

# ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA IMPLEMENTAR EL SECADO POR ATOMIZACIÓN EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA BENTONITA ACTIVADA CON ÁCIDO SULFÚRICO

P. Romero O.<sup>1</sup> y M. Otiniano C.<sup>2</sup>

## RESUMEN

El presente trabajo presenta el estudio experimental sobre el secado por atomización con el objetivo de que tal operación reemplace las tres últimas etapas del proceso de fabricación de la bentonita activada como son: filtro rotatorio continuo al vacío, secador de horno rotatorio y el molino Raymond. Se ha logrado demostrar experimentalmente que con el secado por atomización se logra un producto que tiene un 10 % de humedad y que el 100 % del producto pasa la malla 200 Tyler, superando ampliamente las especificaciones comerciales de la bentonita activada.

**Palabras clave:** estudio experimental, bentonita activada, secado por atomización, ácido sulfúrico.

## EXPERIMENTAL STUDY FOR THE IMPLEMENTATION OF SPRAY DRYING IN THE ACTIVATION PROCESS OF BENTONITE WITH SULFURIC ACID

## ABSTRACT

This paper presents the experimental study of spray drying in order that an operation of replacing the last three steps of the manufacturing process of the activated bentonite as: continuous rotary vacuum filter, rotary kiln dryer and Raymond mill. It has been shown experimentally that with the spray drying is achieved by a product having a 10% moisture and that 100% of the product passes the 200 mesh Tyler, exceeding commercial specifications of activated bentonite.

**Keywords:** activated bentonite, spray drying, sulfuric acid.

## I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como principal objetivo presentar el estudio experimental realizado con un secador por atomización Niro Atomizer con disco rotatorio centrífugo, operado neumáticamente, ubicado en el Laboratorio # 23 de la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería con la finalidad de demostrar experimentalmente que el secado por atomización se puede utilizar en el proceso de fabricación de la bentonita activada reemplazando a las tres últimas etapas de dicho proceso como son:

el filtro rotatorio continuo al vacío, el secador de horno rotatorio y el molino Raymond.

## II. PLANTEAMIENTO

### Secado por Atomización

La operación de secado por atomización consiste básicamente en la dispersión de la alimentación en pequeñas gotas de diferentes tamaños, 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.

<sup>1</sup> pedroromeroy@yahoo.es. Departamento de Análisis de Procesos, FQIQ-UNMSM.

<sup>2</sup> motinianoc@unmsm.edu.pe. Departamento de Operaciones Unitarias, FQIQ-UNMSM.

### Atomizadores Rotatorios

Existen diferentes tipos de atomizadores rotatorios algunos de los cuales se muestran en la figura 1. En estos atomizadores el líquido es acelerado centrífugamente a una alta velocidad antes de que sea descargado en el aire caliente. El grado de atomización depende de la velocidad periférica, flujo de alimentación, propiedades del líquido y del diseño del atomizador.

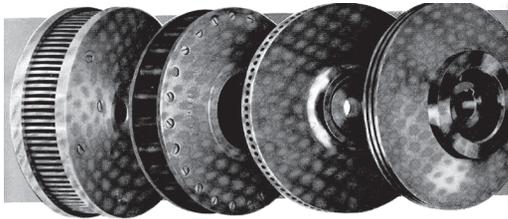


Figura N.º 1. Tipo de discos atomizadores centrífugos.

### Diámetro Medio y Distribución de Gotas

Existen diferentes definiciones de diámetros medios. Dentro de estos el de mayor importancia, es el diámetro medio de Sauter, basado en la relación de volumen a superficie. Su ecuación también puede representarse en forma no continua como:

$$D_{32} = D_{sv} = \frac{\sum_{i=1}^K n_i (d_i)^3}{\sum_{i=1}^K n_i (d_i)^2}$$

Donde:

$n_i$  = número de gotas contadas

$d_i$  = diámetro de la gota o partícula.

Debido a los cambios de magnitud que pueden hacerse al flujo y a la velocidad de giro (rpm), estas son las variables más importantes a considerar para un tamaño de gota dado. Una de las ecuaciones es la de Friedman<sup>[2]</sup> que establece:

$$\frac{D_{vs}}{r} = 0,4 \left[ \frac{M_p}{\rho \cdot N \cdot r^2} \right]^{0,6} \left[ \frac{\mu}{M_p} \right]^{0,2} \left[ \frac{\sigma \rho L}{M_p^2} \right]^{0,1}$$

$M_L$  = velocidad de alimentación;

$M_p$  = unidad de periferia húmeda;

$L$  = velocidad de alimentación por unidad de periferia húmeda.

$\rho$ ,  $\sigma$ ,  $\mu$ : densidad, tensión superficial y viscosidad de la alimentación.

