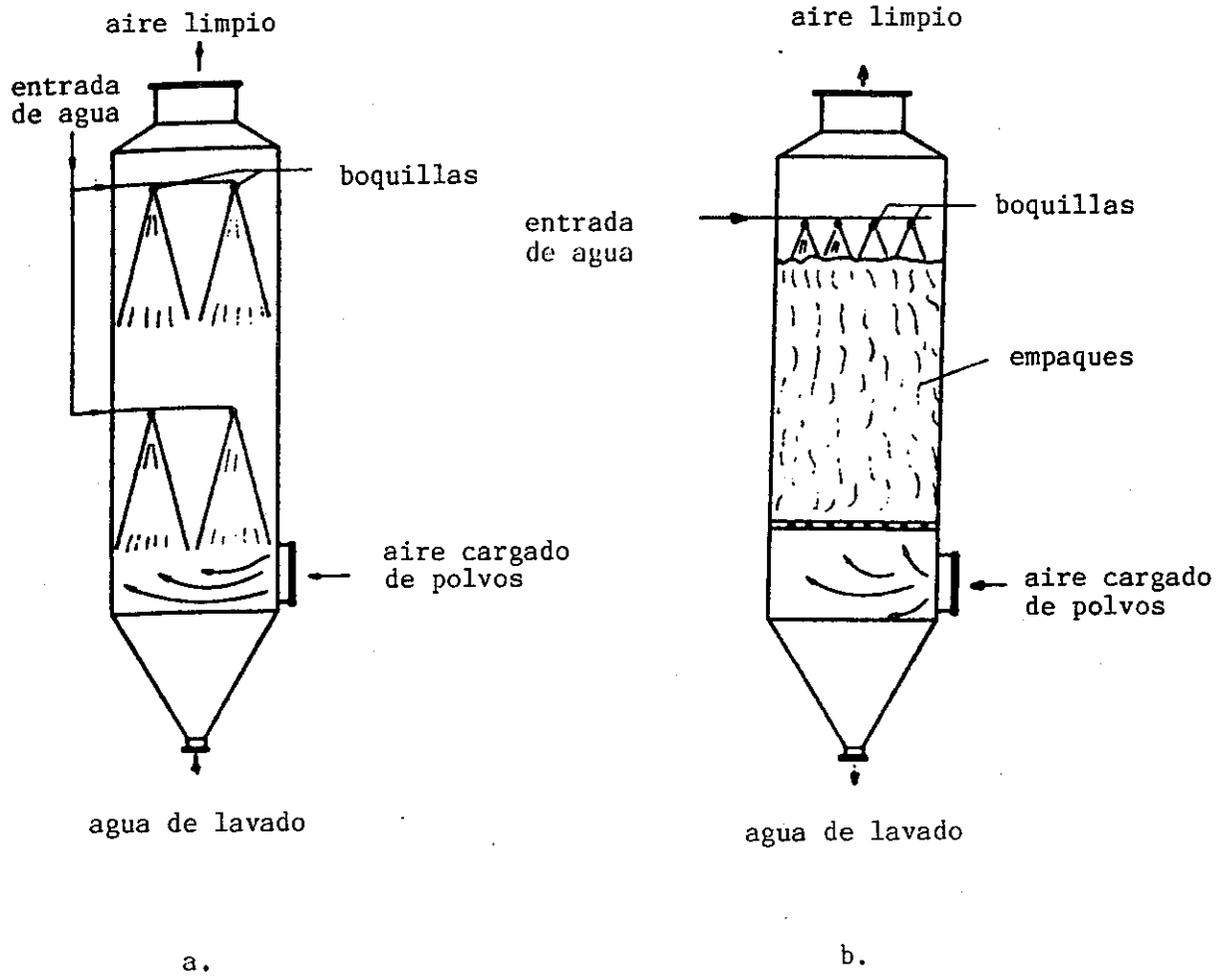


Figura 5.4 Diseños de colectores base húmeda. a) Tipo cámara con atomizadores. b) Tipo cámara con empaques.

