

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA QUIMICA Y MANUFACTURERA



**ESTUDIO TEORICO EXPERIMENTAL DEL SECADO
POR ATOMIZACION**

TESIS

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUIMICO**

VICTOR PEVES CORONADO

ANGEL VILLON ULLOA

LIMA - PERU - 1982

I N D I C E

1.- INTRODUCCION.

1.1.- DEFINICION DEL ESTUDIO

1.2.- SUMARIO

2.- SECADO

- VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SECADO POR ESTE METODO.

3.- ATOMIZACION.

3.1.- ASPECTOS GENERALES

3.2.- CLASIFICACION DE LOS ATOMIZADORES

3.3.- ATOMIZADORES DE TOBERA.

- TOBERAS DE PRESION CENTRIFUGA

3.4.- ATOMIZADORES ROTATORIOS

- DIAMETRO MEDIO Y DISTRIBUCION DE GOTAS.

3.5.- NOCIONES SOBRE ESCALAMIENTO.

3.6.- SELECCION DEL ATOMIZADOR.

4.- CONTACTO SPRAY AIRE.

4.1.- DISEÑOS DE CAMARAS USADAS EN LA INDUSTRIA

4.2.- TRAYECTORIA DE LA GOTA AL SALIR DEL ATOMIZADOR

4.2.1.- DESDE UN ATOMIZADOR ROTATORIO

4.2.2.- DESDE UN ATOMIZADOR DE TOBERA

4.3.- MOVIMIENTO DE LA GOTA DENTRO DE LA CAMARA

4.3.1.- DESACELERACION DE LA GOTA

4.3.2.- VELOCIDAD TERMINAL.

4.4.- DEPOSICION DEL PRODUCTO EN LA PARED DE LA CAMARA.

SECADO DEL SPRAY

5.1.- EVAPORACION DE GOTAS PURAS.

5.1.1.- EVAPORACION DE UNA GOTA

5.1.2.- EVAPORACION DE UN SPRAY DE GOTAS PURAS.

5.2.- EVAPORACION DE GOTAS CONTENIENDO SOLIDOS DISUELTOS.

5.2.1.- EVAPORACION DE UNA GOTA CONTENIENDO SOLIDOS DISUELTOS.

5.2.2.- EVAPORACION DE UN SPRAY CONTENIENDO SOLIDOS DISUELTOS.

5.3.- EVAPORACION CONTENIENDO SOLIDOS INSOLUBLES.

5.4.- MEDIOS DE SECADO DIFERENTE AL AIRE.

5.4.1.- VAPOR DE AGUA SOBRECALENTADO USADO COMO MEDIO.

5.4.2.- ESTUDIO COMPARATIVO DEL SECADO DE VARIOS PRODUCTOS ALIMENTICIOS EN AIRE CALIENTE Y VAPOR DE AGUA SOBRECALENTADO.

5.5.- EFECTO DE LAS VARIABLES DE OPERACION EN TAMAÑO DE PARTICULA Y DENSIDAD VOLUMETRICA.

6.- ELEMENTOS DE DISEÑO DE UN SECADOR POR ATOMIZACION.

6.1.- ESTABLECIMIENTO DE LAS VARIABLES DE OPERACION.

6.2.- DISEÑO Y FALLAS DE OPERACION QUE DEBEN EVITARSE

6.3.- PERFORMANCE DEL SECADOR POR ATOMIZACION.

7.- TRABAJO EXPERIMENTAL.

7.1.- INTRODUCCION.

7.2.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

7.3.- DESCRIPCION DE TABLAS.

7.4.- DISCUSION DE RESULTADOS.

7.4.1.- ATOMIZACION

7.4.2.- SECADO

- ACUMULACION

- PARTICULAS ROTAS

- PERDIDA DE CALOR

- DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS DENTRO DE LA CAMARA

- ZONA DE MAXIMO INTERCAMBIO DE CALOR Y MASA.

- TIEMPO DE CONTACTO GOTA-PARTICULAR AIRE.

7.5.- RECOMENDACIONES

7.6.- CONCLUSIONES

NOMENCLATURA

BIBLIOGRAFIA

APENDICE "A" (EJEMPLO DE CALCULOS REALIZADOS)

APENDICE "B"

-----***-----

1.- INTRODUCCION.

1.1.- DEFINICION DEL ESTUDIO

El término secado de sólidos significa remover agua u otro líquido de ellos, hasta el grado que se de see o sea posible hacerlo. Existen diferentes formas de secar un producto, ya sea por medios mecánicos o por evaporación (14,22,24). El secador por atomización es solamente un método que pertenece a la última clase.

La operación de secado por atomización consiste básicamente en la dispersión de la alimentación en pequeñas gotas de diferentes tamaños, (spray) que entran en contacto con una corriente de aire caliente, el cual debido a la gran superficie de contacto que encuentra, es capaz de transferir la cantidad de calor necesaria para la evaporación del agua contenida en las gotas en unos cuantos segundos, obteniéndose partículas secas que posteriormente se separan de la corriente gaseosa.

Esta operación ha sido usada desde mucho tiempo atrás para el secado de muchos productos, pero sin embargo es relativamente corto el tiempo en que se comenzó a estudiarla, y aún en la actualidad hay fenómenos que no están completamente entendidos. Los

primeros estudios que se llevaron a cabo trataron de encontrar correlaciones generales teniendo en cuenta las variables más importantes, pero los resultados que se obtuvieron no pudieron ser correlacionados debido a que el comportamiento de un producto en el secado por atomización, es muy particular, (5,7,13). Así por ejemplo, si para un material determinado en un secador, se pueden obtener partículas muy finas de acuerdo a unas condiciones dadas, para otro material bajo las mismas condiciones quizás se obtengan partículas de mayor tamaño. Helsing (16), refiere que para el caso de un mismo producto fabricado por dos procesos diferentes, las condiciones de operación tuvieron que ser distintas para obtener el mismo porcentaje final de humedad.

Después de estos primeros intentos, se realizaron muchas investigaciones, sobre los fenómenos que ocurren en la cámara de secado tratándolos en forma separada, llegándose a establecer que el secado por atomización es verdaderamente una operación compleja. Un hecho que puede mostrar esta complejidad, está en que en un lapso de unos pocos segundos deberán estar ocurriendo simultáneamente las tres transferencias; de cantidad de movimiento de calor y de masa, para una distribu

ción de tamaños de gotas en la capa límite formada en cada una de ellas y todo esto con áreas variables, (25).

Sin embargo, evidentemente es deseable realizar el seguimiento de esta operación a través del establecimiento de un modelo matemático, habiéndose realizado algunos intentos, (2,12), pero los resultados no han sido muy exitosos debido a la gran cantidad de asunciones realizadas.

Para el establecimiento de un modelo matemático, que siga la operación de secado en el Niro Minor-Atomizer, es necesario primero que se puedan entender todos los fundamentos básicos de esta operación, y en segundo término conocer los efectos originados por el propio diseño del Niro-Atomizer. En la literatura más accesible (14,22,24), es poco lo que existe que sirva en forma cuantitativa para seguir ciertos fenómenos de esta operación; la mayor parte se encuentra escrita en las revistas especializadas y en Masters (21), pero ellas son menos accesibles; y en cuanto al equipo disponible es poco lo que se conoce de él.

Por ello el presente trabajo ha sido dividido básicamente en dos partes. La primera que es la parte teórica y está dedicada a ofrecer los

fundamentos de la operación de secado, según los estudios realizados por los diferentes investigadores; lo que da una visión general de los efectos que deben tenerse en cuenta cuando se habla de secado por atomización, así como también se propone las bases para un escalamiento de un atomizador - Ec. 3.6. También se propone un método para estimar la cantidad de agua removida en el período de evaporación de la humedad, conocido con el nombre de velocidad constante, Ec. 5.11, (al menos las asunciones realizadas en dicha deducción parecenser válidas para las soluciones de sulfato de sodio trabajadas). La segunda parte comprende, el trabajo experimental realizado con el fin de determinar cuales son las condiciones que fija el tipo de secador Niro-Atomizer, así como algunos efectos operacionales como son: Determinación de la función de distribución de gotas, obtenidas del atomizador, distribución de temperaturas dentro la cámara, zona de mayor intercambio de calor, los efectos de acumulación de material y de pérdida de calor y la estimación de los tiempos de contacto de la gota partícula durante el secado.

En el capítulo dos se establece que la operación de Secado debe tratarse en cuatro pasos:

1.- Atomización.

- 2.- Contacto Spray-Aire.
- 3.- Secado (Evaporación de la humedad)
- 4.- Recuperación del Producto.

El paso cuatro no es tratado en este trabajo, pero puede encontrarse información en Masters y Shepherd (21,26). Los demás pasos en el orden en que han sido mencionados anteriormente son desarrollados en los capítulos, tres, cuatro y cinco respectivamente. El capítulo seis se refiere a los elementos que se aconsejan tomar en cuenta para el diseño de este tipo de secadores, y en el capítulo siete se encuentra todo lo concerniente a la parte experimental realizada.

Las referencias bibliográficas aparecen al final del capítulo siete, en el Apéndice A se muestran los ejemplos de cálculo necesarios para un mejor entendimiento de los resultados obtenidos y en el Apéndice B aparecen algunas figuras y tablas adicionales de gran utilidad.

1.2.- SUMARIO.

Los factores importantes a considerar en la operación de secado por atomización son:

- a) Tipo y características del atomizador.
- b) Propiedades y condiciones del producto a secar
- c) Flujo de alimentación.

- d) Diámetro medio y distribución de gotas.
- e) Flujo y patrón de flujo de aire.
- f) Carga calorífica del aire.
- g) Geometría de la cámara y forma de mezcla del -
Spray-aire.
- h) Distribución de temperaturas dentro de la cámara.
- i) Tiempos de retención y de residencia.
- j) Acumulación.
- k) Pérdidas de Calor.
- l) Características finales del producto deseado.

El Niro Atomizer tiene varias de éstas características fijadas por su propio diseño.

- 1.- El atomizador es de disco centrífugo, que produce una distribución de tamaños de gotas raiz cuadrática normal.
- 2.- El patrón de flujo del aire es helicoidal en cocorriente con la alimentación.
- 3.- La zona de mayor transferencia de calor y masa, se da hasta una distancia corta por debajo del atomizador, y por ser así los tiempos de contacto necesarios para la evaporación del agua son pequeños.
- 4.- La acumulación del producto dependerá básicamente de las condiciones de operación.

- 5.- Las características finales del producto secado dependerá de todas las condiciones anteriores, mas sus propias propiedades.
- 6.- La performance del secador puede seguirse con la temperatura del aire de salida de la cáma-ra pues, ésta es muy sensible a cualquier cambio de las condiciones de entradas.

2.- SECADO POR ATOMIZACION.

La operación de secado por atomización comprende cuatro pasos fundamentales:

- 1.- Atomización.
- 2.- Contacto Spray-aire
- 3.- Secado (evaporación de la humedad)
- 4.- Separación del producto

Existen diferentes clases de atomizadores que se usan en la industria, cuya función principal es la de dispersar un fluido por medio de la energía entregada, en pequeñas gotas dentro de un rango de tamaños que depende del tipo de atomizador, así como de las condiciones de operación dadas. El tener un tamaño de gotas pequeñas hace que la relación de superficie formada al volumen alimentado sea grande, ofreciendo con ello una gran superficie para las transferencias de calor y masa.

Aun cuando el mecanismo de atomización que ocurre en una operación comercial no está perfectamente entendido, se han desarrollado diferentes correlaciones que permiten de una manera simple estimar varios diámetros medios probables, bajo algunas condiciones de operación fijadas. La distribución de tamaños de gotas que se puede obtener de un atomizador depende del tipo de atomizador usado, así por ejemplo si contáramos el número de gotas obtenidas de un atomizador de disco con ventana

nas rectas, dentro de diferentes rangos de tamaños y los graficamos vs. la raíz cuadrada del diámetro representativo de dicho intervalo, obtendríamos una curva similar a la descrita por una distribución probabilística normal. La atomización es un paso muy importante, y en los secadores más pequeños, prácticamente ella determina el rango de tamaños del producto.

La forma de como la alimentación ya atomizada se pone en contacto con el aire caliente y como éste influye en el secado de las gotas, hace que el contacto spray-aire forme parte importante de los fenómenos que ocurren en esta operación.

El movimiento relativo entre el spray y el aire determina las formas de contacto, pudiendo ser en cocorriente, contracorriente o flujo mezclado; la geometría del secador influye en el patrón de flujo de aire haciéndolo ciclónico o paralelo (sin dejar de tener su movimiento relativo original). En función de los movimientos relativos spray-aire, se han desarrollado modelos que describen éstos. Los trabajos de los investigadores no han sido exitosos para describir un proceso real, pues los autores, hacen asunciones que resultan ser imprácticas. Las hipótesis más comunes son: Invariabilidad del diámetro; consideran al aire quieto y a la gota de densidad despreciable. Aunque considerar el cambio del diámetro originado por las transferencias de masa y calor, y el movi-

miento del aire, harían que las ecuaciones sean muy complejas éstas aun están llenas de limitaciones, pues todavía no es conocida la forma como se desarrollan las transferencias de calor y masa.

Un mal contacto spray-aire es una de las causas para que exista deposición de producto dentro de la cámara, lo cual afecta al secado en su eficiencia de recuperación. Se tiene que tener en cuenta que la deposición en cámaras grandes (industriales) y cámaras pequeñas (laboratorio), no se dan en la misma forma, teniendo menos problemas en los de tamaño industrial.

El secado del spray involucra las transferencias de calor y masa, siendo ideal el hecho de separar el secado del spray, con el contacto spray-aire, pues los dos ocurren simultáneamente.

Dentro de la secuencia de secado, una gota pasa por dos etapas bien marcadas las cuales son:

Evaporación constante (constant rate) y el decaimiento de la evaporación (falling rate) estas dos etapas serán desarrolladas ampliamente en el capítulo cinco.

Se han realizado estudios para el secado de una gota ya sea pura, conteniendo sólidos disueltos o de una suspensión. Las ecuaciones resultantes pueden ser utilizados para el spray, si se tiene en cuenta el diámetro medio de Sauter; los cálculos hechos con este diámetro medio pueden resultar en algunos casos conservadores y en

otros insuficientes. Para salvar esta situación algunos investigadores han desarrollado métodos que involucran al spray, pero que aun por la gran cantidad de asunciones que se hacen, no se puede aplicar con éxito a una operación real.

La recolección de producto, es un paso importante que no debería de dejarse de tomar en cuenta porque el tipo de material que se va a secar fija las características del sistema de recolección.

Las características del producto final se verán afectadas de acuerdo a la forma en que cada uno de estos pasos es llevado a cabo y del hecho de que no todos los productos se comportan de la misma manera en el secado, haciendo difícil el predecirlo, por lo que los especialistas aconsejan (4,16), que para el diseño de un secador, se realicen de todas maneras pruebas experimentales. Además es deseable diseñar a partir de datos obtenidos en las unidades más cercanas al tamaño de la unidad real, porque si se intenta conseguir datos de diseño en una unidad demasiado pequeña, quizás pueda suceder que en esta no se pueda secar el material o que el diseño a partir de los datos obtenidos no produzca resultado deseado (19)

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SECADO POR ESTE METODO.

Como mencionamos anteriormente existen diferentes formas

de secar un producto, y antes de poder seleccionar un método determinado se debería tener en cuenta algunos factores importantes, en Perry (24) se describen los diferentes métodos, la clase de material que se aconseja secar por ellos y los factores anteriormente referidos; a continuación presentamos algunas ventajas y desventajas en el secado por atomización.

- Ventajas.

- 1.- Es una operación de un sólo paso, de duración muy corta. Frecuentemente esto elimina muchas operaciones intermedias, como son: filtración, precipitación, cristalización, clasificación y reducción de tamaño, etc.
- 2.- La operación puede ser continua o por Batch, pudiendo secar grandes cantidades de material. Además la puesta en marcha o el final de la operación, es simple debido a que no es necesario tener material de retención.
- 3.- Las propiedades y calidad del producto pueden variar y controlarse:
 - a) La densidad puede ser variada en un rango amplio
 - b) Se puede conseguir partículas de forma esférica a veces huecas o sólidas, lo que generalmente no es posible obtener por otro tipo de secado.
 - c) El tamaño de partícula puede variarse, variando las condiciones de operación.

- d) La calidad del producto frecuentemente es preservada por este método, porque el secado es tan rápido, y el material en la zona de secado está siempre húmedo de tal manera que el producto no se sobrecalienta o degrada.
- e) Todas las partículas tienen una uniformidad en su composición si el material secado es una mezcla.
- f) Un producto obtenido por este medio generalmente posee solubilidad y velocidades de reacción altas, debido a su uniformidad de tamaño y porosidad.

4.- Este método de secado puede adaptarse a un ciclo cerrado, operando ya sea con un gas inerte o con un solvente sobrecalentado, como medio secante. Esto es así ya que debe recuperarse el solvente, reduciendo los peligros de explosión. También pueden secarse materiales afectados por el oxígeno.

5.- Un material que se está secando no toca las paredes hasta que el producto esté seco. Esto generalmente simplifica los problemas de corrosión y la selección de los materiales de construcción.

- Desventajas.

Algunas son propias de la operación y otras se dan porque no se entiende muy bien cuáles son los fenómenos que están ocurriendo.

- 1.- Se obtienen bajas densidades volumétricas cuando se requiere lo contrario. Esto se da frecuentemente en el caso de materiales inorgánicos. Aún cuando la densidad volumétrica de un producto secado por este método esta sujeto a variación, algunas veces no se puede alcanzar el mismo valor que el obtenido por otros tipos de secadores, sin tener que hacer un tratamiento posterior de molienda.
- 2.- En general los secadores de este tipo son relativamente inflexibles, así un secador diseñado para atomización fina generalmente es incapaz de producir un producto de partículas más grandes
- 3.- Para una capacidad dada generalmente se requieren cargas evaporativas más grandes que las que se requieren en otros secadores.
- 4.- En general los secadores, como corrientemente son diseñados, involucran una inversión inicial mayor que otros tipos de secadores continuos, excepto a altas capacidades, por encima de las 1500 lb/hr.
- 5.- Frecuentemente los problemas de recolección de productos y de finos aumenta el costo del secado en un factor apreciable, especialmente cuando filtros mangas o columnas lavadores son requeridas para recoger el polvo de salida del sistema ciclónico recolector.

3.- ATOMIZACION

3.1.- ASPECTOS GENERALES

La atomización resulta de la acción de una fuente de energía sobre un volumen de líquido, haciendo que las fuerzas resultantes se concentren en un punto donde ocurre la desintegración de ese volumen y por lo tanto se producirá el spray con una distribución de tamaños de gotas definida.

La función principal de la atomización es pues la producción del spray, que tiene como principal característica un valor alto de la relación de superficie creada al volumen alimentado. El hecho de tener una gran superficie disponible para las transferencias - hace posible de que dicha operación se lleve a cabo rápidamente y por ello obtener un producto seco por este método es cuestión de unos cuantos segundos.

No solamente el secado utiliza a la atomización como un paso importante, sino que hay muchos procesos en Ingeniería Química que involucran también la atomización de líquidos. Algunos ejemplos de tales procesos son: la absorción por atomización, la cristalización por atomización, el enfriamiento por atomización, reacciones con atomización el "spray quenching" (se obtiene un enfriamiento rápido de un gas caliente por un spray líquido), la combustión, etc. Sin

embargo la mayor parte de la literatura sobre la atomización está asociada principalmente con el estudio del secado.

Las mejoras introducidas en los diseños de los atomizadores siempre han tratado de obtener industrialmente un spray de tamaño de gotas uniformes, ya que si éstas son así, las características del secado (y en general de los otros procesos), de cada una de las gotas sería igual al de las otras, y por lo tanto se obtendría un producto seco con las mismas características; sin embargo hasta hoy no se ha podido obtener esta uniformidad y en la mayoría de los atomizadores se producen tamaños dentro de un rango determinado, siguiendo una función de distribución característica.

También se han realizado estudios de los diferentes mecanismos de atomización que ocurren bajo las diferentes condiciones que pueden trabajarse, no obstante aunque en los estudios realizados para dicho mecanismo se pueden diferenciar zonas, a bajos, medios y altos números de Reynolds, los fenómenos que ocurren en una atomización comercial son complicados, que las relaciones teóricas no considerarse adecuadas. La descripción de los fenómenos se pueden encontrar en la literatura (1,14,15,21).

Los parámetros que sirven para caracterizar a un spray son: El diámetro medio de gota (D), la distribución de tamaños ($f(D)$), y la desviación estandar geométrica (S_G).

Existen muchas definiciones de diámetros medios y la fórmula general para definirlos, para datos discretos; si es una medida del número, área o volumen de las gotas o partículas está dado:

$$(D_{pq}) = \frac{\sum D^q \cdot f_N(D) \Delta(D)}{\sum D^p \cdot f_N(D) \Delta(D)} \quad 3.1.$$

donde p y q son enteros (o cero), $f(D)$, es la función representativa del spray (porcentaje de gotas contadas en el intervalo ΔD).

Para el diámetro medio aritmético $p=0$, $q=1$, para el diámetro medio superficial $p=0$, $q=2$, para el diámetro medio de sauter o de volumen-superficie $p=2$, $q=3$.

Si se conoce la función de distribución normalizada ($f_N(D)$), para un spray, entonces dichos diámetros pueden ser calculados de una forma integral entre los valores cero e infinito (véase nomenclatura D_{vs}^*)

Para las funciones de distribución se puede considerar alguna de las ecuaciones que aparecen en la tabla.3.1

TABLA 3.1.

DISTRIBUCION	FORMULA
NORMAL	$\frac{d(N')}{d(D)} = \frac{1}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp - \left \frac{(D - D_0)^2}{2S_N^2} \right $
LOG-NORMAL	$\frac{d(N')}{d(D)} = \frac{1}{D \cdot S_G \sqrt{2\pi}} \exp - \left \frac{(\log D - \log D_{50\%})^2}{S_G^2} \right $
RAIZ CUADRATICA NORMAL	$\frac{d(N')}{d(D)} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi} D S_G} \exp - \left \frac{(D - D_{50\%})^2}{2S_G^2} \right $
NUKIYAMA-TANASAWA	$\frac{d(N')}{d(D)} = B \cdot D^2 e^{- (C \cdot D^q)}$

donde $\frac{d(N')}{d(D)}$ - porcentaje de partículas en el intervalo $d(D)$,

B, C, q son constantes experimentales.

Una distribución normal es de uso limitado en el secado por atomización. Los discos rotatorios generalmente producen una distribución logarítmica normal, una distribución de raíz cuadrática normal es característica de una tobera de presión y una distribución Nukiyama-Tanasawa es propia de las toberas de dos fluidos. El hecho de que un spray siga una función de distribución significa, que si graficamos la frecuencia acumulativa de ocurrencia de los diámetros sobre un intervalo, en escala pro

abilística y los diámetros medios que representan al intervalo en escala logarítmica, se obtendrá una línea recta como se muestra en la Fig. 3.1.

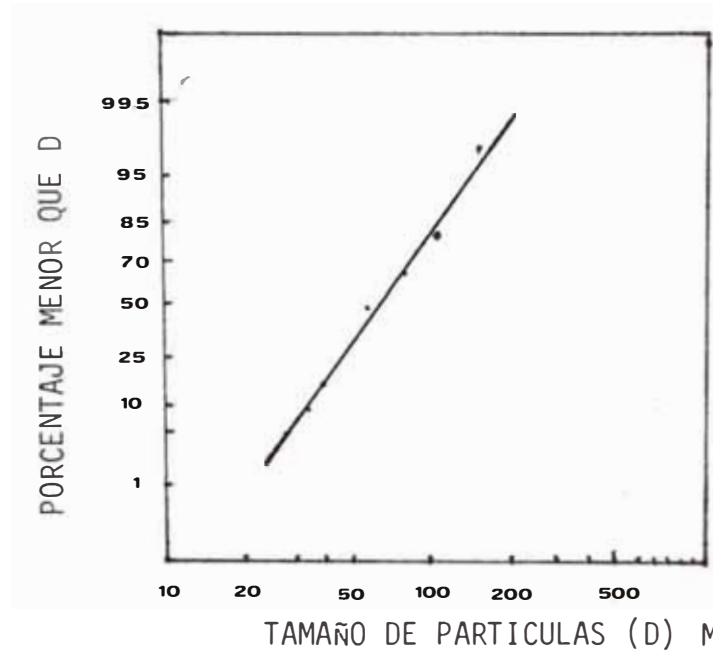


FIGURA 3.1. DISTRIBUCION DE TAMAÑOS DE PARTICULA LOGARITMICA - NORMAL.

La desviación estándar es la relación entre el diámetro cuyo porcentaje acumulativo es 84.13% ($D_{84.13\%}$) entre $D_{50\%}$. En realidad un porcentaje acumulativo se da para diámetros igual al observado y menores.

Como hemos dicho anteriormente debido a que el mecanismo que ocurre en un atomizador es tan complejo, la estimación de un diámetro medio a partir de ecuaciones teóricas no es posible, por lo tanto lo más adecuado ha sido considerar a la atomización desde un punto de vista de un análisis dimensional, cuyo alcance estará limitado al rango de condiciones pa

ra el cual se obtuvieron las constantes involucradas y que de esta manera representaría al mecanismo complejo que está ocurriendo.

Si se conoce la distribución de gotas de un atomizador de disco, el diámetro medio (definido como -aquel de 50%), podría obtenerse por alguna de las estimaciones para diámetros medios p_q , que se indican en el apéndice B, Tabla B.1., y si no se tiene otros datos, el valor estimado puede considerarse como el diámetro medio, pero hay que tener en cuenta que por ejemplo, generalmente el diámetro medio volumétrico excede en 15-20% al diámetro de Sauter.

3.2.- CLASIFICACION DE LOS ATOMIZADORES.

Existen muchas técnicas para suministrar la energía necesaria en la atomización y ello ha dado lugar a la existencia de diferentes tipos de atomizadores. Los más comunes usan energía centrífuga, cinética o de presión aunque también existen atomizadores que utilizan energía sónica o vibratoria.

La característica principal de un atomizador rotatorio, es el tener una alta velocidad de descarga del líquido desde el borde del disco, la tobera de presión descarga el líquido bajo presión a través-

de un orificio y una tobera neumática se caracteriza por el rompimiento del líquido por el impacto con el flujo de aire y otro gas con alta velocidad. La tobera que utiliza energía sónica, se caracteriza porque el rompimiento del líquido se produce por la excitación sónica.

Para cada clase de atomizador se han desarrollado varios tipos de diseños que manipulan la diversidad de materiales que se desean secar.

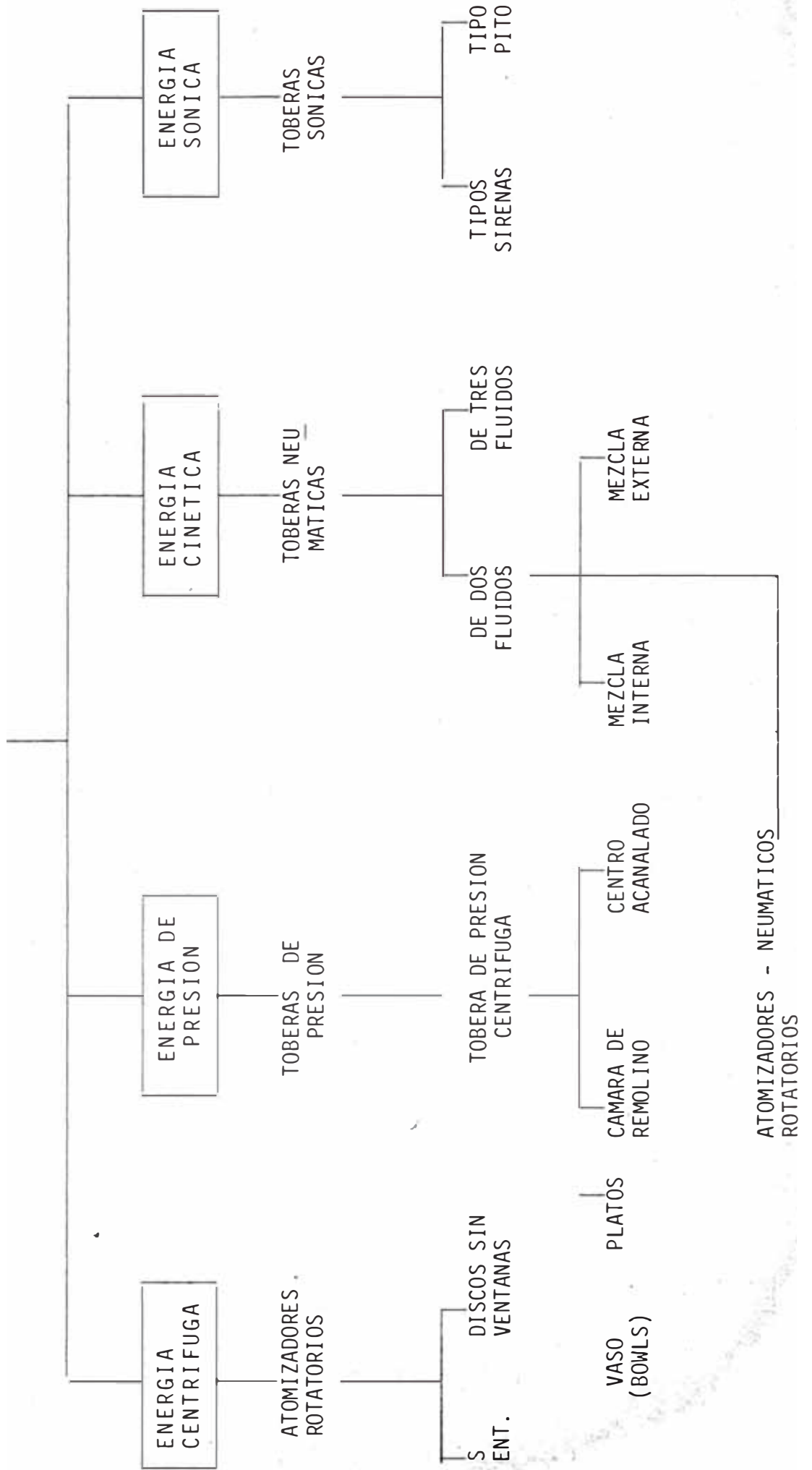
En la Fig. 3.2. se muestra en forma esquemática dicha clasificación.

