

Análisis de la filtración centrífuga de una suspensión

Sadoth Sandoval Torres¹, Marc Valat², Pascal Ginisty³

¹Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Oaxaca.

¹Calle Hornos 1003. Santa Cruz Xoxocotlán. C.P. 71230. Oaxaca. México; ssandovalt@ipn.mx

²Université Bordeaux 1. Laboratoire TREFLE Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence Cedex, France.

³Institut de la Filtration et des Techniques Séparatives. Rue Marcel Pagnol 47510 FOULAYRONNES, France.

Contacto: ssandovalt@ipn.mx

Resumen. En el presente trabajo de investigación, se analizó el proceso de filtración centrífuga de una suspensión. El principio de operación se basa en una diferencia de presión que obliga a la suspensión a atravesar el medio filtrante con una fuerza de 100 a 2500 veces la gravedad. Se simuló la evolución del radio líquido y del espesor de la torta de filtración a partir de los balances de materia, gasto de alimentación, concentración de la suspensión, flujo de filtrado, velocidad de rotación del filtro y masa retenida. Para simplificar el análisis numérico consideramos que la torta es homogénea e incompresible.

Asimismo, se derivó una expresión para predecir la desaturación de la torta constituida por partículas sólidas. Los datos experimentales analizados son obtenidos de la filtración centrífuga de una suspensión modelo (agua/talco luzenac de 70 micras), con una fracción en volumen de sólidos de 0.08, alimentación de la suspensión de 210 Kg/hr y una velocidad de rotación del tambor centrífugo de 3000 rpm. La medición experimental del espesor de la torta se realizó utilizando un Stroboscopio.

Las ecuaciones propuestas predicen correctamente los fenómenos desarrollados en el interior del tambor de filtración. El espesor de la torta alcanza un valor máximo de 0.017 m en 510 segundos, y la desaturación de la torta toma 70 segundos para llegar a un valor de equilibrio de 0.6.

Palabras clave. Desaturación, filtración centrífuga, radio líquido, torta de partículas.

Analysis of the centrifugal filtration of a suspension

Sadoth Sandoval Torres¹, Marc Valat², Pascal Ginisty³

¹Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Oaxaca.

¹Calle Hornos 1003. Santa Cruz Xoxocotlán. C.P. 71230. Oaxaca. México; ssandovalt@ipn.mx

²Université Bordeaux 1. Laboratoire TREFLE Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence Cedex, France.

³Institut de la Filtration et des Techniques Séparatives. Rue Marcel Pagnol 47510 FOULAYRONNES, France.

Contact: ssandovalt@ipn.mx

Abstract. In this research work, the centrifugal filtration process of a suspension was analyzed. The operating principle is based on a pressure drop that forces the slurry through the filter medium with a force from 100 to 2,500 times gravity.

The evolution of the liquid radius and thickness of the cake were computed from the mass balances, by considering the flow rate, the concentration, the permeate flow, the rotation speed of the filter and the retained mass. To simplify the numerical analysis we consider the cake is both homogeneous and incompressible.

Also, a mathematical expression was derived to predict the cake desaturation constituted by solid particles. The analyzed experimental data were obtained from a centrifugal filtration trial by considering a model suspension (water / powder luzenac, 70 μ m), with a volume fraction of solids of 0.08, a slurry feed of 210 Kg / hr and a rotation speed of 3000 rpm.

The thickness of the cake was experimentally measured by using a Stroboscope.

The mathematical equations predict correctly the phenomena developed within the filtering drum. The cake thickness reaches a maximum value of 0.017 m at 510 seconds, and the desaturation process takes 70 seconds to reach an equilibrium value of 0.6.

Key words. Cake, centrifugal filtration, desaturation liquid, radius, .

Introducción.

En procesos de la industria química, de alimentos, farmacéutica, cosmética, etc., la filtración centrífuga es una operación muy importante, la cual tiene como fin obtener productos con bajo contenido de humedad evitando el uso de temperatura. En este tipo de operaciones existen etapas en las cuales se obtienen mezclas de fluidos con partículas finas (suspensiones), que son difíciles de separar debido a la gran cantidad de líquido, y al tamaño diminuto de la partícula. La operación busca obtener tortas constituidas por partículas con un bajo contenido de humedad utilizando solo la fuerza centrífuga (Mayer, 2000; Wakeman, 2007).