$D_{vs}$  = Diámetro medio de gota a la salida del disco atomizador, en micrones.

$V_T = \pi d \cdot N$  = velocidad tangencial de las gotas.

$d$  = diámetro del disco ( $r$ : radio del disco);

$N$  = velocidad de giro del disco (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, como si fuera la velocidad periférica.

### Movimiento de la Gota Dentro de la Cámara

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 atomizado, para de esta manera hacer más manejables estas correlaciones. Estas influyen en:

- La transferencia de calor entre la gota y el aire es por convección forzada.
- Las gotas que constituyen el atomizado son esféricas.
- El atomizado es homogéneo.
- La coalescencia y la rotura de las partículas es despreciable.

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).

Una deducción básica del movimiento de una gota se haría considerando la fuerza de fricción originada entre el aire y la superficie de la gota expresado por el coeficiente de arrastre.

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

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

Donde:

D = diámetro de gota;

$C_D$  = coeficiente de arrastre;

$\rho_w, \rho_a$  = densidad de la gota y del aire;

V = Velocidad de la gota;

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

### Secado del Atomizado (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 atomizado, y dichas transferencias ocurren por convección en la capa límite de cada gota.

Si la gota establece un equilibrio dinámico con el aire caliente, exhibirá un período de secado constante<sup>[8],[14]</sup>. La duración de este período constante dependerá de la fuerza directora de la temperatura y del mecanismo interno de transferencia de masa.

Un segundo período es el decaimiento de la evaporación (falling-rate); el cual consta de dos etapas<sup>[14]</sup>, la primera etapa consiste en la formación de una estructura semi-rígida 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.

La parte inicial de la curva, representa el inmediato contacto de la gota-aire, se caracteriza por el aumento de la temperatura de la superficie, en milisegundos<sup>[12]</sup>.

La parte recta (horizontal), 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.

La parte curva, donde la intersección con la parte recta se define como punto crítico, este punto es alcanzado por la gota al mantener su superficie húmeda, y el período de secado declina; este periodo se da hasta que la superficie de la gota esté completamente seca. La parte final, se caracteriza por que toda la transferencia de masa se ve limitada por la superficie sólida. La razón de evaporación se sigue desarrollando hasta que la humedad de la gota adquiere la humedad del medio, determinándose el equilibrio.

### Evaporación Conteniendo Sólidos Insolubles

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

$$t_{total} = \frac{\lambda \rho_1 (D_o^2 - D_c^2)}{8K_d \Delta T_1} + \frac{D_c^2 \rho_s (W_c - W_2)}{12K_d \Delta T_2}$$

Donde el primer término identifica a la primera etapa (constant rate) y el segundo término a la segunda etapa (falling rate):

$\lambda$ =calor latente del solvente,  $D_c$ =diámetro de la partícula alcanzado en el punto crítico,  $\rho_s$ =densidad del sólido,

$W_c$ = humedad crítica,  $W_2$ =humedad final de la partícula,  $K_d$ = conductiva del medio,

$\Delta T_1$ =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,  $\rho_1$ =densidad de la solución,  $\Delta T_2$ =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.

### III. PARTE EXPERIMENTAL

El trabajo experimental se llevó a cabo en el secador del Laboratorio #23 de la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería. El secador se muestra en la figura 2. El secador utilizado es de procedencia sueca, de la firma Niro-Atomizer<sup>[9]</sup>, tipo Minor, modelo 53-MQ-2/Q, y sus dimensiones son:

Diámetro de la Cámara: 85,3cm

Altura de la parte Cónica: 61,0 cm

Altura de la parte Cilíndrica: 76,2cm

La atomización de la alimentación es producida por un disco rotatorio de 5,08cm de diámetro, con 24 ventanas de 0,33cm de ancho y 0,56cm 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 presión de ingreso para la regulación de las rpm



Figura N.º 2. Secador Niro - Atomizer.

del disco está manipulada por una válvula manual. Para la alimentación que ingresa al atomizador y va directamente hacia las ventanas del disco, se reguló el flujo por medio manual, mediante una pera graduada de un litro.

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 225 CFM a 25° C; medido con un rotámetro a la salida de la cámara. Un juego de seis resistencias que trabajan en forma independiente regula la temperatura 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.

#### Operación de Secado por Atomización a Nivel Piloto

El secador tipo atomizador, transforma la mezcla sólido-líquido en un producto sólido en forma de polvo fino con un diámetro de partícula definido. En esta fase del proceso hay que tener en cuenta los rangos de operación:

- La alimentación se manejará entre 13 a 24% de sólidos.
- La acidez total de la alimentación será de 24,64 ppm.
- La viscosidad de la alimentación es de 4,65 a 11,55 g./cm x min.
- La densidad del lodo alimentado será entre 1,087 a 1,16 g./mL
- El producto final deberá tener una humedad entre 8 - 12%.
- Un 85 % del producto pase malla - 200 tyler.
- La temperatura de entrada del aire de 140°C (restricción del equipo).
- La temperatura de salida del aire de 98 °C.