3.3.- ATOMIZADORES DE TOBERA.

La función de un atomizador de tobera es la aceleración y desintegración de la alimentación, terminando con la dispersión de las gotas resultantes para formar un spray. Un simple orificio o un eyector no puede considerarse un atomizador ya que si el chorro de líquido es lo suficientemente turbulento este se desintegrará, pero las gotas no serán dispersadas por acción de la tobera. La energía que se transfiere en este tipo de atomización es muy ineficiente.

Se han realizado muchos intentos para mejorar el grado de atomización, la flexibilidad de la tobera y la trayectoria del spray, y ello ha conduci

FIGURA 3.2.- CLASIFICACION DE ATOMIZADORES



do a obtener tres tipos de toberas, aquellas, que utilizan presión, energía cinética y energía sónica. La de más amplio uso es la que utiliza la energía de presión.

- TOBERAS DE PRESION CENTRIFUGAS.

El principio de la tobera de presión es la conversión de la energía de presión en el interior de un volumen de líquido en energía cinética, a las capas de líquido que se están moviendo. Dichas capas se rompen bajo la influencia de las propiedades físicas del líquido y por efecto de la fricción con el medio en el cual es descargado el líquido. La tobera produce un movimiento tangencial de alta velocidad, dentro del líquido, que se va a atomizar. La fuerza centrífuga resultante hace que el líquido haga remolinos - alrededor de la circunferencia del agujero de la tobera, formando un corazón de aire a lo largo del eje del agujero. El fluido gira entonces hacia afuera, formando entonces un cono hueco el cual se rompe finalmente en gotitas.

Los sprays de dichas toberas que manejan altos-flujos de alimentación, son generalmente menos-homogéneos y más grandes que aquellos que se obtienen de un disco centrífugo con flujos pequeños dichas características son comparables para

ambos. La variación de la presión ofrece un control sobre la velocidad de alimentación y las características del spray, y estas toberas operan con presiones hasta de 10,000 psi

El patrón de] spray, que sale de una tobera de presión tiene un ángulo de descarga claramente definido, pero el ángulo disminuye y comienza a hacerse menos definido al alejarse del orificio- debido a los efectos de las condiciones del aire. (Fig. 3.3.)

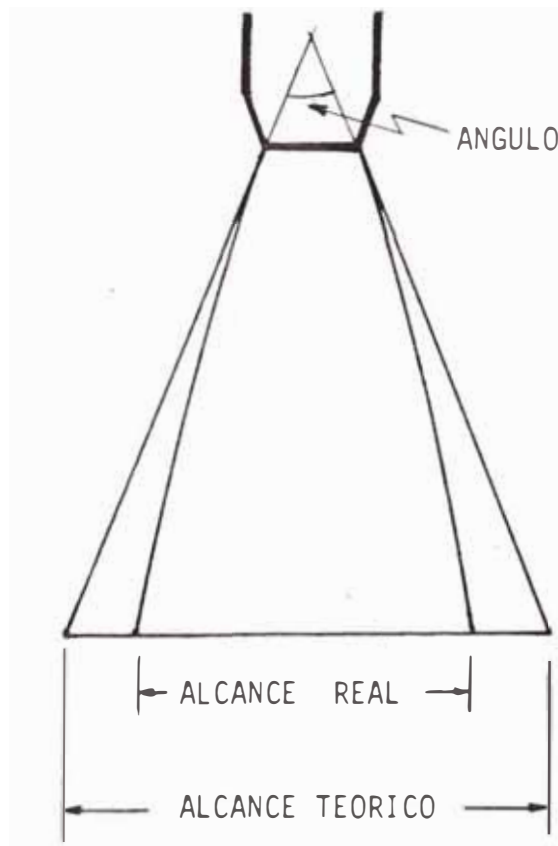


FIGURA 3.3. CARACTERISTICA DEL ANGULO DEL SPRAY DE UNA TOBERA

El cono hueco del spray tiene un corazón de aire en el centro del orificio, éste es formado debido al movimiento relativo dentro de la tobera.

Existen diferentes tipos de toberas de presión , y la obtención del diámetro medio característico del spray depende precisamente de que tipo de tobera se trata. En el apéndice B, Tabla B.2. aparecen dichas correlaciones.

Mayor información acerca de los diferentes tipos de toberas se puede encontrar en Masters (21).

3.4.- ATOMIZADORES ROTATORIOS.

Existen diferentes tipos de atomizadores rotatorios algunos de los cuales se muestran en la Fig. 3.4 En estos atomizadores el líquido es acelerado centrífugamente a una alta velocidad antes de que sea descargado en el aire o gas caliente. El grado de atomización depende de la velocidad periférica, flujo de alimentación, propiedades del líquido y del diseño del atomizador. Para un atomizador de disco (similar al usado en el presente estudio) , se propone que a bajas velocidades de rotación y de alimentación, las fuerzas viscosas y de tensión superficial predominan, lo cual origina una formación directa de las gotas. Para velocidades intermedias la desintegración es de los ligamentos de líquido, extendiéndose fuera del borde de la venta

na y ello ocurre por fuerza centrífuga y en menor grado por las fuerzas gravitacionales. En el rango de condiciones comerciales (flujos de líquido altos, a velocidades periféricas altas), la desintegración del líquido ocurre en el borde del disco por efectos de fricción entre el aire y la superficie del líquido, tan pronto como él emerge como una película delgada desde la ventana. Un aumento de la viscosidad y de la tensión superficial del líquido actuarán aumentando la uniformidad del spray, pero a expensas de un tamaño medio de gota pequeño. Sin embargo, generalmente, un ajuste de las propiedades del líquido no es posible o deseable para obtener una uniformidad de gota óptima, a una alimentación dada, es esencial mantener invariable las siguientes condiciones:

- i) Rotación del disco sin vibración.
- ii) Altas velocidades perifericas.
- iii) Superficie de ventanas limpias.
- iv) Alimentación uniforme.
- v) Completo humedecimiento de las ventanas.
- vi) Distribución uniforme de la alimentación las ventanas.

DIAMETRO MEDIO Y DISTRIBUCION DE GOTAS.

Como se mencionó anteriormente existe
tes definiciones de diámetros medio

de estos el de mayor importancia, es el diámetro medio de Sauter, basado en la relación de volumen a superficie porque es útil para el cálculo de las velocidades de transferencia de calor y de masa (1). Su ecuación también puede representarse en forma no continua como:

$$\bar{D}_{32} = D_{SV} = \frac{\sum_k n_i (d_i)^3}{\sum n_i (d_i)^2} \quad 3.2$$

Donde n_i - número de gotas contadas

d_i - diámetro de la gota o partícula.

Un gráfico de distribución acumulativa en volumen es más representativo que uno por conteo de gotas, porque muestra como el volumen o el peso del líquido es distribuido entre los varios rangos de tamaños de gotas. Para el caso de un disco con ventanas rectas, este gráfico resultaría una línea recta, si está hecho en papel probabilístico-aritmético, graficando la raíz cuadrada del diámetro en la escala aritmética, los demás discos centrífugos mostrarían una línea recta, si el diámetro es graficado en una escala logarítmica. (Figs.3.5,3.1)

La fig. B.1 del apéndice B sirve para estimar la distribución de gotas de un atomizador de discos.



FIGURA 3.4.

DIVERSOS TIPOS DE ATOMIZADORES ROTATORIOS

Existen muchas correlaciones que determinan el diámetro medio de gota dentro de un rango de condiciones dadas. Estas se muestran en el apéndice B. Tabla B.1. Dichas ecuaciones muestran los efectos que tienen cada una de las variables en la ecuación de cálculo del diámetro medio, tales ecuaciones pueden predecir el efecto en el tamaño de la gota para cualquier variación de alguna de las variables involucradas.

Debido a los cambios de magnitud que pueden hacerse al flujo y a las rpm, éstas son las variables más importantes a considerar para un

tamaño de gota dado.

Una de las ecuaciones es la de Friedman (15) que establece:

$$D_{vs} = 0.4 \left(\frac{M_p}{\rho N r^2} \right)^{0.6} \left(\frac{\mu}{M_p} \right)^{0.2} \left(\frac{\sigma \rho L}{M_p^2} \right)^0 \quad 3.3$$

Las definiciones se encuentran en la Nomenclatura.

La velocidad tangencial con la que las gotas dejan el borde del disco puede considerarse como si fuera la velocidad periférica del mismo:

$$V_T = \pi d N \quad 3.4$$

V_T - velocidad tangencial de las gotas.

d - diámetro del disco

N - rpm.

La velocidad radial es despreciable comparada con la velocidad tangencial y el valor resultante de la velocidad será casi el de la velocidad tangencial.

REQUERIMIENTO DE ENERGÍA.

El consumo teórico de energía para un disco-atomizador está dado por:

$$P_k = 1.33 (10^{-11}) W' N^2 \left[d^2 - \left(\frac{1}{2} \right) d_0^2 \right] \quad 3.5$$

P_K - Energía neta requerida , Kw.

N - RPM

d - diámetro del disco

d_0 - posición efectiva de alimentación en los discos con ventanas.

W' - Flujo en Lb/min.

Cuando se usa un disco con ventanas para prevenir la pérdida de velocidad por fricción, de todas maneras hay una distancia donde ocurre la pérdida de velocidad, entre el punto de la alimentación y el inicio de las ventanas. El punto de alimentación efectiva sería aquel que resulte con el mismo consumo de energía y gane la misma velocidad sin dicha pérdida como aquella que ocurre en el proceso verdadero.

Las pruebas realizadas con diferentes discos (1) mostraron que el valor predicho por la Ec 3.5 eran mayores que el real medido. También se puede estimar dicho requerimiento según la Fig. 3.6.

3.5.- NOCIONES SOBRE ESCALAMIENTO.

Las correlaciones con grupos adimensionales, ofrecen un método rápido de escalamiento para manipu -

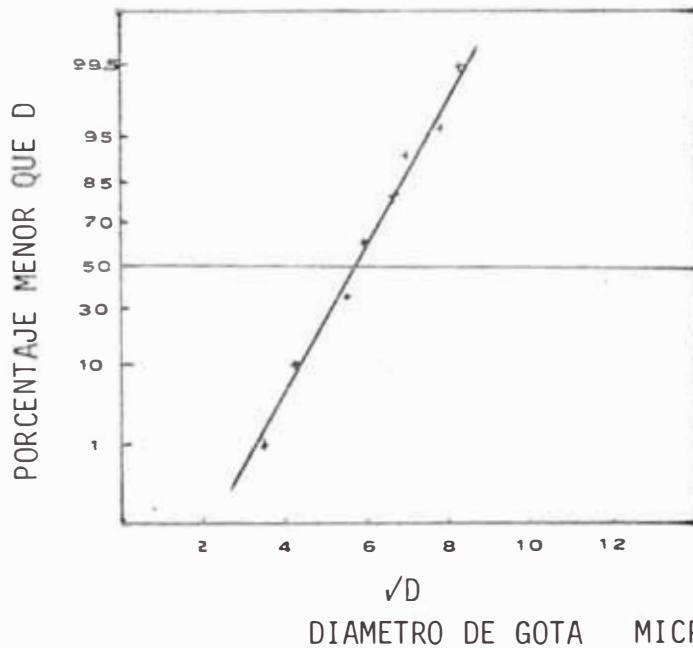


FIGURA 3.5. DISTRIBUCION DE TAMAÑOS DE GOTAS RAIZ CUADRATICA NORMAL.

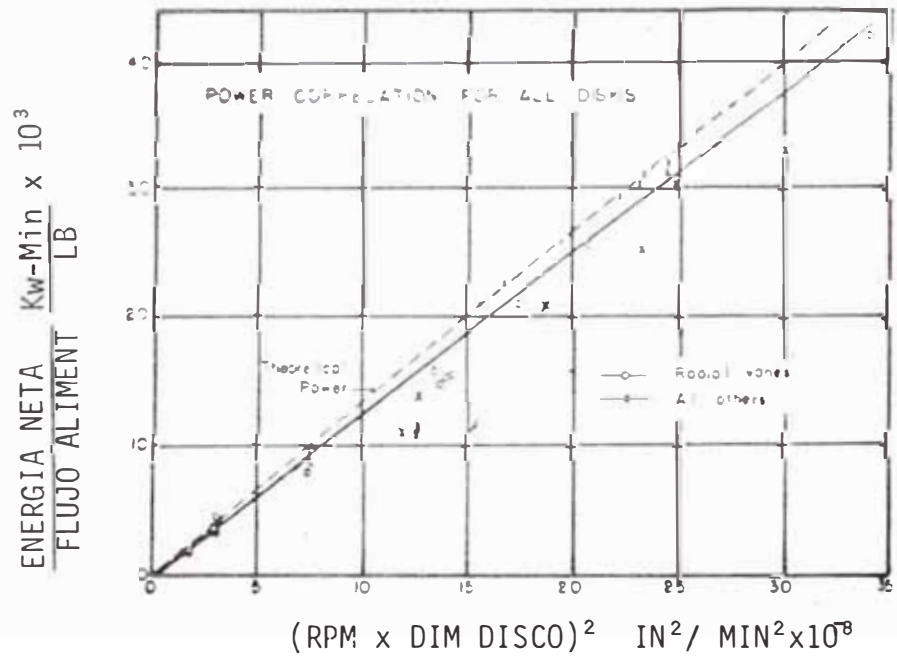


FIGURA 3.6. REQUERIMIENTO DE ENERGIA PARA ATOMIZADORES DE DISCO

lar flujos muchos más grandes, manteniendo una distribución de medidas constantes. La inspección de la ecuación 3.3 para los discos atomizadores muestra que, si la altura de la ventana o el número de ventanas se aumenta para mantener las mismas condiciones de velocidad de alimentación (M_L), por unidad de periferia húmeda (L), a alimentaciones mayores, el diámetro medio y máximo esencialmente permanecerán los mismos, por lo tanto si la alimentación por unidad de periferia húmeda (M_p), se mantiene la misma en el escalamiento de un disco con ventanas basado en un diámetro constante de disco el diámetro medio será reproducible. Por ejemplo, si se requiere un 50% de incremento en la alimentación, sin un cambio del tamaño de gota, la altura de la ventana puede aumentarse en 1.5 veces para mantener la misma velocidad de alimentación por unidad de periferia húmeda, todos los grupos en el lado derecho de la ecuación permanecerán iguales en el incremento de la alimentación excepto por el último, donde hay un incremento de $(1.5)^{0.1}$ o 0.4 veces, el diámetro medio predicho de este escalamiento es solamente 4% más grande que el obtenido para las mismas condiciones de alimentación por unidad de periferia húmeda.

Lo dicho anteriormente se puede verificar haciendo los siguientes cambios

Como las propiedades físicas no variarán, por lo tanto pueden introducirse como constantes y después de realizar las operaciones indicadas en la Ec. 3.3, obtenemos:

$$\frac{(Mp)^{0.2} \times L^{0.1}}{r^{0.2} N^{0.6}} = \text{cte.} \quad 3.6$$

Como se mantienen el mismo diámetro y el mismo RPM, entonces.

$$Mp^{0.2} L^{0.1} = \text{cte} \quad 3.7$$

que explica los cálculos anteriores.

La ecuación 3.6 también es válida para el escalamiento de diferentes tamaños de discos, pero dentro del rango de condiciones para las cuales, la Ec. 3.3 fué ajustada (Apéndice B Tabla B.1), pues como se mencionó al principio ella es la ecuación que representa su mecanismo, (28).

Si reemplazamos $Mp=W/L$ podemos obtener otra forma de dicha ecuación:

$$\frac{W^{0.2}}{L^{0.1} r^{0.2} N^{0.6}} = \text{cte} \quad 3.8$$

3.6.- SELECCION DEL ATOMIZADOR.

Para hacer una selección entre un atomizador rotatorio o uno de tobera hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- 1.- El rango de capacidad del atomizador donde se alcanza una atomización completa.- Los dise-

ños de los atomizadores cubren todos los reque
rimientos de capacidad para flujos de alimentaa
ción bajos, intermedios y altos. Es a una
gran capacidad donde el atomizador rotatorio -
es más eficiente, a pesar de poder alcanzar ta
les capacidades aumentando el número de toberas

- 2.- Requerimiento de energía al Atomizador (eficiencia
del Atomizador).- Para ambos atomizado -
res el requerimiento de energía es del mismo -
orden y rara vez éste tiene la última palabra -
en la selección. Las eficiencias son extrema -
damente bajas y no es un factor determinante.
- 3.- Distribución de tamaños de gotas a alimentacione
s idénticas.- Las distribuciones de los ato -
mizadores rotatorios o centrífugos pueden te -
ner características similares a alimentaciones
bajas o intermedias aun cuando las leyes matema
ticas que ellos siguen no siempre son las
mismas. Con los atomizadores rotatorios a al -
tas capacidades el spray es generalmente mas -
homogéneo.
- 4.- Tamaños máximo y mínimo de gota (homogeneidad)
Los discos con ventanas, las toberas de dos
fluidos y los atomizadores de copa neumáticos -
están mejor especificados, cuando se quiere ob

tener los sprays más finos, en general los discos con ventanas y las toberas de presión se usan en un rango de medida intermedia, y los discos sin ventanas o toberas de presión para los sprays con gotas más grandes.

5.- Flexibilidad de la Operación.- La atomización para atomizadores rotatorios es generalmente más flexible que la atomización por tobera desde un punto de vista operacional. Uno de estos atomizadores, puede manejar grandes variaciones de la alimentación sin obtener una gran variación en el tamaño de partícula del producto, y sin necesidad de cambiar las condiciones del secador ya que se puede hacer variar solamente la velocidad del disco. Si se usa una tobera, un aumento en la capacidad del secador requiere un aumento en la presión, pero éste está acompañado por una variación en la distribución del spray. Cuando las características del spray están fijadas se debe considerar el colocar otra tobera. Si la presión es la limitante, pero las características del spray no son críticas será suficiente cambiar el orificio de la tobera.

6.- Las propiedades de la alimentación más adaptable para la atomización.- Ambos son capaces-

de atomizar líquidos, poco viscosos, no corrosivos y no abrasivos con el mismo éxito. Los discos son aconsejados para manipular suspensiones corrosivas y abrasivas. En los productos que crean problemas de bombeo bajo altas presiones, los discos son normalmente recomendados, aun cuando las toberas neumáticas tambien pueden manipular tales alimentaciones.

7.- El diseño de la cámara del secador para la mejor atomización.- Cuando se selecciona los atomizadores, el diseño de la cámara juega un papel importante, Desde este punto de vista - las toberas son mas adaptables. La naturaleza de los sprays de una tobera permite cualquier posición de la misma, en cocorriente, en contracorriente o flujo mezclado con patrones de flujo paralelos o rotatorios. Los atomizadores rotatorios generalmente requieren un patron de flujo rotatorio.

8.- La experiencia de atomización del producto en cuestión.- Se escoge un tipo de atomizador si es que en el pasado otras instalaciones lo usan, si el producto es nuevo es necesario realizar pruebas experimentales.

4.- CONTACTO SPRAY-AIRE.

Los factores importantes que influyen en el diseño de una cámara de secado son: dirección y grado de atomización (contacto spray-aire), patrón de flujo del aire, descarga del producto; inherente a las características del producto secado, tiempo de retención y flujo de aire.

Este último es una función de la razón de evaporación requerida y de las características del secado. El tiempo de exposición o de retención es igual al volumen de la cámara dividido entre el flujo del aire, y expresa el tiempo de retención medio del aire en la misma. La dirección en la cual las partículas atomizadas son arrojadas determina el diseño básico; si la torre es vertical se dará la adecuada distancia vertical para las gotas lanzadas en el cono de la tobera, o el diámetro relativo adecuado de la cámara para acomodar las gotas giradas horizontalmente desde un atomizador centrífugo. Falta mucho aún para que se entienda acerca de como operar las variables de diseño, y como pueden combinarse en la mejor forma, para producir el movimiento del spray-aire, en condiciones óptimas de secado. La falta de conocimiento de la interdependencia de las variables, limita una relación general que pueda involucrar los efectos combinados del movimiento del spray, en el diseño de los secadores. Una vez que las pequeñas gotas han salido de los alrededores, en la proximidad del atomizador. La

distancia en la cual las gotas queden influenciadas por el aire depende del tamaño, forma y densidad de la gota. Los sprays de gotas grandes son mas independientes del flujo del aire. La relación gota partícula (en tamaño), forma y densidad determinará la caída del producto a través del aire.

Los patrones de flujo que son posibles en un secador de este tipo pueden ser clasificados de acuerdo a la dirección relativa de las partículas, con respecto al flujo de aire: cocomoriente, contracorriente y flujo mezclado. El movimiento del spray está gobernado por la localización del aire disperso (remolinos), por la operación y localización del atomizador, el comportamiento de la gota cuando se está secando, dimensiones de la cámara, y método de descarga aire-polvo.

4.1.- DISEÑOS DE CAMARAS USADAS EN LA INDUSTRIA.-

Los diseños de cámara comunmente contruidos para la industria química están ilustrados de la figura 4.1 a la 4.7. Los tres primeros son de tipo de atomización centrífuga, los otros tienen atomización por tobera.

Los secadores por atomización en los cuales el flujo de aire es esencialmente en cocomoriente, es usado principalmente en instalaciones comerciales por sus muchas ventajas, y es que permite el diseño simple y puede resultar de buen éxito para se

car un amplio rango de productos.

La Figura 4.1 muestra un secador con atomización centrífuga con flujo de aire turbulento, cocorriente y espiral. Una corriente secundaria de aire -frio circula en flujo mezclado, el flujo de aire- que es rotado en dirección opuesta al atomizador, incrementa la turbulencia y mejora la razón de secado. La acción del aire en el spray permite el diseño de un diámetro relativamente pequeño, pero con una altura relativa grande. Un cono con buena inclinación evita la obstrucción en la cámara y ayuda a prevenir la acumulación del material seco. Una modificación de este diseño permite la introducción de aire tangencialmente a la pared del cilindro, ya sea ambiental o calentado, para incrementar la eficiencia de secado, o el enfriamiento y endurecimiento del material con temperaturas moderadas. El tiempo de retención puede ser diseñado sobre un amplio rango, usando técnicas de atomización y patrones de flujo (21).

La figura 4.2 ilustra un tipo de secador originado en Europa y tiene algo de similaridad con la figura 4.1 . Sin embargo, el ingreso del aire caliente es introducido debajo del spray por un ducto y dispersado dentro de la cámara. La dispersión del aire caliente puede ser ajustado para va

riar la dirección del aire contra el spray.

El patrón del aire y del spray dictaminan el diámetro de la cámara, por que el spray es llevado horizontalmente. Es necesario una altura relativamente pequeña en el cilindro, y en la práctica el cono es hecho con un ángulo obtuso mayor que en la Figura 4.1. Este diseño se acomoda más a una menor turbulencia, baja de velocidad del aire-spray y un tiempo de retención alto, el cual requiere un gran volumen de cámara. El tiempo de retención es generalmente (para equipos de tamaños industriales) de 18 a 30 segundos.

Los secadores de cocorriente, con flujo de aire en espiral son muchas veces contruidos con una base cónica, como en la figura 4.1 y 4.2. Otro estilo, se muestra en la figura 4.3, algunas veces llamado de diseño cilíndrico, posee un barredor de aire con movimiento rotatorio justo debajo de la base, con salidas periféricas. La cámara cilíndrica se adapta especialmente para diseños en concreto o loetas, para un bajo costo y una construcción resistente a la corrosión.

Se puede mantener una capa de aire frío sobre las paredes de la cámara, esta capa es mucho más delgada que para un diseño cónico. En este diseño pueden ser secados con buen éxito, materiales de baja

----- ATOMIZADOR DE DISCO

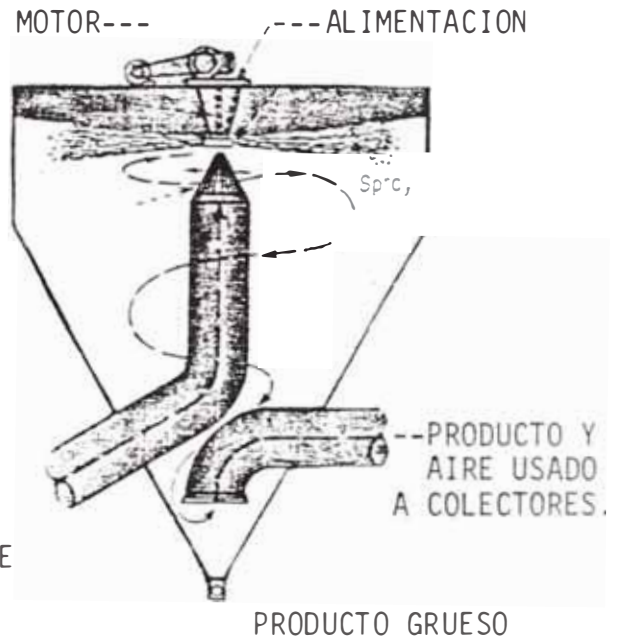


FIGURA 4.1.

CAMARA CONICA, FLUJO TURBULENTO EN COCORRIENTE EN ESPIRAL.

FIGURA 4.2.

CAMARA CONICA, CON INGRESO DE AIRE INTERNO, FLUJO COCORRIENTE EN ESPIRAL.



ENTRADA TANGENCIAL DE AIRE FRIO

AIRE CALIENTE

CAPA DE AIRE FRIO

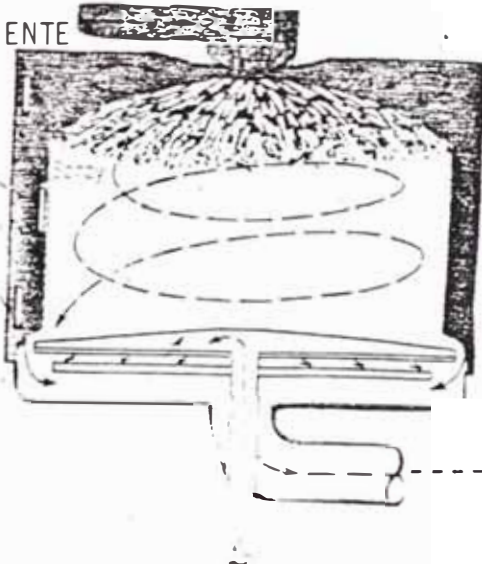


FIGURA 4.3.

CAMARA CILINDRICA, BASE PLANA CON ATOMIZACION CENTRIFUGA, FLUJO TURBULENTO EN COCORRIENTE EN ESPIRAL

temperatura de reblandecimiento, semejante a la resina formaldehida.

El secador mostrado en la Figura 4.4 emplea la atomización por tobera. Aunque algunos rasgos son similares a las unidades de cocorriente, el flujo de aire es bastante diferente. El aire caliente entra tangencialmente y baja por el cono en forma de espiral y toma la dirección contraria para salir, junto con los finos, a través de la salida localizada en la parte superior de la cámara. El funcionamiento es muy parecido al de un ciclón recolector, con la mayor cantidad de producto removido en la base de la cámara. El álabe interno es accionado por corrientes de aire, y rota de 10 a 20 rpm, sirve para limpiar las paredes y mejorar su eficiencia. Este secador es de flujo mezclado, el ingreso del aire es en cocorriente con las gotas, pero después cambia de dirección en contracorriente para el spray. La ventaja de este diseño es producir un producto de alta densidad volumétrica, y baja carga de finos en el colector. El aire de ingreso da una alta temperatura a la pared de la cámara, de aquí la limitación para muchos productos sensibles. El tiempo de retención del aire es generalmente de 6 segundos. El arreglo específico de la Figura 4.4., está normalmente diseñado para operar bajo presiones positivas. El ventilador primario está localizado más arriba del calentador

y tiene bajo costo, manejando aire ambiental.

Los secadores de flujo mezclado pueden ser cons -
truidos para operaciones a presión negativa. Se
pueden encontrar modificaciones de la Figura 4.4.
sin el álabe movable.

Otro tipo de secador de flujo mezclado se muestra
en la Figura 4.5. El aire de ingreso en forma de
espiral cae de la parte superior mientras el spray
es dirigido hacia arriba de la tobera, de la par-
te más baja de la cámara. El spray viaja en con-
tracorriente hasta la parte superior, donde enton-
ces las partículas caen cocrriente y descargan -
en la base de la cámara. Los finos son llevados-
hacia afuera, con el aire de salida. La ventaja-
de este diseño es el viaje largo proporcionado
por la cámara a las partículas, en un diámetro pe-
queño y altura moderada. En esta forma, las par-
tículas grandes pueden ser formadas, sin la nece-
sidad de una cámara larga que podría ser económi-
ca, solamente para grandes capacidades. A causa-
de que las partículas semisecas se ponen en con -
tacto con el aire caliente, un secador como el de
la Figura 4.4., es menos adaptable para productos
que son afectados por el calor, a menos que se
use aire con temperatura baja. Este diseño es
usado ampliamente en la industria cerámica.