El funcionamiento de los filtros centrífugos se basa en la generación de una diferencia de presión al interior de la torta, que obliga a la suspensión a atravesar el medio filtrante. El filtrado es impulsado con una fuerza de 100 a 2500 veces la gravedad (Sutherland, 2009). De igual forma, el sólido es lanzado hacia las paredes del tambor o cesta, el cual tiene adherido un filtro. El tambor se encuentra perforado, y en sus paredes se depositan las partículas que se van acumulando durante el proceso hasta formar una torta de sólidos depositados.

La velocidad con la que el fluido atraviesa la torta de partículas sólidas depende de tres factores básicos: La porosidad de la torta, la densidad del fluido que atraviesa la torta, y la presión a la que está sometido el fluido (rpm del tambor). Las características de operación son la razón por la cual la filtración centrífuga es de gran interés en procesos de separación de partículas de suspensiones (Wakeman, 2007). La energía consumida en los filtros convencionales oscila generalmente entre 0.5 a 10 kWhm de la

suspensión a separarse, que corresponde a 100-1000 veces menos energía con respecto al secado térmico (Couturier, *et al.* 2007), lo cual es aún más interesante, pues con el sólo uso de la fuerza centrífuga se puede disminuir el consumo energético de la separación, además de evitar la exposición de las partículas a temperaturas que las degraden, evitando que se inicien reacciones secundarias en los materiales por el efecto térmico.

Durante un proceso en estado transitorio, la tasa de filtración es afectada significativamente por el crecimiento de la torta, la distribución del tamaño de partículas y la estructura de las partículas en la torta, si embargo el crecimiento de la torta es difícil de predecir y de medir experimentalmente (Lee y Wang, 2000).

Hwang y Chou (2008) estudiaron la filtración centrífuga de una bio-suspensión a diferentes velocidades de rotación, observando la resistencia a la filtración y porosidad promedio de la torta. Los autores obtuvieron una relación lineal entre la masa de la bio-suspensión y el volumen de filtrado.

En el presente trabajo se estudia un proceso de filtración centrífuga considerando las propiedades de los materiales empleados: partículas de talco luzenac de tamaño 70 micras y agua líquida, separadas en un dispositivo experimental adaptado.

Materiales y Métodos.

Para facilitar las comparaciones entre las predicciones teóricas y los datos teóricos, fue necesario caracterizar la suspensión, lo cual que condiciona tanto el crecimiento de la torta, como el caudal de filtrado de forma continua durante las pruebas de filtración; lo anterior con el propósito de contar con todas las variables que consideran las ecuaciones propuestas.

Se utilizó una centrífuga Marca Robatel (Robatel, France) con radio interior de 0.158 m y altura interior de la cesta de 0.198 m. El flujo másico de filtrado evacuado, así como el filtrado retenido en el tambor fueron medidos a través de lecturas sucesivas de tiempo en 2 balanzas electrónicas. El dispositivo experimental permite registrar la velocidad de rotación del tambor, el flujo de alimentación, el flujo de filtrado durante la operación, y la evolución del espesor de la torta. Se analizan los datos de un experimento bajo las siguientes condiciones de operación: flujo másico de alimentación de 210 Kg/h, fracción volumen de sólidos (f_{vs}) de 0.08 y una velocidad de rotación de 3000 rpm.

La suspensión se mezcla perfectamente con un mezclador de aspas, antes de ser alimentado al equipo por medio de una bomba de 1hp. La suspensión es una mezcla de agua y partículas de talco luzenac de tamaño 70 micras. Toda la operación se realiza a temperatura ambiente.

Balances de materia y deducción de ecuaciones

Para predecir el espesor, el radio líquido y la desaturación de la torta, es necesario considerar la fracción másica de sólidos (f_{ms}), la fracción volumen de sólidos (f_{vs}), y el flujo másico de alimentación integrado; los cuales forman parte de las expresiones matemáticas para determinar la masa de sólidos acumulados al interior del equipo. La masa de líquido contenido en la cesta centrífuga es considerada, pues forma parte de la masa acumulada en el sistema. Inicialmente definimos la fracción volumétrica de sólidos (f_{vs}), la cual está dada por:

$$f_{vs} = \frac{V_s}{V_l + V_s} \quad (1)$$

Donde V_s indica el volumen del sólido en m^3 y V_l es el volumen del líquido en m^3 . La fracción másica en sólidos f_{ms} es expresada como:

$$f_{ms} = \frac{m_s}{m_l + m_s} \quad (2)$$

Donde m_s es la masa del sólido en kg, m_l es la masa del líquido también expresada en kg.