- Se evapora un promedio de 20,66 g. H<sub>2</sub>O /min.
- El secado es continuo.

Como elemento atomizador se usará un disco rotatorio de ventanas rectangulares (atomización centrífuga).

Después del lavado y sedimentado de la arcilla, viene el secado por atomización, prescindiendo de la operación de filtrado, secado y posterior molienda del producto seco, de los procesos que no utilizan el secado por atomización.

En la sedimentación una variable importante es la concentración de sólidos, el objetivo es lograr la mayor concentración en sólidos de los lodos lavados, y así alimentar al secador por atomización una alta concentración de sólidos, logrando un proceso continuo en todas sus etapas.

Otra variable importante en el lavado, es la reducción de la acidez que de acuerdo a las especificaciones comerciales, el lodo final lavado deberá tener un pH  $\geq$  a 3,6. En este lavado (6to) se logró llegar a una concentración de 33,27% en sólidos a tiempo infinito a un pH=3.61.

El secado deberá hacerse de manera que el porcentaje de humedad y el tamaño de partícula de la bentonita activada seca, garantice un proceso eficiente de decoloración del aceite.

**Balance de Materia**

Se tomo una muestra de bentonita lavada con 20,03% de sólidos, de 704,0 g y un volumen del lodo de 650,0 mL.

$$\rho_{\text{LODO}} = 704,0 \text{ g./}650,0 \text{ mL}$$

$$\rho_{\text{LODO}} = 1,083 \text{ g./mL}$$

En la figura 3 se muestra el esquema del atomizador utilizado donde:

LB = Flujo de alimentación con 20,03 % de sólidos, (g./min).

BS = Bentonita activada seca, 0% de humedad, (g./min).

HF = Humedad final del producto secado, (g./h).

BF = Bentonita final seca, con 13,5 % de humedad, (g./min).

AS = Aire de secado que sale del secador, (g./min).

AE = Aire que entra al secador, (g./min).

PB = Bentonita que se pierde en el secado, (g./ min).

PA = Perdida de bentonita que se va con el aire, (g./min).

Fv = Flujo de agua que se vaporiza en el secado, (g./min).

LB = 26,73 g. lodo/min, con 20,03% de sólidos.

% PB = 12,60%, pérdida de bentonita adherida a las paredes.

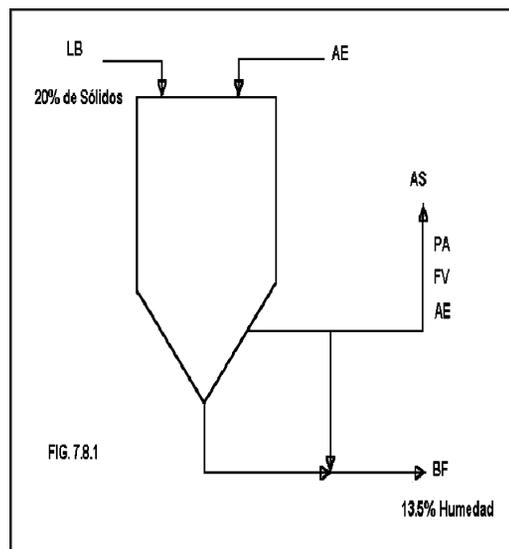


Figura N.º 3. Diagrama del Secador por Atomización

**Primera Prueba de Secado por Atomización**

Considerando que el mayor porcentaje de perdidas es la bentonita que se adhiere a las paredes del secador, pero para operación

continua de largo alcance, este porcentaje de pérdidas se torna muy pequeño.

Los sólidos secos son arrastrados por transporte neumático y separados del aire mediante un ciclón; pero existe una fracción de bentonita seca que se va con el aire húmedo que se desecha.