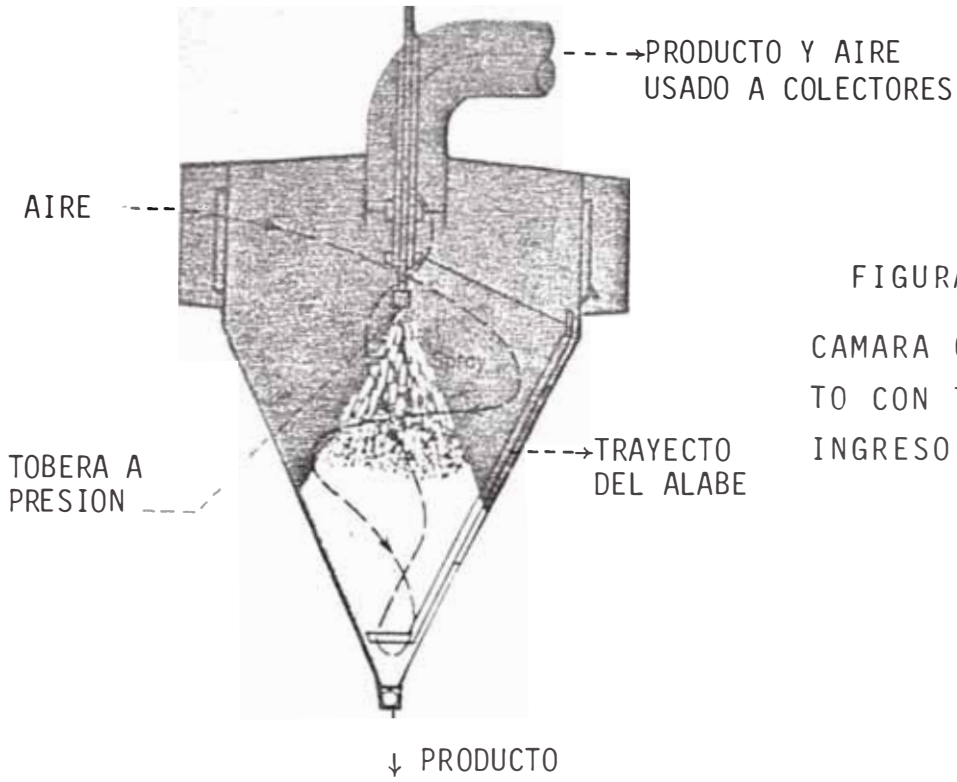
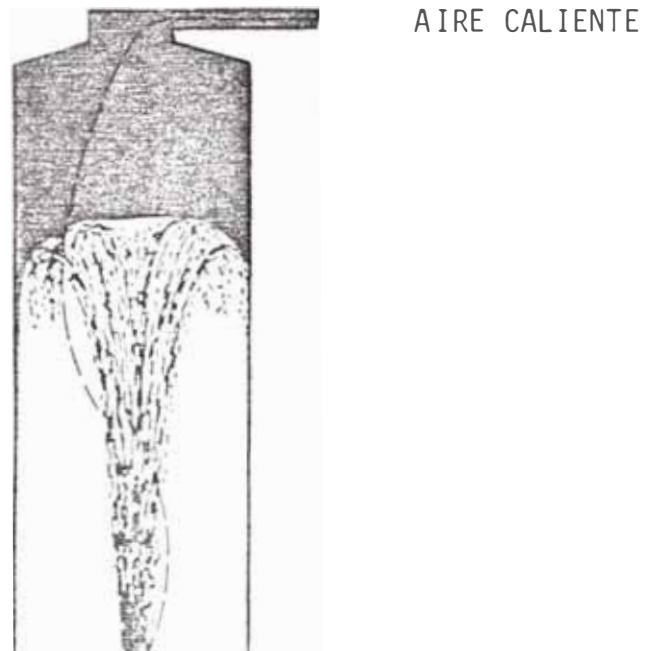


FIGURA 4.4.
CAMARA CONICA CON FLUJO MIXTO CON TOBERA A PRESION E -
INGRESO DE AIRE TANGENCIAL.

FIGURA 4.5.
CAMARA TORRE DE SECADO, CON TOBERA ATOMIZANDO HACIA ARRIBA DANDO FLUJO MEZCLADO



La Figura 4.6 y 4.7 ilustran cámaras de secado que tienen operaciones puras de cocorriente y contracorriente. El secador de cocorriente es ampliamente usado, particularmente en manufacturas de productos como el café instantáneo. Excepto para la producción de detergentes, la operación en contracorriente es muchas veces menos práctica, por que las partículas deben ser lo suficientemente densas para caer a través del flujo ascendente del aire. En ambos tipos de operación, la atomización es por una tobera o arreglo de toberas en la parte superior de la cámara. En algunos diseños el flujo del aire es en espiral, mientras en otros es paralelo al eje de la cámara.

El rasgo prominente de estas cámaras es su altura, la cual da a la partícula un tiempo de residencia largo. De este modo, partículas grandes pueden formarse, su altura también puede ser aprovechada para secar materiales que requieren altos tiempos de residencia.

La Figura 4.6 muestra la configuración usada para producir gotas huecas grandes y frágiles como las del café instantáneo. Para este tipo de aplicación el flujo de aire es paralelo al eje de la torre y en cocorriente al spray. En la sección de ensanchamiento de la torre, las partículas son se

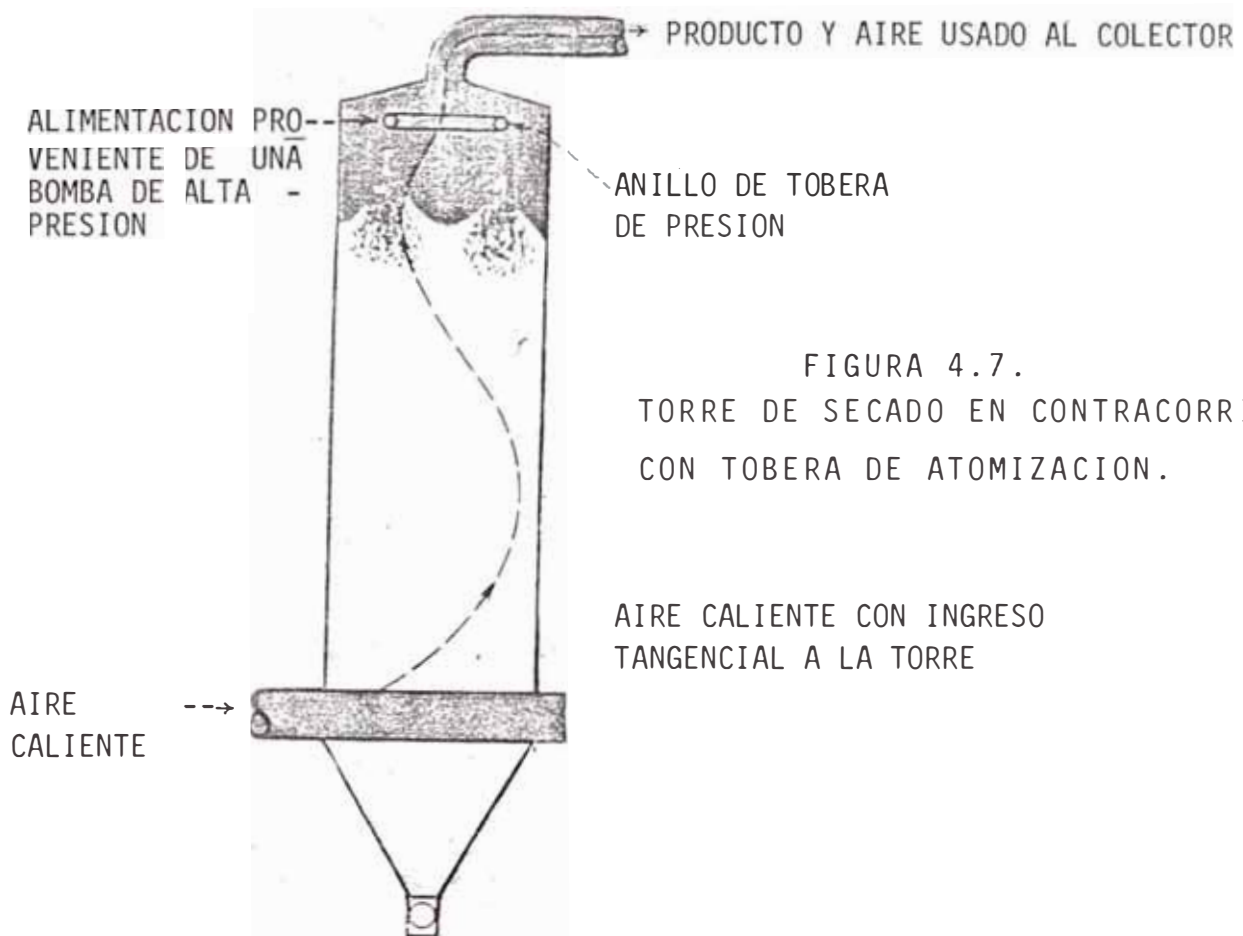


FIGURA 4.7.
TORRE DE SECADO EN CONTRACORRIENTE
CON TOBERA DE ATOMIZACION.

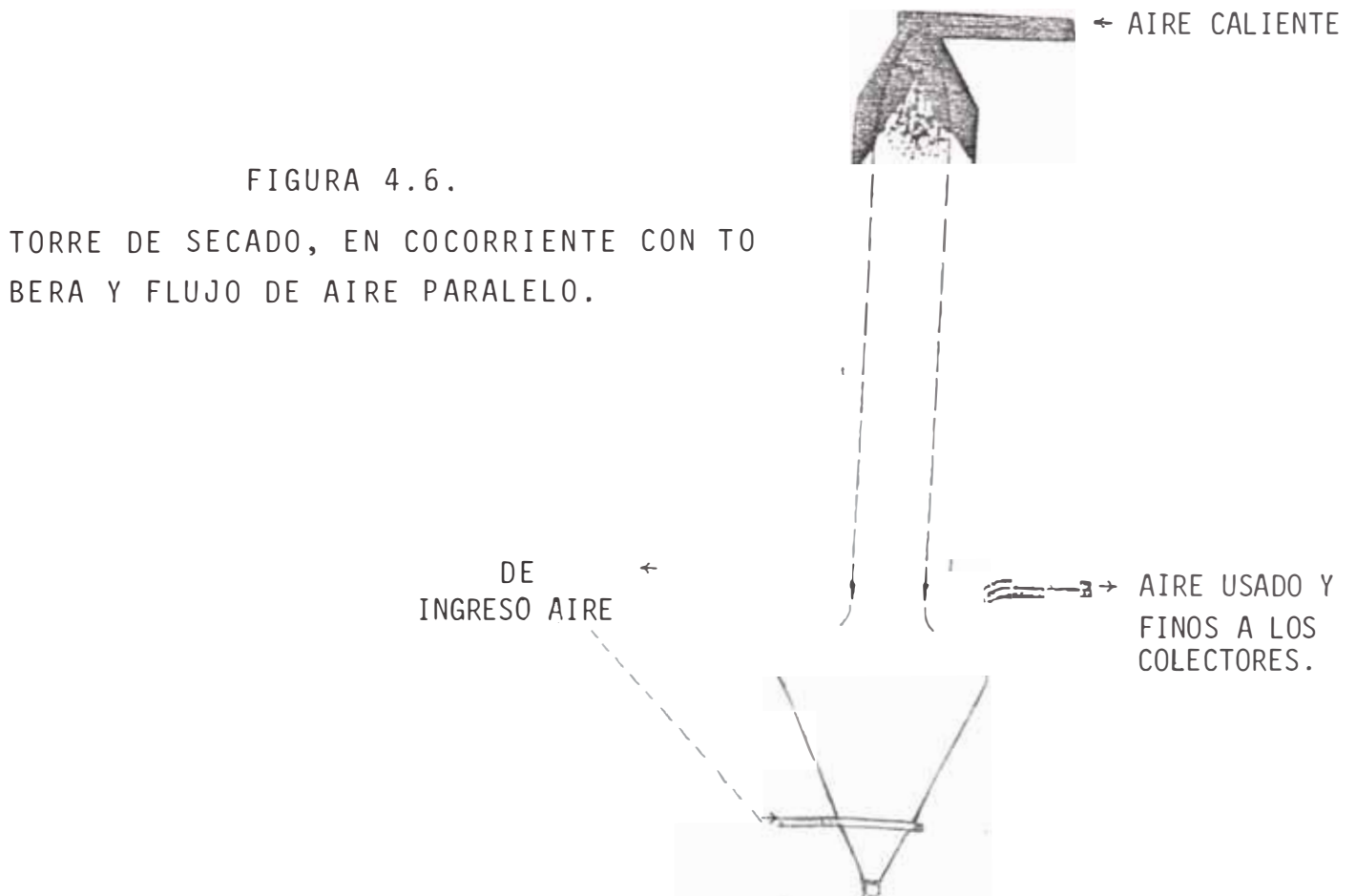


FIGURA 4.6.
TORRE DE SECADO, EN COCORRIENTE CON TOBERA Y FLUJO DE AIRE PARALELO.

paradas del aire con una mínima turbulencia.

Un diseño similar se muestra en la Figura 4.5. , excepto por la tobera que es colocada debajo del tope de la cámara, éste es más comunmente usado para materiales que no requieren un tratamiento suave.

La torre en la figura 4.7., es usada para la producción de detergentes. En estas aplicaciones , se evita el excesivo levantamiento del material como finos. Sin embargo, los productos de baja densidad, polvos finos y productos sensibles al calor no pueden ser normalmente manejados.

Los secadores de este diseño dan una temperatura alta al producto de salida, desde que la salida de las partículas están en contacto con el aire caliente. La utilización óptima del calor es posible en aplicaciones donde la razón de evaporación es incrementada debido al flujo en contra corriente.

4.2.- TRAYECTORIA DE LA GOTA AL SALIR DEL ATOMIZADOR.

4.2.1.- DESDE UN ATOMIZADOR ROTATORIO.

Al momento de abandonar la gota del atomizador se ve afectada por los remolinos de aire y por el flujo de aire de secado. Se ha notado en pequeños secadores de

prueba que la rotación del disco contribuye grandemente para el patrón de flujo total y de la trayectoria de la gota en la cámara, pero esto no es cierto para secadores de escala industrial donde el movimiento radial declina rápidamente. El flujo del aire y la trayectoria de la gota están gobernados principalmente por el aire disperso.

El viaje radial de la gota depende sobre todo del diseño y velocidad del disco, razón de alimentación y localización del aire disperso. El efecto de las dimensiones del atomizador, la velocidad y razón de alimentación en la trayectoria radial de la gota ha sido estudiado por Lapple y Shepherd (18).

Estos resultados expresan un porcentaje del spray que caen a una distancia dada, estas relaciones se dan en la Tabla 4.1. La ecuación 4.1. fué establecida bajo 26 experimentos. No fué considerado la existencia de las paredes del secador, sin embargo es una relación útil, cuando se alteran las condiciones de atomización. Comparando los resultados de la ecuación 4.3 y los

datos experimentales da resultados conservadores, esto fué explicado por que no se consideró la reducción en la densidad de la gota durante la evaporación o el flujo de aire de secado. De las tres ecuaciones, la 4.2. es generalmente preferida al referirse a la máxima trayectoria radial en condiciones de aire quieto.

TABLA 4.1.

<u>AUTOR</u>	<u>ECUACION</u>	<u>NRO. ECUACION</u>
Friedman, Gluckert Marshall.	$R_{10} = 0.4 \left \frac{dNM}{2} \right ^{0.25}$	4.1
Frazer, Eisenkaln, Dombrowski.	$R_{max} = 7.2d^{0.21} M^{0.2} / N^{0.16}$	4.2
Herring, Marshall	$R_{qq} = 12d^{0.2} M^{0.25} / N^{0.16}$	4.3

d = diámetro de disco, M=flujo de alimentación, N = rpm.

R_{10} = distancia radial en pies, del 50% - del spray que cae hasta 10 pulgadas debajo del spray.

R_{max} . = máxima distancia radial que alcanza todo el spray a una distancia de 3 pies debajo del Spray.

R_{qq} = incluye el 99% del spray.

4.2.2.- DESDE UN ATOMIZADOR DE TOBERA.

Cuando el spray de gotas emergen de la to

bera a los remolinos de la cámara desde el orificio a alta velocidad en dirección del eje de la tobera, las gotas desaceleran rápidamente cuando provienen de una tobera a presión, lo que no ocurre con una neumática. Con gotas pequeñas, la componente de velocidad radial en la salida es baja, el viaje del spray hacia las paredes es pequeño. Con torres de secado de diámetros pequeños se usan atomizadores de tobera.

4.3.- MOVIMIENTO DE LA GOTA DENTRO DE LA CAMARA.

La manera de como influye la mezcla spray-aire en la población de las gotas dentro de la cámara, produce una relación importante dentro de la cámara - para la evaporación del spray, un tiempo óptimo de residencia de las gotas en una atmósfera caliente - y la extensión de la deposición del producto sobre las paredes. Las gotas del atomizador salen a gran velocidad, sin embargo, la energía cinética - de ellas es rápidamente disipada por la fricción - con el aire, y su penetración directa en el aire , está limitada a una corta distancia del atomizador. En los secadores de tamaño industrial, las deposiciones en las paredes causadas por la trayectoria directa del producto se debe a la atomización incompleta. Algunas pruebas para el cálculo de las dimensiones de la cámara dependen de los datos de

la trayectoria de la gota y de la proporción de secado.

El viaje de la gota puede ser reducido a una o dos dimensiones, en los secadores verticales desde el momento de salir del atomizador hasta el punto de contacto con la pared (para atomizadores de tobera en un flujo de aire no rotatorio), y es en tres dimensiones para atomizadores rotatorios en un flujo de aire también rotatorio.

Es posible derivar correlaciones teóricas para representar el movimiento de la gota, este tipo de correlaciones simples consideran la masa y la forma esférica constante, siendo verdadero lo contrario.

Una gota en movimiento, bajo consideraciones de evaporación, se ve influida por la transferencia de calor y masa, esto implica el desarrollo de ecuaciones complejas. Se hacen ciertas asunciones en el proceso de secado del spray, para de esta manera hacer más manejables estas correlaciones. Estas incluyen:

- a) La transferencia de calor entre la gota y el aire es por convección forzada.
- b) Las gotas que constituyen el spray son esféricas.

- c) El spray es homogéneo.
- d) La coalescencia y la rotura de las partículas es despreciable.
- e) Los secadores con flujo de aire rotatorio se desenvuelven como un perfecto ciclón (la velocidad es constante en la dirección axial pero varía en la dirección tangencial.)
- f) Para los secadores con flujo de aire no rotatorio, el aire se desarrolla en el secador en flujo netamente paralelo.

Una deducción básica del movimiento de una gota se haría considerando la fuerza de fricción originado entre el aire y la superficie de la gota expresado por el coeficiente de arrastre. El resultado del movimiento relativo de la gota en el aire depende sobre todo de la variación de la fuerza de resistencia que es controlada por el cambio de las propiedades de la gota durante la evaporación.

En algún instante de su movimiento (movimiento vertical) las fuerzas que actúan sobre ella pueden ser expresado como:

$$(\rho_w - \rho_a) \frac{\pi D^3}{6} \frac{dV}{dt} = \frac{\pi D^3}{6} (\rho_w - \rho_a) g - \frac{1}{2} C_D \rho_a V_{rel}^2 A \quad 4.4.$$

donde D= diámetro de gota, C_D = coeficiente de arrastre,
 ρ_w, ρ_a - densidades de la gota y aire,
 V - velocidad de la gota,

$V_{rel.}$ = velocidad relativa gota-aire.

Cuando la fuerza gravitatoria, es igual a las fuerzas de fricción, la aceleración se hace cero y su velocidad se hace constante.

El movimiento de la gota dentro de la cámara de secado consiste en:

- La gota saliendo del atomizador.
- La gota desacelerándose.
- Movimiento de caída libre bajo la influencia del flujo del aire en la cámara.

4.3.1.- DESACELERACION DE LA GOTA.

La gota saliendo del atomizador con alta velocidad se desacelera rápidamente debido a la fuerzas de fricción en su superficie, la razón de la desaceleración determina su penetración. Una vez que la gota ha sido descargada del atomizador su velocidad decrece, y pasa primero por una zona de turbulencia, luego a una de semiturbulencia, luego pasa finalmente a una zona de flujo laminar. Si su diámetro es grande, no se podría experimentar un flujo laminar debido a la alta velocidad terminal.

Las ecuaciones que fijan cada zona son:

$$\frac{dV}{dt} = -0.33\rho a V^2 / D\rho\omega \quad 4.5 \text{ flujo turbulento}$$

$$\frac{dV}{dt} = 0.3\rho a V^2 / D\rho\omega - 30 \mu a V / D^2\rho\omega \quad 4.6 \text{ flujo semi-turbulento}$$

$$\frac{dV}{dt} = -18\mu a / D^2\rho\omega \quad 4.7 \text{ flujo laminar}$$

La integración de las ecuaciones anteriores dan el tiempo de desaceleración y la penetración de la gota dentro de cada región.

Las ecuaciones antes mencionadas están limitadas en las prácticas, por el sistema simple que ellas describen.

- a) Desaceleración de la gota de un atomizador rotatorio.- Para una gota que sale del borde de un atomizador rotatorio, la desaceleración puede ser expresada con ecuaciones de movimiento en los planos verticales y horizontales. Para el caso de una gota saliendo a una velocidad de U_h del disco atomizador, la gravedad actúa inmediatamente en la gota dando una componente vertical a la velocidad, U_v . Las fuerzas que actúan sobre la gota son aparentemente su peso $Mg(1-\rho_a/\rho_\omega)$ y la fuerza de fricción $R'A$, donde R' -

es la fuerza por unidad de área proyectada de la gota en un plano de 90 grados a su movimiento, y A es su área.

La ecuación para el movimiento horizontal,

$$\frac{m dU_h}{dt} = -\frac{R'}{\rho_a V^2} \rho_a A U_h (U_h^2 + U_v^2)^{1/2} \quad 4.8$$

La ecuación para el movimiento vertical:

$$\frac{m dU_v}{dt} = -\frac{R'}{\rho_a V^2} \rho_a U_v (U_h^2 + U_v^2)^{1/2} + mg \left(\frac{1 - \rho_a}{\rho_w} \right) \quad 4.9$$

Los cálculos del movimiento de la gota durante la desaceleración requieren el uso de la relación entre el número de Reynolds de la gota y el grupo adimensional $R'/\rho v^2$, como se muestra en la figura 4.8. El tiempo y la distancia viajada por la gota durante la desaceleración es obtenida por la integración de las ecuaciones 4.8 y 4.9

- b) Desaceleración de una gota de un atomizador de tobera.- Para una gota descargada de un atomizador de tobera ya sea su movimiento hacia arriba o hacia abajo, la ecuación 4.9 puede ser usada, para una gota moviéndose en un plano vertical.

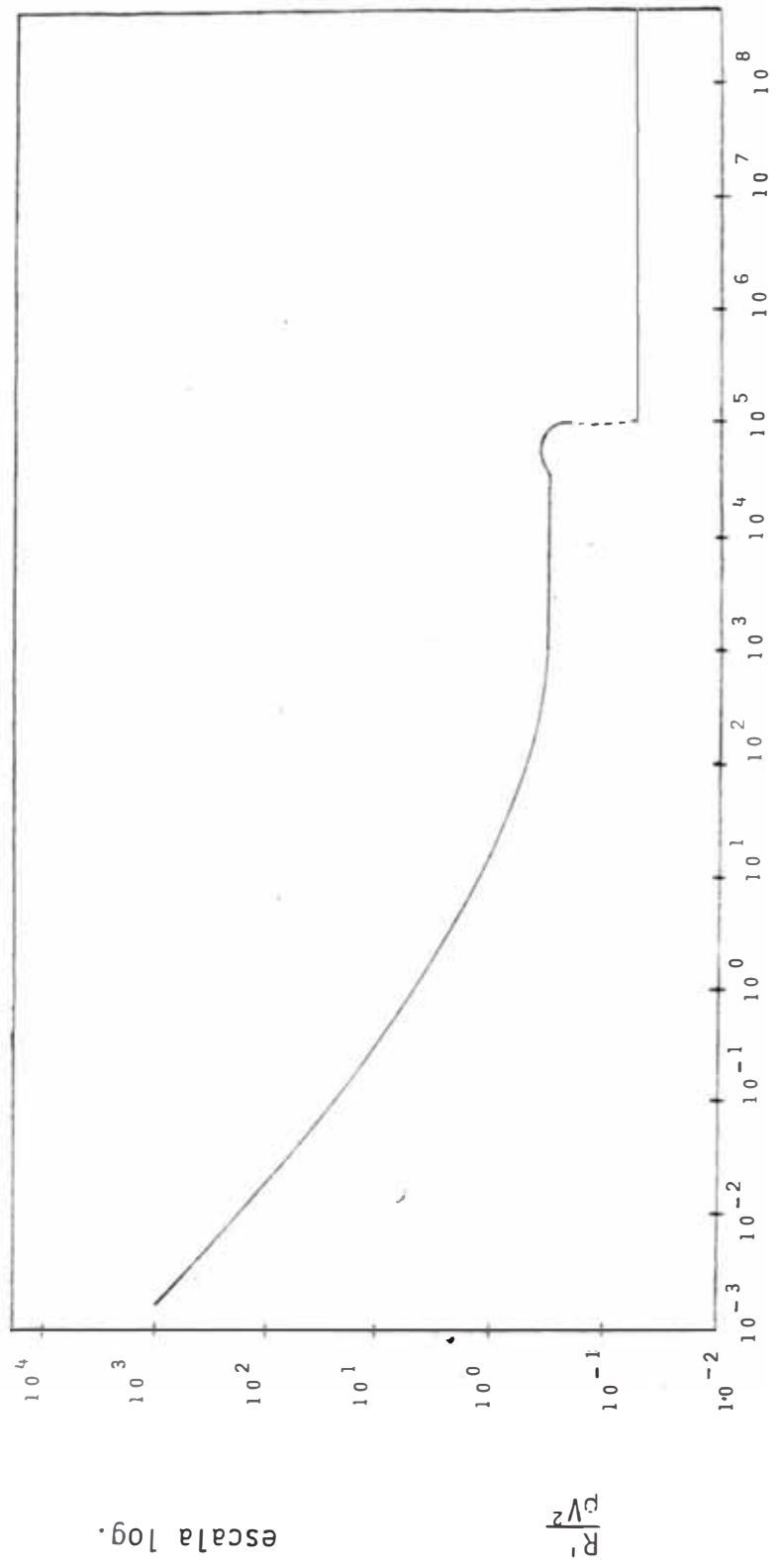


FIGURA 4.8 NUMERO DE REYNOLDS (Re) Escala Log.

escala log.

Si el spray descarga hacia abajo, la gravedad y la fricción del aire actúan juntas para retardar su movimiento, en el plano vertical. Una vez que ella comienza a caer la gravedad y la fricción del aire están en oposición. Para una gota esférica la ecuación se transforma:

$$\frac{dU_v}{dt} = \frac{-R'}{\rho_a V^2} U_v^2 \left| \frac{1.5 \rho_a}{\rho_w} \right| + g \left(\frac{1 - \rho_a}{\rho_w} \right) \quad 4.10$$

4.3.2.- VELOCIDAD TERMINAL (GOTAS ESFERICAS).

Las condiciones de velocidad terminal ocurren cuando la fuerza de gravedad actúa en la gota y es contrarrestado por las fuerzas de fricción del aire. La parte izquierda de la ecuación 4.4 es cero, de allí se deduce la velocidad terminal como:

$$V_f = \left| \frac{4}{3} \frac{(\rho_w - \rho_a) g D}{C_D g a} \right|^{1/2} \quad 4.11$$

Esta ecuación corresponde para números de Reynolds menores de 0.2. Para velocidades terminales dentro de una región de flujo semiturbulento, puede aplicarse:

$$V_f = 0.153 D^{1.14} g^{0.71} \left(\frac{\rho_w - \rho_a}{\rho_a} \right)^{0.29} \mu_a^{0.4} \quad 4.12$$

Las ecuaciones antes descritas son aplicables para condiciones ideales, y las des

viaciones se deben a:

Interferencia entre las gotas.- El aire asociado con la presencia de un gran número de gotas difiere de un aire moviéndose alrededor de una de ellas. Una gota de un spray al moverse cede energía al aire que se encuentra en sus alrededores, el efecto total es el de reducir la resistencia del aire a la siguiente gota, todo esto conlleva a incrementar la penetración de la gota.

- Las gotas no son rígidas.- Las gotas están sujetas a deformación debido a variaciones de presión que actúan sobre su superficie, la deformación causa el aumento del coeficiente de arrastre.
- Las gotas cambian de forma durante el secado y puede cambiar de sólida a porosa, y en alguna forma a hueca. Si la gota es secada rápidamente, pueden formarse esferas huecas, al establecimiento de las condiciones de velocidad terminal. Para poder aplicar la ecuación de velocidad terminal, se debe hacer una corrección a la densidad, por lo que la densidad para una

partícula está dada por:

$$\frac{A_s \times b_w \times \rho_w}{V_p} \quad 4.13$$

A_s = área superficial, b_w = espesor de la cáscara, V_p = volumen de la partícula.

Las ecuaciones desarrolladas para simular el movimiento de la gota-partícula fueron recopiladas por Masters (21), dentro de los cuales se halla, el movimiento de gota-partícula despedido, por un atomizador rotatorio y un tipo tobera, tratando en ellas todas las componentes de la velocidad que involucran cada atomizador.

4.4.- DEPOSICION DEL PRODUCTO EN LA PARED DE LA CAMARA.

En lo referente a la deposición del producto en las paredes de la cámara se desarrollará: las tres formas principales de deposición, así como la influencia del tamaño de la cámara en la deposición. Las tres principales categorías de deposición son:

- Depósitos del producto semihúmedos, originado por gotas gruesas, con tiempo insuficiente para adquirir una superficie seca, la eliminación de estos depósitos requieren una corrección del

funcionamiento del atomizador; el flujo de aire de secado tiene una limitada influencia.