La concentración de la suspensión está dada por:

$$C = \rho_s f_{vs} \quad (3)$$

Donde ρ_s es la densidad del talco luzenac en (kg_{talco}/m^3_{talco}) y f_{vs} es la fracción volumen de sólidos.

Entonces la fracción másica del sólido puede escribirse como:

$$f_{ms} = \frac{\rho_s f_{vs}}{\rho_s f_{vs} + \rho_l (1 - f_{vs})} \quad (4)$$

De donde ρ_s es la densidad del sólido, en este caso es la partícula de talco (kg_{talco}/m^3_{talco}), f_{vs} es la fracción volumen de sólidos. El término $\rho_s f_{vs}$ es la cantidad de sólidos en (Kg/m^3) y entonces el término $\rho_l (1 - f_{vs})$ indica la cantidad de líquido contenido en la suspensión expresada en Kg/m^3 .

Por lo tanto, la relación recíproca entre concentración y fracción de sólidos es:

$$f_{vs} = \frac{C}{\rho_s} \quad (5)$$

Donde C es la concentración de la suspensión (kg/m^3) ρ_s es la densidad del sólido (kg_{talco}/m^3_{talco}).

Para conocer la cantidad de sólido y líquido que se está alimentando al tambor de filtración en un instante t , se integra el flujo másico de alimentación, con lo cual podemos conocer la cantidad de masa total alimentada al equipo:

$$\int_0^t m_a dt = Q_a \quad (6)$$

Para calcular la evolución del espesor de la torta de filtrado dentro de la centrifuga se realiza un balance de materia que nos permita calcular el radio líquido, radio sólido, y el espesor de la torta. La acumulación de materia al interior de la centrifuga se refiere al cambio de masa con respecto al tiempo de la masa de líquido acumulado en el cesto.

En la figura 1 se muestran las variables que son estudiadas en el presente trabajo. La altura del cesto de filtración es H , y gira a una velocidad ω en rpm.

El radio del tambor filtrante es r_b , el radio líquido es r_l , el espesor de la torta de sólidos es $r_b - r_c$, sobre la cual queda una capa de líquido retenida de espesor $(r_b - r_c)$. La dimensión $(r_b - r_l)$ determina el máximo espesor de líquido o sólido retenido en la cesta.

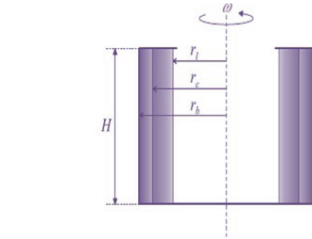


Figura 1. Variables estudiadas en el proceso de filtración centrífuga.

La torta filtrante va formándose durante el proceso de alimentación de la suspensión, y va constituyendo una torta de partículas sólidas que inicialmente tiene un espesor cero. Para determinar el espesor de la torta es necesario conocer el volumen dentro del anillo líquido (r_l) como se muestra en la Figura 1. El balance de materia en este proceso de filtración puede expresarse como:

$$\frac{d}{dt} (\pi H (r_b^2 - r_l^2)) = Q_a - Q \quad (7)$$

Donde el cambio de volumen del anillo líquido con respecto al tiempo $\frac{d}{dt} (\pi H (r_b^2 - r_l^2))$ es igual a la diferencia entre el flujo de alimentación y el flujo de filtrado ($Q_a - Q$). H es la altura de la cesta, r_b es el radio del centro a la pared de la cesta el cual permanece constante, r_l es el radio de la capa del líquido el cual varía durante la operación. Integramos ambos miembros de la ecuación para obtener:

$$\pi H (r_b^2 - r_l^2) = \int Q_a - Q \quad (8)$$

En este tipo de proceso no se puede medir directamente el flujo de filtrado, esto lo podemos estimar con la doble pesada de las dos balanzas, es decir, en nuestro experimento hemos instalado dos balanzas, una mide el líquido acumulado en el carter y la segunda el flujo filtrado que abandona inmediatamente el tambor de filtrado.

Obtenemos entonces la masa instantánea del filtrado como:

$$\rho_l \int_0^t Q dt = M(t) \quad (9)$$

Sustituyendo los flujos de alimentación y filtrado en términos de flujo másico despejamos el radio líquido y obtenemos la ecuación siguiente:

$$r_l(t) = \sqrt{r_b^2 + \frac{1}{\pi H} \left(\frac{M(t)}{\rho_l} - \frac{\int_0^t Q_a dt}{\rho_{sus}} \right)} \quad (10)$$

Para calcular el radio sólido, es necesario considerar la formación del anillo líquido formado dentro de la centrifuga de filtración, por lo tanto se tienen 3 radios: el radio líquido (r_l) que va del centro de la centrifuga a la orilla de la capa líquida formada, el radio sólido (r_s) cuya distancia va del centro de la centrifuga hasta donde termina la capa líquida y por último el radio de la cesta (r_b) que es la distancia entre el centro y el borde de la cesta.