Esta fracción es difícil de cuantificar, pero por especificaciones de diseño del equipo Niro atomizer, estas pérdidas están en el orden del 1 al 3%. Asumiremos un valor igual a:

$$\%PA = 2,5\%$$

Por lo tanto:

$$PA = 0,025 (0,2003 \times 1600,04)$$

$$PA = 8,032 \text{ g./h} = 0,134 \text{ g bentonita/ min.}$$

De la figura 3 se tiene:

$$BF = BS + HF \quad [2.1]$$

$$0.2003 \text{ LB} = BS + PB \quad [2.2]$$

$$0.7997 \text{ LB} = FV + HF \quad [2.3]$$

$$AS = AE + FV + PA \quad [2.4]$$

Donde:

$$PB = 0,126 (0,2003 \times 164,04)$$

$$PB = 40,482 \text{ g./h} = 0,674 \text{ g bentonita seca / min.}$$

Para una humedad del 13,5% del producto final:

$$\frac{HF}{BS + HF} = 0,135 \quad [2.5]$$

Remplazando  $L_B$  y  $P_B$  en [2.2]:

$$BS = 280,807 \text{ g bentonita seca / h} = 4,68 \text{ g bentonita seca / min.}$$

Remplazando BS en [2.5]:

$$HF = 43,825 \text{ g agua / h} = 0,7304 \text{ g agua / min.}$$

BS y HF en [2.1]:

$$BF = 324,632 \text{ g. bentonita final seca/ h} =$$

$$5,411 \text{ g bentonita final seca / min.}$$

Remplazando  $L_B$  y HF en [2.3]:  $Fv = 1\ 238,93 \text{ g. agua / h.}$

$$Fv = 1,24 \text{ kg agua / h} = 20,56 \text{ g agua / minuto.}$$

Donde Fv: Es la cantidad de agua que se tiene que evaporar de los lodos activados para obtener un producto con 13,5% de humedad final.

### Balance de Energía

Condiciones ambientales:

$$TG = \text{temperatura del bulbo seco} = 23,3 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$TW = \text{temperatura del bulbo húmedo} = 20,0 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$Hr = \text{humedad relativa} = 74,0\%.$$

Especificaciones del aire que entra al secador:

$$TE = \text{temperatura de entrada al secador} = 140 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$TS = \text{temperatura de salida del secador} = 98 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Ya = 0,013 g. vapor agua / kg. aire seco: Humedad del aire ambiente a la entrada de secador.

$$\Delta H_{as}^{23,3^\circ\text{C}} = 20 \text{ kJ/kg aire seco: Entalpía del aire ambiente a la entrada del calentador.}$$

Cuando se calienta este aire hasta 140 °C, la humedad permanece constante, mientras que la entalpía sufre un incremento.

De la carta psicrométrica<sup>[5]</sup> se obtiene el siguiente valor:

$$\Delta H_{as}^{140^\circ\text{C}} = 98 \text{ kJ/kg a.s.: entalpía del aire ambiente calentado y a la entrada del secador.}$$

En un secador adiabático, donde no existen pérdidas de calor, la entalpía de entrada al secador ( $\Delta H_{as}^{140^\circ\text{C}}$ ) se conservará y será igual a la de salida ( $\Delta H_{as}^{98^\circ\text{C}}$ ).

Pero en un secado por atomización real, existen pérdidas caloríficas que se encuen-

tran en el rango de 1 al 10% Asumiendo para nuestro proceso una pérdida calorífica del 10%, por lo tanto después del secado el aire de salida tendrá el siguiente valor:

$$\Delta H_{as} = 98 - [(0,10) \times 98]$$

$$\Delta H_{as} = 88,2 \text{ kJ/ kg a.s.}$$

Con estos dos valores: la temperatura del aire de salida del secador de 98°C y el valor de la entalpía encontrado de 88,2 kJ/kg, encontramos en la carta psicrométrica<sup>[5]</sup> la humedad del aire de salida:

$Y_b = 0,028 \text{ kg vapor H}_2\text{O/kg aire seco}$ : humedad del aire de salida.

Con estos datos se podrá determinar:

La cantidad de calor que absorbe el aire:

$$Q_{\text{abs.A.}} = \Delta H_{as}^{140} - \Delta H_{a.s}^{23,3} = 98 - 20 = 78 \text{ kJ/ kg a.s.}$$

La cantidad de agua que absorbe el aire:

$$V_{\text{abs.A.}} = Y_b - Y_a = 0,028 - 0,013 = 0,015 \text{ kg vapor agua / kg aire seco}$$

Determinación del flujo de aire requerido para secar el lodo alimentado hasta una humedad de **13,5 %** (valor obtenido experimentalmente).

$$AE = \frac{Fv}{Y_b - Y_a} + \frac{Y_a \cdot Fv}{Y_b - Y_a} \quad [2.6]$$

$$AE = \frac{1238,926}{0,015} + \frac{0,013(1238,93)}{0,015}$$

$$AE = 83\,668,80 \text{ g aire seco/h} = 42,354 \text{ CFM}$$

$$\text{Además: } AS = AE + Fv + PA$$

$$AS = 83668,80 + 1238,93 + 8,032$$

$AS = 84915,76 \text{ g. aire húmedo/h}$ , que sale del secador a 98 °C

La cantidad de energía requerida para el secado:

$$Q_{R.V.} = \frac{\Delta H_{A.S.}^{140} - \Delta H_{A.S.}^{23,3}}{Y_b - Y_a} = \frac{78,0 \text{ kJ/ kg.a.s.}}{0,015 \text{ kg.V. agua/ kg.a.s.}} \quad [2.7]$$

$$7Q_{RV} = 5\,200 \text{ kJ/ kg vapor agua}$$

Por lo tanto la cantidad de energía total requerida para el secado es:

$$Q_{T.R.V.} = (Q_{RV}) \cdot Fv \quad [2.8]$$

$$Q_{T.R.V.} = (5200 \text{ kJ/kg vapor agua}) \times 1,2389 \text{ kg agua/h}$$

Reemplazando valores:

$$Q_{T.R.V.} = 6\,442,42 \text{ kJ/h.}$$

De igual forma la cantidad de energía total que absorbe el aire para el secado es:

$$Q_{T.A.A.} = (Q_{\text{Abs.A.}}) \cdot AE \quad [2.9]$$

Reemplazando:

$$Q_{T.A.A.} = 78 \text{ kJ/ kg a.s.} \times 83,668 \text{ kg aire seco/ h.}$$

$$Q_{T.A.A.} = 6\,526,18 \text{ kJ/ h.}$$

$$Q_{T.A.A.} = 7\,589,95 \text{ watt}$$

### Especificaciones sobre el Disco Atomizador

Los parámetros del atomizador, tales como el diámetro, número de ventanas, velocidad de giro, etc. Son calculados de un escalamiento de datos de planta piloto<sup>[15]</sup> hacia una planta industrial. Dado que en plantas industriales, el atomizador de disco centrífugo es el más recomendable por que permite manipular elevadas razones de alimentación y producen spray uniformes.

Para conseguir una distribución de partícula de producto seco uniforme y de una determinada dimensión, es fundamental mantener una superficie periférica húmeda constante en el disco, la película húmeda que se forma sobre la periferia del disco, tiene una influencia fundamental en las características del spray, y en el tamaño de las partículas secas. Esta película húmeda está afectada por el diámetro del disco, la rapidez de giro del disco, el número de ventanas, altura de las ventanas, y las variables operacionales (propiedades físicas y químicas de la alimentación, razón de alimentación, etc.).

### Determinación de la Periferia Húmeda del Disco

Secador Niro Atomizer:

Disco: Rotatorio centrífugo operado neumáticamente

- 24 ventanas de 0,59 cm de altura
- Rapidez de giro del atomizador: 31000 rpm.
- Con una presión de aire de 5 kg./cm<sup>2</sup>
- Razón de alimentación: LB = 26,734 g./minuto

Para determinar la *superficie periférica húmeda* del disco se ha utilizado la ecuación propuesta por Friedman, Gluckert y Marshall<sup>[3]</sup> quienes estudiaron experimentalmente el efecto de las características del atomizador y de las variables de operación sobre el tamaño de las partículas:

$$D_{VS} = K_1 \times R \left[ \frac{M_p}{d \cdot N \cdot R^2} \right]^{0.6} \left[ \frac{\mu}{M_p} \right]^{0.2} \left[ \frac{d \cdot n \cdot h \cdot \sigma}{M_p^2} \right]^{-0.1}$$

[2.10]

$K_1$  = Constante que depende de las características del disco: 0,37 (planta piloto).

N = Velocidad del atomizador: rpm.

R = Radio del disco: cm.

n = Número de ventanas.

h = altura de las ventanas: cm.

$M_p$  = Periferia húmeda del disco: g./cm x min.

$\mu$  = Viscosidad: g./cm x min.

s = Tensión superficial: g./min<sup>2</sup>.

d = Densidad: g./cm<sup>3</sup>.

Otro parámetro importante a determinar es el *diámetro medio de partícula* (Dss), es quizás la variable más importante que da el sistema como respuesta a la operación realizada bajo las condiciones especificadas; las otras son: Humedad final del sólido y la temperatura del aire de salida y en menor medida la temperatura del sólido a la salida. Los pasos para esta determinación, es hacer un análisis de malla al producto seco final, reportando

los datos como porcentaje acumulado; representando los datos de cada operación de secado en sus gráficos respectivos, así por ejemplo para la prueba N.º 1 el análisis de malla se ve representando mediante la figura 4: porcentaje de peso acumulado vs diámetro de partícula, por lo tanto tomando 50% de acumulado se obtendrá el *diámetro medio de partícula* de la muestra: Dss1 = 41,5 micrones.