- Depósitos por apelmasamiento, causado por la naturaleza del producto a la temperatura del secador, esta clase de deposición se lleva a todo lo largo de la cámara, pues regularmente se forma un remolino del producto dentro de la misma haciendo inevitable el contacto del producto con la pared, en muchos casos se forma una costra en la pared que cae luego de haber formado un espesor determinado.
- Superficie con polvo adherido a ella, es el contacto inevitable entre las partículas secas y la pared. El grado de deposición depende de la geometría de la pared, la velocidad del aire local y las fuerzas electrostáticas entre las partículas y la pared, esta clase de deposición no forma capas duras y pueden ser movidas fácilmente.

Es indeseable un tiempo largo del producto en la cámara, por el daño que se pueda originar a dicho producto, como por las continuas paradas que tendría que hacerse a la operación para su limpieza, la contaminación del producto bueno que se está secando, tiempo perdido de opera

ción, etc.; aunque ese tiempo de residencia largo, es a veces requerido por una clase de producto, para su completa evaporación, porque estos ofrecen una gran resistencia a la remoción de un nivel bajo de humedad. Un tiempo de residencia de 5 minutos es regularmente requerido, para frutas y vegetales. Esta clase de deposición se hace por una aglomeración porosa, que cae continuamente en forma de módulos. El control de semejante operaciones es muy delicado, por la degradación que pueda sufrir el producto pegado en las paredes, regularmente es necesario un enfriamiento de las mismas.

a) Deposición en cámaras pequeñas: regularmente la deposición se lleva a cabo a nivel del atomizador, como también en el techo de la cámara (4), la variación de la velocidad del atomizador, la razón de alimentación, el flujo de aire y la localización del atomizador alteran el grado y el área de deposición. Un aumento de la velocidad del disco, para una deposición fija del atomizador disminuye la deposición en las paredes del secador, y para bajas proporciones de alimentación la deposición ocurre bajo el atomizador. Para un incremento en el flujo de aire disminuye la de-

posición a nivel del atomizador.

Para atomizadores tipo tobera depende de la posición de este respecto del flujo de aire. un atomizador de tobera accionado por presión y flujo en cocorriente, el spray se expande al salir del atomizador estando sujeto también al ángulo del cono de la tobera; todos estos factores determinar la deposición en la pared de la cámara. Para toberas del tipo dos fluidos, la deposición ocurre en el área debajo del atomizador, y es debida a la alta velocidad a la que sale la alimentación; la deposición es más común que en los de tobera de presión, esto se debe a que la tobera de dos fluidos conlleva aire de la atomización, que hace difícil el contacto con el aire caliente.

- b) Deposición en cámaras grandes: El control de la deposición en las paredes de un secador grande es mucho más fácil que en las cámaras pequeñas. Un incremento en el tamaño de la cámara da el suficiente tiempo de residencia. La influencia del atomizador en el trayecto de la gota es mínima así el apelmamamiento del producto puede ser contrarrestado por un control de la velocidad y dirección del flujo del aire. Semejante control se

lleva a cabo usando un diseño apropiado de la dispersión del aire dentro de la cámara. Para secadores en cocorriente y atomizadores rotatorios, el flujo de aire secador origina una depresión de la atomización (en forma de una nube tipo paraguas), ésta controla y elimina las áreas de deposición tipo producto semi húmedo.

Para la mayoría de productos, no hay tendencia de este a acumularse a la pared, si la operación fué adecuada para estos productos una vez completado el tiempo de secado, la cámara puede ser limpiada por un flujo de aire que actúe como barredor. Para los productos que tienen tendencia a adherirse a la pared de la cámara, se montan en el secador vibradores que periódicamente desalojan el producto depositado. Para productos que tienen características de deposición, ésta ocurre independientemente del patrón del flujo del aire, si el equipo vibratorio es inadecuado, la introducción de aire secundario alrededor de las paredes, o un sistema de aire de barrido, puede mejorar la operación.

- SECADO DEL SPRAY.

Esta tercera etapa de la operación de secado, se refiere a la evaporación de las gotas, envueltas en el flujo del aire caliente. [Esta involucra las transferencias de calor y masa entre el aire y el spray, y dichas transferencias ocurren por convección en la capa límite de cada gota. Ahora la capa límite, como los fenómenos de transporte, dependerán de la temperatura, velocidad relativa entre el spray y el aire, la humedad y propiedades de transporte del spray y del aire.

[Una gota puede entrar a la cámara, a una temperatura por encima, debajo o igual a la de equilibrio dinámico. Para gotas que provienen de una solución, la temperatura del equilibrio dinámico sería más alta que su temperatura de bulbo húmedo, y en el caso de suspensiones podrían ser iguales las dos temperaturas. Si la temperatura inicial de la gota no es igual a la temperatura del equilibrio dinámico esta tenderá a aproximarse a esta temperatura. Durante este período inicial, el secado que se lleva a cabo es generalmente despreciable, aunque no siempre es cierto para altas temperaturas. Si la gota establece un equilibrio dinámico, con el aire caliente exhibirá un período de secado constante (constant rate) (27,10). La duración de este período constante dependerá de la fuerza directora de la temperatura y del mecanismo interno de transferencia de masa.

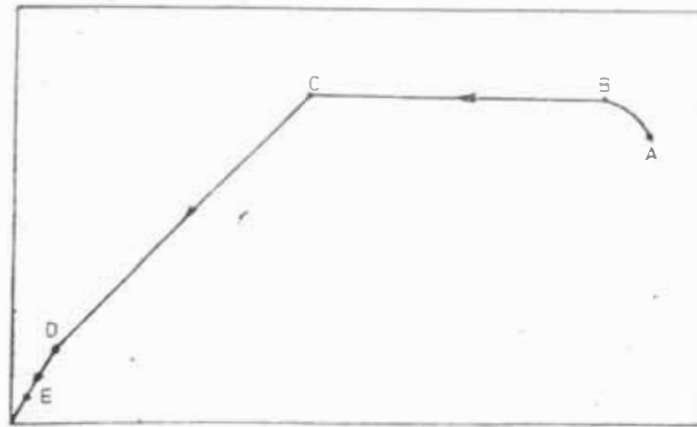
Una temperatura alta del aire y una concentración

elevada, acortará el período de secado constante, por lo tanto bajo estas condiciones este período puede ser despreciado. Un segundo período es decaimiento de la evaporación (falling-rate); el cual consta de dos etapas (27), la primera etapa consiste en la formación de una estructura rígida o semirígida en la superficie de la gota, la segunda es la remoción de la humedad remanente y esto está frecuentemente acompañado por una vaporización interna, la cual puede causar la expansión de la partícula. Es bastante probable que en el secado de algunos materiales estas dos etapas ocurran simultáneamente. La primera etapa del período de decaimiento del secado, está caracterizado por la formación de una superficie sólida, y esta puede ser parcial o enteramente impermeable al flujo de humedad, esto hace que se eleve la temperatura de la gota, causando tensiones internas en la partícula debido a la formación del vapor, originando la expansión y/o rotura de la superficie.

| El grado de secado alcanzado por la partícula durante el período de decaimiento depende: del tiempo expuesto al medio caliente, de la temperatura final y humedad de este medio y del tamaño de la partícula.)

Estas características de secado pueden ser presentadas en una curva de razón de secado versus humedad como la figura 5.1. La parte AB de la curva, representa el inmediato contacto de la gota aire, se caracteriza por el au

RAZON DE SECADO O FLUX
(PESO DE HUMEDAD REMOVIDO POR
UNIDAD DE TIEMPO)



CONTENIDO DE HUMEDAD
(PESO DE HUMEDAD POR UNIDAD
DE PESO DE PRODUCTO SECO)

FIGURA 5.1..
CURVA DE LA RAZON DE SECADO.

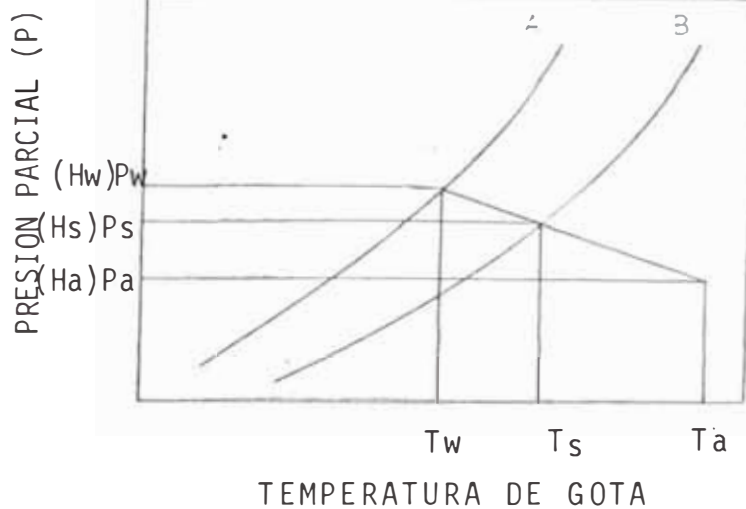


FIGURA 5.2

ESTIMACION DE LA TEMPERATURA DE LAS
GOTAS CONTENIENDO SOLIDOS "A" PRE -
SION DE VAPOR PARA EL LIQUIDO PURO -
PURO. "B" PRESION DE VAPOR DE LA SOLUCION SATURADA

mento de la temperatura de la superficie, el cual se lleva a cabo en milisegundos (21).

[La parte BC, representa el período de secado constante, caracterizado por la más alta razón de evaporación en toda la operación, la superficie de la gota está continuamente saturada por la migración de humedad del interior de la gota a la superficie. La parte CD, donde C se define como punto crítico (representando la humedad crítica), este punto es alcanzado por la gota de mantener su superficie húmeda, y el período de secado declina; este período se da hasta que la superficie de la gota este -- completamente seca. La parte DE, se caracteriza por que toda la transferencia de masa se ve resistida por la superficie sólida. La razón de evaporación se sigue desarrollando (declinando cada vez mas) hasta que la humedad de la gota adquiere la humedad del medio, determinándose el equilibrio. Regularmente el producto es removido de la cámara antes de alcanzar la humedad de equilibrio.]

5.1.- EVAPORACION DE GOTAS PURAS.

[El estudio de este tipo de evaporación parece impráctico a simple vista, pero la importancia de esta clase de investigación es con el fin del entendimiento de los mecanismos de evaporación, para luego hacer modificaciones a esta teoría básica que incluya sólidos insolubles o solubles.]

El estudio de la evaporación de una gota se basa en la teoría de capa límite, la cual está íntimamente ligada con la velocidad relativa que ésta tenga con el aire. Por lo que este estudio se divide en dos partes cuando la velocidad relativa es cero (aire quieto), y cuando la gota tiene una velocidad respecto al aire.

5.1.1.- EVAPORACION DE UNA GOTA.

Tras muchos experimentos (25) se dedujo que la transferencia de calor (con velocidad relativa cero) para una gota esférica era igual:

$$h_c D / k_d = 2.0 \quad 5.1.$$

donde h_c - coeficiente de transferencia de calor por convección, D = diámetro de la gota, k_d = conductividad térmica media de la película gaseosa alrededor de la gota.

Y para la transferencia de masa (con velocidad relativa cero) por analogía:

$$K_g D / D_v = 2.0 \quad 5.2.$$

donde K = coeficiente de transferencia de masa, D_v = coeficiente de difusión.

Las relaciones anteriores sirven para encontrar los valores de los coeficientes -

de transporte correspondiente a cada transferencia.

Ahora cuando la gota posee velocidad con respecto al aire, las ecuaciones sufren modificaciones, teniendo un rango de aplicación para Reynolds entre 100 y 1000.

$$\left(\frac{h_c D}{K_d}\right) = 2.0 + 0.6 \left(\frac{C_p \omega a}{K_d}\right)^{0.33} \left(\frac{D_v \rho a}{\omega a}\right)^{0.5} \quad 5.3$$

$$\left(\frac{kg D}{D_v}\right) = 2.0 + 0.6 \left(\frac{\omega a}{\rho a D_v}\right)^{0.33} \left(\frac{D_v \rho a}{\omega a}\right)^{0.5} \quad 5.4$$

Una recopilación de las ecuaciones de transferencia tanto de calor como de masa y tiempo de evaporación para una gota pura, están desarrolladas por Masters y Ranz (21, 25)

5.1.2.- EVAPORACION DE UN SPRAY DE GOTAS PURAS.

Las características de evaporación de una gota simple difieren de las de un spray, por lo que se hace difícil la aplicación de las mismas consideraciones y ecuaciones de una gota simple. El análisis de la evaporación de un spray depende de una distribución de tamaños, de la velocidad relativa que posean, de su trayectoria y de un tiempo dado para un volumen dado de aire -

caliente. Además hay dificultades graves en determinar estos factores y por lo tanto los datos de evaporación están limitados. Para sprays con baja velocidad relativa, con altas velocidades de aire (flujo en cocorriente) se puede observar que (12):

- La evaporación del spray causa reducción en la temperatura del aire y la razón de evaporación decrece.
- Un spray con una distribución grande de tamaños inicialmente se evaporan mucho más rápidamente que muchos sprays homogéneos de igual diámetro medio. El incremento de la evaporación se debe a las pequeñas gotas en la distribución. Las gotas grandes se evaporan mucho más lentamente, y así el tiempo de evaporación total es más grande.
- Ningún diámetro medio solo puede representar adecuadamente la evaporación de las gotas de un spray.
- Una distribución dada de tamaños, ofrece una mejor representación de la evaporación del spray.
- Para un spray no homogéneo, inicialmente mostrará un incremento del diámetro medio para luego disminuir hasta comple

tar la evaporación.

La evaporación de sprays, que se mueven con una pronunciada velocidad relativa (por ejemplo, gotas grandes de una atomización por tobera en flujo cocorriente o secadores tipo fuente) muestran estas características:

- Las gotas viajan distancias grandes antes de que una fracción de ellas sea evaporada.
- La influencia de la velocidad relativa entre las gotas y el aire es mas significativa en la razón de evaporación a altas velocidades de salida del atomizador y a altas temperaturas de secado.
- Para gotas despedidas a altas velocidades del atomizador, originando velocidades relativas grandes, el despreciar esta característica afectará en mayor grado a las gotas pequeñas de la distribución. Virtualmente las gotas pequeñas se evaporan instantáneamente y las grandes completan su período de evaporación cuando empiezan a desacelerarse.

5.2.- EVAPORACION DE GOTAS CONTENIENDO SOLIDOS DISUELTOS.

Las gotas conteniendo sólidos disueltos se evaporan

en una proporción más baja que una gota pura de igual diámetro. La presión de vapor disminuye en una gota conteniendo sólidos, por lo que el gr - diente de presión decrece y la transferencia de masa disminuye.

5.2.1.- EVAPORACION DE UNA GOTA (CON SOLIDOS DI- - SUELTOS).-

Efecto del descenso de la presión de vapor: La figura 5.2, muestra la varia - ción de la presión parcial, como la temperatura de bulbo húmedo de un solvente determinado conteniendo sólidos, la curva A es el solvente puro y la curva B es el mismo solvente conteniendo sólidos disueltos en saturación. Se parte de unas condiciones de T_a y P_a , una línea de intersección con la curva de saturación indicará las condiciones de su superficie de la gota T_s y P_s , si se si - gue hasta el líquido puro tendremos las condiciones de T_w y P_w , donde $(T_s - T_w)$ - indica el aumento de temperatura de la gota debido a los sólidos.

- Efecto de la formación de sólidos en la

gota se caracteriza por el desarrollo del secado con un período de evaporación constante (primer período de secado), Ranz y Marshall (25) demostraron que, en esta parte, la temperatura de la superficie de la gota es igual al de una solución saturada, a pesar que la concentración en la superficie de la gota podría ser menor.

El movimiento de la humedad del interior de la gota a la superficie se hace cada vez menor, debido al incremento de la resistencia a la transferencia de masa causada por la fase sólida. La razón de transferencia de calor excede a la transferencia de masa. La evaporación dentro de la gota ocurre si la transferencia de calor es lo suficientemente alta para causar la vaporización. En la operación de secado, cuando la temperatura del aire está sobre la temperatura de ebullición del solvente, siempre se formará vapor y este ejercerá una presión sobre la superficie, el efecto de la presión dependerá de las características de la cos

tra. El vapor saldrá de la partícula sin romperla, cuando ésta posea una costra porosa, lo que no sucederá cuando la costra no es porosa. La gota no alcanza el punto de ebullición cuando se tienen tiempos de residencia cortos en la zona de mayor transferencia (zona más caliente). El movimiento de la humedad dentro de la gota estará dada por difusión y capilaridad. Cada material muestra un comportamiento característico en la zona de falling rate. Así, si la formación de la costra se hace impermeable luego de alcanzar el punto crítico, se verá extendida la siguiente etapa del secado. En resumen las características de la costra formada determinará la extensión del período de evaporación constante (constant rate), como del segundo período (falling-rate).

5.2.2.- EVAPORACION DE UN SPRAY CONTENIENDO SOLIDOS DISUELTOS.

El fenómeno que se vió, referido a la disminución de la presión de vapor para una gota sola, se manifiesta en el spray como una variable que depende del tamaño de la

gota. La resistencia a la transferencia de humedad por la formación de la costra no aparecerá simultáneamente en toda la distribución. El estudio matemático de este tipo de secado, establece ecuaciones complejas y su desarrollo está aún limitado. Baltas y Gauvin (2), estudiaron el secado de un spray conteniendo nitrato de sodio desarrollaron un método de incremento, en el cual el área transversal de la cámara fué dividida en anillos, cada uno interdependientes tanto a lo que se refiere a la transferencia de calor y masa. Pero el desarrollo del método implicó asunciones muchas veces irreales, a pesar de esto su solución requiere de programas por computadora conteniendo en ellas ecuaciones complejas.

También a partir del estudio de un spray se puede estimar de una manera sencilla, que porcentaje del agua inicial de la alimentación se está evaporando en el período constante de evaporación (constant rate) y para ello es necesario fijar algunas condiciones:

- 1) Se ha establecido ya (en subtítulo 3.1) que un spray puede definirse, con una función de distribución característica:

$$\frac{dN'}{dD} = f(D) \quad 5.5$$

entonces

$$dN' = f(D)d(D) \quad 5.6$$

y si integramos en todo el rango

$$N' = \int_0^{\infty} f(D)d(D) = 1 \quad 5.7$$

esto se debe a que N' está referido en forma porcentual.

- 2) Definimos F como el porcentaje de agua en todo el spray que no ha sido evaporada con respecto al spray inicial, en un instante determinado.

$$F = \frac{\text{Volumen de agua no evaporada}}{\text{volumen Inicial de agua.}}$$

$$\text{y } dF = \frac{\left(\frac{D}{D_1}\right)^3 \times \text{número de gotas en un intervalo.}}{\text{número total de gotas}} =$$

$$\left(\frac{D}{D_1}\right)^3 dN'$$

Donde D_1 es el diámetro inicial de una gota (se asume que el sólido contenido en la gota no afecta significativamente en su volumen), D es el diámetro de una gota en un tiempo θ

Pero como el segundo termino tiene contenida a la función de distribución entonces:

$$dF = \left(\frac{D}{D_1}\right)^3 f(D) d(D) \quad 5.8$$

Y, si integramos en todo el rango del spray para un tiempo θ entonces:

$$F = \int_0^{\infty} \left(\frac{D}{D_1}\right)^3 f(D) d(D) \quad 5.9$$

La cantidad de agua no evaporada, desde que el spray deja el atomizador está relacionada con la cantidad de calor que se ha transferido hasta ese instante, y que depende de factores como: Coeficientes de transferencia, velocidades relativas de las gotas, coeficientes de arrastre, dirección del flujo del aire, etc, que deben ser descritos como un juego de ecuaciones diferenciales simultáneas (12). Sin embargo todos los cálculos son extremadamente complicados y deben hacerse por computador, realizando muchas asunciones.

La Ecuación 5.9 sola, sin embargo puede ser útil para estimar que porcentaje de agua del volumen inicial se evaporará en un período de velocidad constante, si es que se postulan las siguientes a-

sunciones, al menos dichas asunciones parecen ser válidas para las soluciones de sulfato de sodio:

i) la función de distribución de gotas obtenidas del atomizador permanecerá invariable, mientras el producto se está secando.

ii) existe una relación lineal entre el diámetro de gota inicial y el diámetro en cualquier instante θ

$$D = aD_1 + b \quad 5.10$$

iii) Desde el momento en que se formará la costra de la gota, el diámetro permanecerá invariable, no ocurriendo un hinchamiento de la gota, ni rompimiento de partículas, por lo tanto el diámetro de partícula es fijado por la formación de la costra.

iv) El cálculo se realiza hasta el momento en que se forma la costra.

Reemplazando la Ec. 5.10 en la Ec .

5.9 obtenemos:

$$F = \int_0^{\infty} \left(\frac{aD_1 + b}{D_1} \right)^3 f(D) dD$$

$$F = \int_0^{\infty} \left(a + \frac{b}{D_1} \right)^3 f(D) dD$$

y si el valor de b es un valor pequeño - entonces:

$$F = \int_0^{\infty} a^3 f(D) dD - a^3 \int_0^{\infty} f(D) dD$$

pero la integral es igual a uno por lo - tanto

$$F = a^3 \tag{5.11}$$

Para el caso de la corrida 24 (parte ex- perimental de la tabla 7.8)

$$D = 0.786D_1 + 6.85$$

Aplicando el 5.11

$$F = (0.786)^3 = 0.486$$

Eso indicaría que el 51.4% en volumen del spray inicial, se ha evaporado en el pe - ríodo de evaporación constante.

5.3.- EVAPORACION CONTENIENDO SOLIDOS INSOLUBLES.-

El efecto de sólidos insolubles en una suspensión, - se caracteriza por la invariabilidad tanto de su pre - sión de vapor como la temperatura del bulbo húmedo , con respecto al solvente puro. El tiempo total de - secado puede ser evaluado, sumando separadamente los - dos tiempos de secado (constant rate, falling rate)

$$t_{total} = \frac{\lambda \rho_1 (D_0^2 - D_c^2)}{8K_d \Delta t_1} + \frac{\lambda D_c^2 \rho_s (W_c - W_2)}{12K_d \Delta T_2} \tag{5.12}$$

donde el primer término identifica a la primera eta - pa (constant rate) y el segundo término a la segun -

da etapa (falling rate) λ = calor latente del solvente, D_c = diámetro de la partícula alcanzado en el punto crítico, ρ_s = densidad del sólido, W_c = humedad crítica, W_2 = humedad final de la partícula, K_d = conductividad del medio, ΔT_1 = LMTD de las temperaturas del aire de entrada al punto crítico y de la gota a la entrada al punto crítico, D_o = Diámetro inicial de la gota, D_c = diámetro crítico, ρ_1 = densidad de la solución, ΔT_2 = LMTD de las temperaturas del aire del punto crítico al de salida y de la gota del punto crítico al de salida. Esta ecuación es útil para obtener datos para el diseño de la cámara.

5.4.- MEDIOS DE SECADO DIFERENTE AL AIRE.

Cuando se requiere de una atmósfera inerte, para prevenir explosivos, por la clase de solvente a evaporar, se usa comunmente nitrógeno o vapor sobrecalentado, esto implicará un equipo adicional al secador el cual consiste en un reciclador del medio a utilizarse. Este medio secador puede tener una alta difusividad y conductividad térmica, lo que hace que la evaporación se vea incrementada. La ventaja potencial de un vapor sobrecalentado, es su similitud química entre la humedad a ser removida de la gota y del medio a utilizarse, lo cual facilita tanto la transferencia de masa y de calor.

5.4.1.- VAPOR DE AGUA SOBRECALENTADO USADO COMO MEDIO.

Las principales ventajas que tiene el uso de esta clase de vapor, es: el mejoramiento que produce a la transferencia de calor y de masa, provee de una atmósfera inerte que previene la oxidación rápida del material o la inflamación del solvente , ofrece un medio efectivo de secado cuando el material a secar es un pobre conductor. Una de las mayores desventajas en el uso del vapor sobrecalentado, es la sensibilidad que el material tenga a temperaturas sobre la temperatura de ebullición del solvente a la presión existente en el secador. Para un líquido puro, cuando se evapora en un vapor con propiedades diferentes, el equilibrio dinámico es alcanzado a una temperatura algo más baja de la temperatura de bulbo húmedo originado por las resistencias combinadas a las transferencias de masa y calor; cuando un líquido se evapora en un medio similar, esto es su propio vapor, la resistencia de masa y calor es disminuida, y la temperatura del líquido se aproxima a la del vapor saturado a la presión existente. Cuando el secado se lleva a cabo en vapor sobre-

calentado, ocurre algo de condensación, esto se da en el período de inducción AB, el valor de la condensación depende del grado de sobrecalentamiento y de la razón de transferencia de calor a la gota.

5.4.2.- ESTUDIO COMPARATIVO DEL SECADO DE VARIOS PRODUCTOS ALIMENTICIOS EN AIRE CALIENTE Y VAPOR DE AGUA SOBRECALENTADO.

Este estudio lo llevó a cabo Trommlen y Crosby (27).

Esta clase de materiales generalmente no exhiben un período de temperatura constante en aire. La temperatura de la gota se elevaba continuamente desde la temperatura inicial del aire a través del curso del secado. Esta elevación interrumpida cerca del punto de ebullición, donde los materiales sufrieron uno o más ciclos de inflación, ruptura y deformación. Cuando se llevó a cabo la evaporación en vapor sobrecalentado el período de temperatura constante se dió cerca a la temperatura de saturación, este período cubrió la mayor parte del ciclo total de secado.

Cuando se secó jugo de tomate, el secado -
ocurrió más rápidamente en aire que en va-
por sobrecalentado, cuando la temperatura
fué de 150°C. En este caso se notó un pe-
ríodo de temperatura constante en aire;
quien sabe debido a su baja concentración.
A 250°C no hubo diferencia apreciable en -
la razón de secado entre los dos medios.
Para todas las condiciones las partículas
se tornarón de color marrón, causada por
la degradación de los pigmentos.

Cuando se secó café, la proporción de seca-
do fué considerablemente más alta en aire-
que en vapor a 145°C. Se observó infla-
miento y rotura de las partículas durante-
la segunda parte del período de secado, a
esta temperatura, cuando se usó vapor. A
250°C se notó una alta proporción de seca-
do para el vapor comparando con el aire.
Durante todas las operaciones que se usó -
vapor ocurrió la rotura e inflamamiento de
la partícula, lo que no ocurrió con ningun-
o de los casos en que se uso aire, tam-
bién se notó que el aire producía partícu-
las más grandes que el vapor.

Cuando se secó leche, el secado fue considerablemente más rápido en vapor que en aire a 150°C. En ambos medios ocurrió el inflamamiento y rotura, pero ocurría el primero en mayor grado que en vapor; los dos dieron partículas grandes y huecas, como también produjeron un color marrón claro.

Al comparar estas historias de secado de estos materiales (alimenticios) se concluye que se da más rápidamente el secado en aire que en vapor a 150°C, mientras el vapor sobrecalentado da una razón equivalente de secado a 250°C. En lo referente a las propiedades finales del producto para los dos medios estos dependen de las propiedades del producto a secar. La degradación por efectos térmicos fueron igualmente severas en aire y vapor.

Estos dos autores concluyeron: que las correlaciones de los coeficientes de transferencia de calor usados para pequeñas gotas de líquidos puros en aire, es también válido en la evaporación en vapor sobrecalentado. Bajo consideración de comparación el coeficiente de transferencia de

calor en vapor es más o menos un 15% menos, que el que ocurre en aire. A temperatura de bulbo húmedo iguales, la razón de evaporación es más grande en aire que en vapor. Cerca a los 100°C la razón de evaporación es muchas veces más grande en aire que en vapor, y a altas temperaturas como 400°C, las razones de evaporación son casi iguales.

Las gotas que contienen solamente sólidos inertes suspendidos se secan de igual manera que gotas de agua pura. La diferencia radical en los mecanismos internos de secado son causados por el incremento de la solubilidad, por la resistencia a la transferencia de masa y calor causado por la gran tendencia de la costra a inflarse o romperse, o a ser muy porosa, y por la generación de más superficie (en el momento de inflarse). No hay ninguna diferencia radical en las propiedades de producto seco, producido por aire o vapor sin embargo las gotas secadas en vapor producen partículas densas.

5.5.- EFECTO DE LAS VARIABLES DE OPERACION EN EL TAMAÑO DE PARTICULA Y DENSIDAD VOLUMETRICA.

- a) Flujo de Alimentación.- Un incremento de esta variable hará aumentar el tamaño de la partícula como, hará aumentar la densidad volumétrica, porque, al entrar, más masa cuando todas las variables están constantes, ésta se manifiesta con el aumento del tamaño.
- b) Cantidad de sólidos en la alimentación.- A mayor cantidad de sólidos, el tamaño de partícula aumentará, porque el tamaño de gota casi permanecerá inalterable.
- c) Temperatura de alimentación.- Este factor afectará haciendo disminuir la viscosidad, en lo que se refiere a la carga calorífica que pueda tener la alimentación por su temperatura es despreciable, comparado con el calor total necesario para su evaporación. Con respecto a la densidad volumétrica ésta disminuirá, con el aumento de la temperatura de alimentación, produciéndose partículas huecas.
- d) Tensión Superficial.- Esta influirá en forma indirecta a las partículas afectando en mayor grado en la atomización. Altos valores de tensión superficial producirá gotas de tamaño grande.

e) Temperatura del aire.- El efecto de esta temperatura depende de las características del material a secar. Pero regularmente esto afecta hinchando a las gotas y decreciendo la densidad volumétrica para aumentos de ésta.

6.- ELEMENTOS DE DISEÑO DE UN SECADOR POR ATOMIZACION.

6.1.- ESTABLECIMIENTO DE LAS VARIABLES DE OPERACION.

Los datos de diseño de ciertas variables de operación de un secador deben determinarse por pruebas experimentales, antes de que el diseño final sea realizado. En general la selección del atomizador el diseño de la cámara, y el sistema de recuperación del producto, estarán gobernados por las características de la solución o suspensión a secarse y las características deseadas del producto seco. Por ello es importante saber cual es la secuencia lógica que debe seguirse para obtener estos datos, pues ningún secador es lo suficientemente flexible como para tratar cualquier clase de producto bajo las características deseadas.

