

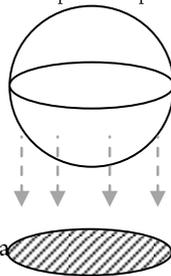
2.- Mecánica de partículas

Las partículas en el seno de un fluido están sometidas a fuerzas de distintas naturalezas. En principio se manifiesta el peso en función de la atracción de la gravedad, luego hay que considerar el empuje debido al volumen de fluido desplazado (flotación) y por último que su propio movimiento contra el fluido produce un rozamiento proporcional al cuadrado de su velocidad. En cuanto al sentido, la atracción de la gravedad y la flotación son contrarias entre sí, la primera hacia abajo y la segunda hacia arriba. El cuerpo se hundirá o flotará según su densidad sea mayor o menor que la del fluido en la que se encuentra inmerso. Las partículas que se hunden lo hacen aceleradamente, puesto que en ese caso $\delta_p > \delta_f$ y $Vg\delta_p > Vg\delta_f$ pero la fuerza resultante $F_p = Vg(\delta_p - \delta_f)$ sigue respondiendo a la aceleración gravitatoria. La partícula que estaba en reposo aumenta la velocidad al caer dentro del fluido. El rozamiento, despreciable en el primer momento, llega a imponerse ya que su valor es el que más aumenta: $F_r = C \delta_f v^2 \frac{A}{2}$

para una partícula esférica:

$$V = \frac{\pi D^3}{6} \text{ y } A = \pi D^2/4$$

A es la proyección normal al movimiento del área de la partícula



C es el coeficiente de arrastre
 v es la velocidad de la partícula
 D su diámetro y
 δ es la densidad (para tal fluido y partícula).

2.1.- Sedimentación

Cuando la resistencia producida por el rozamiento alcanza el valor de la fuerza resultante impulsora. Estas se anulan y la partícula sedimenta a una razón constante conocida como velocidad terminal.

$$F_d = C \cdot \delta_f \cdot v^2 \cdot A/2$$


$$F_s = V \cdot g \cdot (\delta_p - \delta_f)$$

Nuevamente suponiendo partículas esféricas:

$$\pi D^3 g (\delta_p - \delta_f) = C \delta_f v^2 D^2 / 8$$

y considerando: $C = 24/Re$ (para flujos laminares)

$$\rightarrow v = D^2 g (\delta_p - \delta_f) / 18 \mu$$

que se conoce como **Ley de Stokes**

o de la siguiente expresión:

$$v = D^2 \cdot a \cdot (\delta_p - \delta_f) / 18 \mu$$

conocida como:

“Ecuación Fundamental del movimiento de partículas en fluidos”.

la cual se aplica en los cálculos de centrifugación considerando que la fuerza impulsora es la centrífuga:

$$F_c = m \cdot r \cdot \omega^2$$

y la aceleración centrífuga es $r \cdot \omega^2$

Aunque las partículas no son necesariamente esféricas, la aproximación es útil en los casos en que estas no presentan actividad fluidodinámica importante, en este caso debe corregirse el área proyectada mediante un factor determinado en condiciones de laboratorio.

Hasta aquí no hemos apreciado el movimiento del fluido. Obviamente si este lo hace con una velocidad mayor a la terminal de las partículas consideradas estas serán arrastradas con él, formando una suspensión. Si por el contrario el fluido se mueve por debajo de la velocidad terminal de las partículas, estas se depositarán en el fondo del conducto, lo que se conoce como sedimentación.

La sedimentación es una operación útil para separar sólidos arrastrados por fluidos, mediante la disminución de la cantidad de movimiento de este último.

Supongamos el caso sencillo (y molesto) del polvo arrastrado por el viento. (Cálculo de la velocidad de sedimentación de polvo en aire).

Hay que considerar la temperatura en que se encuentra el fluido (en este caso aire) puesto que su densidad puede variar con el estado térmico del mismo (esto es más importante cuando se trata de gases).

Suponiendo aire a 0°C (del Hayes; Manual de datos para ingeniería de los alimentos) $\delta_f = 1,2 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$ y $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ [Pa.s]}$

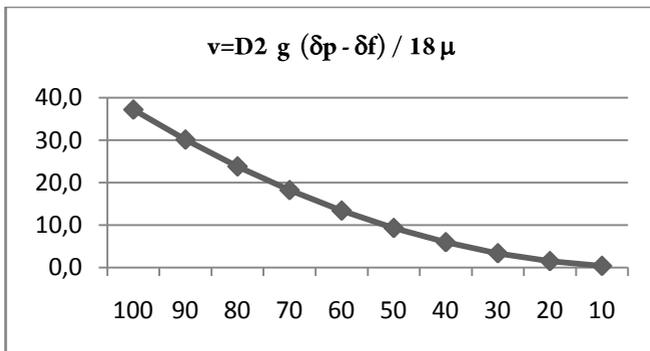
Para partículas de polvo (tierra) $\delta_p = 1280 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$