El atomizado con gotas de unos 1000 micrones es considerado el más apropiado, lo que permite que la velocidad relativa entre las gotas y partículas de polvo se mantenga más fácilmente en el escrubber a pesar de la evaporación de las gotas. Como la eficiencia de colección es baja para partículas menores de 5 micrones, el remover partículas finas de la corriente de aire requiere repetidos impactos entre éstas y las gotas de agua. Esto se logra montando múltiples niveles de boquillas arregladas de tal manera que asegure que el agua atomizada cubre toda el área de la sección transversal del aparato.

Si el lavador se utiliza como un separador secundario en una torre de secado por aspersion trabajando aire con baja carga de polvos, la eficiencia de colección es relativamente baja, 55-70%. (1)

Lavadores de Gas con Empaques. Los lavadores de gas con empaques tienen la construcción análoga a la de los de cámara atomizada o hueca, y se diferencian solamente por el empaque de algún material en pedazos (coque, cuarzo, etc.), de anillos de porcelana o cerámicos de diferentes tamaños, empaques de madera, etc. En el caso de líquido de rociada ácido o alcalino, se utilizan muy a menudo anillos cerámicos, de porcelana o de carbón y para los álcalis anillos de acero.

La resistencia hidráulica de un lavador de gas con empaques es mucho mayor que la de un lavador de gas hueco. La resistencia del empaque depende de la forma y tamaño de los elementos de empaque, de su altura y de la velocidad del gas. Es muy importante que la rociada comience desde el nivel superior del empaque. Con este objetivo se usan diferentes dispositivos: atomizadores cilíndricos, de discos, placa de distribución, etc. En el caso de la rociada insuficiente el polvo puede pegarse a los elementos de empaque, lo que provoca un brusco incremento de la resistencia hidráulica y una disminución en el rendimiento del lavador de gas. La limpieza del empaque es una operación complicada y laboriosa, puesto que hay que sacarlos del lavador. El empaque de pedazos pequeños cargados a granel requiere de limpieza más frecuente. Por esta causa para los gases con polvo casi no se utiliza el empaque que se carga a granel, sino anillos situados en orden con un diámetro mínimo de 50 mm o el empaque de madera con una distancia entre tablillas no menor que 10-15 mm. Además, a fin de evitar que el polvo se pegue, la rociada se hace más intensa. (9)

Normalmente la cantidad de líquido a suministrar por m^2 de empaque en la sección del lavador, llamada intensidad de rociada, depende del tipo de empaque y asciende a unos 5-20

m³/h. Al igual que en los lavadores de gas huecos con lavado intenso, el líquido es de recirculación. El empaque se coloca sobre unas barras de apoyo de material correspondiente a las condiciones de trabajo del lavador de gas.

Lo mismo que en los lavadores de gas huecos, el grado de captación en los lavadores con empaque, crece de acuerdo con el aumento de la intensidad de rociada y del contenido de polvo en los gases a la entrada de el lavador de gas. La dispersidad también influye en el grado de captación de polvos: cuanto más menudas son las partículas, peor se captan. Prácticamente las partículas de 2 a 5 micrones se captan en un 70%; el polvo más grueso (partículas de 5 micrones) en un 80-90%. Las partículas menores de 2 micrones se captan mal. La condensación de los vapores de agua en las partículas de polvo es un factor muy favorable para la captación. (9)

La influencia de la velocidad del gas en los lavadores sobre la captación de polvo, depende del mecanismo de precipitación del polvo dominante de acuerdo con su dispersidad. Muchos datos demuestran que el polvo mayor (por ejemplo, del gas de alto horno) se capta mejor aumentando la velocidad del gas tanto en los lavadores de gas con empaques como en los huecos. Se debe a que la intensidad de precipitación de las partículas grandes en las gotas bajo la acción de inercia, crece con el aumento de la velocidad relativa de las partículas de polvo y de las gotas de agua. A consecuencia del incremento de la resistencia hidráulica del empaque en caso de su atasco por polvo, actualmente se rechazan cada día más los lavadores de gas con empaque para enfriar gases y captar polvos, y se utilizan los lavadores de gas huecos con rociada intensa.

