

FILTRACIÓN TANGENCIAL DE CALDOS DE MICROALGAS: ESCALAMIENTO

Orozco Alvarez C.,* García Salas S., Cruz Islas O. y Hernández Sánchez E.

Departamento de Bioingeniería. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología. Instituto Politécnico Nacional. Av. Acueducto S/N. Col. La laguna Ticomán. G. A. Madero. México, D.F., e-mail: corozcoa@ipn.mx

RESUMEN:

Se concentraron caldos de fermentación de microalgas usando microfiltración y ultrafiltración bajo las siguientes condiciones: presión de 175 kPa; flujo de alimentación de $14 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$; pH 6 y 25 °C. A nivel laboratorio ambas operaciones presentan *fluxes* parecidos y del orden de $20 \times 10^{-6} \text{ m/s}$.

Se llevó a cabo el escalamiento empleando como criterio el coeficiente de transferencia de masa. Los resultados de la microfiltración de laboratorio y piloto fueron parecidos indicando esto que el criterio de escalamiento fue el adecuado. Esto no sucede con la ultrafiltración, donde los resultados piloto son 45% superiores a los de nivel laboratorio, debido al ensuciamiento de la membrana de laboratorio.

A nivel piloto se trabajaron 100 L de caldo y fueron concentrados veinte veces probándose dos flujos de alimentación. Los valores de *flux* de la microfiltración y la ultrafiltración sólo se elevaron 22 y 30 %, respectivamente, cuando se duplica el flujo de alimentación.

ABSTRACT:

Microalgae fermentation broths using microfiltration and ultrafiltration under concentrated. The following conditions: pressure of 175 kPa; feed stream $14 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s}$; pH 6 and 25 ° C. A laboratory scale operations have both similarities and fluxes of the order of $20 \times 10^{-6} \text{ m} / \text{s}$.

It was conducted using as a criterion scaling the mass transfer coefficient. The results of laboratory and pilot microfiltration were similar indicating that the criterion of scaling was adequate. This does not happen with ultrafiltration, where pilot results are 45 % higher than the laboratory level, due to membrane fouling laboratory.

A pilot scale 100 L of broth is worked and were concentrated twenty times trying on two streams of power. Flux values of microfiltration and ultrafiltration rose only 22 and 30 %, respectively, when the feed stream is doubled.

Palabras clave:

Ultrafiltración, escalamiento, microalgas, microfiltración

Keyword:

Ultrafiltration, scaling, microalgae microfiltration

Área: Microbiología y biotecnología

INTRODUCCIÓN

La producción de microalgas está en auge como fuente de azúcares y lípidos y su posterior conversión a biodiesel. El cultivo se realiza en biorreactores especiales bajo condiciones específicas de operación (Millán, 2013). Al finalizar el cultivo viene la recuperación de la biomasa microalgal. La microfiltración tangencial y la ultrafiltración pueden emplearse para efectuar esta recuperación. Esta recuperación se realiza a través de la concentración del caldo celular hasta su máximo permisible, por lo que deben encontrarse las condiciones de operación que cumplan esta maximización. Una vez logrado lo anterior, el siguiente paso es el escalamiento de las operaciones de filtración tangencial para cuantificar el costo energético, y de esta forma saber la rentabilidad industrial del proceso de membranas. Así, el presente trabajo estudia estas operaciones unitarias y su escalamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se usaron cartuchos de microfiltración tipo fibras huecas, de 0.1 μ m de diámetro de poro, y cartuchos de ultrafiltración de 100 kDa de MWCO; ambos con un área de membrana de 0.042 m² para el nivel laboratorio; diámetro hidráulico de la fibra hueca de 0.001m y longitud de 0.3 m. Los caldos de microalgas fueron obtenidos previamente mediante su cultivo en raceways de 1.0 m³, alcanzando una concentración celular final de 0.5 g/L (Millán, 2013).