En general el primer paso es desarrollar un método seguro de obtención de datos de diseño de las variables de operación involucradas.

Generalmente las variables más importantes para las cuales los datos de diseño deben establecerse son:

- Naturaleza del producto deseado.
- El método de atomización utilizado.
- Concentración de la alimentación.

- Temperatura de secado.
- Necesidad de enfriamiento con corriente secundaria de aire.
- Método de separación del producto.
- Recuperación de finos.

i) NATURALEZA DEL PRODUCTO DESEADO.

Cualquier material puede ser secado por este método hasta obtener partículas de diferentes tamaños y formas, que pueden ser esferas huecas, sólidas, aglomeradas o con gran porcentaje de fragmentados. La decisión de las características del producto final, es fundamental para decidir el tipo de secador a seleccionarse y las técnicas de su operación. Las esferas huecas son de baja densidad a granel, mientras que las esferas sólidas por la relativa ausencia de gas atrapado, dan una mayor densidad.

a) Tamaño de Partícula y distribución de partículas.-

Son importantes por la influencia en la densidad a granel, solubilidad, color, segregación y producción de polvos muy finos. Las partículas coloreadas que son grandes y densas tienden a verse más oscuras y más vívidas, que las partículas pe-

queñas de la misma composición.

La creación de polvo por una atomización ,
trafina crea, en los productos usados par
lavar, el peligro de estornudo y el probl
ma de manipularlos en otros. Es más fáci
que se produzca un producto, con un rango
amplio de tamaños de partículas en los se
dores grandes, que en uno pequeño. La pr
ducción de partículas pequeñas en un rang
de tamaños también pequeño generalmente
obtiene directamente del atomizador. Gen
ralmente es más fácil producir partículas
grandes huecas con la mayoría de los produ
tos, que producir partículas grandes sólida
das.

Es importante entender, como la selección
de un producto fino o grueso afecta el dis
ño del secador. Si el secador ha sido dis
ñado para producir un producto fino, en ge
neral rara vez es posible modificarlo par
producir un producto de partículas grandes
de otro lado un secador diseñado pa pro
ducir un producto grueso, generalm
más grande y más barato que uno
ducto fino. Es importante e
tal decisión sea bien e
la inflexibilidad

tades involucradas si se requieren cambios ulteriores en las características del pro-ducto.

b) Densidad a granel (Bulk density)

Es una de las propiedades más importantes del producto a ser estudiada y determinada para el diseño. La selección de esta prop-iedad generalmente depende de factores económicos tales como, tipo y costo de de pósitos, de transporte y los requerimienu-tos de mercadeo. Los factores principales a considerar son:

- Características Coloidales.- Asumiendo - que la operación de secado va a ser rea-lizada con soluciones o suspensiones a - cuosas, hay dos clases generales que di- fieren marcadamente en el tipo de producu-to obtenido, bajo ciertas condiciones y sigue un comportamiento similar bajo otras. Los materiales que tienen distin- tas propiedades coloidales hidrofílicas, son de una clase y aquellos del tipo no hidrofílico (no necesariamente hidrofóbi- co), son de la otra.

A fin de predecir el tipo de partículas- que se obtendrán en el secado, es útil

entender a cual de las dos categorías pertenece el material que va a ser secado, ya que las condiciones que pueden producir partículas grandes y densidades a granel bajas con materiales hidrofílicos, podrían producir partículas pequeñas y altas densidades a granel con materiales no hidrofílicos.

- Concentración de Sólidos.- Las soluciones de materiales hidrofílicos generalmente exhiben un gran incremento en la viscosidad con el aumento de sólidos. Bajo la mayoría de las condiciones del secado por atomización, los materiales de bajas densidades a granel disminuyen cuando la concentración de sólidos aumenta. En general, para materiales no hidrofílicos tales como el café, la leche, las sales inorgánicas, los pigmentos, los tintes etc., si hay un incremento en el contenido de sólidos aumentará la densidad a granel del producto. No siempre se puede predecir el efecto que tendrá un incremento en la concentración de un producto, porque concentraciones intermedias pueden presentar-

un comportamiento distinto al de concentraciones bajas o altas, tal como refiere Crosby (10), para las soluciones de sulfato de Sodio.

- Temperatura de la Solución.- Aumentando la temperatura en la mayoría de las soluciones hidrofílicas y no hidrofílicas se tiende a aumentar la densidad a granel del producto secado. Esto se ha encontrado principalmente para el café y el jabón, aún cuando para el Sulfato de Sodio no tiene mayor influencia (10)
- Temperatura del Aire de Secado.- La densidad a granel está influenciada significativamente por la temperatura del aire. Una alta temperatura tiende a producir densidades a granel bajas. Si se requiere una densidad a granel alta o partículas sólidas, el sistema debería ser diseñado para que el aire más caliente no encuentre al Spray recientemente formado.

Dirección relativa del flujo del aire.- Sin un sacrificio de la eficiencia y capacidad térmica es posible en el secado de algunos productos tales como el ja -

bón, introducir aire caliente por el fondo de la cámara y atomizar hacia abajo desde el tope o de los lados de la misma; esto es en contracorriente al aire. Dado que el Spray encuentra al aire parcialmente frío y húmedo, el producto predominantemente consiste de esferas sólidas o granulos y la densidad a granel es más grande que en el secado en cocorriente. La aglomeración es común en el secado en contracorriente, porque las partículas se secan durante su descenso, algunas alcanzan una densidad relativa más baja que otras con respecto al aire, y son llevadas hacia arriba, colisionan y se adhieren con las partículas húmedas. El producto de secadores en contracorriente tienen una apariencia menos uniforme que en un secador en cocorriente. Dado que las partículas más secas caen a través de la zona de los gases más calientes, este tipo de secado no está bien diseñado para la mayoría de materiales sensibles al calor, desde que las temperaturas de entrada tendrían que ser bajas trayendo como resultado secadores más grandes y consecuentemente más caros.

Una desventaja de flujo en contracorriente es el peligro de explosión, por una concentración de polvo acumulada en algún punto de la cámara, donde las partículas del peso apropiado son mantenidas en suspensión por el flujo en contracorriente. Aún más, una considerable acumulación de productos ocurre con el flujo de aire en contracorriente.

- Aditivos.- En el secado de jabones y detergentes se ha encontrado que la adición de sales inorgánicas como el Cloruro de Sodio a la alimentación incrementará la densidad a granel.

ii) SELECCION DEL METODO DE ATOMIZACION.-

La selección del atomizador que mejor se adecua al problema, puede automáticamente determinar el tipo de secador por atomización que va a usarse.

La determinación del mejor método de atomización para un producto nuevo requiere de pruebas experimentales, en los diferentes atomizadores que existen. Sin embargo rara vez se encuentran disponibles, por lo que no es posible hacer comparaciones y encontrar cual es

el mejor entre todos.

Hay ciertos criterios que se siguen en la selección, evaluación y comparación de los tres tipos de Atomizadores los cuales se indican en la sección 3.6.

iii) SELECCION DE LA CONCENTRACION APROPIADA.

La determinación de la concentración de la alimentación para propósitos de diseño puede ser hecha solo por pruebas experimentales. La concentración será determinada por las siguientes consideraciones:

- 1.- Efecto en la calidad y operación del secador.
- 2.- Efecto en la densidad a granel.
- 3.- La máxima concentración que puede ser bombeada. Esta es característico de la solución a pasta.
- 4.- Pérdidas de calor o costos de combustible.

En general la tendencia es seleccionar la máxima concentración compatible con estas cuatro consideraciones. La concentración más alta posible generalmente será determinada por el bombeo y requerimientos de Atomización, si la densidad a granel se desea alta, y si la calidad del producto no se ve afectada por la

concentración. Sin embargo frecuentemente hay limitaciones de calidad o de condiciones de operación en el grado de concentración posible con ciertos materiales.

iv) SELECCION DE LA TEMPERATURA DE SECADO.

La temperatura de secado está generalmente determinada solamente por la sensibilidad al calor del producto. Si el producto es completamente insensitivo, entonces la limitación de temperatura, generalmente la dan los materiales de construcción, la cantidad de calor que se puede suministrar al aire, o el efecto sobre algunas propiedades deseadas que puede causar la temperatura en el producto (10).

v) NECESIDAD DE ENFRIAMIENTO DEL PRODUCTO.

Los datos de diseño sobre este punto, también solo pueden ser establecidos por pruebas. A aquellos productos que requieren aire secundario, para el enfriamiento después del secado son generalmente los termoplásticos y ciertos productos alimenticios que contienen azúcar. Frecuentemente, la necesidad es la de mantener las superficies interiores frías para prevenir el pegado de partículas.

vi) METODO DE SEPARACION DEL PRODUCTO.-

Dos métodos principales son usados para la separación del producto.

1.- El producto es transportado desde el secador por los gases de salida. Este es generalmente el método más fácil de diseñar y es usado ampliamente cuando se obtiene un producto fino y el rompimiento de partículas no es un inconveniente. Muchos esquemas han sido diseñados para la separación del producto por este método, el objetivo usual ha sido, en todos los casos, separar todo el producto para que ningún material seco permanezca dentro del secador en contacto con las superficies calientes.

2.- El segundo método está basado en el principio de separación de la mayor parte del producto del gas en la cámara de secado, separándolo a través de ventanas de descarga apropiadas, mientras que los gases de salida con polvo salen de un segundo colector de polvo. Este procedimiento es generalmente seguido cuando se desea un producto de partículas grandes con un mínimo de partículas rotas. Este es un di-

seño más difícil, debido a los problemas involucrados en la separación de los gases sin arrastrar un gran porcentaje del producto. De otro lado la clasificación de finos en el gas de salida que ocurre con este método frecuentemente da un producto libre de polvo.

vii) RECUPERACION DE FINOS.

Así como el proceso de secado por atomización crea un material subdividido, es evidente que la recolección de finos y polvo es una operación auxiliar importante. La eficiencia con la cual ambos; productos y polvo pueden ser recuperados podría hacer que la operación de secado no sea satisfactoria. Los sistemas de recolección, que pueden encontrarse en el secado por éste método son: de colectores ciclónicos, de filtros de mangas, y colectores húmedos o scrubbers. Estos sistemas son necesarios por las siguientes razones:

- 1.- La recolección del producto principal cuando el producto es transportado desde el secador por los gases de salida.
- 2.- La recuperación del polvo de los gases de salida después de la separación principal en la cámara del secador.

- 3.- La recuperación del polvo que escapa del colector ciclónico por el valor del producto. Podrían usarse los filtros de mangas o colectores húmedos.
- 4.- El lavado de los gases de salida de los recolectores ciclónicos, porque el polvo representa una molestia, pero la recolección no está justificada sobre una base económica. La selección y diseño de los diversos recolectores es dependiente de la naturaleza del polvo involucrado y su tamaño de partícula. Los procedimientos para la selección del equipo apropiado - se ha reportado en la literatura (5,11).

6.2.- DISEÑO Y FALLAS DE OPERACION QUE DEBEN EVITARSE.-

- MEZCLA SPRAY-AIRE POBRE.- La eficiencia de un secador es severamente afectada si el spray y los gases calientes no son eficientemente mezclados. La eficiencia de mezcla implica uniformidad, como rapidez. Si tenemos en cuenta que los tiempos de evaporación en la cámara son de unos cuantos segundos, consecuentemente el tiempo requerido para mezclar el gas y el spray eficientemente debería ser del mismo orden de magnitud del tiempo de secado; por otro lado sino los beneficios de la atomización se pierden. En general, la gran multitud de diseños de seca

dores reflejan la gran cantidad de intentos realizados para mejorar el mezclado del gas-spray . Sin embargo muchos de ellos introducen complicaciones más serias, tales como turbulencia violenta, lo cual tiende a promover deposición en la pared o degradación del producto.

Poco es lo que se conoce acerca de las corrientes de aire complicadas en un secador, resultante, - de la transferencia de momentum del spray al gas, repentino enfriamiento del gas con reducción de volumen y grandes gradientes de temperatura en - tre el gas caliente y las gotas evaporándose. Si hay imposición de estos fenómenos, el movimiento violento del aire para promover la mezcla; tales como velocidades rotacionales altas común en muchos diseños, harán que el patrón de flujo resultante sea difícil de predecir.

Actualmente hay muchos tipos de secadores que incluyen características de diseño para las cuales estas se han realizado sin los suficientes fundamentos para justificarlos.

- DEGRADACION DEL PRODUCTO.

El diseñador del secador debería evitar el paso del producto a través de los ventiladores u otro equipos, los que causan la degradación de las partículas. Esto aumenta el problema de la recu-

peración del polvo tanto como la degradación de las propiedades de producto.

- PERFORMANCE NO UNIFORME DEL ATOMIZADOR.

Una falla seria de operación puede encontrarse en conexión con una performance no uniforme del atomizador. La no uniformidad de la atomización puede ser de dos tipos:

- 1) No uniformidad de la distribución de tamaños de partículas, esto es la creación de un porcentaje más alto de finos o partículas gruesas que la función de distribución usual y
- 2) La no uniformidad de la distribución en peso en el patrón del spray.

El primer tipo conducirá al sobrecalentamiento y degradación de las partículas finas o el secado insuficiente de las partículas gruesas y la consecuente adherencia del material húmedo en las paredes de la cámara de secado. Esta falla puede evitarse por la selección del atomizador apropiado y por la operación del mismo dentro del rango de capacidad de diseño. No es imposible tener un spray no uniforme desarrollado durante la operación como resultado de la erosión taponamiento e incrustación del atomizador.

El segundo tipo de no uniformidad, en la distribución del spray es debido generalmente a un

mal diseño del atomizador. Con los discos atomizadores, la alimentación debe ser uniformemente distribuida encima del disco, porque ningún valor de la rotación del disco corregirá la no uniformidad de la distribución de la alimentación. El efecto de tal distribución mala es de desba--lancear el proceso de evaporación, resultando de ello consecuencias ulteriores en el flujo del aire y movimiento del producto en el secador. Por supuesto, las fallas operacionales, tales como obturación pueden causar la no uniformidad en la distribución del spray.

Pueden encontrarse otras dos no uniformidades que traen consecuencias negativas en la atomización y la performance del secador. Ellas son: El flujo de alimentación no uniforme y la concentración no uniforme.

6.3.- PERFORMANCE DEL SECADOR POR ATOMIZACION.

En general, los secadores operan en un amplio rango de condiciones. Ellos manipulan soluciones diluídas del 1% hasta pastas de 70% de concentración de sólidos. Pueden operar con temperaturas de entrada entre 175°F y 1400°F. El calor para el secado puede obtenerse del vapor de agua, aceite, gas, carbón o electricidad.

En la industria de alimentos, un gran porcentaje de secadores emplean calentadores de vapor indirectos para el calentamiento del aire y la temperatura de entrada estará limitada por la presión de vapor disponible. Esto impone un tope en la capacidad evaporativa para una cámara de tamaño o capacidad de aire fijados. El vapor de agua tiene muchas ventajas:

- 1.- Cuando hay suficiente capacidad de evaporación el uso del vapor reduce la cantidad de atención y labor normalmente necesitada para un sistema de calentamiento directo.
- 2.- El calentamiento indirecto es mas limpio. No se requiere equipo auxiliar para la puesta en marcha y no hay peligro de ensuciar el producto con hollín, tal como puede ocurrir con una combustión incorrecta en sistemas de calentamiento directos.
- 3.- No es relativamente peligroso, dado que las temperaturas son raramente lo suficientemente altas para que los productos en las paredes ardan.
- 4.- No es caro si se usa vapor de baja presión para el precalentamiento de la alimentación en cuyo caso el consumo puede ser tan bajo como de 1.4 a 2 lb. de vapor/lb. de agua evaporada.

5.- El uso de la temperatura del aire de entrada relativamente baja es conducida para alcanzar polvos de alta densidad. Otro método de calentamiento indirecto del aire es el de pasarlo a través de un intercambiador de calor calentado por los gases residuales de la caldera antes de descargarlos a la atmósfera. Un calentador de vapor se instala en el sistema principalmente como medio de regular la temperatura de aire caliente pero también puede ser usado cuando la planta se está poniendo en marcha.

La recuperación de calor de los gases de salida siempre han sido de competencia del ingeniero. Con secadores que tienen una capacidad evaporativa de 1000 lb. de agua/hr, se refiere que no es inusual descargar a la atmósfera 1'000,000 btu/hr. La utilización de los gases calientes de salida para la preconcentración es una práctica establecida de una mejor utilización del calor, y sirva con el propósito adicional lavador y recuperador de sólidos suspendidos.

Existen muchos secadores que utilizan preconcentradores y la recuperación de calor se puede usar para este fin. Los secadores por atomización están generalmente controlados por la temperatura de salida del gas. Esta temperatura es extremadamente sensitiva a los cambios en la alimentación, velocidad

del aire y temperatura de entrada del mismo. Aún más, cualquier desbalance en estas variables se nota rápidamente en la temperatura de salida desde que el tiempo de secado es materia de unos pocos segundos.

.- TRABAJO EXPERIMENTAL.

7.1.- INTRODUCCION.

Como se mencionó en la Introducción inicial de este trabajo, es muy poco lo que se conoce acerca de los factores que condiciona el tipo de equipo del que se dispone en el Laboratorio de Ingeniería Química, por lo que el trabajo experimental, estuvo conducido a la determinación de dichos factores, así como de establecer la influencia de algunos de los parámetros de la operación.

En la parte 7.2 se describe la forma en que se realizó la operación y se hicieron la mayoría de las mediciones, en 7.3 se muestran en forma de tablas y gráficos los resultados obtenidos de los cálculos, los cuales sirvieron para la discusión, que se encuentra en 7.4. En 7.5 se dan algunas recomendaciones para un próximo trabajo y en 7.6 se encuentran las conclusiones finales del trabajo.

7.2.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

El trabajo experimental se llevó a cabo en el secador del Laboratorio # 23 de Ingeniería Química de la UNI. El esquema de la operación aparece en la Fig. 7.1. El secador utilizado es de procedencia sueca, de la firma Niro-Atomizer tipo Minor modelo

53-M0-2/Q, y sus dimensiones son:

Diámetro de la cámara	2.8 pies
Altura de la parte cónica	2.0 pies
Altura de la parte cilíndrica	2.5 pies.

La atomización de la alimentación es producida por un disco rotatorio de dos pulgadas de diámetro, con 24 ventanas de 0.13 pulgadas de ancho y 0.22 - pulgadas de alto. El movimiento del disco es originado por aire comprimido, que incide sobre una - turbina que se encuentra en el eje central del atomizador; este aire no ingresa a la cámara, sino más bien es expulsado al medio ambiente. La pre-- sión de ingreso para la regulación de los rpm del disco está manipulada por una válvula manual. Para la alimentación que ingresa al atomizador y va directamente hacia las ventanas del disco se regu- ló el flujo por medio de un rotámetro hasta un máximo de 0.3152 lb/min y fué inducida exclusivamente por gravedad.

El flujo de aire ingresa a la cámara por medio de un ventilador localizado debajo del tablero de controles, el cual indicó un flujo único de 3.75 - SCFM a 77°F; medido con un rotámetro a la salida - de la cámara. Un juego de seis resistencias que trabajan en forma independiente reguló la tempera- tura del aire de ingreso. La dirección relativa -

de las gotas con respecto al flujo de aire de este secador es del tipo cocorriente, pues la rotación del disco y el diseño de los álabes de salida del aire tienen la misma dirección. El patrón de flujo del aire dentro de la cámara es en espiral en cocorriente.

Los valores de humedad del aire de entrada que ingresa a la cámara, fueron basados en los datos del Senamhi, para los meses de Diciembre 81 y Enero 82; cuando fueron realizadas las corridas. Los valores de las humedades de salida del aire de la cámara fueron tomadas bajo el procedimiento de bulbo húmedo y bulbo seco, los cuales fueron localizados en la descarga del aire.

Las temperaturas tanto de ingreso como de salida del aire de la cámara, fueron medidas con termocuplas con su respectiva escala en grados centígrados localizados en el tablero de control. Para las medidas dentro de la cámara, se acondicionó una termocupla de fierro, constantan, la cual tenía fácil movimiento dentro de ella, esto facilitó la investigación de la distribución de temperatura

Los tacómetros, analógico y electrónico digital fueron usados para encontrar la relación entre la

7
presión de aire al disco y los rpm que inducía (Fig. 7.2). La densidad de las soluciones de sulfato de sodio para las concentraciones usadas, fueron halladas por el método del picnómetro, la viscosidad con el viscosímetro de Ostwald y la tensión superficial por capilaridad.

Se utilizó un horno eléctrico para el secado del producto de salida de la cámara, para identificar por diferencia de peso la humedad del producto, así como para poder observar de la mejor manera las partículas obtenidas en el microscopio. Las medidas fueron hechas en una balanza analítica.

El conteo y medición de partículas de las corridas se realizó en un microscopio, usando un objetivo NPL 16 y un ocular 10X, dando como resultado un aumento global de 200. El microscopio estaba provisto de un micrómetro que podía medir las partículas con una incertidumbre menor que 2.5 micrones.

Los datos obtenidos para las corridas números 20 y 24 aparecen en la Tabla 7.2b.

7.3.- DESCRIPCION DE TABLAS.

Con los datos de las Tablas 2 se han construido las Tablas 3 y 4 para las corridas número 2 y 24. Se escogieron ambas corridas porque las partículas obtenidas del secado eran totalmente esféricas y por lo tanto indirectamente estaban representando los tamaños de gotas obtenidas de la atomización. Se calculó los valores de frecuencia y frecuencia acumulada, columnas (5) y (6). La columna (11) fué calculada como una integral del diametro al cubo por la función de distribución normalizada para dichas corridas entre los límites cero y el diámetro que limita el rango, para el cual se realiza el cálculo, entre la integral en todo el rango. (Véase Apéndice A.2). Más adelante se demostrará que dicha función es una distribución raiz cuadrática normal y que los parámetros necesarios para los cálculos se pueden obtener a partir de la Fig.7.3.

La columna (12) se calculó con el grupo funcional- Func. y el diámetro final del rango en cuestión.

La Tabla 5 muestra los datos correlacionados de la curva B (Véase Fig. B.1 del Apéndice B), para los diferentes valores de porcentaje volumétrico acumulativo, así como los valores que proponemos para una mejor estimación de la distribución de gotas para las condiciones operadas, en el presente estudio, valores VP.

Las Tablas 7.6 y 7.7 muestran principalmente la estimación de los diámetros medios de Sauter a partir de la forma integral de la distribución (D_{VS}^*) y de la ecuación de Friedman (D_{VS}).

La mayoría de los cálculos realizados que aparecen en las tablas se encuentran en los de cálculo del Apéndice A.

TABLA 7.1.

PROPIEDADES FISICAS DE LAS SOLUCIONES DE SULFATO DE SODIO.

C %	ρ gr/cm	μ (cp)	dy/cm
10	1.1043	1.0966	48.70
15	1.1569	1.3182	37.23
20	1.2142	1.4632	72.03

TABLA 7.2.a

RANGO DE CONDICIONES DE OPERACION DEL ESTUDIO REALIZADO

RPM	3500	9500
w(lb/min)	0.017	0.052
μ (cp)	1.0966	1.4632
J(dy/cm)	48.70	72
ρ (lb/ft ³)	1.104	1.214
Diámetro del disco 2"		
# de Ventanas	24.	

TABLA 7.2.

DIAMETROS DE PARTICULAS (MICRONES)

R A N G O	NUMERO DE PARTICULAS EN UN INTERVALO	CORRIDA # 2 (RPM = 3500)	CORRIDA # 2 (RPM = 9500)
1 - 5	1	1	1
6 - 10	5	5	12
11 - 15	13	13	55
16 - 20	24	24	72
21 - 25	34	34	91
26 - 30	39	39	84
31 - 35	40	40	57
36 - 40	38	38	50
41 - 45	28	28	36
46 - 50	20	20	25
51 - 55	14	14	12
56 - 60	9	9	5
61 - 65	6	6	3
66 - 70	3	3	3
71 - 75	2	2	1

TOTAL

276

507

TABLA 7.3.-

DISTRIBUCION DE PARTICULAS (MUESTRA # 2)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RANGO	D.	f(D)	Free	FreeAc	D ² (CD)(10 ⁻²)	D ³ f(CD)10 ⁻³	% (8)	Σ%(9)	% V	% V
1 - 5	3	1.73	0.36	0.36	0.09	0.03				
6 - 10	8	2.83	1.81	2.17	3.20	2.56	0.02	0.02	0.019	2.
11 - 15	13	3.61	4.71	6.88	21.97	28.56	0.17	0.19	0.224	2.
16 - 20	18	4.24	8.70	15.58	77.76	139.97	0.85	1.04	1.196	3.11
21 - 25	83	4.8	12.32	27.90	179.86	413.68	2.51	3.55	3.963	3.48
26 - 30	28	5.89	14.13	42.03	305.76	856.13	5.20	8.75	9.563	3.81
31 - 35	83	5.74	14.49	56.52	435.60	1437.48	8.73	17.48	18.42	4.11
36 - 40	38	6.16	13.77	70.29	548.72	2085.14	12.67	30.15	30.02	4.40
41 - 45	43	6.56	10.14	80.43	517.72	2226.20	13.52	43.67	43.11	4.66
46 - 50	48	6.93	7.25	87.68	460.80	2211.84	13.43	57.10	56.18	4.92
51 - 55	53	7.28	5.07	92.75	393.26	2084.28	12.66	69.76	67.98	5.16
56 - 60	58	7.62	3.26	96.01	302.76	1756.01	10.67	80.43	77.74	5.38
61 - 65	63	7.94	2.17	98.18	238.14	1500.28	9.11	89.54	85.23	5.60
66 - 70	70	8.25	1.09	99.27	138.72	943.30	5.73	95.27	90.62	5.82
71 - 75	73	8.54	0.72	99.99	106.58	778.03	4.73	100.00	04.28*	6.02
		276			3730.94	16463.49				

* DE LA CURVA 1 SE ESTIMAN VALORES MAS GRANDES DE D.

TABLA 7.4.

DISTRIBUCION DE PARTICULAS (Muestra # 24)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RANGO	D_i	$\sqrt{Vol.}$	f(D)	Free	Free Ac	$D^2 f(D) \times 10^2$	$D^3 f(D) \times 10^{-3}$	%(8)	$\Sigma\%(9)$	% V
1 - 5	3	1.73	1	0.2	0.2	0.09	0.03			
6 - 10	8	2.83	12	2.37	2.57	7.68	6.14	0.05	0.03	0.1061
11 - 15	13	3.61	55	10.85	13.42	92.95	120.84	0.64	0.67	0.8300
16 - 20	18	4.24	72	14.20	27.62	233.28	419.90	2.24	2.91	3.836
21 - 25	23	4.8	91	17.95	45.57	481.39	1107.20	5.90	8.81	8.443
26 - 30	28	5.29	84	16.57	62.14	658.56	1843.97	9.83	18.64	16.88
31 - 35	33	5.74	57	11.24	73.38	620.73	2048.41	10.92	29.56	28.10
36 - 40	38	6.16	50	9.86	83.24	722.00	2743.60	14.62	44.18	40.87
41 - 45	43	6.56	36	7.10	90.34	665.64	2862.25	15.26	59.44	53.75
46 - 50	48	6.93	25	4.93	95.27	576.00	2764.80	14.74	74.15	65.33
51 - 55	53	7.28	12	2.37	97.64	337.08	1786.52	9.52	83.67	75.46
56 - 60	58	7.62	5	0.99	98.63	168.20	975.56	5.20	88.87	83.27
61 - 65	53	7.94	3	0.59	99.22	119.07	750.14	4.00	92.87	89.05
66 - 70	68	8.25	3	0.59	99.80	138.72	943.30	5.03	97.90	93.12
71 - 75	73	8.54	1	0.20	100.00	53.29	389.02	2.07	99.97	95.86
			507			4874.68	18761.68			

TABLA 7.5.

DATOS PARA ESTIMACION DE LOS DIAMETROS DE GOTAS.

% V	CURVA B √X	VALORES VP √X
5	6.607	4.866
15.86	7.6066	5.865
50	9.1572	7.416
84.13	10.708	8.967
95	11.708	9.967

TABLA 7.6

CALCULOS DE D_{VS}^* A PARTIR DE LOS DATOS DE LA CURVA B

C	1	2	3	4	5
FUNC	0.3937	0.4832	0.6682	0.8041	1.1776
D_{50}	212.9	173.5	125.5	104.3	71.2
$10^{-6} V$	62.066	34.332	13.544	8.0111	2.7608
$10^{-4} A'$	27.582	18.484	9.8401	6.8822	3.3176
D_{VS}^*	225.02	185.7	137.6	116.4	83.22
D_{VS}	80.4	67.69	53.2	45.96	34.9
D_{VS}^*/D_{VS}	2.80	2.74	2.59	2.53	2.38
C	23	24	25	29	
FUNC	1.7204	1.194	1.0132	1.2240	
D_{50}	48.7	70.2	82.8	68.5	
$10^{-6} V$	0.98652	2.6446	4.1928	2.4824	
$10^{-4} A'$	1.6279	3.2299	4.4204	3.0835	
D_{VS}^*	60.6	81.88	94.85	80.51	
D_{VS}	26.85	33.61	38.09	34.99	
s^*/D_{VS}	2.26	2.44	2.49	2.30	

TABLA 7.7

CALCULO DE D_{VS}^* A PARTIR DE LOS VALORES VP

C	1	2	3	4	5	23	24	25	2
Func.	0.3937	0.4832	0.6682	0.8041	1.776	1.7204	1.194	1.0132	1.224
D50	139.7	113.2	82.31	68.4	30.97	31.97	46.06	54.28	44.93
10^{-6} V	18.40	10.26	4.125	2.472	0.3949	0.3304	0.8511	1.319	0.7970
10^{-4} A	12.12	8.146	4.371	3.075	0.7144	0.7562	1.469	1.992	1.403
D_{VS}^*	151.8	125.95	94.37	80.39	42.68	43.7	58.0	66.2	56.8
D_{VS}	80.4	67.69	53.2	45.96	34.9	26.85	33.61	38.09	34.99
D_{VS}^*/D_{VS}	1.89	1.86	1.77	1.75	1.22	1.69	1.73	1.74	1.62

TABLA 7.8

CALCULO DE DIAMETROS (MICRONES)

% V	CORRIDA # 2 (RPM=3500)				CORRIDA # 24 RPM (9500)			
	G O T A		PARTICULA	G O T A	G O T A		PARTICULA	G O T A
	CURVA B	VALOR VP	CURVA B		VALOR VP	CURVA B	VALOR VP	
5	90.7	49.0	25.35	36.6	19.8	21.78		
15.86	119.7	71.2	33.11	48.5	28.8	30.15		
50	173.5	113.8	47.68	70.2	46.1	43.42		
84.13	237.3	166.4	63.75	96.0	67.3	59.10		
95	283.7	285.6	77.01	114.8	83.2	72.44		

TABLA 7.9.- RESULTADOS DE LOS BALANCES DE CALOR

Y MASA.