Además de los lavadores de gas descritos anteriormente con empaques de anillos de cerámica o porcelana, últimamente se usan los lavadores con empaque flotante. El empaque de este aparato consiste en unas bolas ligeras de polietileno o polipropileno con un diámetro de 40 mm, que flotan libremente entre dos rejillas limitadoras superior e inferior. El líquido de lavado se introduce por arriba y se atomiza por unos inyectores. Los gases tienen contacto con el líquido de lavado en la superficie de las bolas mojadas y en los chorros entre ellas. Las bolas que están en un continuo movimiento se limpian mutuamente y el empaque no se atasca. La resistencia de los lavadores de gas con empaque flotante es de 1 - 1.5 kN/m² (100-150 mm H₂O). La eficacia de captación de polvo es aproximadamente la misma que en los lavadores de gas con empaques corrientes. (9)

PARTE VI

CONCLUSIONES

1- El Secado por Aspersión (Spray Drying) es uno de los métodos más flexibles y económicos para el secado de distintos materiales. Conociendo la capacidad de evaporación del secador y las condiciones de la alimentación, basta solamente con cambiar las boquillas, de acuerdo con su capacidad de descarga, para que quede dispuesto a operar con el nuevo material. Esto difícilmente se puede hacer con otro equipo de secado, y es ésta una de las razones de lo económico de este sistema al poder secar varios materiales con un mismo equipo.

2- En el caso de las Torres de Secado por Aspersión, su diseño se termina de definir por la experiencia. Las ecuaciones que al respecto existen son resultado de pruebas con equipo de laboratorio, que dejan de ser reales para equipos de uso industrial. Ahora se calculó solamente un ventilador, pero si en el momento de ponerse a operar el equipo, llegara a faltar aire para el secado, se puede instalar otro a la entrada de la torre, el cual siempre será más pequeño, en potencia, que el otro. Cuando el sistema es de dos ventiladores, al de la entrada se le llama ventilador primario y al de la salida, ventilador secundario.

3- Definitivamente es posible diseñar y construir equipo industrial en nuestro medio. En muchos casos, se ha comprobado que llevar a cabo esto, siempre será más económico que importar el equipo.

PARTE 7

RECOMENDACIONES

1- La industria guatemalteca debe promover el diseño de equipo. Probablemente la inversión tardará un poco más en recuperarse, pero no debe perderse de vista que ésta también será más baja. Con esto, se estará ayudando a que el progreso tecnológico de Guatemala pueda desarrollarse más rápidamente.

