

DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE LOS NÚCLEOS SIN REACCIONAR A LA SALIDA DE UN REACTOR EN UN PROCESO FLUIDO-SÓLIDO NO CATALÍTICO

Dania Del Toro Alvarez, Antonio Pons Hernández, René Viera Bertrán
Universidad de Oriente

Este trabajo se ocupa de la determinación de la distribución de tamaños final que alcanzará una masa de partículas sólidas de tamaños diferentes, a la salida de un reactor continuo con agitación, una vez que ha sido sometida a un proceso reaccionante fluido-sólido no catalítico, y de la distribución de tamaños resultante de la mezcla de dos corrientes con distribuciones diferentes. El equipamiento utilizado ha sido el correspondiente a la planta de Neutralización y a los laboratorios de la Empresa "Comandante Pedro Sotto Alba". El procedimiento consistió en realizar un proceso de muestreo sobre la primera etapa de la batería de reactores, realizar pruebas de tamizado a los sólidos de la pulpa de coral alimentada al primer reactor de la batería, desarrollar un modelo matemático adecuado a la situación que se estudia, confeccionar un algoritmo y un programa computacional con el modelo matemático obtenido y por último validar los resultados. Al finalizar el trabajo se pudo concluir que el modelo matemático desarrollado, el algoritmo y el programa basado sobre el mismo permiten predecir, sea cual sea el mecanismo de reacción controlante, la distribución de tamaños que alcanzará una masa de partículas sólidas de distribución conocida, después de someterse a un proceso reaccionante fluido sólido no catalítico, en un reactor continuo con agitación; y además, determinar la distribución de tamaños resultante de la mezcla de dos corrientes de suspensión fluido-sólido, cada una de ellas con distribuciones diferentes.

Palabras clave: *distribución de tiempos de residencia, distribución de tamaños, etapa controlante, sistema fluido-sólido no catalítico, reactor continuo con agitación.*

This work is in charge of from the determination of the final distribution of sizes that will reach a mass of solid particles of different sizes, to the exit of a continuous reactor with agitation, once it has been subjected to a reaction process flowing - solid non catalytic; and of the resulting distribution of sizes of the mixture of two currents with different distributions. The used equipment has been the corresponding to the plant of Neutralization and to the laboratories of the Company Major Pedro Sotto Alba and the procedure consisted in: to carry out a sampling process on the first stage of the battery of reactors, to carry out tests of having sifted to the solids of the coral pulp fed to the first reactor of the battery, to develop an appropriate mathematical model to the situation that is studied, to make an algorithm and a calculation program with the obtained mathematical pattern and lastly to validate the results. When concluding the work you can conclude that the developed mathematical pattern, the algorithm and the program based on him allow, to predict, be which is the controlling mechanism of reaction, the distribution of sizes that will reach a mass of solid particles of well-known distribution, after not undergoing a reaction process flowing- solid non catalytic, in a continuous reactor with agitation, and also, to determine the resulting distribution of sizes of the flowed mixture of two suspension currents - solid; each one of them with different distributions.

Key words: *distribution of times of residence, distribution of sizes, controlling stage, flowing-solid, system non catalytic, continuous reactor with agitation.*

Introducción

En este trabajo se presenta el desarrollo de un modelo matemático y de un algoritmo basado sobre el mismo que permite determinar la distribución de tamaños final que alcanzará una masa de partículas

sólidas de tamaños diferentes, cuando se somete a un proceso reaccionante fluido-sólido no catalítico, en un reactor continuo con agitación; y la distribución de tamaños resultante de la mezcla de dos corrientes de suspensión fluido-sólido, cada una de ellas con distribuciones diferentes.

La necesidad de resolver situaciones de esta clase es típica prácticamente de todos los sistemas reaccionantes fluidos-sólidos no catalíticos, y un ejemplo de ello se presenta en la planta de neutralización de la empresa "Comandante Pedro Sotto Alba" de Moa.

La importancia particular de este estudio descansa en que aporta elementos imprescindibles a trabajos actualmente en curso, que pretenden dar solución a problemas vitales existentes en el proceso de neutralización tales como:

1. Elevado consumo de coral, y en consecuencia, aumento del costo de producción.
2. Reacción de neutralización que continúa en los sedimentadores, como consecuencia de exceso de coral en el alimentado.
3. Baja eficiencia en la planta de precipitación de sulfuros, como consecuencia de valores de pH fuera de norma.
4. Pérdidas elevadas provocadas por la necesidad de trabajos de mantenimiento en sedimentación provocadas por incrustaciones.