Considerando un tamaño de $5 \cdot 10^{-5} \text{ [m]}$

Luego se puede calcular que la velocidad terminal será:

$$v = D^2 g (\delta_p - \delta_f) / 18 \mu$$

$$v = \frac{(5 \cdot 10^{-5})^2 \text{ [m}^2\text{]} \cdot 9,8 \text{ [m/s}^2\text{]} (1280 - 1,2) \text{ [Kg/m}^3\text{]}}{18 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ [Pa.s]}} = 1,9 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$



velocidades terminales para partículas de polvillo de hasta 100μ

2.2.- Flotación

La separación de mezclas de tres fases (gaseoso - líquido-sólido) que se promueve aprovechando la adhesión selectiva de partículas sólidas a las burbujas de aire, resulta conveniente en algunos casos para tratar mezclas heterogénea a nivel molecular o iónico de dos o más componentes, no reactivos entre sí, cuya proporción se encuentra acotada entre ciertos límites de disposición.

Algunos usos de los tratamientos de flotación (separación diferencial de partículas minerales):

Adecuación de materias primas (pigmentos, caolín, arcillas cerámicas).

Cuidado del medio ambiente (separación sólido-líquido o líquido-líquido).

Minerales no metálicos, fosfatos, fluorita

Óxidos Minerales (Mn, Nb, Arcillas)

Recuperación de sustancias valiosas: Au, Ag, Hg, carbono “metalúrgico”, sales solubles: KCl, NaCl, Yodo, Ácido Bórico Sulfuros (Cu, Pb, Zn, Mo)

Tratamiento de compuestos orgánicos (plantas de extracción por solventes), aceites, grasas y colorantes.

Tratamiento de efluentes que contienen metales pesados, aniones (CN, CrO₄, AsO₄, SO₄, PO₄, MoO₄, F), complejos y quelatos (galvanoplastia, siderurgia, minería – metalmecánica).

2.3.- Centrifugación

La aplicación del movimiento de giro para producir fuerza centrífuga y ordenar los componentes de una mezcla, diferenciadamente según sus densidades, ordenadamente en el radio de giro para su separación, ha sido utilizado exitosamente en la industria de los alimentos hace más de cuatrocientos años, principalmente en la obtención de la crema de la leche.

Las máquinas centrifugadoras actuales son eficientes, relativamente económicas y con capacidades para grandes prestaciones en regímenes continuos de trabajo.

La fase liviana se separa de la pesada naturalmente por decantación debido su menor densidad. En el gráfico se muestra el modelo físico que corresponde a esta separación que se puede describir por la relación de Stokes, ya que se producirá en fluido estático con desplazamiento laminar.

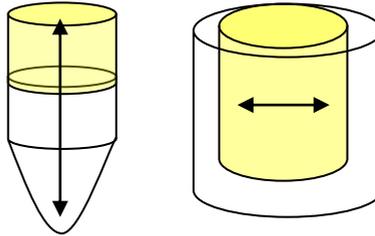
$$v = D^2 g (\delta p - \delta f) / 18 \mu$$

Donde v es la velocidad terminal de separación, y depende de la fuerza que puede obtenerse de la aceleración, en este caso de la gravedad, unos 10 [m/s] cada segundo.

Obviamente la separación será más veloz si se aplica una aceleración mayor, como la que puede obtenerse usando un equipo centrífugo.

$$a_c > g$$

El modelo físico cambia la orientación de la separación de la verticalidad al radio.



En la centrifugación la aceleración gravitacional \mathbf{g} se reemplaza por la centrífuga $\mathbf{r}\cdot\omega^2$ que puede ser miles de veces mayor.

$$v_t = \frac{r\omega^2 D^2 (\delta_2 - \delta_1)}{18 \mu}$$

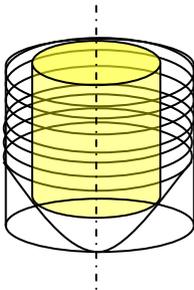
Régimen laminar

$$v_t = \sqrt{\frac{r\omega^2 D^2 (\delta_2 - \delta_1)}{\delta_1}}$$

turbulento

Es fácil apreciar que la separación en régimen turbulento se hace más lenta, además está sujeta a corrientes de remezcla.