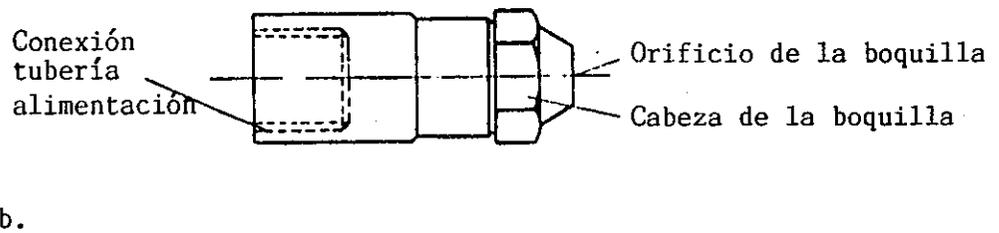
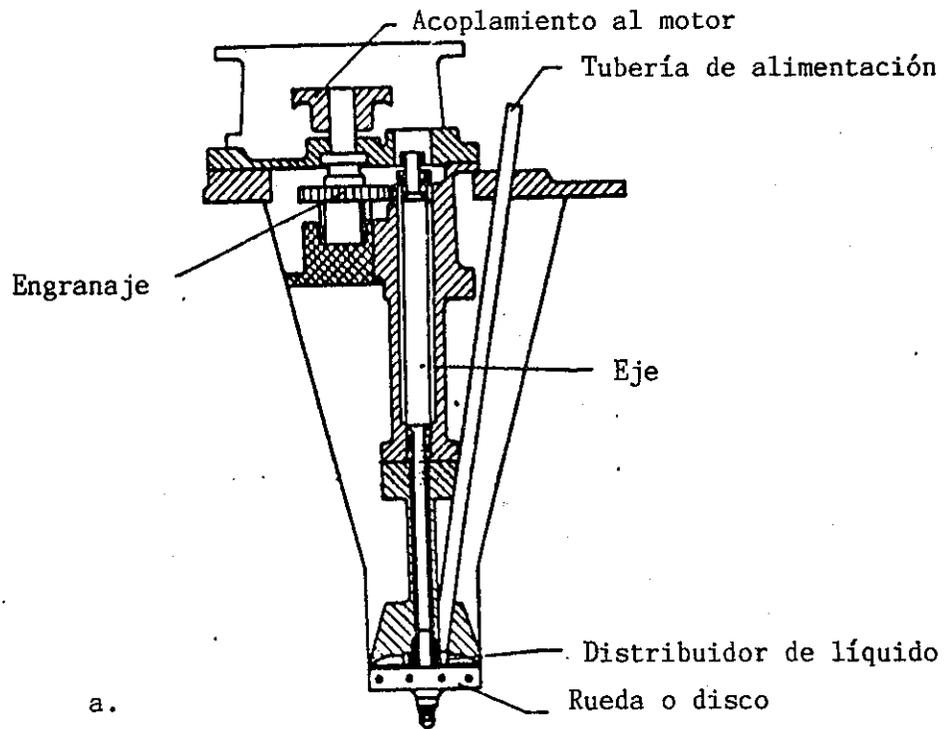
2- Se debe continuar con el diseño de toda la línea de secado. Faltan por diseñar los recuperadores de producto seco y el aislamiento del sistema. Ambos casos constituyen una buena oportunidad para desarrollar otros trabajos de tesis.