El radio sólido se calcula a partir de un balance global de materia:

$$\frac{d}{dt} (\pi H (r_b^2 - r_s^2)) = \frac{f_{vs}}{(1-\phi)(1-f_{vs})} * (Q_a - Q) \quad (11)$$

Donde el término $\frac{d}{dt} (\pi H (r_b^2 - r_s^2))$ es el cambio de volumen del anillo sólido con respecto al tiempo, integrando ambos lados de la ecuación tenemos:

$$\pi H (r_b^2 - r_s^2) = \frac{f_{vs}}{(1-\phi)(1-f_{vs})} * \int_0^t (Q_a - Q) dt \quad (12)$$

Despejando el radio sólido (r_s) de la ecuación (10)

$$r_s = \sqrt{r_b^2 - \frac{f_{vs}}{\pi H (1-\phi)(1-f_{vs})} * \left(\frac{M(t)}{\rho_l} - \int_0^t Q_a dt \right)} \quad (13)$$

En donde el término $(1-\phi)$ significa el espacio ocupado por las partículas sólidas de talco, y el término $(1 - f_{vs})$ es el espacio vacío entre partículas.

Teniendo en cuenta que el volumen de sólidos es igual a:

$$\text{volumen de sólidos} = (1 - \varepsilon) * V_s$$

Para estimar la desaturación de la torta, hemos propuesto la siguiente expresión:

(14)

$$S = 1 - \frac{m_{filtrado}}{\pi * H * (rb^2 - rs^2) * \epsilon * \rho_l}$$

Resultados.

En la Figura 2 se presentan las variables más importantes del experimento, entre ellas el flujo másico de alimentación (línea azul) con el fin de identificar las etapas de la operación, el flujo másico de filtrado evacuado así como el flujo másico de filtrado retenido. Dos fases son las principales a identificar: 1) alimentación de la suspensión al tambor, durante la cual se forma la torta de partículas, y 2) la desaturación, en la cual se ha dejado de alimentar la suspensión, la torta está consolidada y se evacúa la humedad contenida en dicha torta.

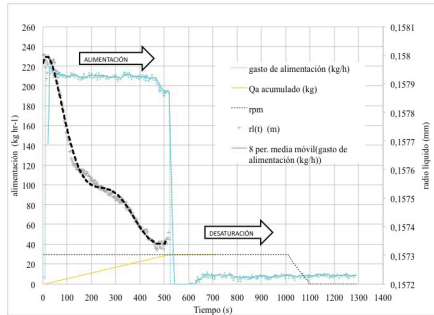


Figura 2. Proceso de la filtración centrífuga de la suspensión.

El flujo másico de alimentación se mantiene constante, el rotámetro de flujo muestra algunas variaciones, pero son normales cuando se alimentan suspensiones. La suspensión tiene una f_{VS} de 0.08, el flujo de alimentación de la suspensión es de 210 Kg/hr y la velocidad de operación de 3000 rpm. En esta figura se observa como el radio líquido va disminuyendo, lo cual es señal de un incremento de la torta de sólidos al interior del tambor.

El gasto másico de alimentación es constante durante los primeros 524 segundos, el flujo másico de alimentación se estabiliza a los 40 segundos de iniciado el proceso, y se mantiene constante en un promedio de 210 Kg/h. Esta alimentación se detiene a los 521 segundos. El registro del gasto es muy importante, pues de acuerdo a los balances, conociendo este dato podemos estimar la cantidad de partículas que fueron alimentadas al filtro.

En la evolución de la masa de filtrado retenido dentro del tambor hay pequeñas variaciones, las cuales son causadas por 2 eventos, el primero se da en la salida de masa del líquido evacuado en el carter del equipo, y el segundo a la vibración generada en el equipo por la alta velocidad de rotación de la centrífuga (3000 rpm). Podemos observar que la masa de filtrado evacuado (línea naranja) se mantiene uniforme durante el proceso, se aprecia que tiene un comportamiento casi lineal. La cuantificación de la masa de filtrado retenido en el tambor es aproximadamente de 1.700 Kg y la masa de filtrado evacuado de un total de 24.79 Kg, la cual es una cantidad de líquido grande.