La concentración de los caldos de microalgas se llevó a cabo las siguientes condiciones de operación: presión transmembrana de 175 kPa, flujo de alimentación de 14×10^{-6} m³/s, temperatura de 25 °C y pH 8.0 (Yeh *et al.*, 2003). Los caldos fueron concentrados 20, 50 y 100 veces (factor de concentración) para lo cual fue necesario partir de volúmenes iniciales de 2, 5 y 10 L, respectivamente. Para el escalamiento se efectuaron pruebas a nivel piloto utilizando cartuchos de microfiltración y ultrafiltración de 0.46 m² de área de filtración, diámetro hidráulico de 0.002 m y longitud de 0.60 m. Las condiciones de trabajo para estas pruebas fueron las mismas que las de nivel laboratorio, excepto el flujo de alimentación. Se procesaron 100 L de los caldos de microalgas para concentrarlos hasta 20 veces. Se usó como criterio de escalamiento el coeficiente de transferencia de masa (k) del modelo de gel polarizante, ampliamente usado en la literatura especializada, para poder calcular el flujo de alimentación al que deberían trabajar los cartuchos. A nivel piloto también fueron procesados los caldos de microalgas empleando dos diferentes flujos de alimentación para corroborar el escalamiento y estimar el flux cuando se varía el flujo de trabajo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Nivel Laboratorio

Los caldos de microalgas fueron concentrados por microfiltración y ultrafiltración y los resultados se presentan en la Fig. 1. Para alcanzar un nivel de concentración de 20 veces se parte de un volumen inicial de 2 L y éste se concentra hasta un volumen final de 0.1 L, obteniéndose a su vez un volumen de filtrado, libre de células, de 1.9 L. En esta primera concentración el *flux* se cae estrepitosamente hasta un valor de 23×10^{-6} m/s, para microfiltración, y 20×10^{-6} m/s, para la ultrafiltración, cuando apenas se ha concentrado cinco veces; y prácticamente estos mismo valores se mantienen cuando se alcanza el grado de concentración de 20 veces, algo no esperado según la teoría de gel polarizante, la cual predice que el *flux* debe seguir bajando a medida que la concentración celular siga aumentando (Naja *et al.*, 2006).

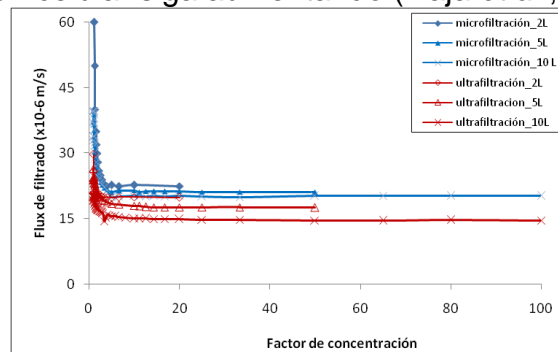


Fig.1. Filtración tangencial de caldos de microalgas. Nivel laboratorio

Para alcanzar niveles de concentración de 50 y 100 veces es necesario iniciar con volúmenes de 5 y 10 L, respectivamente, y concentrar hasta un volumen final de 0.1 L. Así, para la microfiltración 50 y 100 veces, se obtienen prácticamente los mismos valores de *flux* que se obtuvieron para un grado de concentración celular de veinte veces, como puede verse en la misma figura. Teóricamente se esperaría que los valores de *flux* para 20, 50 y 100 veces de nivel de concentración, debieran ser idénticos (Meireles et al., 2002), sin embargo se presentó una mínima diferencia en los valores experimentales debido probablemente a un ligero ensuciamiento de la membrana (Liew et al., 1995).

Por lo que respecta a la ultrafiltración, se puede observar que los valores de *flux* a 50 y 100 veces de concentración, son menores que los encontrados a un nivel de concentración de 20 veces, lo cual no era esperado, como ya fue discutido renglones arriba, por lo que una explicación a esto sería que la membrana de ultrafiltración sufre un mayor ensuciamiento que provoca un menor desempeño (Orozco et al., 2003).