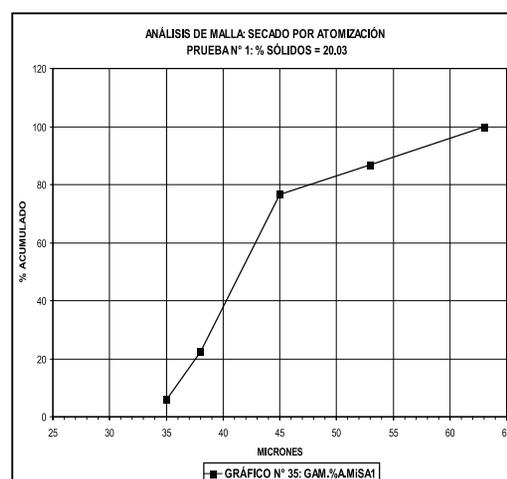


Figura N.º 4. Porcentaje de peso acumulado versus diámetro de la partícula.

Para determinar el tamaño de la gota a la salida del disco atomizador<sup>[8]</sup> usaremos la siguiente ecuación:

$$\frac{D_{SS1}}{D_{VS1}} = \sqrt[3]{\frac{\rho_{L1} \cdot x \% S_{L1}}{\rho_{SS1} \cdot x \% S_{S1}}}$$

Despejando el Diámetro medio de gota a la salida del Atomizador:

$$D_{VS1} = \frac{D_{SS1}}{\sqrt[3]{\frac{\rho_{L1} \cdot x \% S_{L1}}{\rho_{SS1} \cdot x \% S_{S1}}}}$$

Donde:

$D_{VS1}$ : diámetro medio de la gota a la salida del disco atomizador.

$D_{SS1}$ : diámetro medio del sólido a la salida del secador.

$\rho_L$ : densidad del lodo a la entrada del secador.

%S<sub>L</sub>: % de sólidos en el lodo alimentado al secador.

p<sub>ss</sub>: densidad de la partícula seca a la salida del secador.

%S<sub>s</sub>: % sólidos del producto a la salida del secador.

Reemplazando valores en la ecuación anterior:

$$D_{vs1} = \frac{41,5}{\sqrt[3]{\frac{1,1286 \times 20,03}{0,595 \times 86,5}}} = 54,60 \text{ micrones}$$

Con este valor del *diámetro medio de la gota* a la salida del disco atomizador (D<sub>vs1</sub>) y las propiedades de la alimentación para la prueba N°1 de la Tabla [2.2.1], conjuntamente con las características del atomizador a Nivel Piloto descritas en la Tabla: [2.2.2] se determina la *periferia húmeda del disco* (Mp), despejando esta variable de la Ec. [2.10], propuesta por Friedman, Gluckert y Marshall<sup>[3]</sup>.

De la misma forma se obtiene la *periferia húmeda del disco* para las pruebas de secado

2 y 3, con diferentes porcentaje de sólidos y razón de alimentación; manteniendo constante la velocidad de giro del disco.

La determinación de la superficie periférica húmeda (Mp) a nivel piloto es importante porque correlaciona las características del atomizador con las variables operacionales de la alimentación, permitiendo por lo tanto del valor piloto obtenido por ejemplo para un lodo de 24% en sólidos de bentonita activada a secar, obtener una *periferia húmeda de disco*: Mp (2) = 4,389, y usar luego este valor para el escalamiento industrial.

Manteniendo una superficie húmeda para el disco igual a la encontrada en planta piloto y haciendo uso de la ecuación [2.10]; se determinarán las características del nuevo disco atomizador, asumiendo varios diámetros de disco y diferentes velocidades de giro (N); teniendo además las propiedades del lodo que se alimentará al secador, iguales a las del proceso de nivel piloto. Se buscará encontrar una superficie húmeda igual a la determinada en planta piloto.

**Tabla N.º 1.** Condiciones de operación de las pruebas realizadas

Nro	% Sólidos en la alimentación	Densidad g./ cm <sup>3</sup>	Viscosidad g./ cm x min.	Tensión Superficial g./ min <sup>2</sup>
1	20.03	1,084	4,652	127 800
2	24.03	1,129	8.964	79 700
3	13.57	1,158	11,553	48 900

**Tabla N.º 2.** Características del atomizador

Radio del disco <b>R</b> (cm)	nº de ventanas <b>n</b>	Altura de la Ventana <b>h</b> (cm)	Velocidad de Giro <b>N</b> (r.p.m.)	Razón de Alimentación <b>ML</b> (g./ min.)
5,08	24	0,59	31 000	26,73 <sub>4</sub>

#### IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para esta operación fue necesario determinar las propiedades físico – químicas del lodo alimentado al secador, principalmente: densidad, viscosidad, y tensión superficial, en función a la concentración de sólidos. Debido al rango de operaciones en la que se trabajó no fue necesario manipular altas concentraciones de sólidos, las determinaciones fueron realizadas entre 8 a 34% de sólidos, reflejando una tendencia lineal para las tres propiedades.