Radio líquido

En la Figura 3 se muestra la evolución del radio líquido en función del tiempo durante la etapa de alimentación del proceso. La línea gris clara

pertenece a los datos experimentales, y los puntos negros son el resultado de la simulación numérica. Este es uno de los resultados más interesantes de nuestro estudio, pues la predicción de dicho radio describe muy bien la naturaleza física de la filtración. La evolución del radio líquido no es lineal, su comportamiento es difícil de explicar desde un punto de vista fenomenológico, pues hasta los 150 segundos su disminución es explicada por un incremento de la torta de filtración, sin embargo de los 200 a los 300 segundos existe una zona de estabilización que probablemente se deba a un acomodo de las partículas sólidas, al efecto del sobrenadante y al incremento de la resistencia del medio poroso, que disminuye el incremento del espesor de la torta con la misma tasa de crecimiento.

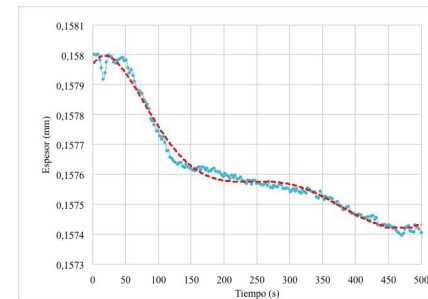


Figura 3. Evolución del radio líquido dentro de la centrífuga durante la etapa de alimentación.

Espesor de la torta

En la Figura 4 se presenta la evolución del espesor de la torta con respecto al tiempo. Esta predicción ha sido simulada a partir de los balances de

materia. El espesor depende de la geometría y estructura de las partículas, así como también de la velocidad de deposición de las partículas en el filtro, además de la concentración o fracción en volumen de sólidos. Se aprecia que el espesor rc crece rápidamente en los primeros segundos de la filtración y posteriormente (después de los 150 s) la tasa de crecimiento empieza a disminuir. Este resultado tiene una relación directa con la evolución de rl , pues los radios están cambiando al interior del tambor o cesta de filtración, pero estos datos y predicciones son muy difíciles de obtener a menos que se implemente un dispositivo experimental de nuestro tipo.

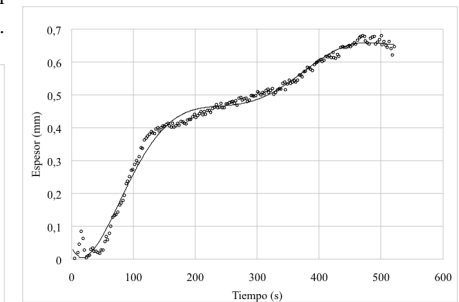


Figura 4. Evolución del espesor de la torta dentro de la cesta centrífuga.

Desaturación o deshidratación mecánica de la torta

Una vez que se ha formado la torta, la cual ya posee un espesor y altura bien definidos, se mantiene la rotación de la cesta (centrifugado, $\omega=3000$ rpm), con el fin de evacuar el agua libre contenida

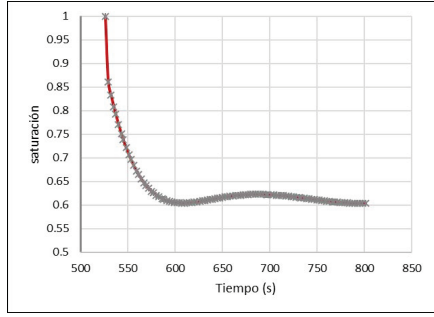


Figura 5. Predicción de la deshidratación mecánica de la torta (desaturación).

en los espacios vacíos de la torta. Esta etapa es conocida como *deshidratación mecánica* de la torta y es un proceso crucial dentro de toda operación de separación partículas-fluido. En esta etapa se elimina la mayor cantidad de humedad posible por efecto de la fuerza centrífuga. Al inicio de la deshidratación se considera a la torta como un medio poroso saturado $S = 1$, el instante preciso en que empieza la desaturación es cuando todos los espacios vacíos dentro de la torta se encuentran llenos de líquido. Para nuestro caso se identificó el punto de inicio de la desaturación, considerando la masa de filtrado, es decir la masa de filtrado alcanza una máxima lectura y en los segundos siguientes disminuye. Lo anterior ocurre a los 6 segundos después de haber dejado de alimentar suspensión a la centrífuga. Este punto crítico es identificado con la ayuda de un stroboscopio, el cual permite visualizar (cuantificar) con la ayuda de una graduación al interior del tambor, la evolución del espesor del radio líquido y radio sólido. En la Figura 5 se muestra el comportamiento de la

saturación contra el tiempo, la cual ha sido calculada utilizando la ecuación 14. Se aprecia que la saturación decae rápidamente en los primeros segundos para luego tender al equilibrio (ya no se puede evacuar más líquido). En esta etapa, el filtro continúa rotando a 3000 rpm. Además se observa que la deshidratación se lleva a cabo muy rápidamente, prácticamente en 70 segundos se alcanza el equilibrio.