De forma global puede deducirse de la Fig. 1, que los *fluxes* de la microfiltración son en promedio 21×10^{-6} m/s cuando se alcanzan concentraciones de 20, 50 y 100 veces. Y que la ultrafiltración produce *fluxes* inferiores en 25 %, en promedio, con respecto a la microfiltración cuando se alcanzan los mismos niveles de concentración celular.

Escalamiento

Una vez concluido la experimentación a nivel laboratorio, el paso siguiente fue realizar el escalamiento, el cual tiene como objetivo final encontrar la ecuación (7) la cual será deducida a continuación. El modelo de gel polarizante permite el cálculo del *flux* cuando son conocidos el coeficiente de transferencia de masa (*k*) y la concentración en la pared de la membrana (*C_g*).

$$flux = k \ln \frac{C_g}{C_b} \quad (1)$$

Para lograr un escalamiento piloto aceptable se deben alcanzar los mismos valores de *flux* que los alcanzados a nivel laboratorio, esto se puede escribir de la siguiente forma (2):

$$flux_1 = flux_2 \quad (2)$$

$$\left(k \ln \frac{C_g}{C_b} \right)_1 = \left(k \ln \frac{C_g}{C_b} \right)_2 \quad (3)$$

1: nivel laboratorio 2: nivel piloto

Los valores inicial y final de *C_b* son los mismos para ambos niveles (laboratorio y piloto) y la concentración en la pared de la membrana *C_g* es constante, por lo tanto:

$$k_1 = k_2 \quad (4)$$

donde (*k*) se puede determinar por medio de correlaciones obtenidas al aplicar el análisis dimensional, y generalmente en los módulos de ultrafiltración se cumplen las condiciones para emplear la ecuación de Leveque²:

$$k \frac{d_h}{D} = 1.86 \left(d_h v \frac{\rho}{\mu} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\rho D} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{d_h}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

donde d_h es el diámetro de la fibra hueca (m), L es el largo de la fibra hueca (m), D corresponde al coeficiente de difusión, entonces arreglando para (k):

$$k = 1.86D^{\frac{2}{3}} \left(\frac{v}{d_h L} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Tomando a k como criterio de escalamiento, y considerando D igual en ambos niveles (porque se trabaja el mismo grado de concentración y las mismas condiciones de temperatura y pH), entonces el valor de la velocidad en el cartucho a nivel piloto v_2 se calcula con la siguiente expresión:

$$v_2 = \left(\frac{v_1}{d_{h1} L_1} \right) d_{h2} L_2 \quad (7)$$

En la tabla I se presentan los cálculos para el escalamiento, donde finalmente se obtiene que el flujo de alimentación (F_{a2}) para el cartucho piloto debe ser de $8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla I. Procedimiento de escalamiento de la filtración tangencial en módulos de fibra hueca

Ultrafiltración de laboratorio	
cartucho: UFP-100-E-4	
diámetro interno de la fibra d_{h1} (m)	0.001
longitud de la fibra L_1 (m)	0.267
área del cartucho a_c (m ²)	0.042
área de la fibra a_f (m ²)	0.00084
número de fibras	50
Cálculo de la velocidad de corte	
flujo de alimentación (Lpm)	1.1
flujo de alimentación F_a (m ³ /s)	0.0000183
flujo por cada fibra hueca (m ³ /s)	0.0000004
área de flujo de la fibra hueca (m ²)	0.0000008
velocidad por la fibra hueca v_1 (m/s)	0.4668534
velocidad de corte v_c (s ⁻¹)	3735