Las pruebas realizadas fueron hechas a diferentes concentraciones de sólido y a diferentes flujos de alimentación reportados en la Tabla N.º 1, manteniendo constante los parámetros del secador y del atomizador así como las características propias de este último, Tabla N.º 2 : (R, N, n, h). Los parámetros fijados para el secador fueron: flujo de aire de secado y la temperatura del aire caliente que entra al secador (140°C), aunque esta última puede variarse mediante el juego de resistencias, en el disco atomizador el único parámetro que puede ser modificado es la velocidad de giro del disco atomizador (N=31 000 rpm), que está en función a la presión del aire que lo acciona.

Bajo estas condiciones de operación para el secado continuo por atomización, el sistema produce un producto seco casi instantáneamente, (con un tiempo de retención pequeño) por lo tanto no es posible hacer un seguimiento al proceso de secado. Dentro de la secuencia de secado, una gota pasa por dos etapas: Evaporación constante y el decaimiento de la evaporación, esta es una de las razones por la que se implementó el secado por lote (en el secador de bandeja) para determinar la curva de secado y fijar las etapas por la que pasa la arcilla activada en el proceso de secado.

Las condiciones de la alimentación para el secado por atomización, están condicionadas por la operación de lavado de la arcilla ácida, la que deberá tener un pH mayor o igual a 3,6 y una concentración de sólidos lo más alta posible, fijada esta en el último

lavado (6to) donde se dejó sedimentar a tiempo infinito logrando una concentración máxima en sólidos de 33,27%, esta sería la concentración límite de la alimentación hacia el secador. Aunque las pruebas realizadas en el secador se efectuaron en un rango de 13 a 24% en contenido de sólidos.

En el balance de materia en el secador piloto, se determinó una fracción de pérdidas importante, la que ocasiona la deposición de bentonita en la pared de la cámara ( $P_B = 12,6\%$ ), son varias las causas que provocan deposición, más aún en cámaras pequeñas; pero en nuestro caso la alta deposición se debió al corto tiempo de operación (~30 minutos), teniendo en cuenta que esta es una operación continua a ser operada durante horas e incluso días, y el mayor porcentaje de sólidos que se adhieren a las paredes ocurre en los primeros minutos de la operación.

Para lo cual fue necesario realizar análisis de mallas para cada corrida. El análisis de malla fue realizado en un juego de tamices tyler tomando una muestra de **30** gramos y colocando el juego de tamices en un rotad. Del análisis de malla se determina el *diámetro medio de partícula* ( $D_{ss}$ ), es quizás la variable más importante que da el sistema como respuesta a la operación realizada bajo las condiciones especificadas; las otras son humedad final del sólido y la temperatura del aire de salida y en menor medida la temperatura del sólido a la salida.

Con la determinación experimental del *diámetro medio de partícula* ( $D_{ss}$ ) de la muestra y las propiedades de la alimentación, conjuntamente con las características del atomizador y razón de alimentación para la prueba; se determina la *periferia húmeda del disco* ( $M_p$ ), despejado de la ecuación **[2.10]**, propuesta por Friedman, Gluckert y Marshall **(2)**. Esta correlación empírica es capaz de englobar todos estos parámetros involucrados en el proceso, de allí que es válida para el escalamiento de diferentes tamaños de disco, pero dentro del rango de condiciones para las cuales fue ajustada.

Al igual que en el secado discontinuo, dentro de la secuencia del secado por atomización, una gota también pasará por las dos etapas determinadas en el secador de bandejas: evaporación constante (constant rate) y el decaimiento de la evaporación (falling rate). Si la gota establece un equilibrio dinámico con el aire caliente, exhibirá un período de secado constante. La duración de este período constante dependerá de la fuerza directora de la temperatura y del mecanismo interno de transferencia de masa. El segundo período, el de decaimiento de la evaporación; consta generalmente de dos etapas, pero parece bastante probable que en el secado de la bentonita activada estas dos etapas ocurran simultáneamente, tal como ha sido detectado en el secado por lote<sup>[16]</sup> donde se determinó para este periodo una sola ecuación ( $W = 0,003463 X_m^{(1,6556)}$ ) con un alto coeficiente de correlación.

El secado por atomización por los resultados ha demostrado ser una eficiente alternativa dentro de las operaciones para la obtención de bentonitas activadas. Así tenemos que la mezcla reaccionante lavada y sedimentada no requerirá de ninguna otra operación (filtración, centrifugación, etc.) ingresará al atomizador de disco rotatorio el cual está en condiciones de procesar un amplio rango de concentración de sólidos en la alimentación (incluido dentro de este rango la concentración máxima que alcanza la sedimentación de la bentonita activada ~33% y una acidez con un pH  $\geq$  a 3,6), proporcionando un producto final que cumple con las especificaciones en un amplio margen: por ejemplo para una alimentación de un lodo de concentración media (24%), se obtuvo un producto final de 10% de humedad y el 100% pasa la malla 200 Tyler.