Es importante mencionar que el fenómeno que impide la evacuación total del líquido en la torta, es la presión capilar. El tamaño de partícula contenido en la torta es de 70 micras. Los canales formados en este tipo de materiales son muy pequeños, aunado a la fuerza centrífuga, las fuerzas capilares son de gran magnitud. De acuerdo con Ruslim *et al.*, (2009), quien realizó experimentos de filtración centrífuga con arenas de sílice variando la velocidad de rotación, se encontró que la saturación disminuye con el aumento del factor g, es decir con la fuerza de rotación del equipo. El autor considera que la saturación en este régimen también conocida como "saturación remanente" es la parte de líquido que se une más fuerte dentro de la torta por *capilaridad del líquido*, la cual no se puede retirar de manera significativa por fuerzas mecánicas, lo cual se demuestra en nuestro experimento.

Conclusiones.

La filtración centrífuga es un método de separación muy eficiente en donde se evacuan grandes cantidades de líquido en muy poco tiempo. En este experimento se analizó el proceso de filtración de una suspensión con una fracción volumétrica en sólidos de 0.082. Hemos descrito el comportamiento simulado del radio líquido, radio sólido, y espesor de la torta con expresiones derivadas de los balances de materia.

La etapa de desaturación de la torta formada llegó hasta un valor de equilibrio de 0.6 (-) después de 70 segundos de operación, lo cual es muy bueno considerando que evaporar esa cantidad de agua por métodos térmicos convencionales tomaría mucho tiempo y consumirían demasiada energía, pues evaporar agua líquida requiere energía térmica considerable.

La retención de líquido en la torta se debe a la magnitud de las fuerzas capilares, las cuales son muy fuertes debido al tamaño de partículas contenidas en la torta. Los resultados son importantes por la aplicación que puede darse en el procesamiento de suspensiones y partículas en sectores como la minería, el agroalimentario y el farmacéutico. El procedimiento experimental es original y la escritura de ecuaciones es detallada. Estos balances y predicciones pueden implementarse en otro tipo de suspensiones, y describen correctamente la física del filtrado centrífugo.

La predicción de los radios líquidos y la descripción de la desaturación manifiestan información importante respecto al estado final de la torta consolidada.

Agradecimientos.

Al Instituto Politécnico Nacional por el financiamiento otorgado mediante el proyecto SIP 2013083, "Análisis de la filtración centrífuga de suspensiones", y al IFTS France.

.....
Cita sugerida: Sandoval Torres S., M. Valat y P. Ginisty 2013. Análisis de la filtración centrífuga de una suspensión. *Naturaleza y Desarrollo 11(2)*, 22-31.

Literatura Citada.

Couturier, S., Valat, M., Vaxelaire, J. & Puiggali, J. R., 2007. Enhanced expression of filter cakes using a local thermal supply. *Separation and Purification Technology 1*, 321-328.

Hwang, K. J. & Chou, Y. C., 2008. Mechanism of centrifugal filtration for separation of microbe/protein bio-suspension. *Chemical Engineering and Processing 73*, 261-267.

Lee, D.J., Wang, C.H., 2000. Theories of cake filtration and consolidation and implications to sludge dewatering 34 (1)1-20.

Mayer, E., 2000. Cake filtration theory and practice. *Chemical Engineering Journal 80*, 233-236.

Ruslim, F., Nirschl H., and Stahl W., Carvin P. 2009. The Influence of Temporal Cake Moisture Content on a Discontinuous Washing Process in the Centrifugal Field. *AIChE Journal 55*, 650-651.

Surtherland, K., 2009. Filtration and separation technology: What's new with centrifuges?. *Filtration-separation*, 30-31.

Wakeman, R. 2007. The influence of particle properties on filtration, *Separation and Purification Technology 58(2)*, 234-241.

Recibido: 20/05/2013 Aceptado: 1/08/2013