Ultrafiltración piloto	
cartucho: UFP-100-H-9A	
diámetro interno de la fibra d_{h2} (m)	0.002
longitud de la fibra L_2 (m)	0.488074
área del cartucho a_{c2} (m ²)	0.46
área de la fibra a_{f2} (m ²)	0.0030667
número de fibras	150
Cálculo del flujo de alimentación	
velocidad por la fibra v_2 (m/s)	0.9337068
área de flujo de la fibra (m ²)	0.0000031
flujo por la fibra hueca (m ³ /s)	0.0000029
flujo de alimentación F_{a2} (m ³ /s)	0.00044
flujo de alimentación (Lpm)	26
velocidad de corte v_c (s ⁻¹)	3735

Ya conocido el flujo de alimentación al cual trabajaría el cartucho piloto, se procedió a la concentración de 100 L de caldos de fermentación de microalgas bajo las mismas condiciones de operación empleadas a nivel laboratorio. Los resultados obtenidos a nivel piloto y su comparación con los obtenidos a nivel laboratorio pueden ser visualizados en la Fig. 2.

En la operación se obtienen 95 L de filtrado y 5 L de concentrado, alcanzando con esto un nivel de concentración de 20 veces, suficiente para el estudio de escalamiento; cabe aclarar que por cuestiones de logística no fue posible trabajar volúmenes mayores para lograr factores de concentración de 50 y 100, y con esto tener una comparación completa con lo logrado a nivel laboratorio.

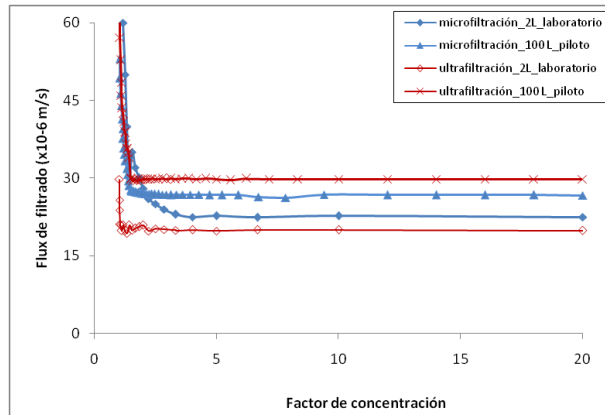


Fig. 2. Escalamiento a nivel piloto de la filtración tangencial de caldos de microalgas

Comparando los resultados de la microfiltración, se puede observar que los valores de flux entre el nivel laboratorio y piloto son muy parecidos (los resultados piloto son apenas 17 % superiores a los valores de laboratorio), indicando esta similitud que el criterio de escalamiento fue el adecuado.

En cambio para los resultados de la ultrafiltración, se puede ver que los resultados piloto son 45% superiores a los de nivel laboratorio. Sin embargo, se esperaba que los resultados en ambos niveles fueran muy parecidos, quizás esto no fue así porque los resultados de laboratorio son más bajos de lo esperado debido al ensuciamiento de la membrana (Graves *et al.*, 2006). Lo importante de destacar en esta parte del trabajo es que la metodología desarrollada para el escalamiento es válida porque los resultados a nivel piloto nunca fueron inferiores a los encontrados en el nivel laboratorio.

Nivel Piloto.

Aprovechando la capacidad del equipo piloto de filtración tangencial, se pudieron trabajar flujos de alimentación superiores al calculado en el escalamiento ($8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$), los resultados se muestran en la Fig. 3, donde también se trabajaron 100 L de caldo de microalgas con una concentración inicial de 0.5 g/L, y se concentró hasta un valor de 10 g/L para obtener un grado de concentración de veinte veces.

Comparando los resultados de microfiltración se observa claramente que cuando se duplica el flujo de alimentación, también se incrementan los valores de *flux* aunque sólo se elevan 22 %. Esto era esperado según la ecuación 6, desarrollada en la parte de escalamiento, la cual indica que una mayor velocidad del fluido provocará un mayor valor de *flux*, y el aumento será de $2^{1/3}$, lo que en términos prácticos se obtuvo experimentalmente.