ECHA	23.12.81	23.12.81	23.12.81	29.12.81
C %	20	20	20	20
C	1	2	3	4
θ	41.31	41.15	44.12	45.36
T_{in}	297	295	298	302
T_{out}	205	219	228	219
BSI	81	81	81	82
BHI	73	73	73	77
BS2	167	171	180	172
BH2	105	111	111	106
h1	0.0155	0.0155	0.0155	0.018
h2	0.042	0.033	0.031	0.037
maA1	1.859	1.859	1.859	2.154
ω	23.451	9.979	7.711	7.711
mP1	4.69	1.996	1.542	1.542
mP2	0.20	0.501	0.706	0.434
mPD	4.49	1.495	0.836	1.108
mas	18.761	7.983	6.169	6.169
maP	0.0031	0.002	0.0035	0.0027
mac	15.579	5.882	4.306	3.893
mA2	5.038	3.958	3.718	4.427
rpm	3500.	3500.	4800.	6000.
Dvs	80.4	67.69	53.2	45.96
H1	21.73	21.68	21.95	22.97
H2	23.83	22.039	22.034	23.053
QP1	2.13	0.906	0.70	0.714
QP2	0.0101	0.03	0.035	0.022
QCP	1.08	0.461	0.356	0.356
QL	0.891	0.997	1.001	1.020
ΔT	118.4	132.42	133.04	135.5
ΔTD	2	7.	7.	6

ABLA 7.9.- RESULTADOS DE LOS BALANCES DE CALOR Y MASA

CHA	29.12.81	07.01.82	07.01.82	08.01.82	11.01.82	11.01.82
C %	20	20	20	20	20	20
C	5	7	8	0	12a	12b
θ	27.16	33.97	34.14	28.64	15.02	15.31
T _{in}	307.	295.	304.	304.	295.	297.
T _{out}	219.	226.	226.	203.	208.	216.
BS1	82.	79.	79.	82.	79.	79.
BH1	77.	72.	72.	75.	76.	76.
BS2	171.	142.	151.	153.	144.	142.
BH2	106.	91.	101.	108.	102.	102.
h1	0.018	0.015	0.015	0.017	0.0185	0.0185
h2	0.0375	0.03	0.0315	0.046	0.0375	0.036
maA1	1.154	1.80	1.918	2.036	2.212	2.212
ω	7.711	7.711	7.711	23.451	7.711	7.711
mP1	1.542	1.542	1.542	4.69	1.542	1.542
mP2	0.593	0.517	1.268	0.224	0.190	0.297
mPD	0.949	1.025	0.274	4.46	1.352	1.245
mas	6.169	6.169	6.169	18.76	6.169	6.169
map	0.0015	0.0025	0.0047	0.0046	0.0036	0.005
mac	3.835	4.367	4.30	15.288	3.893	4.07
mA2	4.487	3.60	3.78	5.504	4.485	4.305
rpm	9500.	6000.	9500.	3500.	6000.	6000.
Dvs	34.90	45.96	34.9	79.77	45.96	45.96
H1	23.30	21.61	22.12	22.70	22.55	22.68
H2	23.358	21.609	22.07	24.877	22.60	22.68
QP1	0.714	0.6715	0.671	2.17	0.672	0.672
QP2	0.030	0.026	0.064	0.011	0.010	0.0149
QCP	0.356	0.356	0.356	1.083	0.356	0.356
QL	1.004	1.068	1.053	0.876	1.001	1.016
ΔT	133.47	141.94	139.88	116.44	132.96	134.99
ΔT_D	8.	11.	11.	5.	8.5	10.

BLA 7.9.- RESULTADOS DE LOS BALANES DE CALOR Y MASA.

CHA	11.01.82	11.01.82	11.01.82	11.01.82	11.01.82	11.01.82
%	20	20	20	20	20	20
	12c	12d	13a	13b	13c	13d
θ	15.00	15.00	15.02	19.34	15.12	15.00
Tin	295.	304.	295.	304.	304.	313.
Tout	225.	226.	226.	226.	223.	226.
BS1	79.	79.	79.	79.	79.	79.
BH1	76.	76.	76.	76.	76.	76.
BS2	145.	140.	172.	160.	147.	169.
BH2	96.	102.	105.	104.	103.	106.
h1	0.0185	0.0185	0.0185	0.0185	0.0185	0.0185
h2	0.0265	0.035	0.033	0.035	0.036	0.037
maA1	2.212	2.212	2.212	2.212	2.212	2.212
ω	7.711	7.711	7.711	7.711	7.711	7.711
mP1	1.542	1.542	1.542	1.542	1.542	1.542
mp2	0.478	0.589	0.405	1.195	0.405	
mPD	1.064	0.953	1.137	0.347	1.137	
mas	6.169	6.169	6.169	6.169	6.169	6.169
map	0.0049	0.0069	0.0048	0.0058	0.0040	0.0075
mac	5.207	4.189	4.430	4.189	4.072	3.949
mA2	3.169	4.180	3.946	4.186	4.305	4.425
rpm	6000.	6000.	9500.	9500.	9500.	9500.
Dvs	45.96	45.96	34.89	34.89	34.89	34.89
H1	20.19	23.14	22.55	23.14	23.14	23.73
H2	20.39	23.06	22.45	23.06	23.15	23.67
QP1	0.672	0.672	0.672	0.672	0.672	0.672
QP2	0.024	0.030	0.020	0.06	0.0203	-
QCP	0.356	0.356	0.356	0.356	0.356	0.356
QL	1.049	1.053	1.039	1.039	1.026	0.975
ΔT	139.4	139.88	138.01	138.01	136.36	129.5
ΔTD	16.5	11.	7.5	10.	11.5	11.5

ABLA 7.9.- RESULTADOS DE LOS BALANES DE CALOR Y MASA

HA	12.01.82	12.01.82	12.01.82	19.01.82	21.01.82	22.01.82
C%	20	20	20	20	25	20
C	14a	14b	14c	17	18b	20
θ	15.00	15.00	15.09	20.77	71.29	36.08
Tin	298.	298.	295.	304.	304.	304.
Tout	226.	226.	226.	223.	223.	223.
BS1	82.	82.	82.	82.	81.	82.
BH1	77.	77.	77.	77.	72.	74.
BS2	172.	145.	142.	154.	172.	158.
BH2	106.	102.	101.	104.	104.	102.
h1	0.019	0.019	0.019	0.018	0.0145	0.016
h2	0.035	0.034	0.034	0.0365	0.0305	0.032
maA1	2.271	2.271	2.271	2.154	1.741	1.918
ω	7.711	7.711	7.711	7.711	7.711	7.711
mP1	1.542	1.542	1.542	1.542	1.928	1.542
mP2	0.258	0.345	0.343	1.109		
mPD	1.284	1.197	1.199	0.433		
mas	6.169	6.169	6.169	6.169	5.783	6.169
map	0.0055	0.0052	0.0052	0.0039		
mac	4.202	4.371	4.371	3.952	4.248	4.251
mA2	4.184	4.064	4.064	4.367	3.662	3.836
rpm	4800	4800.	4800.	6000.	9500.	9500.
Dvs	52.5	52.5	52.5	45.96	33.57	35.31
H1	22.90	22.90	22.70	23.29	21.97	22.41
H2	23.05	22.74	22.74	23.31	21.42	21.99
QP1	0.714	0.714	0.714	0.714	0.875	0.714
QP2	0.013	0.0173	0.0172	0.0557		
QCP	0.356	0.356	0.0356	0.356	0.445	
QL	0.975	0.975	0.975	1,019	1.034	1.004
ΔT	129.5	129.5	129.5	135.43	137.45	133.36
$\Delta T D$	7.5	10.5	11.	10.	7.	9.5
c					213.8	208.4

BLA 7.9.- RESULTADOS DE LOS BALANQUES DE CALOR Y MASA.

HA	22.01.82	25.01.82	25.01.82	26.01.82	26.01.82	27.01.82
%	20	20	20	10	10	25
C	21	22	23	24	25	26
θ	23.60	31.14	30.48	46.81	43.91	25.45
Tin	304.	304.	304.	304.	304.	304.
Tout	219.	212.	208.	212.	198.	221.
BS1	82.	82.	82.	79.	79.	82.
BH1	73.	74.	74.	72.	72.	72.5
BS2	169.	167.	165.	168.	156.	174.
BH2	105.	105.	105.	104.	105.	105.
h1	0.016	0.0165	0.0165	0.015	0.015	0.015
h2	0.033	0.0355	0.0375	0.0325	0.038	0.033
maA1	1.918	1.977	1.977	1.800	1.80	1.80
ω	9.979	7.711	7.711	7.711	14.424	7.711
mP1	1.542	1.542	1.542	0.771	1.442	1.928
mP2			1.129	0.677	1.060	0.552
mPD			0.413	0.094	0.382	1.376
mas	6.169	6.169	6.169	6.940	12.982	5.783
maP			0.0033	0.0041	0.0046	0.0059
mac	4.131	3.982	3.649	4.336	10.22	3.617
mA2	3.956	4.254	4.493	3.900	4.560	3.960
rpm	3500.	4800.	15000.	9500.	9500.	6000.
Dvs	67.69	53.19	26.85	33.61	38.09	44.77
H1	22.41	22.56	22.57	22.12	22.15	22.15
H2	22.04	22.31	22.65	22.04	22.91	22.19
QP1	0.714	0.714	0.714	0.735	1.373	0.6811
QP2			0.057	0.034	0.053	0.028
QCP			0.356	0.178	0.333	0.445
QL	0.989	0.936	0.902	0.982	0.854	1.027
ΔT	131.42	124.42	119.90	130.48	113.41	136.48
ΔTD	6.	8.	7.5	7.	6.	5.
Tc	208.4	201.2	195.8	206.6	186.8	215.6

ABLA 7.9.- RESULTADOS DE LOS BALANCES DE CALOR Y MASA.

FECHA	27.01.82	27.01.82	28.01.82
C%	25	25	20
C	27	28	29
θ	25.56	25.21	64.74
Tin	304.	304.	304.
Tout	223.	216.	190.
BS1	82.	82.	82.
BH1	72.5	72.5	79.
BS2	174.	171.	156.
BH2	105.	106.	113.
h1	0.015	0.015	0.02
h2	0.0325	0.0375	0.0525
maA1	1.80	1.80	2.388
ω	7.711	14.424	23.451
mP1	1.928	3.606	4.690
mP2	0.701	1.299	3.755
mPD	1.227	2.306	0.935
mas	5.783	10.818	18.761
maP	0.0070	0.0079	0.0073
mac	3.676	8.110	14.873
mA2	3.900	4.50	6.269
rpm	9500.	9500.	14000.
Dvs	33.98	38.52	34.99
H1	22.15	22.15	23.59
H2	22.17	23.23	25.87
QP1	0.6811	1.274	2.17
QP2	0.035	0.065	0.189
QCP	0.445	0.833	1.083
QL	1.019	0.967	0.759
ΔT	135.43	128.42	100.84
ΔTD	6	5.	4.
Tc	212.0	204.8	176.0

7.10.- TABLA RESUMEN DE FLUJO DE ALIMENTACION,
CONCENTRACION,GR.DEPOSITADOS Y TIEMPO
DE OPERACION.

	rpm	ω (lb/min)	%	gr.DEPOSIT.	θ (min)
	3500	0.052	20	186.76	41.31
	4800	0.022	20	61.48	41.15
3	4800	0.017	20	32.88	44.12
4	6000	0.017	20	46.13	45.36
5	9500	0.017	20	23.3	27.36
7	6000	0.017	20	31.74	33.97
8	9500	0.017	20	6.24	34.74
9	3500	0.0517	20	123.43	28.64
12a	6000	0.017	20	18.95	15.02
12b	6000	0.017	20	17.65	15.21
12c	6000	0.017	20	14.59	15.00
12d	6000	0.017	20	12.97	15.00
13a	9500	0.017	20	15.72	15.02
13b	9500	0.017	20	4.94	19.34
13c	9500	0.017	20	15.8	15.12
14a	4800	0.017	20	17.89	15.00
14b	4800	0.017	20	16.59	15.00
14c	4800	0.017	20	16.1	15.09
17	6000	0.017	20	7.11	20.77
18b	9500	0.017	25	*	71.29
20	9500	0.017	20	*	36.08
21	3500	0.022	20	*	23.60
22	4800	0.017	20	30.9	31.14
23	1500	0.017	20	5.84	30.48
24	9500	0.017	10	2.26	46.81
25	9500	0.0318	10	13.2	43.91
26	6000	0.017	25	32.12	25.45
27	9500	0.017	25	28.45	25.56
28	9500	0.0318	25	32.77	25.21
29	14000	0.052	20	61.85	64.74

* NO SE LOGRO MEDIR EL MATERIAL DEPOSITADO.

ABLA 7.11.- PROPIEDADES DEL AIRE.

F	μ	K_d	C_p	Pr
0	0.0394	0.0131	0.240	0.718
50	0.0427	0.0143	0.240	0.712
100	0.0459	0.0157	0.240	0.706
150	0.0484	0.0167	0.241	0.699
200	0.0519	0.0181	0.241	0.693
250	0.0547	0.0192	0.242	0.690
300	0.0574	0.0203	0.243	0.686
400	0.0626	0.0225	0.245	0.681
500	0.0675	0.0246	0.248	0.680
600	0.0721	0.0265	0.250	0.680

μ lbm/hrft K_d BTU/hrft $^{\circ}$ F C_p BTU/lbm $^{\circ}$ F.

TABLA 7.12.- VALORES DE LOS TIEMPOS DE CONTACTO Y COEFICIENTES PELICULARES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

C	rpm	C%	ω	D_{vs}^*	Qh	T	A	θ_c	h_{tc}
18b	9500	25	7.711	42.68	4.1092	224.6	9.06	0.4261	354.84
20	9500	20	7.711	42.68	4.1028	225.2	9.61	0.2006	455.96
21	3500	20	9.979	125.95	4.3595	221.5	4.21	2.3724	119.83
22	4800	20	7.711	94.37	4.8708	214.4	5.62	1.4887	158.65
23	15000	20	7.711	43.7	5.3820	207.1	12.14	0.3206	440.70
24	9500	10	7.711	58.0	4.4921	219.5	7.78	0.6210	259.62
25	9500	10	14.424	66.2	5.9039	199.7	12.74	0.1931	223.14
26	6000	25	7.711	80.39	3.7648	230.1	1.53	1.0253	189.56
27	9500	25	7.711	42.68	4.4921	218.9	9.06	0.7338	352.58
28	9500	25	14.424	66.2	5.7756	199.9	10.92	1.7714	222.43

ω lb/min D_{vs}^* micrones Qh BTU/min T °F θ_c seg. h_{TC} BTU/hr ft² °F.

A ft²/min.

TABLA 7.13.-

AS EVAPORATIVAS, EFICIENCIAS TOTALES Y EFICIENCIAS EVAPORATIVAS

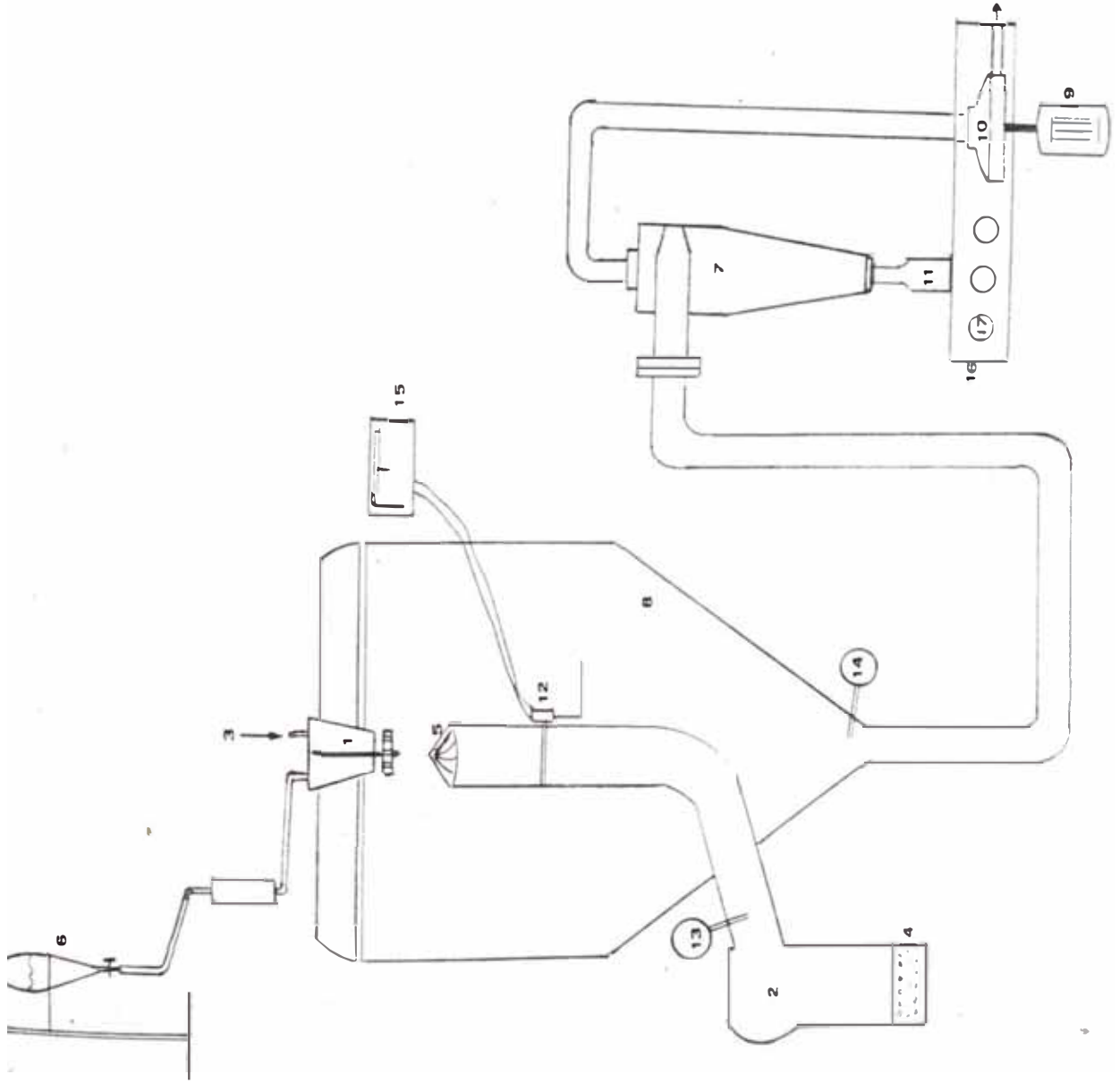
C	Q_E	E_T	E_E
1	3,100.58	42.59	49.73
2	4,685.11	35.51	41.42
3	5,355.85	32.26	37.74
4	4,583.89	37.73	44.03
5	4,530.17	39.11	45.60
7	5,445.72	31.94	37.40
8	5,388.63	34.67	40.63
9	2,969.07	46.50	52.74
12a	4,500.08	40.28	47.67
12b	4,915.26	37.16	44.02
12c	9,569.68	32.41	38.36
12d	5,333.49	34.67	41.05
13a	5,898.89	31.94	37.81
13b	5,317.28	34.67	41.05
13c	5,014.96	36.00	42.63
13d	4,863.95	37.18	43.83
14a	5,429.92	18.18	39.02
14b	5,793.33	18.18	39.02
14c	5,742.73	32.39	38.12
17	4,773.77	36.49	42.63
18b	5,187.71	36.32	41.97
20	5,299.88	36.49	42.19
21	4,987.82	38.29	44.27
22	4,494.17	41.44	48.04
23	4,069.06	43.24	50.13
24	4,777.92	40.89	47.92
25	3,640.30	47.11	55.21
26	4,651.50	37.39	43.23
27	4,784.40	36.49	42.19
28	3,721.20	39.64	45.83
29	2,757.13	51.35	60.25

Q_E CARGA EVAPORATIVA BTU/lb de agua evaporada

E_T - EFICIENCIA TOTAL %

E_E - EFICIENCIA EVAPORATIVA %

FIGURA 7.1.



1. Atomizador
2. Calentador del aire
3. Aire de presión
4. Toma de aire del ambiente
5. Aletas dispersoras
6. Alimentación
7. Separador Ciclónico
8. Cámara de Secado
9. Motor del Ventilador
10. Ventilador
11. Botella de Recolección
12. Termocupla móvil.
13. Termocupla del aire de entrada
14. Termocupla del aire de salida
15. Indicador de Temperatura
16. Panel de Instrumentos
17. Indicador de presión de aire - del Atomizador.

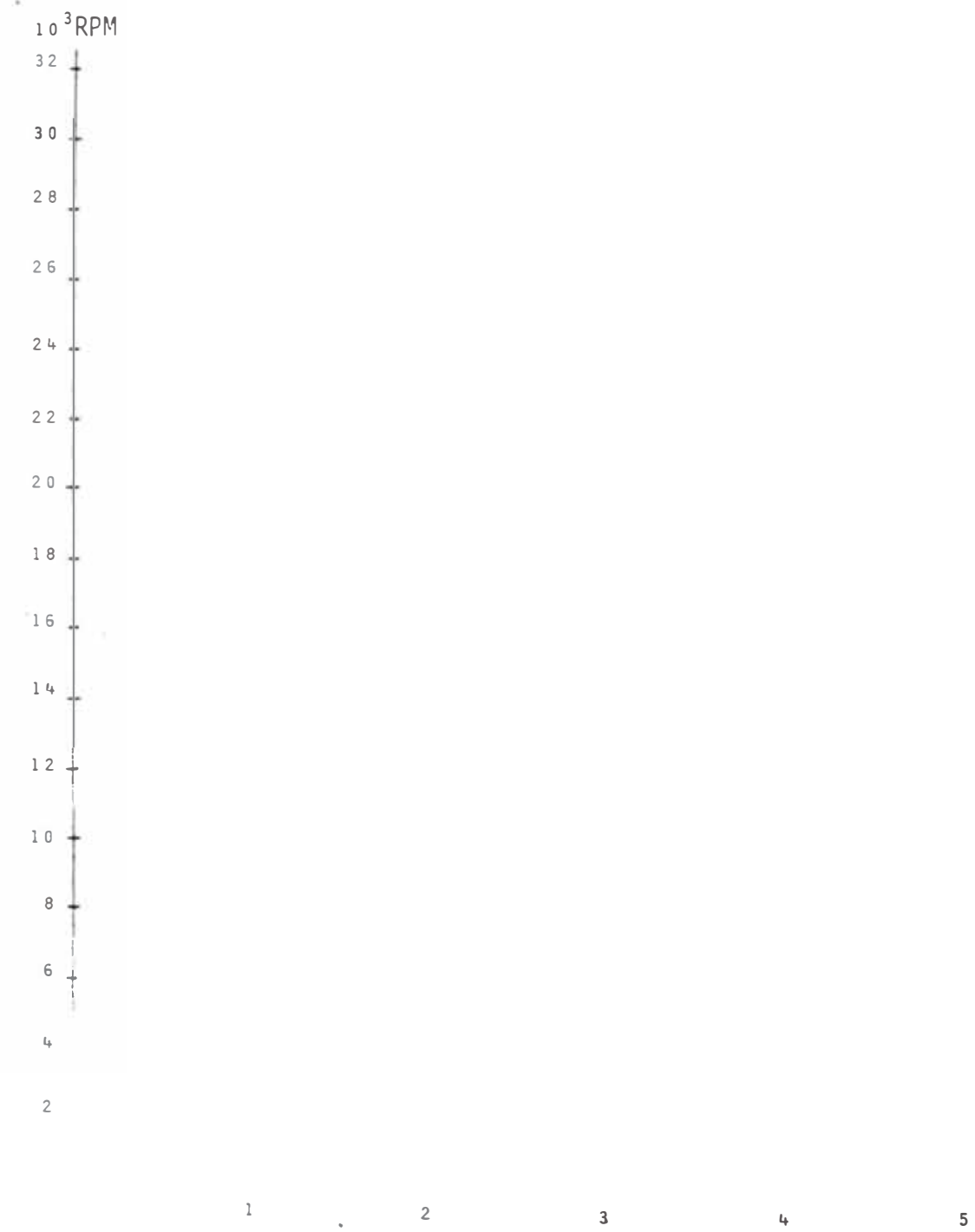


FIGURA 7.2. GRAFICO DE RPM versus PRESION.

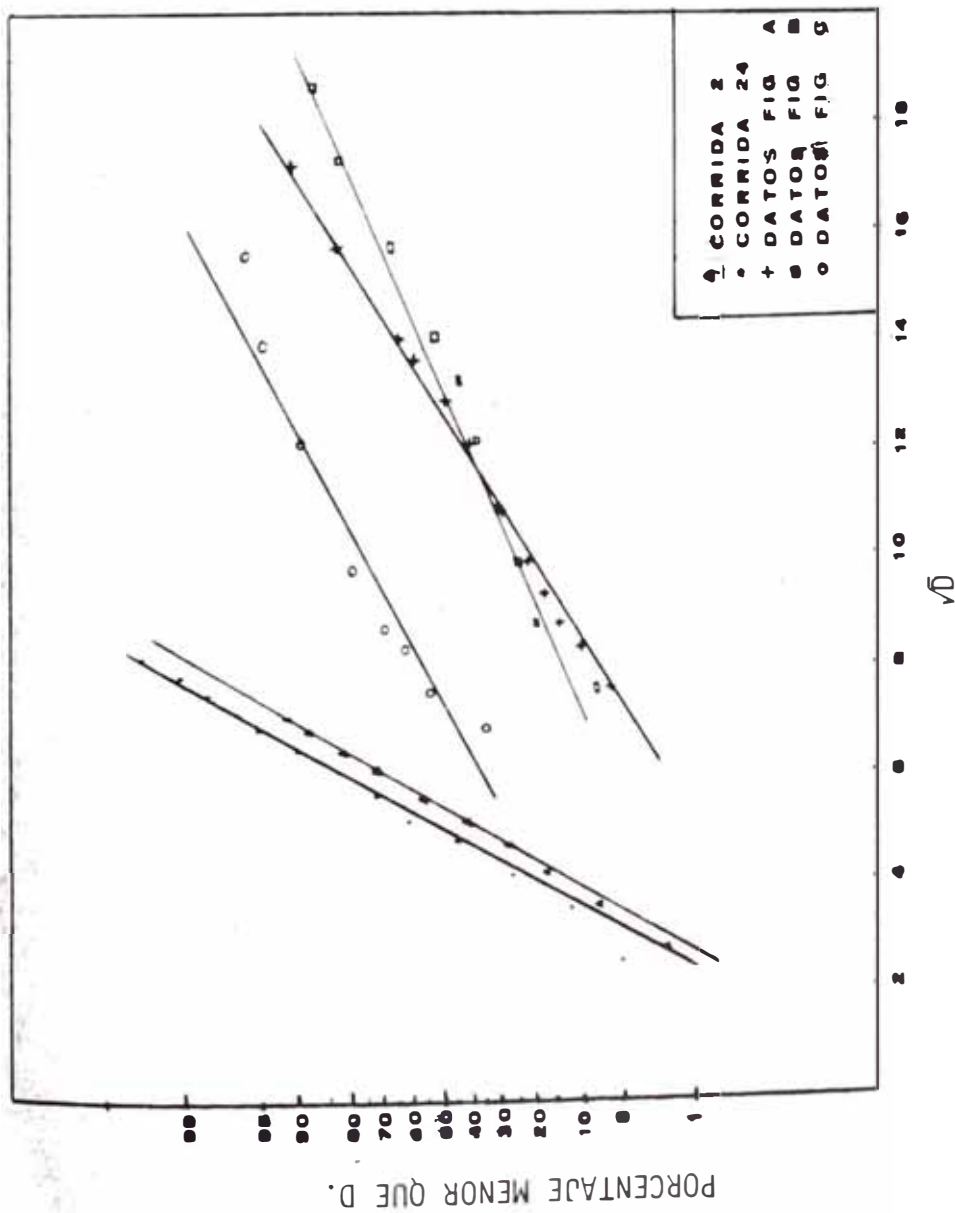


FIGURA 7.3. GRADO DE CORRELACION CON UNA DISTRIBUCION DE RAIZ CUADRATICA NORMAL PARA PARTICULAS.