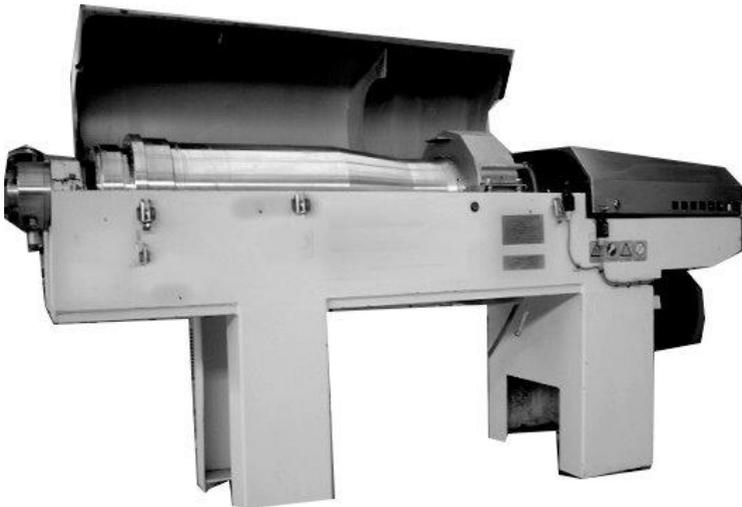
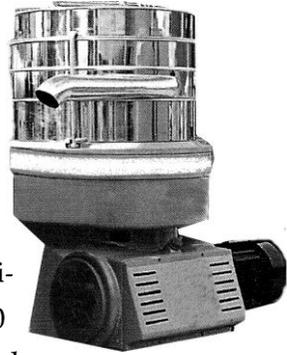
Para evitar las remezclas las centrífugas actuales cuentan con un sistema de platos “polarizadores” que favorecen el movimiento en el sentido perpendicular al eje de giro.



La centrífuga industrial fue desarrollada por Prandtl en 1864, de una patente de Weston de 1852; presentada en la Exposición Universal de París por Laval en 1878 como “Séparateur”. El dispositivo polarizador fue concebido por Fush, cuya patente compró Laval incluyéndolo en sus productos como “alfa”.

Las centrífugas verticales se utilizan para la clarificación de jugos, aceites, obtención de crema de la leche, concentración de sólidos de interés económico en suspensiones y otros usos.

Son sencillas en su operación y mantenimiento y abarcan potencias desde 2 a 20 [KW], para rendimientos comúnmente de hasta 1000 [kg/h].



Las centrífugas horizontales conocidas como “decantadores” o “*decanter*s” se utilizan para mezclas pesadas como sumos, pasta de aceitunas, caseína y otros, con potencias comúnmente de hasta 60 [KW] y capacidades de hasta 20000 [kg/h].

2.4.- Separadores y Ciclones

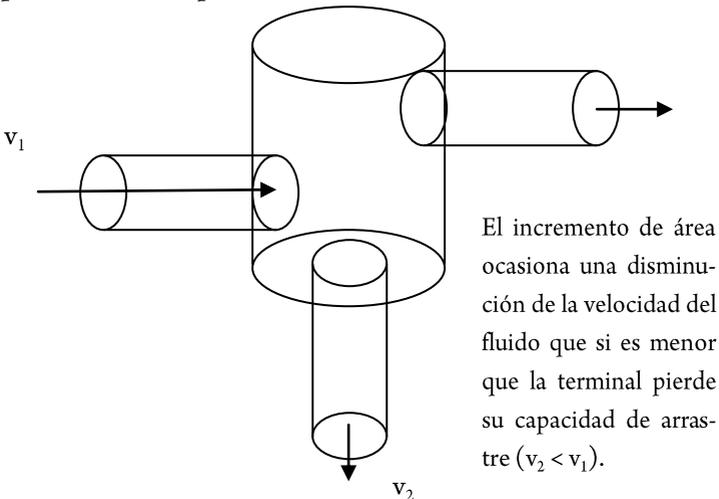
Observando la ecuación de continuidad (basada en el principio de conservación de la materia)

$$\text{Flujo másico} = \dot{m} = \frac{dm}{dt} = \delta \frac{dV}{dx} = A \delta \frac{dx}{dt} = A \delta v$$

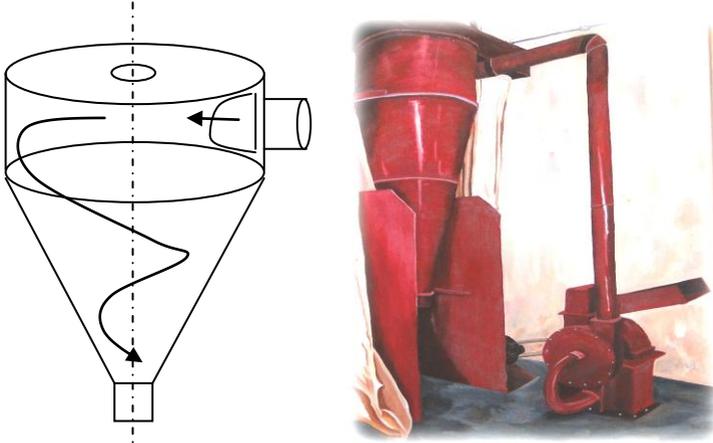
Y considerando un cambio de estado del sistema en el cual la densidad del fluido permanezca inalterada:

$$E_1 \rightarrow E_2 / A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Puede apreciarse que simplemente modificando el área del conducto se puede producir una variación en la velocidad de un fluido, y si este está compuesto por elementos arrastrados por moverse a una velocidad superior a la terminal, puede provocarse su separación.