En prácticamente todos estos problemas se encuentra, como un factor común, el desconocimiento cuantitativo del efecto de la distribución de tamaños del sólido alimentado, y su evolución progresiva a su paso por las diferentes etapas del proceso reaccionante.

Sin embargo, dada la frecuencia de sistemas reaccionantes de esta clase y lo común que resulta en ellos las situaciones aquí tratadas, la importancia del trabajo va más allá del caso particular que le sirve de soporte en este estudio.

Los objetivos del trabajo son:

1. Determinar la distribución de tamaños de una masa de partículas como resultado de un proceso fluido-sólido no catalítico a la salida de un reactor continuo con agitación.
2. Determinar la distribución de tamaños resultante de mezclar dos corrientes con distribuciones diferentes.

Materiales y métodos

El equipamiento utilizado corresponde a la planta de Neutralización y a los laboratorios de la

Empresa "Comandante Pedro Sotto Alba", y el procedimiento consistió en realizar un proceso de muestreo sobre la primera etapa de la batería de reactores de la planta de neutralización; realizar pruebas de tamizado a los sólidos de la pulpa de coral fresca alimentada al primer reactor de la batería, para identificar la distribución de tamaños; desarrollar un modelo matemático que permita determinar la distribución de tamaños de una masa de partículas a la salida del primer reactor de la batería, y por último, validar los resultados.

Parte Experimental

Este trabajo consiste en determinar la distribución de tamaños que alcanza una masa de partículas que se alimenta a un reactor continuo con agitación una vez que han reaccionado en su interior, además de determinar la distribución resultante de mezclar dos corrientes con distribuciones diferentes. En consecuencia, esta parte va dirigida a:

- Presentar las expresiones fundamentales que conforman el modelo matemático.
- Mostrar el algoritmo general que se va a utilizar para cumplimentar los objetivos del trabajo.

Desarrollo del modelo matemático

El modelo matemático del comportamiento de una etapa cualquiera, se basa sobre tres suposiciones básicas:

- 1) Las partículas se comportan como un macrofluido perfecto, es decir, cada partícula posee un comportamiento propio, dado sus dimensiones y la composición del medio.
- 2) Dentro de cada etapa existen condiciones de mezclado perfecto para la suspensión sólido-líquido; en consecuencia dentro de la etapa y en la corriente de salida, la distribución de tamaños de las partículas es la misma, y la composición de la fase líquida, el pH, etcétera tienen el mismo valor.
- 3) Debido al carácter de macrofluido y a la condición de mezclado perfecto, las partículas de un mismo tamaño alcanzan diferentes grados de conversión, según su tiempo de residencia en el reactor.

El proceso que se lleva a cabo en la planta de neutralización se caracteriza por ser un sistema líquido-sólido, en el cual, un líquido (H_2SO_4) se pone en



Para el sistema reaccionante que se estudia se considera modelo centro sin reaccionar, partículas de tamaño fijo y difusión externa como mecanismo controlante; por lo que las expresiones que se muestran a continuación, se ajustan a las consideraciones realizadas.

- Expresiones componentes del modelo matemático.

$$\bar{I} = \sum_{i=1}^{NT} (\bar{I}_i) * F \quad (2)$$

$$\bar{I} = \frac{e^{-y} + y - 1}{y} \quad (3)$$

$$y = \frac{\tau_i}{t} \quad (4)$$

$$\bar{t} = V / q \quad (5)$$

$$\tau_i = \frac{1.939717}{CAS^{1.28641}} \quad (6)$$

$$\frac{\tau_i}{\tau_{bn}} = \left(\frac{Dp_i}{Dp_b} \right)^{K_0} \quad (7)$$

donde:

CAS: Concentración del reactivo líquido

DPM: Diámetro medio de partícula

Dp_i y Dp_b : Diámetro promedio de partícula de un tamaño determinado y diámetro promedio de partícula considerado como tamaño base, respectivamente

DPI: Diámetro de partícula por debajo del tamiz superior

DPS: Diámetro de partícula por encima del tamiz inferior

contacto con un sólido ($CaCO_3$), reaccionando con él, y dando lugar a productos sólidos y gaseosos, como se muestra según la reacción estequiométrica siguiente:

F_i : Fracción de partículas de tamaño i en el alimentado

FRS: Fracción de partículas a la salida del reactor 1

FRM: Fracción de partículas resultante de la mezcla de dos corrientes

NT: Número total de tamaños diferentes de partículas en el alimentado

\bar{I} : Fracción no convertida promedio total

i : Distintos tamaño de las partículas (1,2,3,...NT)

\bar{I}_i : Fracción no convertida promedio para partículas de tamaño i

K_0 : Factor que depende del mecanismo controlante de la reacción, en este caso $K_0 = 1$

q : Flujo volumétrico que atraviesa el reactor

V : Volumen del reactor

\bar{t} : Tiempo de residencia promedio en el reactor

τ_i : Tiempo de reacción completa de un determinado tamaño de partícula

τ_{bn} : Tiempo de reacción completa del tamaño de partícula considerado como tamaño base

Algoritmo general para determinar la distribución de tamaños de una masa de partículas a la salida de un reactor continuo con agitación, después de ser sometidas a un proceso reaccionante fluido-sólido no catalítico

Después que las partículas se someten a un proceso reaccionante, las mismas cambian su tamaño con respecto a su tamaño inicial. Este cambio depende del tamaño inicial de las partículas, ya que las de mayor tamaño necesitan mayor tiempo de reacción completa con respecto a las más pequeñas. De esto se infiere, que al salir del reactor, las partículas más grandes reducen su tamaño, no siendo así para las más pequeñas, que tienden a desaparecer durante el proceso de reacción.

En la corriente de salida, en cada tamaño se va a encontrar una determinada cantidad de partículas de ese tamaño que no se tenía antes de ser sometidas al proceso reaccionante.

Esto se puede representar, de manera esquemática, de la siguiente forma, recordando

$$i_1 = \left(\begin{array}{l} \text{Fracción o masa} \\ \text{de partículas que quedó} \\ \text{sin reaccionar. } i_1 \end{array} \right) \quad (8)$$

$$i_2 = \left(\begin{array}{l} \text{Fracción o masa} \\ \text{de partículas que quedó} \\ \text{sin reaccionar. } i_2 \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Fracción o masa} \\ \text{de partículas } i_1 \text{ que se} \\ \text{transformó en } i_2. \end{array} \right) \quad (9)$$

$$i_3 = \left(\begin{array}{l} \text{Fracción o masa} \\ \text{de partículas que quedó} \\ \text{sin reaccionar. } i_3 \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Fracción o masa} \\ \text{de partículas } i_1 \text{ que se} \\ \text{transformó en } i_3. \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Fracción o masa} \\ \text{de partículas } i_2 \text{ que se} \\ \text{transformó en } i_3. \end{array} \right) \quad (10)$$

$$i_{NT} = \left(\begin{array}{l} \text{Fracción o masa} \\ \text{de partícula que quedó} \\ \text{sin reaccionar. } i_{NT} \end{array} \right) + \sum_{j=1}^{NT-1} \left(\begin{array}{l} \text{Fracción o masa} \\ \text{de partículas } i_j \text{ que se} \\ \text{transformó en } i_{NT-1}. \end{array} \right) \quad (11)$$

Teniendo en cuenta estos elementos, de manera general los pasos por seguir son los siguientes:

1. Determinar la masa de las partículas que no cambia de tamaño.
2. A partir del segundo tamaño, determinar la masa de las partículas que aparecen de cada tamaño.
3. Los puntos 1 y 2 se repiten tantas veces como el número total de tamaños de partículas.
4. Finalmente, se determina la fracción correspondiente a cada tamaño de partículas.

Una vez determinado la distribución de tamaños de la masa de partículas a la salida del primer reactor, entonces se puede determinar la distribución de tamaños resultante de mezclar la masa de partículas que sale del primer reactor con la que entra al segundo reactor a través de la media ponderada de las dos corrientes mezcladas.

que: i representa los distintos tamaños de partículas (1,2,3,...,NT), y NT el número total de tamaños de partículas en el alimentado.

La fracción resultante en la corriente de salida viene dada, según el tamaño, por:

Resultados y discusión

Para el desarrollo de este trabajo, se procedió a realizar un proceso de muestreo en la Planta de Neutralización, donde se tomaron un total de 13 muestras a la entrada y salida del primer reactor de la batería, anotando además, los valores correspondientes a las variables de operación. Por otra parte se identificó la distribución de tamaños de una muestra de coral como se puede observar en la (tabla 1).