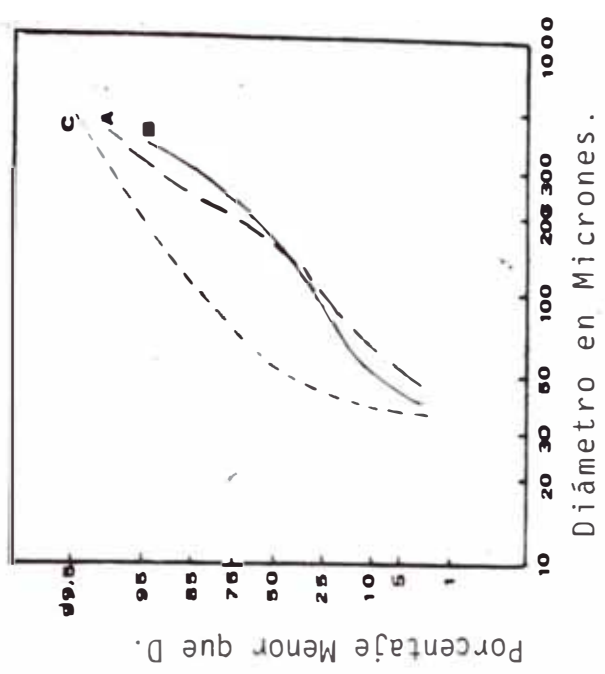


FIGURA 7.4. DISTRIBUCION DE PARTICULAS REF. (17)

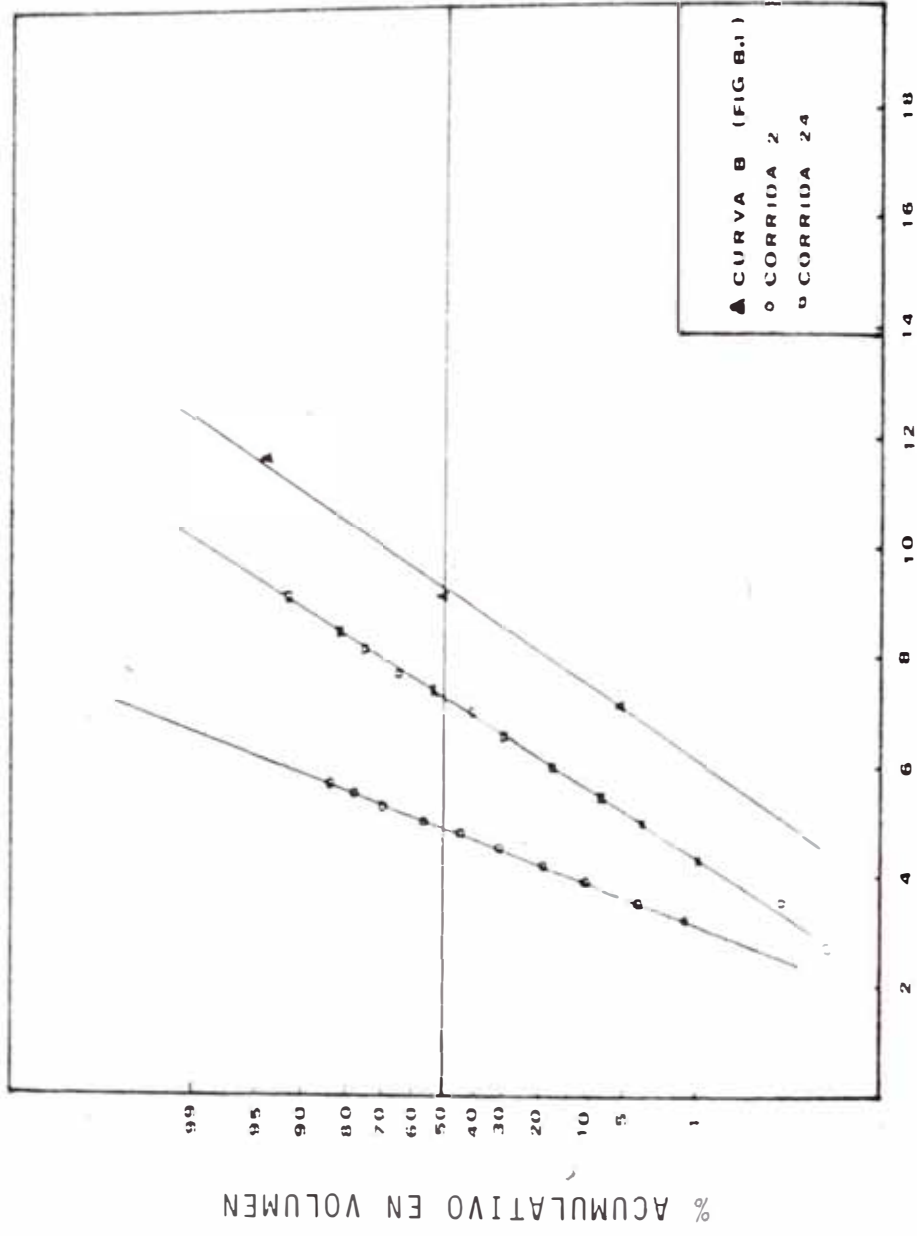


FIGURA. 7.5

GRUPO FUNCIONAL \sqrt{X}

V0 I MU A VS X

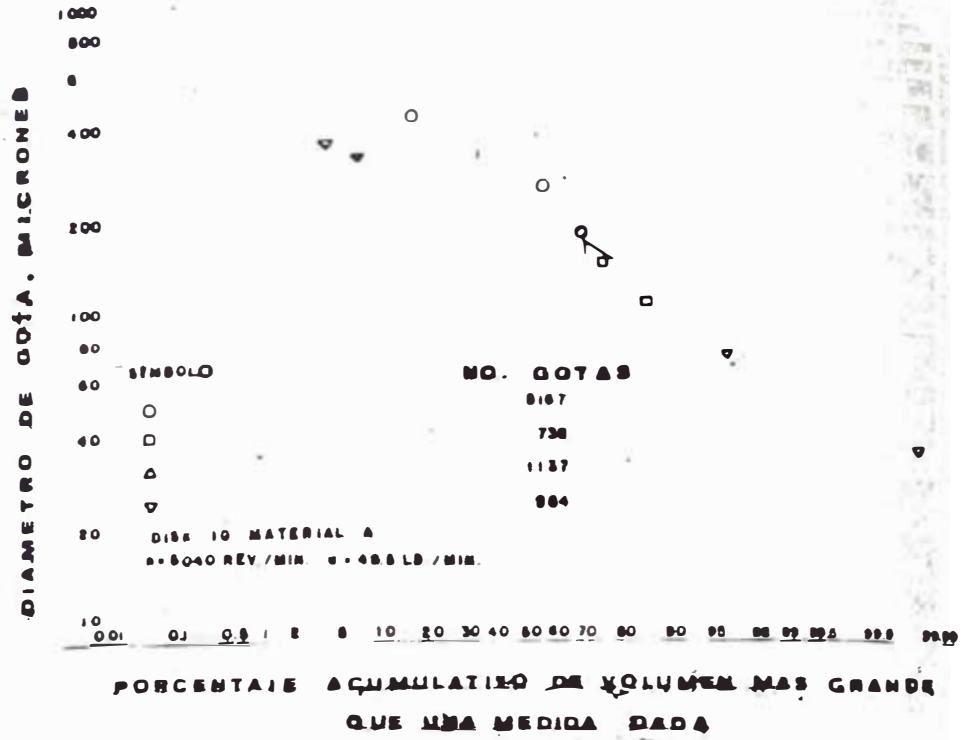


FIGURA 7.6. DISTRIBUCION DE GOTAS PARA ATOMIZADORES DE DISCO (15)

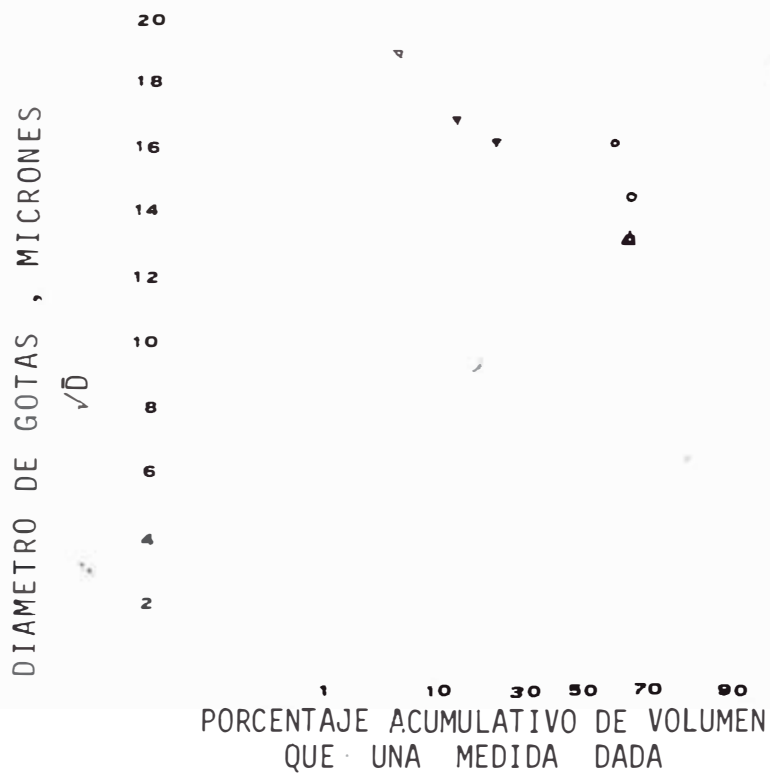
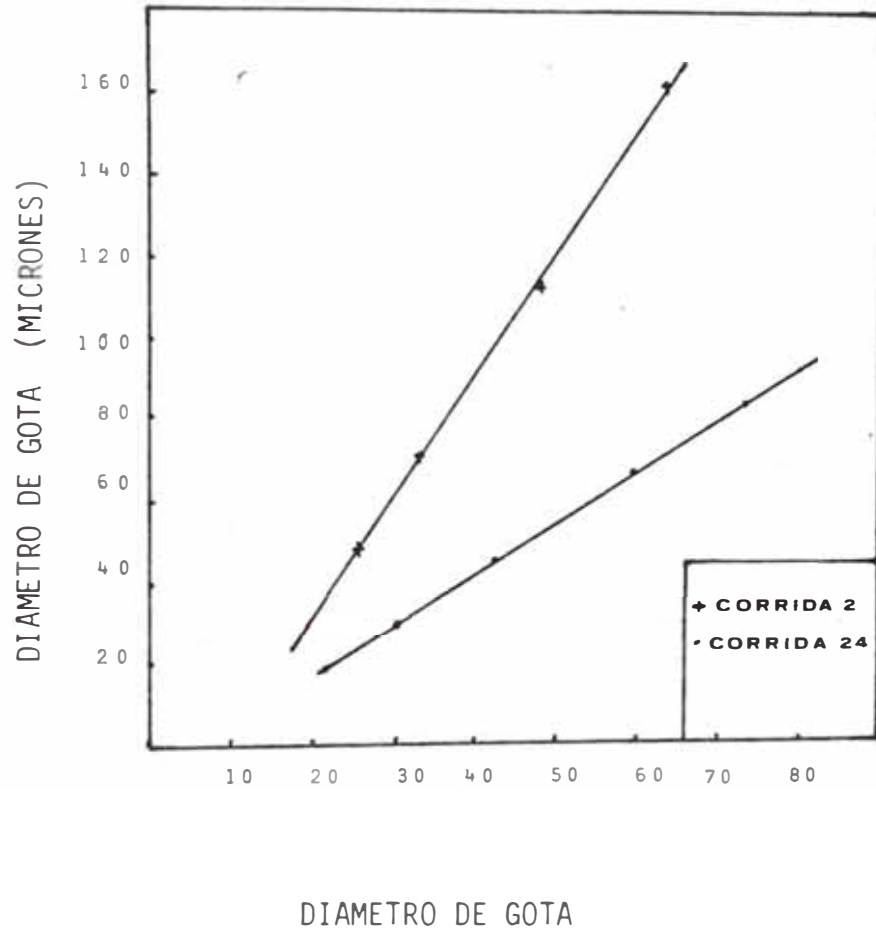


FIGURA 7.6a. DISTRIBUCIO

FIGURA 7.7

RELACION DE DIAMETRO DE GOTA A DIAMETRO DE PARTICULAS



8 0

7 0

W = 0.017 lb/min

N = 9500 RPM

6 0

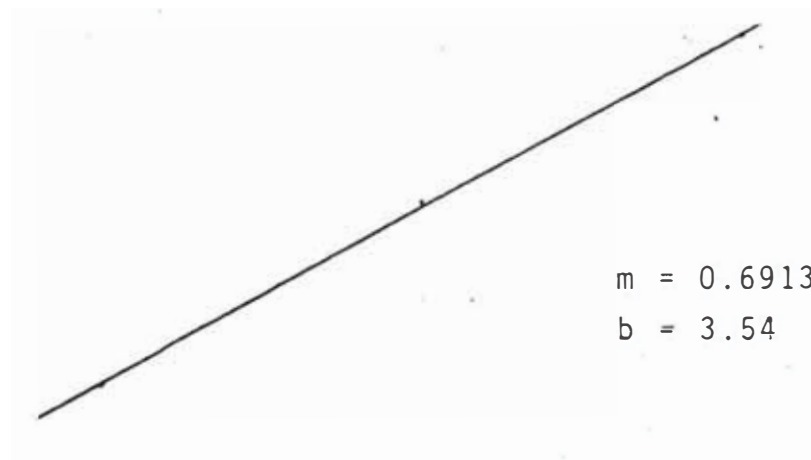
5 0

4 0

3 0

2 0

1 0



1 5

3 0

4 5

FIGURA 7.8 GRAMOS DEPOSITADOS DE SO_4Na_2 VERSUS TIEMPO

DATOS : CORRIDA 13

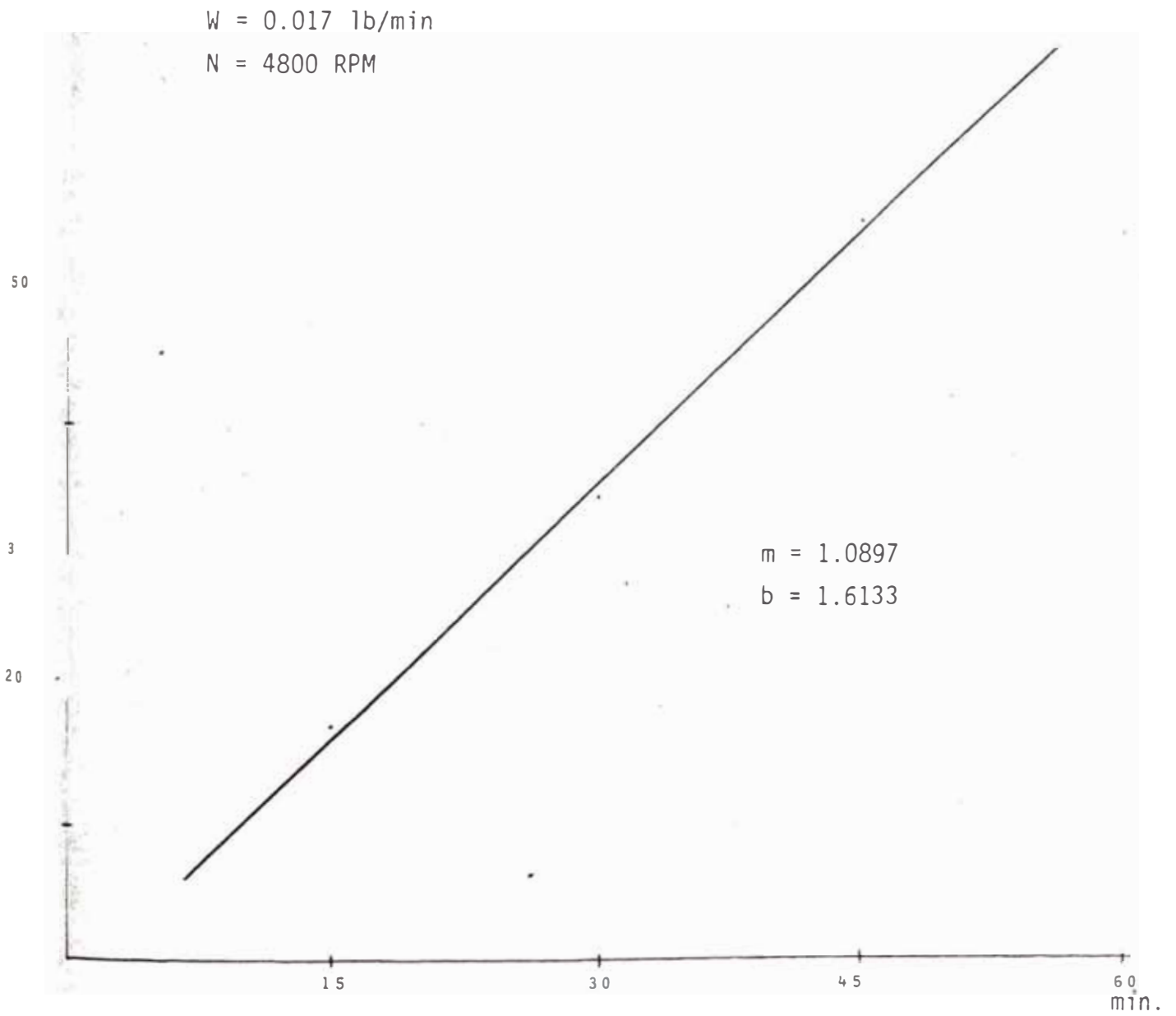


FIGURA 7.9. GRAMOS DEPOSITOS DE SO_4Na_2 VERSUS TIEMPO

DATOS: CORRIDA 14

W = 0.017 lb/min

N = 6000 RPM.

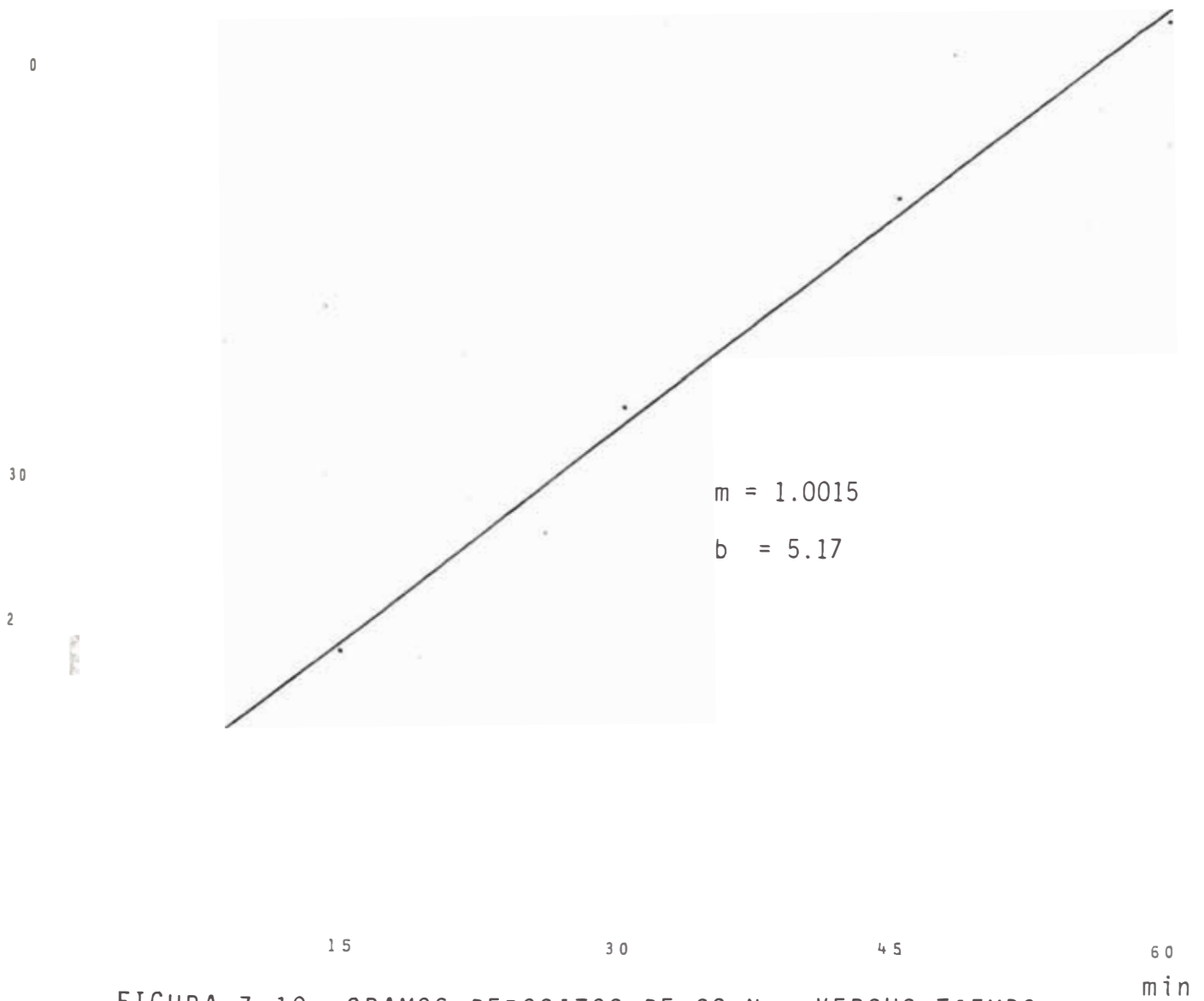


FIGURA 7.10 GRAMOS DEPOSITOS DE SO_4Na_2 VERSUS TIEMPO
DATOS: CORRIDA 12

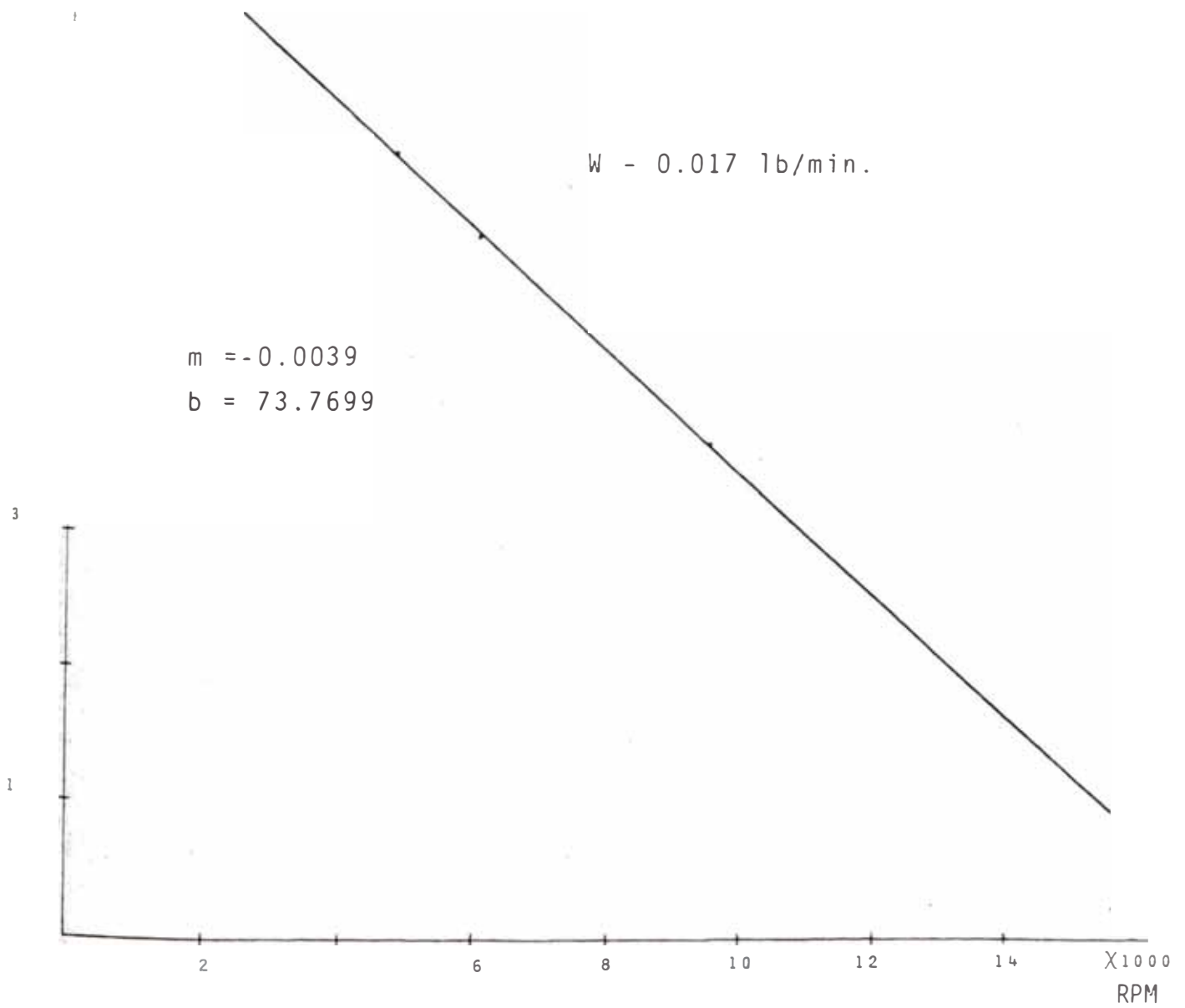


FIGURA 7.11 GRAMOS DEPOSITOS DE SO₄Na₂ VERSUS RPM

DATOS: CORRIDAS 12, 13 y 14

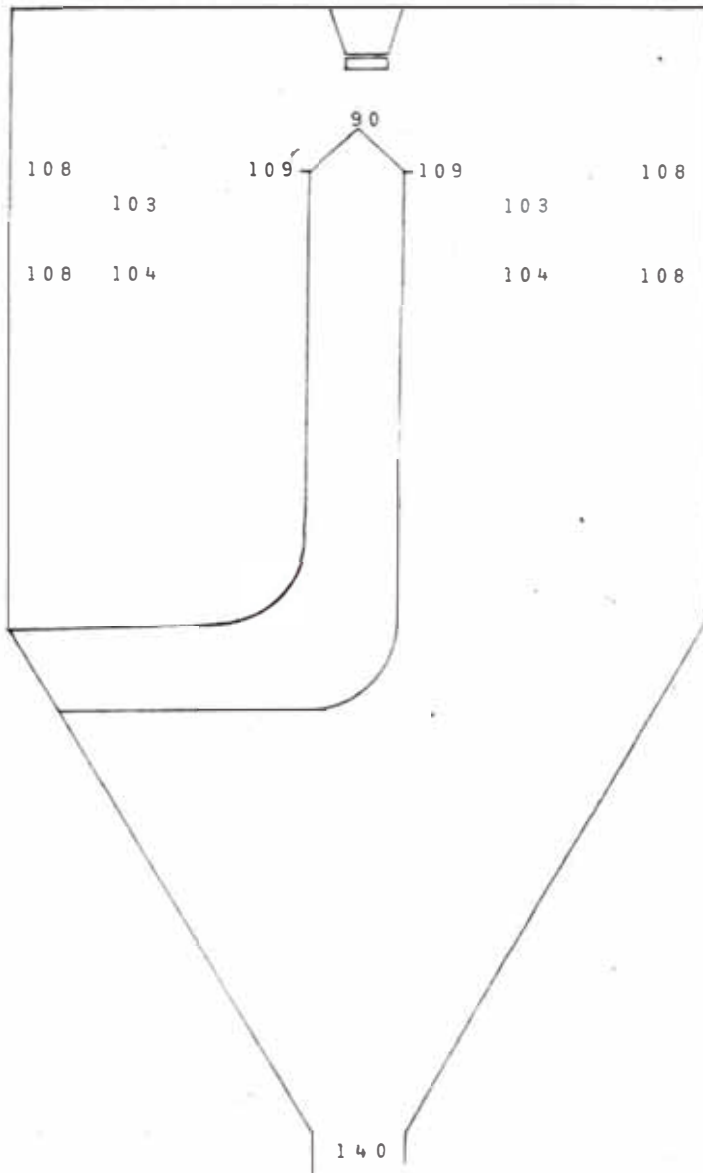


FIGURA 7.12 DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS EN GRADOS CENTIGRADOS DENTRO DE LA CAMARA VACIA.

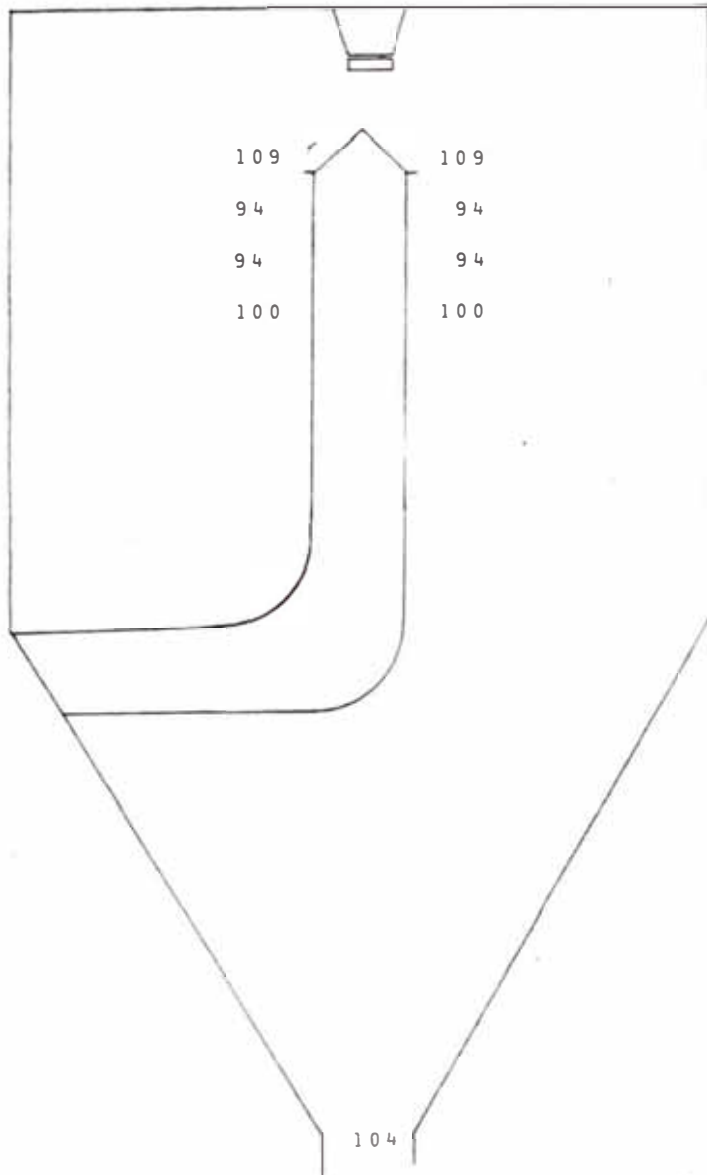


FIGURA 7.13. TEMPERATURA DENTRO DE LA CAMARA EN CENTIGRADOS EN OPERACION CORRIDA 22 y 31.