Los separadores del tipo ciclónico utilizan un vórtice que proporciona una zona neutra de arrastre.



Separador ciclónico. Esquema y pintura (C. Albarracín)

El “efecto de la taza de té” fue estudiado por Albert Einstein en 1926 al observar los vórtices que se producían con la cuchara al endulzar el té y el comportamiento de los granos de azúcar que flotaban en el líquido.

La fuerza centrífuga que empuja el fluido contra las paredes del recipiente es compensada con una reacción centrípeta que mueve las partículas hacia el centro desacelerándolas.

Recordando que $Re = \frac{Dv\delta}{\mu}$ incluiremos otro número adimensional conocido como el número de Strouhal el cual se presenta a menudo como: $St = \frac{fL}{v}$

f es la frecuencia de desprendimiento de vórtice,
 L es la longitud característica, por ejemplo, el diámetro hidráulico o el espesor del perfil aerodinámico,
 v es la velocidad de flujo.

Los separadores ciclónicos generalmente están diseñados para trabajar en el rango $10^4 < Re < 10^6$ y $0,18 < St < 0,2$

Algunos parámetros de operación característicos para la selección de los separadores ciclónicos son:

Eficiencia de colección (definido como el porcentaje de la masa de partículas entrante que es separado en el ciclón), representa el éxito de su elección para un determinado tratamiento de separación.

Exponente del vórtice (n) es la relación entre la velocidad tangencial y el radio de giro de una trayectoria en forma de vórtice. En la práctica $0.5 < n < 0.7$ de acuerdo con el diseño del ciclón y la temperatura de trabajo.

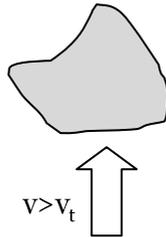
Giros o vórtices externos que presenta la corriente gaseosa en el interior del ciclón.

Punto de corte, que es un par conformado por el tamaño de la partícula que aparta y la velocidad del flujo al que opera.

Tiempo de relajación es el tiempo necesario para que una partícula que se desacelera para su separación alcance una velocidad menor a la terminal.

2.5.- Lechos fluidizados

La Ley de Stokes permite comprender la velocidad terminal en la caída de cuerpos y partículas y entender que si el fluido se mueve a una velocidad superior se producirá el arrastre.



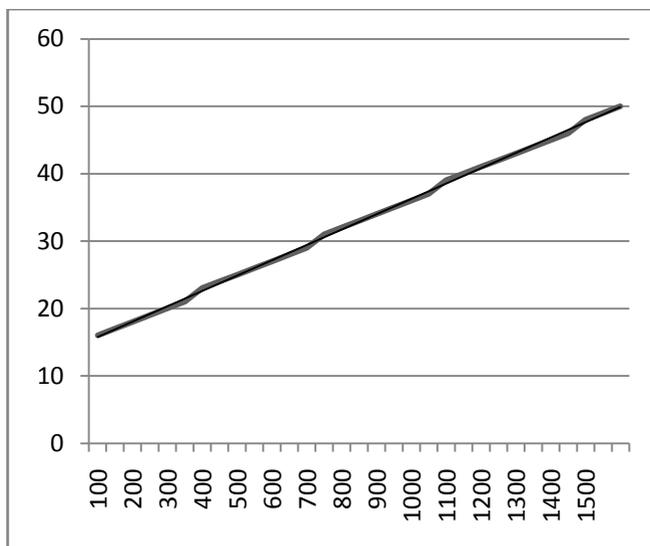
Este principio se utiliza cada vez con mayor frecuencia para el transporte de sólidos mediante el uso de fluidos adecuados.

Puede moverse cereales mediante una corriente de aire que fluye por un conducto, aceitunas con salmuera y hasta piedras con agua (mineraloductos) aplicando la ecuación general de los fluidos y seleccionando convenientemente tipo de fluido y velocidad.

$$v_t = \frac{gD^2(\rho_2 - \rho_1)}{18\mu}$$

Los sistemas de lecho fluidizados se complementan con separadores simples o ciclónicos para eliminar indeseables de arrastre y separar los componentes de interés. También complementan otras operaciones como evaporación y secado.

Fundamentos de OU para Industrias Alimentarias



Velocidad terminal del aire [m/s] en función de la densidad de la partícula [Kg/m³]



Bomba de lecho fluidizado para el movimiento de aceitunas

Sánchez Brizuela, R; Mansilla, S. (2019) E.C.U. UNCA