## V. CONCLUSIONES

La ecuación [2.10] propuesta por Friedman, Gluckert y Marshall, que engloba los parámetros principales de operación ha demostrado que es una ecuación válida para el rango de operación del proceso experimental el cual reportó un tamaño de partícula medio

(figura 4) entre 35 a 65 micrones, mientras que la ecuación [2.10] nos dio un valor medio de  $D_{vs1} = 54.6$  micrones, demostrando que se puede utilizar en la simulación del proceso.

Con respecto a los resultados de la operación de secado por atomización en el proceso de secado de la arcilla activada se obtuvieron muy buenos resultados dando un producto final de 10 % de humedad y el 100 % pasa la malla 200 Tyler, superando las especificaciones comerciales del producto que son una humedad entre 8 y 12 %, y que el 80 % pasa la malla 200 Tyler. Dando un producto más fino que el requerido y con una humedad óptima.

Las condiciones de operación del proceso experimental se dieron entre 113 a 24 % de sólidos (alta humedad) siendo la condición límite de 33 % de sólidos, mientras que en el proceso industrial se da entre 25 a 30 % de sólidos, siendo las condiciones del estudio más drásticas que las del proceso real, concluyendo que el proceso de secado por atomización es muy adecuado para el secado de la arcilla activada.

## VI. RECOMENDACIONES

Otra operación importante es el lavado de la mezcla reaccionante, al final de la reacción siempre quedará un exceso considerable de ácido<sup>[1]</sup>, que será necesario reducir a una acidez mínima requerida; a la vez que se requerirá sedimentar el lodo lavado, tratando de lograr la mayor concentración de sólidos, para esto será necesario hacer un estudio de la sedimentación ácida de las arcillas activadas, en operación discontinuas, en función de la acidez que irá disminuyendo en cada lavado, hasta llegar a la acidez requerida.

Un estudio complementario o alternativo vendría a ser el estudio de la sedimentación y lavado continuo de los ácidos de la bentonita activada, orientados a implementar un sistema de "Sedimentadores Continuos a Contracorriente" <sup>[3]</sup>, método estandarizado para el lavado de la arcilla ácida a nivel industrial.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Siddiqui, M. K. Bleaching Earths. Londres: Pergamon Press; 1968.
- [2] Friedman S. J., Gluckert, Marshall W. R. Centrifugal Disk Atomization. Chem. Eng. Progr. 1952. Pag. 48, 181.
- [3] Perry J. Chemical Engineering Handbook, 5ed. New York: Mc Graw-Hill; 1973.
- [4] Foust AS. Principios de Operaciones Unitarias. México: CECSA; 1977.
- [5] Treybal R. Operaciones de Transferencia de Masa, 2 ed. México: McGraw – Hill; 1980.
- [6] Belcher DW, Smith DA, Cook E M. Design and use of Spray Dryers Part I and II, Chem Eng 1963: 30, 83, 14, 201.
- [7] Chemical Engineering. Drying Equipment Reprinted from Chemical Engineering. Chem Eng 1977 Jan 17.
- [8] Crosby EJ, Marshall WR. Effects of Drying Conditions on the Properties of Spray – Dried Particles. Chem Eng Progr. 1958: 54, 56.
- [9] Helsing H. Spray Drying of Ceramic Material Such as Tile Pressbody, Etc. A/S Nitro Atomizer Copenhagen.
- [10] Helsing H. Spray Drying of Ceramic Material Such as Tile Pressbody, Etc. A/S Nitro Atomizer Copenhagen.
- [11] Lapple CE, Shepherd CB. Calculations of Particle Trajectories. Ind Eng Chem 1940: 32: 605.
- [12] Master K. Spray Drying, Leonard Hill Book, Londres: Leonard Hill Book; 1972.
- [13] Marshall WR, Seltzer E. Principles of Spray Drying. Chem Eng Progr 1950: 46: 501.
- [14] Trommelen AM., Crosby EJ. Evaporation and Drying Of Drops in Superheated Vapors. AIChE Journal 1970: 16 : 857.
- [15] Wooldridge M. , Edgeworth. Pilot Plans, Models and Scale Up Methods in Chemical Engineering. New York: Mc Graw Hill Book Company; 1957.
- [16] Romero y Otiniano, Pedro. Estudio del Secado por Atomización y Bandeja, en el Proceso de Activación de la Bentonita con  $H_2SO_4$  a Nivel Piloto, tesis para título profesional, UNMSM – FQIQ; 2006.