7.4.- DISCUSION DE RESULTADOS.

7.4.1.- ATOMIZACION.

Los factores que caracterizan un proceso de atomización aparte de las dimensiones del atomizador son el flujo de alimentación y la velocidad de rotación, los que determinarán principalmente las características del spray (diámetro medio de gota y función de la distribución de tamaños de las gotas).

El estudio que realizamos estuvo conducido a la determinación de esta distribución de gotas para el atomizador de disco que dispone el Niro-Atomizer. Se encontró que una distribución de raíz cuadrática normal reproducía, en buen grado los datos para las partículas medidas, (Fig. 7.3), obtenidas del proceso de secado, cuya ecuación es:

$$\frac{dN'}{dD} = f_N(D) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}S_G} \frac{1}{\sqrt{D}} \text{EXP} - \frac{(\sqrt{D} - \sqrt{D_{50}})^2}{2S_G^2} \quad | \quad 7.1$$

donde: $d(N')$ es el porcentaje de partículas medidas en un intervalo

dD , y S_G la desviación estandar geométrica.

Crosby (10) y Masters (21), muestran para el sulfato de Sodio, el primero y para una sal inorgánica el segundo, que se puede esperar-

en el secado, que todos los diámetros tengan el mismo porcentaje de reducción al comparar las gotas con las partículas, dicho de otra manera; que si conocemos la distribución volumétrica de gotas vs. la raíz cuadrada del diámetro, representada como una línea recta, el producto deberá ser representado por una línea recta paralela a la anterior.

La Fig. 7.5, mostraría que habría un mismo porcentaje de reducción de los diámetros si la curva B sirviera para reproducir los diámetros de las gotas.

De la Fig. B.1 (21) mostrada en el apéndice B, se puede demostrar que dichas distribuciones volumétricas para gotas deberían provenir de distribuciones de raíz cuadrática normal para el conteo de las mismas.

Por los conceptos de similaridad, (28), discos centrífugos similares al utilizado en este trabajo, deberían producir distribuciones de gotas similares. La fig. 7.4 aparece en (17) y los datos de ésta fueron graficados en la Fig. 7.3, mostrando un mejor ajuste de dichos datos a una distribución -

de raíz cuadrática normal, que a una loga
rítmica normal. Existe también el hecho -
de que no todos los discos centrífugos --
producen las mismas distribuciones como -
se puede deducir de la Fig. 7.6 (15), y -
7.6a donde al cambiar los valores original
es graficados vs. $\log D$ por \sqrt{D} , no mues-
tran una mejor correlación. El disco cen-
trífugo en cuestión es de ventanas curva-
das en la periferia.

Por todo lo expuesto se puede concluir -
que la distribución de gotas obtenidas
del proceso de atomización, para el con-
teo de las mismas, puede ser estimada co
mo una distribución de raíz cuadrática
normal.

Entonces el porcentaje volumétrico se pue-
de estimar como:

$$\frac{d(\%V)}{dD} = D^3 f(D) \quad \text{Ec.7.2}$$

de donde obtenemos:

$$\%V = \int_0^{D_2} D^3 f(D) dD / \int_0^{\infty} D^3 f(D) dD \dots \quad \text{Ec.7.3}$$

% V es el porcentaje volumétrico que tiene -
diámetros iguales a D_2 ó menores.

De acuerdo a las condiciones de operación
a las que hemos trabajado (Tabla 7.2a) es-
tablecimos que la ecuación que más se a -

cercaba para ser usada en la estimación del diámetro de Sauter era la de Friedman. Ec 3.3., en la cual reemplazando los valores geométricos característicos para nuestro atomizador obtenemos:

$$D_{VS} = 12.93 \times 10^3 \frac{\mu^{0.2} M_L^{0.2} r^{0.1}}{\rho^{0.5} N^{0.6}} \quad 7.5$$

D_{VS} está en micrones.

Sin embargo como ya mencionamos el diámetro medio de Sauter solo no es representativo del spray (12), por lo tanto, si la curva B sirviera para estimar la distribución de gotas, el diámetro medio de Sauter calculado a partir de la distribución de raíz cuadrática normal, debería darnos un diámetro de Sauter similar al de Friedman. La tabla 7.6 muestra un diámetro que en promedio es 2.5 veces más grande. Aunque los datos de que se disponen no son los suficientes para determinar la recta verdadera de la distribución de gotas para el rango de condiciones trabajadas en el presente estudio, se podría estimar de una mejor forma dichos diámetros a partir de los valores VP propuestos, que aparecen en la Tabla 7.5.

7.4.2.- SECADO.

ACUMULACION.

Nótese que en las figuras 7.8, 7.9 y 7.10, graficados los gramos depositados versus tiempo, que cuanto menor son los rpm utilizados en la atomización, mayor será la pendiente, lo que implicará mayor producto acumulado en un tiempo determinado. Estas deducciones se han hecho en base a una misma alimentación y a unas temperaturas de entrada del aire a la cámara similares como se nota en la tabla 7.9.

En la figura 11 se presentan los gramos del producto acumulado versus los rpm, de donde se deduce que a mayores rpm utilizados para una misma alimentación, menor será la acumulación. Si intersectamos la recta con el eje de los rpm, se puede observar que para 19000rpm la acumulación sería cero, este análisis se hizo para una alimentación de 0,017 lb/min.

La tabla que se presenta a continuación es un extracto de la Tabla 10.

C	rpm	w(lb/min)	%	grs, Depo.
24	9500	0.017	10	2.26
25	9500	0.0318	10	13.2
27	9500	0.017	25	28.45
28	9500	0.0318	25	32.77

C - corrida, w= flujo de alimentación ,
% - concentración en porcentaje en peso.

Nótese que para concentraciones de 10% y 25%, para un flujo de alimentación 0.017, los gramos depositados en la primera con centración es menor que en la segunda, - para un w=0.0318 sigue siendo menor para 10% que para 25%. Para poder explicar - este fenómeno se tiene que tener en cuen ta que, para una gota concentrada la ex- tracción del agua, es más difícil, pues- ya no es solente evaporación de una capa sino por la difusión de ésta por la cos- tra formada, lo que no sucede con una so lución diluída donde la evaporación del agua es más sencilla, pues se realiza por la costra que forma, pero ésto se da para alimentaciones relativamente bajas- como es el caso de 0.017 lb/min, porque- para una alimentación más alta ocasiona- rá el ingreso de más agua (para 10%); co mo el flujo de aire es constante, asi co

mo también su carga calorífica, se nota - que este aire no es capaz de secar ese aumento en el flujo de agua, por lo que la probabilidad que llegue a las paredes sin secar es alta, lo que no ocurre para una alimentación concentrada a pesar de que hay el mismo aumento en el flujo de alimentación, el aumento en el flujo de agua es mucho menor, se depositarán de todas - maneras pero no con el crecimiento para - 10%.

Según las corridas experimentales cuando se abre la tapa del secador se notará a simple vista que la pared de la cámara -- este seca, pero la particularidad de este producto seco, es ser medio cristalino como si estuviese diluído, su apariencia se debe a que cuando se para el equipo regularmente se deja funcionando el ventilador y las resistencias, mientras se cierra la alimentación, en este lapso de tiempo donde no ingresa alimentación, el aire caliente de ingreso arrastra la humedad de la pared. Tomemos un caso de los balances presentados, la corrida 28 tiene agua acumulada de 8.1 gr/min, tiempo de operación de 25.21 minutos, agua total a

cumulada 204.45 gr, el área de acumulación o de formación de la costra es la parte recta, la que tiene un área de 22.1 pies cuadrados, lo que da una deposición de agua menor de 9.25 gr/ft^2 , que es razonable.

PARTICULAS ROTAS.

Cuando se llevó el microscópio la corrida-27 (de concentración 25%), para el establecimiento de la distribución de tamaños, se observó que era imposible encontrar un tamaño representativo del diámetro de las partículas, pues todas ellas se encontraban rotas; se piensa que el hecho que la gota este concentrada, la capa de líquido para la zona de evaporación constante es pequeña y el calor, que cede al aire es alto, la seca inmediatamente y el resto del calor lo utiliza para vaporizarse el agua remanente en la gota, el agua ya vaporizada tiende a escapar y romper la costra, lo que hace que la partícula se rompa y no tenga forma definida.

PERDIDA DE CALOR

De la Tabla 9, de las corridas 12, 13 y 14 se deduce que las pérdidas de calor son menores cuanto menor sean los rpm, se pudo -

demostrar que cuanto menor son los rpm, la deposición es mayor, esto implicará que haya más resistencia para la transmisión de calor, lo que significa menores pérdidas.

Las pérdidas de calor juegan un papel importante en la operación de secado, pues se puede interpretar, como la cantidad de calor no empleada en la evaporación del solvente (en nuestro caso agua), de allí la importancia de tener el equipo de secado aislado. Algo interesante de notar con la corrida 29 (Tabla 7.9), es que en todas las corridas anteriores hay un promedio de pérdida de calor de 1 BTU/min., en tanto que en dicha corrida, se nota que baja a 0.759 BTU/min, ello se debe a la facilidad de la transferencia de calor en la operación de secado, causado por el alto valor de los rpm.

El balance de calor se hizo solo alrededor de la cámara, porque el valor de U (coeficiente global de transferencia de calor por las paredes de la cámara) fué calculado experimentalmente con la cámara vacía, lo que da cierto error en los cálculos de pérdida de calor cuando la cámara tiene

sólidos depositados en ella, este error aumentaría si se considera las tuberías de salida, pues la aproximación de las medidas experimentales serían mayores, lo que se vería reflejado en el balance general.

Como se puede notar en la Tabla 7.9, la desviación de la adiabática esta directamente ligada con la pérdida de calor, el valor promedio de la desviación de la adiabática para las corridas es 9°F , esto equivale más o menos 1 BTU/min de pérdidas por la pared de la cámara (valor estimado de los balances).

DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS DENTRO DE LA-CAMARA.

Uno de los factores que determinan una distribución de temperaturas dentro de la cámara, es el patrón de flujo de aire, pues con su dirección de alguna forma orienta la localización de éstas. En el caso estudiado se tiene un patrón de flujo de forma ciclónica (dirigido por los álabes directores de la salida del aire y la forma cónica), lo que proporciona un movimiento del aire pegado a las paredes (este comportamiento lo tiene un gran porcentaje del flu

jo total del aire), lo que hace que la temperatura más alta se localice en las paredes, como se observa en la Figura 7.12, notese un nivel debajo de la temperatura de 103°C , un aumento de ésta, ello se debe a la transferencia de calor de la tubería que se extiende en el interior de la cámara. Esta tubería produce el gradiente necesario (al aire de entrada) para que se de la transferencia de calor hacia la cámara (el aire ingresa a la cámara por medio de la tubería a 150°C y sale de la misma hacia la cámara a 109°C).

ZONA DEL MAXIMO INTERCAMBIO DE CALOR Y MASA

En función de las temperaturas medidas dentro de la cámara (secando producto), se pudo deducir que existe una zona (volumen de cámara) donde se realiza la máxima transferencia de calor y masa. Se observa en la Figura 7.13, que la temperatura de 94°C permaneció constante hasta una distancia de 25 cm. debajo del atomizador, indicándonos que en esa zona se llevará a cabo la transferencia de calor latente (razón por la cual la temperatura fue constante) necesario para la vaporización de la mayor cantidad de agua, etapa de evaporación constante

(constant rate), después de la cual, se elevó a 100°C, refiriendo a la entrega de calor por la tubería extendida dentro de la cámara, este sobrecalentamiento se debió a la etapa de decaimiento de la evaporación (falling rate), cuando se formó toda la costra.

La información presentada, es una de las más importantes a considerar para el dimensionamiento de una cámara que opere con las mismas características del equipo presentado. La discusión anterior concluye que la mayor transferencia de calor y masa se da en general, a una corta distancia del atomizador, esto hace que las dimensiones de la parte cilíndrica de la cámara sean relativamente pequeñas.

TIEMPO DE CONTACTO GOTA-PARTICULA AIRE.

Muchos estudios (10) se han realizado con respecto a este punto, tratando de cuantificar el tiempo de contacto, regularmente los investigadores para referirse a una gota conteniendo sólidos, asumen una fracción de tiempo con respecto a una gota pura. Así Charles Worth y Marshall (10) presentaron un ejemplo de la aplicación de su ecuación semiteórica predecido el tiempo de secado

de una gota conteniendo sulfato de sodio. Se cálculo para condiciones medias de secado, el tiempo necesario para que se forme la estructura sólida y para una reducción del volumen de agua evaporada. Ellos sugirieron que la razón de evaporación de la gota de sulfato de sodio, era igual a los dos tercios de una gota de agua pura.

Los valores calculados por Charles Worth y Marshall difieren de los obtenidos experimentalmente por Crosby (10). Sin embargo la asunción, de que una gota que contiene sólidos (sulfato de sodio) se evapora igual que una gota pura durante el período de evaporación constante (constant rate), acerca la diferencia entre su teoría y lo que ocurre experimentalmente. Uno de los motivos para que ocurra dicha diferencia, sea posiblemente por que ellos asumieron velocidades relativas nulas, lo cual implica una baja evaporación, lo que no sucede en la práctica.

Apoyados de estas deducciones usaremos la ecuación (5.3), que define el coeficiente pelicular de transferencia de calor, para gotas puras con velocidades relativas, en función de las propiedades medias del medio y del diámetro medio de gota hallado con la distribución de ellas. En el apéndice A.6, se desarrolla la forma de hallar h_{TC}

(coeficiente pelicular de transferencia de calor, por correlaciones) y en A5 se calcula por medio - de los valores experimentales el calor necesario - para evaporar toda el agua.

El conocimiento de que en esta etapa se evapora - la mayor cantidad de agua, se hace viable este cálculo) el gradiente de temperatura gota partícu la medio y el área que se dispone para la transfe rencia, quedando como incognita el tiempo de con tacto, igualando los términos de A5 y A6, se des peja el tiempo de contacto. Los valores de h_{TC} y tiempo de contacto se encuentran en la tabla 7.12.

De estos últimos valores se deduce que:

- Cuando se tiene el mismo flujo de alimentación y concentración, pero diferente RPM, se tiene - menos tiempo de contacto a menor RPM, debido a su velocidad de salida.
- Cuando se tiene el mismo flujo de alimentación y RPM, pero diferente concentración, se tiene - menos tiempo de contacto a mas concentración , debido a su mayor densidad.

Cuando se tiene el mismo RPM, pero diferente flujo de alimentación y mayor concentración(25%) se tiene menos tiempo de contacto a menor flujo de alimentación, lo que no ocurre a una concen tración menor (10%), a pesar de ser menor el flujo de alimentación, el tiempo de contacto es

mayor, posiblemente debido a que las propiedades del medio se hacen desfavorables cuando se tiene gran cantidad de agua por gota.

7.5.- RECOMENDACIONES.

Se sugiere como continuación de este estudio, el seguimiento de la operación, por medio de las ecuaciones que se presentan en el texto o las que se dan en las referencias, para tal motivo han sido escogidas como las mas apropiadas a aplicarse a la operación de secado. Las ecuaciones que se presentan en las referencias (2,12,13,10,21), van acompañadas de métodos experimentales, como de alimentaciones recomendadas (2,13), para una investigación apropiada y verificación de las ecuaciones. Como una posible solución esta en proponer un cierto modelo matemático, que pueda predecir, las características importantes del producto final, para algún cambio de algunas de las variables (concentración, propiedades de la alimentación, flujos de aire o de alimentación, temperatura de la cámara, características del disco, etc.)

Como el planteamiento de las ecuaciones es difícil se recomienda el establecimiento de las ecuaciones que involucran las variables más importantes de la operación, luego del cual, se puede adaptar el fun

cionamiento del equipo para hacer posible las simplificaciones en las ecuaciones planteadas, se sugiere efectuar la operación adiabáticamente, conseguir que la velocidad relativa sea cero entre la gota-partícula aire, un pato de flujo vertical, evitar deformaciones de la partícula (rotura, coalescencia, etc) y acumulación.

Si en un siguiente trabajo no se puede abarcar todas estas consideraciones, sería recomendable, que por lo menos se llegue a alguna etapa de éste, como atomización, contacto spray aire (la cinemática de la operación) o secado del spray (transferencia de calor y masa), para poder describir cada una de ellas.

El trabajo que se sugiere es delicado y laborioso (por la cantidad de pruebas), pero sería necesario pues regularmente todos los equipos de secado trabajan con criterios cualitativos deducidos empíricamente a los largo de muchos años de uso, por lo que un trabajo de esta naturaleza, solucionaría tiempo, exactitud, predicción de resultados y mas- que nada la funcionalidad de esta operación que es tan importante en la industria química.

7.6.- CONCLUSIONES.

1.- La distribución de gotas que se obtiene de la atomización, en un disco rotatorio con venta -

nas rectas, debe ser estimada a partir de la ecuación que describe una distribución de raíz cuadrática normal.

$$\frac{dN'}{dD} = f(D) = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi S_G'} \frac{1}{\sqrt{D}} \text{EXP} - \frac{(\sqrt{D} - \sqrt{D_{50\%}})^2}{2S_G^2}$$

- 2.- El diámetro medio de Sauter calculado de la ecuación de Friedman es un buen valor estimado para el diámetro de gota bajo las condiciones operadas, y sí se desea obtener la distribución de gotas del spray pueden usarse los valores VP que aparecen en la Tabla 7.5.
- 3.- No todos los sprays obrenidos de los atomizadores rotatorios pueden aproximarse a una distribución de raíz cuadrática normal, pero el diámetro medio para diferentes clases de discos, puede estimarse de la ec. 3.3.
- 4.- Para la estimación de la distribución de gotas de un atomizador de disco, con ventanas rectas puede hacerse uso de las figuras B1, del apéndice B, si se logran alcanzar condiciones de operación similares para las cuales fueron obtenidas dichas correlaciones.
- 5.- La zona de mayor transferencia de calor y masa que ocurre en la cámara del Niro-Atomizer, se da hasta una distancia corta por debajo del atomizador.
- 6.- Las mayores temperaturas del aire que existen dentro de la cámara; en la zona de mayor

transferencia de calor están localizadas adyacentes a las paredes de la misma.

- 7.- La acumulación en la cámara se da en dos zonas y es de dos formas: en la parte cilíndrica de la cámara es permanente por apelmasamiento del producto, y en la parte cónica es transitoria.
- 8.- La acumulación de agua y material dentro de la cámara ocurrirán dependiendo de cuales son las condiciones de operación que se utilizan para el secado del producto, y deben considerarse en los balances globales.
- 9.- Las características del producto final obtenidas en esta operación de secado (tamaño, forma, densidad, etc.), depende en forma muy particular de sus condiciones de operación, lo que hace sumamente difícil predecir dichas propiedades sin realizar pruebas experimentales.
- 10.- La temperatura del aire de salida es muy sensible a cualquier cambio de las condiciones de entrada, por lo que puede usarse como un indicador, de la performance de secado.
- 11.- En el secado por atomización deben de tomarse en cuenta los tiempos de retención (referido al aire), y residencia referido a la gota partícula), a la vez, pues estos no necesariamente son iguales.

12.- Habiendo fijado las demás variables no mencionadas:

- Un aumento de los rpm traerá como consecuencia partículas más pequeñas, y por lo tanto mayor área de transferencia y una menor acumulación de producto sobre las paredes.
- Un pequeño aumento en el flujo de alimentación traerá como consecuencia una disminución significativa en las temperaturas dentro de la cámara.
- Un aumento de concentración de la solución, producirá un producto seco con mayor porcentaje de fragmentados.

13.- Los factores importantes a considerar en la operación de secado por atomización son:

- a) Tipo y características del Atomizador.
- b) Propiedades y condiciones del producto a secar.
- c) Flujo de alimentación.
- d) Diámetro medio y distribución de gotas.
- e) Flujo y patrón de flujo del aire.
- f) Carga calorífica del aire.
- g) Geometría de la Cámara y forma de mezcla del spray-aire.
- h) Distribución de temperaturas dentro de la cámara.
- i) Tiempo de retención y de residencia.
- j) Acumulación

k) Pérdidas de calor.

l) Características finales del producto deseado.

NOMENCLATURA.

- A - área de contacto disponible (ft²/min)
- A' - Area total de la distribución (cm²) - $\int_0^{\infty} D^2 f_N(D) dD$
- BH1 - Temperatura de bulbo húmedo del aire (°F)
- BS1 - Temperatura de bulbo seco del aire (°F)
- C - Número de Corrida.
- C% - Concentración (% en peso)
- Dy% - Diámetro para el que, el Y% de partículas es menor o igual que dicho diámetro (micrones)
- D_{50%} - Diámetro medio geométrico.
- D_v - Coeficiente de difusión.
- D_{vs} - Diámetro medio de Sauter (micrones)
- D_{vs}* = Diámetro medio de Sauter a partir de la distribución.
- V/A'
- d - Diámetro de disco (pulg) = 2r.
- Func = (Nd)^{0.83} (nh)^{0.12} / M_L^{0.24} x 10⁴
- f_N(D) = Función de distribución normalizada = $\frac{dN'}{dD}$ -
- % de partículas en el intervalo dD
= $\frac{1}{2\sqrt{2\pi} S_G} \frac{1}{\sqrt{D}} \text{EXP} - \left| \frac{(\sqrt{D} - \sqrt{D_{50\%}})^2}{2S_G} \right|$
- H1 - Entalpía del aire de entrada, BTU/min.
- h - Altura de ventanas del disco (pulg)
- h1 = Humedad absoluta del aire de entrada
(lb de agua/lb de aire seco)
- h_{tc} - Coeficiente de transferencia de calor convectivo
BTU/ft²F hr.

- K_d - Conductividad térmica media del film gaseoso.
- L - perímetro húmedo - $n \times h$
- M_L - flujo de alimentación (lb/min).
- m_{aA1} - Flujo de masa de agua en el aire (gr/min)
- m_{p1} - Flujo de producto seco en la entrada (gr/min)
- m_{pD} - Producto seco acumulado (gr/min).
- m_{as} - Agua en la alimentación (gr/min)
- m_{ap} - Agua en el producto (gr/min).
- m_{ac} - masa de agua acumulada (gr/min)
- N - Revoluciones por minuto - rpm
- N' - Porcentaje de gotas contadas en un intervalo.
- número de ventanas en un disco (pulg).
- Q_{cp} - Calor de cristalización BTU/min.
- Q_h - Flujo de calor facilitado por h_{tc} (BTU/min)
- Q_L - pérdidas de calor en la cámara (BTU/min).
- Q_{p1} - Entalpía del producto de entrada (BTU/min).
- S_G - Desviación standar geométrica - $D_{84.13\%}/D_{50\%}$
- T - Temperatura media del aire ($^{\circ}F$)
- T_c - Temperatura medida dentro de la cámara.
- T_{in} - Temperatura del aire de entrada ($^{\circ}F$).
- T_{out} - Temperatura del aire de salida ($^{\circ}F$).
- V - Volumen total de la distribución (Cm^3) $\int_0^{\infty} D^3 f_N(D) dD$
- $\%V = \int_0^{D1} D^3 f_N(D) dD / \int_0^{\infty} D^3 f_N(D) dD$
- W - Flujo de alimentación (gr/min)
- ΔT - MLTD de la cámara ($^{\circ}F$)
- ΔTD - Desviación de la temperatura con respecto a una operación adiabática.

LETRAS GRIEGAS.

- ρ - densidad (gr/cc)
- μ - viscosidad (cp)
- σ - tensión superficial (dy/cm)
- θ - Tiempo de operación (min)
- θ_c - tiempo de contacto (seg)

SUBINDICES.

- 1 Significa de entrada
- 2 Significa de salida

BIBLIOGRAFIA

- 1.- ADLER C.R. AND MARSHALL W.R. PERFORMANCE OF SPINNING DISK ATOMIZERS Chem. Eng. Progr. 47; 515, 601 (1915)
- 2.- BALTAS L. AND GAUVIN W.H.. PERFORMANCE PREDICTIONS FOR A COCURRENT SPRAY DRYER. AICHE Journal 15; 764, (1969).
- 3.- BALTAS L. AND GAUVIN W.H. TRANSPORT CHARACTERISTICS OF A COCURRENT SPRAY DRYER. AICHE Journal 15, 772, (1969).
- 4.- BELCHER D.W., SMITH D.A. AND COOK E.M. DESIGN AND USE OF SPRAY DRYERS. PART I AND II, Chem. Eng. 30, 83, 14, 201, (1963)
- 5.- BROWN RAYMOND J.WITH VILLIANSON JOHN. EFFICIENT DRYING - OF CLAY SLURRIES. CERAMIC AGE. APRIL 1957.
- 6.- BUCKHMAN S.A. AND MOULTON R.W. FACTORS AFFECTING GAS RE-CIRCULATION AND PARTICLE EXPANSION IN SPRAY DRYING. Chem. Eng. Progr. 51; 126 (1955).
- 7.- CHALLOUD J.H., MARTIN J.B. AND BACKER J.S. FUNDAMENTALS - OF SPRAY DRYING DETERGENTS. Chem. Eng. Progr. 53; 593 , (1957).
- 8.- CHEMICAL ENGINEERING G. DRYING EQUIPMENT REPRINTED FROM-CHEMICAL ENGINEERING, Chem. Eng. Jan 17, (1977).
- 9.- COOK E.M. ESTIMATING SPRAY DRYING COSTS Chem. Eng. Progr. 62,93 (1966).
- 10.- CROSBY E.J. AND MARSHALL W.R., EFFECTS OF DRYING CONDI - TIONS ON THE PROPERTIES OF SPRAY-DRIED PARTICLES. Chem . Eng. Progr. 54,56 (1958).
- 11.- CROSBY E.J. AND MARSHALL W.R. EXPERIMENTAL SPRAY DRYER - FOR PRODUCT DEVELOPMENT STUDIES. Chem. Eng. Progr. 53 , 347 (1957).

- 12.- DICKINSON DEAN AND MARSHALL W.R. THE RATES OF EVAPORATION OF SPRAYS. AICHE. Journal 14, 541 (1968).
- 13.- DUFFIE J.A. AND MARSHALL W.R. FACTORS AFFECTING THE PROPERTIES OF SPRAY DRIED MATERIALS. Chem. Eng. Progr. 49, 480 (1953).
- 14.- FOUST A.S. et.al. PRINCIPIOS DE OPERACIONES UNITARIAS, Compañía Editora Continental. S.A. México 1977.
- 15.- FRIEDMAN S.J. GLUCKERT AND MARSHALL W.R. CENTRIFUGAL - DISK ATOMIZATION. Chem. Eng. Progr. 48, 181 (1952).
- 16.- HELSING H. SOME TYPICAL APPLICATIONS OF SPRAYS DRYING - IN THE CHEMICAL INDUSTRY. A/S NIRO ATOMIZER COPENHAGEN.
- 17.- HELSING H. SPRAY DRYING OF CERAMIC MATERIAL SUCH AS TILE PRESSBODY, ETC. A/S NIRO ATOMIZER COPENHAGEN.
- 18.- LAPPLE C.E. AND SHEPHERD C.B. CALCULATIONS OF PARTICLE TRAJECTORIES. Ind. Eng. Chem. 32; 605, (1940).
- 19.- MARSHALL W.R. DISCUSSION EN EL FORTY-FIRST ANNUAL MEETING, NEW YORK. Chem. Eng. Progr. 46, 583 (1950)
- 20.- MARSHALL W.R. AND SELTZER E. PRINCIPLES OF SPRAY DRYING Chem. Eng. Progr. 46; 501, 46; 575. (1950).
- 21.- MASTERS K. SPRAY DRYING, LEONARD HIL BOOK 1972, LONDON GREAT BRITAIN.
- 22.- Mc CABE W.L. SMITH J.C. OPERACIONES BASICAS EN INGENIERIA QUIMICA VOL. II Editorial Reverté, 1975. ARGENTINA.
- 23.- MEYER F.W. FACTORS AFFECTING PARTICLE SIZE IN A SEVEN-FOOT SPRAY DRYER. Chem. Eng. Progr. 51, 528, (1955).

- 24.- PERRY, CHILTON C. CHEMICAL ENGINEERING HANDBOOK, Mc GRAW HILL, 5th. EDITION, 20,58 (1973).
- 25.- RANZ W.E. AND MARSHALL W.R. EVAPORATION FROM DROPS- Chem. Eng. Progr. 48, 141 (1952).
- 26.- SHEPHERD C.B. AND LAPPLE C.E. FLOW PATTERN AND PRE-SSURE DROP IN CYCLONE DUST COLLECTOR. Ind. Eng. Chem. 31, 972 (1939).
- 27.- TROMMELEN A.M. AND CROSBY E.J. EVAPORATION AND DRYING OF DROPS IN SUPERHEATED VAPORS. AIGhE. Journal 16,857, (1970).
- 28.- WOOLDRIDGE M. And EDGEWORTH R. PILOT PLANS, MODELS AND SCALE UP METHODS IN CHEMICAL ENGINEERING. Mc GRAW HILL BOOK COMPANY, 1957, NEW YORK.