En la (tabla 1) se observa que las partículas de menor tamaño, es decir, las que se encuentran en el tamiz por debajo de 325 mesh representa el 76,68 por ciento, siendo este el más elevado de todas las fracciones; y como el tiempo de reacción completa (t_i) disminuye en igual sentido que el tamaño de la partícula, es necesario conocer el comportamiento de la distribución de tamaños de la fracción por debajo de 325 mesh.

Tabla 1
Datos de tamizado y análisis granulométrico a la pulpa de coral

No	Bajo Mesh	Sobre Mesh	DPI (mm)	DPM (mm)	DPS (mm)	Fracción másica bajo (Fi)	Fracción másica acumulativa (FIM)
1	-	20	-	-	0,833	0,005 629 45	1
2	20	50	0,833	0,56	0,287	0,021 897 6	0,994 370 552
3	50	100	0,287	0,217	0,147	0,028 242 66	0,972 472 952
4	100	200	0,147	0,110 5	0,074	0,058 966 09	0,944 230 295
5	200	325	0,074	0,058 5	0,043	0,118 504 66	0,885 264 208
6	325	-	0,043	-	-	0,766 759 55	0,766 759 548

En este caso la planta, no cuenta con un juego de tamices que permita la obtención de dicha información, es por ello que se obtuvo el modelo de la curva acumulativa para de esa forma ampliar la información hasta diez tamaños como se muestra en la (tabla 2). Aplicando el algoritmo desarrollado en el acápite anterior y con la distribución de tamaños

mostrada en la (tabla 2) se procedió a determinar primeramente la distribución de tamaños a la salida del reactor 1 (FRS) y la distribución de tamaños resultante (FRM) de mezclar la corriente que sale del primer reactor con la corriente fresca que entra al segundo reactor o lo que es lo mismo la que entra al primero.

Tabla 2
Distribución de tamaños ampliada, mediante el modelo ajustado

No	Bajo Mesh	Sobre Mesh	DPI (mm)	DPM (mm)	DPS (mm)	Fracción másica bajo (Fi)	Fracción másica acumulativa (FIM)
1	-	20	1,631	1,232	0,833	0,005 629 45	1
2	20	50	0,833	0,56	0,287	0,021 897 6	0,994 370 552
3	50	100	0,287	0,217	0,147	0,028 242 66	0,972 472 952
4	100	200	0,147	0,110 5	0,074	0,058 966 09	0,944 230 295
5	200	325	0,074	0,058 5	0,043	0,118 504 66	0,885 264 208
6	325	-	0,043	0,035	0,027	0,153 351 91	0,766 759 548
7	-	-	0,027	0,023	0,019	0,153 351 91	0,613 407 638
8	-	-	0,019	0,017	0,015	0,153 351 91	0,460 055 729
9	-	-	0,015	0,014	0,013	0,153 351 91	0,306 703 819
10	-	-	0,013	0,012	0,011	0,153 351 91	0,153 351 191

Los resultados de ambas determinaciones para una corrida se muestran en la (tabla 3).

En las bibliografías revisadas no se reportan ni aspectos teóricos, ni procedimiento alguno acerca de la distribución de tamaños de partículas de tamaños variable como resultado de un proceso reaccionante fluido-sólido no catalítico, por lo que para validar o estar seguro del resultado obtenido, fue necesario inicialmente, a partir de una distribución menos compleja (tabla 4), realizar cálculos utilizando el algoritmo propuesto para la deter-

minación de la distribución de tamaño a la salida del Reactor 1 por vía manual, resultados de la (tabla 5), y luego procesar dichos datos a través del programa computacional desarrollado, resultados de la (tabla 6). Al comparar los resultados obtenidos por ambas vías, se observa que los resultados obtenidos son coincidentes en todas sus cifras; esto permite validar los resultados obtenidos y tener la seguridad del programa elaborado como herramienta para situaciones similares a la descrita en este trabajo.