Este mismo análisis puede hacerse con los resultados de la ultrafiltración: los valores de flux se aumentan a un mayor flujo de alimentación, y ahora son superiores en 30 % cuando se duplica el flujo; en términos prácticos se cumple lo que predice la ecuación 6. Cuando se comparan los resultados entre la microfiltración y la ultrafiltración se puede obtener que, los *fluxes* de la ultrafiltración son 20 % superiores a los de la microfiltración a un flujo de alimentación de $16 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, y sólo 10 % superiores cuando el flujo es de la mitad.

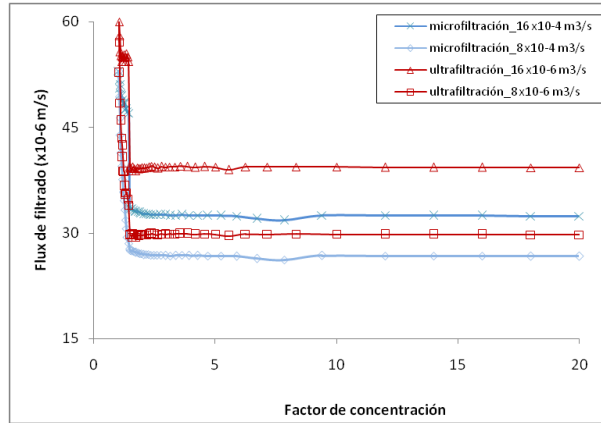


Fig. 3. Filtración tangencial de caldos de microalgas. Nivel piloto

Algunos autores explican que los *fluxes* en la ultrafiltración pueden ser mayores que en la microfiltración debido a que las partículas y/o células no pueden penetrar en los poros de la membrana mientras que sí lo pueden hacer en la membrana de microfiltración causando en esta última una obstrucción que provoca la disminución del *flux* (Liew *et al.*, 1995).

CONCLUSIONES

Al obtenerse los mismos valores de *flux* en la filtración tangencial tanto a nivel laboratorio como piloto se demuestra que el criterio de escalamiento usado fue el adecuado. Y que el mismo criterio predice en qué nivel se incrementará el *flux* al elevarse el flujo de alimentación.

AGRADECIMIENTOS: Proyecto SIP 20150455. Instituto Politécnico Nacional.

BIBLIOGRAFÍA

- Graves, K., Rozeboom, G., Heng, M., y Glatz, Ch., *Broth Conditions Determining Specific Cake Resistance During Microfiltration of Bacillus subtilis*, Biotechnology and Bioengineering, 94:346-352 (2006).
- Liew, M. K., Fane, A. G., y Rogers, P. L., *Hydraulic resistance and fouling of microfilter by Candida utilis in fermentation broth*, Biotechnology and Bioengineering, Vol. 48, 108-117 (1995).
- Meireles, M., Clifton, M. y Aimar, P., *Filtration yeast suspensions: experimental observations and modelling of dead-end filtration with a compressible cake*, Desalination, 147: 19-23 (2002).
- Millán Oropeza Aarón. (2013). Estrategias de operación de cultivos microalgales en *Raceway* para incrementar la productividad lipídica. Tesis de maestría. UPIBI-IPN.
- Naja, G., Volesky, B. y Schnell, A., *Performance análisis of an integrated tangential microfilter-fermenter*, Chem Technol Biotechnol, 81:648-658 (2006).
- Orozco, A. C., Vidal, R. D., García, S. S. y Ordaz, C. L. (2003). *Concentración de suspensiones de levadura por filtración tangencial*. Tecnología de alimentos, 38 (2), 7-17.
- Yeh, H.M., Wu, H.P. y Dong, J.F., *Effects of design and operating parameters on the declination of permeate flux for membrane ultrafiltration along hollow – fiber modules*, Journal of Membrane Science, 213 : 33 – 44 (2003).