PARTE 8

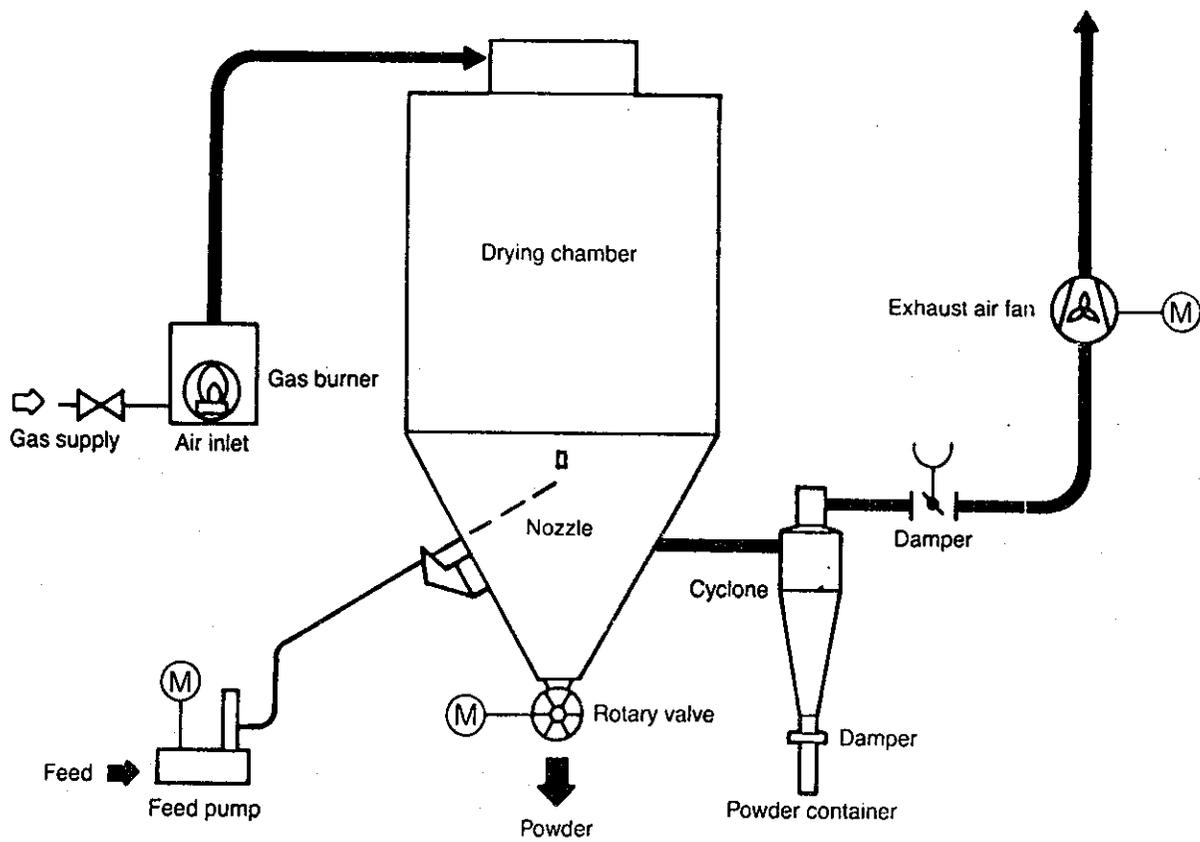
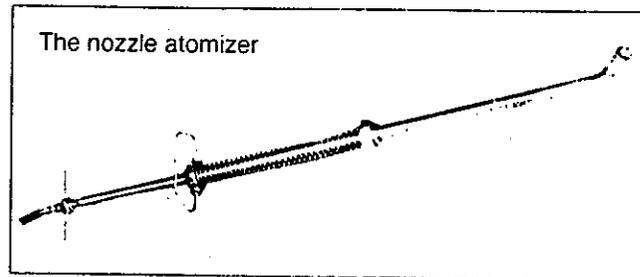
REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- 1- Chemical and Process Engineering Series. Spray Drying. An Introduction to Principles, Operational Practice and Applications. K. Masters. Leonard Hill Books London an Intertext Publisher. 1,972.
- 2- Brochure. Barr & Murphy. Advanced Drying Systems. Barr & Murphy Group. B & M House, 48 Bell Street Maidenhead. Berks SL1 1BR.
- 3- Process Equipment Series. Volume 5. Technomic Publishing Co. Inc. 1,983.
- 4- The Versatile Spray Dryer. For Small Scale Production. Niro Atomizer. A/S Niro Atomizer. 305, Gladsaxevej, DK-2860 Soeborg, Denmark.
- 5- Drying '89. Edited by Arun S. Mujundar/Michel Roques. Hemisphere Publishing Corporation. 1,990.
- 6- Transfer Operations in Process Industries -Design and Equipment-. Technomic Publishing Co. Inc. 1,983.
- 7- Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. Christie J. Geankoplis. The Ohio State University. Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. México. 1,982.
- 8- Manual del Ingeniero Químico. Robert H. Perry/Cecil H. Chilton. Quinta Edición. McGraw-Hill.
- 9- Captación de Polvos y Purificación de Gases en la Metalurgia de Metales no Ferrosos. G.M. Gordon, I.L. Peisajov. Editorial Mir. Moscú. 1,984.
- 10- Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidraulicas. Claudio Mataix. Harper & Row Publishers Inc.

ANEXOS



A.1. Tipos básicos de atomizadores. (a) Atomizador rotatorio.
(b) boquilla atomizadora)



A.2. Secador por aspersión de flujo mixto y boquilla de atomización.