Tabla 3
Resultados de la distribución de tamaños de la corrida 3
(Difusión externa de la película líquida, tamaño fijo)

Tamaños	Diámetro promedio (DPM)(mm)	Fracciones másicas		
		Entrada Pulpa de Coral (Fi)	Salida Reactor 1 (FRS)	Entrada Reactor 2 (FRM)
1	1,232 0	0,005 629 45	0,020 770 53	0,008 494 53
2	0,560 0	0,021 897 60	0,080 767 64	0,033 037 31
3	0,217 0	0,028 242 66	0,095 465 82	0,040 962 99
4	0,110 5	0,058 966 09	0,157 876 3	0,077 682 42
5	0,058 5	0,118 504 66	0,196 740 44	0,133 308 86
6	0,035 0	0,153 351 91	0,165 612 65	0,155 671 95
7	0,023 0	0,153 351 91	0,106 046 01	0,144 400 43
8	0,017 0	0,153 351 91	0,069 610 64	0,137 505 93
9	0,014 0	0,153 351 91	0,047 988 23	0,133 414 42
10	0,012 0	0,153 351 91	0,059 121 17	0,135 521 16

Tabla 4
Datos de distribución de tamaños para comparar

No	DPS (mm)	DPM (mm)	DPI (mm)	Fi
1	210	200	190	0,400 0
2	190	180	170	0,000 0
3	170	160	150	0,000 0
4	150	140	130	0,000 0
5	130	120	110	0,000 0
6	110	105	100	0,600 0
7	100	95	90	0,000 0
8	90	80	70	0,000 0
9	70	60	50	0,000 0
10	50	25	0	0,000 0

Tabla 5
Resultados manuales de la distribución de tamaños para comparar
(difusión externa de la película líquida, tamaño fijo)

Tamaños	Diámetro promedio (DPM)(mm)	Fracciones másicas		
		Entrada pulpa de coral (Fi)	Salida reactor 1 (FRS)	Entrada reactor 2 (FRM)
1	200	0,400 0	0,125 6	0,222 8
2	180	0,000 0	0,151 5	0,097 8
3	160	0,000 0	0,080 2	0,051 8
4	140	0,000 0	0,045 0	0,029 1
5	120	0,000 0	0,209 1	0,347 6
6	105	0,600 0	0,129 7	0,083 8
7	95	0,000 0	0,088 5	0,057 1
8	80	0,000 0	0,103 6	0,066 9
9	60	0,000 0	0,044 1	0,028 5
10	25	0,000 0	0,022 7	0,014 6

Tabla 6
Resultados computacionales de la distribución de tamaños para comparar
(difusión externa de la película líquida, tamaño fijo)

Tamaños	Diámetro promedio (DPM)(mm)	Fracciones másicas		
		Entrada pulpa de coral (Fi)	Salida reactor 1 (FRS)	Entrada reactor 2 (FRM)
1	200	0,400 0	0,125 6	0,222 8
2	180	0,000 0	0,151 5	0,097 8
3	160	0,000 0	0,080 2	0,051 8
4	140	0,000 0	0,045 0	0,029 1
5	120	0,000 0	0,209 1	0,347 6
6	105	0,6000	0,129 7	0,083 8
7	95	0,000 0	0,088 5	0,057 1
8	80	0,000 0	0,103 6	0,066 9
9	60	0,000 0	0,044 1	0,028 5
10	25	0,000 0	0,022 7	0,014 6

Conclusiones

1. El modelo matemático desarrollado y el algoritmo basado en él permiten, predecir, sea cual sea el mecanismo de reacción controlante, la distribución de tamaños que alcanzará una masa de partículas sólidas de distribución conocida, después de someterse a un proceso reaccionante fluido sólido no catalítico, en un reactor continuo con agitación.
2. Se ha desarrollado un algoritmo que permite determinar la distribución de tamaños resultante de la mezcla de dos corrientes de suspensión fluido-sólido; cada una de ellas con distribución diferente.

Bibliografía

1. García, T., Estudio y aplicación de modelos acoplados de flujo, Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, Vol. I, Separata, <http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECEOC04>, 2004.
2. Kilander, J., Blomström S., Rasmuson A., Chemical Engineering Science. Spatial and Temporal Evolution of Flocculation Size Distribution in a Stirred Square tank Investigated using PIV and Image Analysis, vol 61, diciembre 2006, p. 7651-7667. www.sciencedirect.com
3. Priscilla J., Ka M. Chemical Engineering Science. Particle size distribution by design. Vol 57, 2002, p. 2125-2138. www.sciencedirect.com
4. Roth O., Bo'nemark T. y Jonsson M. Journal of Nuclear Materials. The influence of particle size on the kinetics of UO₂ oxidation in aqueous powder suspensions, vol. 353, julio 2006, p. 75-79, www.sciencedirect.com
5. Viera, R., Soler S., Diseño y análisis de reactores químicos, tI, III, IV, Ediciones Enpes, La Habana, 1991.