

## Estudio hidrodinámico de reactores empacados de flujo ascendente (REFA)

Miguel Ángel Díaz Marrero

email: [migueld@quimica.cujae.edu.cu](mailto:migueld@quimica.cujae.edu.cu)

Centro de Estudios de Ingeniería de Procesos, Fac. Ing. Química. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). Habana.

Jaime Dueñas Moreno

email: [jaimedm@quimica.cujae.edu.cu](mailto:jaimedm@quimica.cujae.edu.cu)

Centro de Estudios de Ingeniería de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). Habana.

Ania Cabrera Díaz

email: [ania@quimica.cujae.edu.cu](mailto:ania@quimica.cujae.edu.cu)

Centro de Estudios de Ingeniería de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). Habana.

### RESUMEN

En el presente trabajo se emplean las técnicas de estímulo respuesta para estudiar los modelos de flujos de dos reactores tipo REFA, con volúmenes de 3,4 y 6 litros respectivamente, usando tiempos de retención hidráulicos y trazadores diferentes en ambos. Se determinaron las curvas de concentración contra tiempo para ambos reactores y se realizó el análisis comparativo de un grupo de relaciones entre los diferentes tiempos que se obtuvieron en los gráficos. Se aplica con los mismos experimentos, el Modelo de dispersión (Levenspiel) y se determina el tiempo medio ( $t_m$ ) que el trazador está dentro del reactor y el grado de dispersión. Concluyendo que los modelos hidrodinámicos de los dos reactores presentan características muy similares, con predominio de la tendencia a flujo pistón y un grado de dispersión media.

**Palabras clave:** estudio hidrodinámico, estímulo respuestas, modelos de flujo, reactor empacado de flujo ascendente, trazadores.

## Hydrodynamic study of upflow packed reactor (UPR)

### ABSTRACT

In this study the stimulus-response techniques are used to study the flow models of two type upflow filters packed reactors, volume of 3,4 to 6 liters respectively, using hydraulic retention times and different tracers in both. The concentration versus time curves for both reactors were determined and comparative analysis of a set of relationships between the different times that were obtained in the graphs was performed. Dispersion Model (Levenspiel) was applied in the same experiments, determined the median time ( $t_m$ ) that the dye is inside the reactor and the degree of dispersion. It was proved that the hydrodynamic models of the two reactors have very similar characteristics, dominated by the tendency of the plug flow and degree of dispersion media.

**Keywords:** hydrodynamic study, stimulus responses, flow models, packaged upflow filters, tracers.

## INTRODUCCIÓN

La mayoría de los diseñadores de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, lo realizan basados en los procesos biológicos que en ellos se desarrollan y no toman con el peso debido los problemas hidráulico que dentro de los reactores ocurren, como son: características del fluido, régimen de mezcla, tiempo de residencia, geometría del reactor y estado de agregación de elementos del fluido, los cuales influyen en la eficiencia de los procesos que se llevan a cabo durante el tratamiento. (Pérez y Torres, 2008; Giacomonet. al., 2006)

En otros casos se limitan sus diseños bajo el supuesto de que el fluido en los reactores tiene comportamiento ideal pudiendo ser de tipo pistón o mezcla completa, cuando en la realidad los fluidos no se ajustan exactamente a situaciones ideales, sino que su comportamiento resulta una mezcla de estos dos tipos de modelos de flujo (Levenspiel, 1998). También debe tenerse en cuenta los casos de canalización, recirculación de fluidos o formación de zonas muertas, lo que reduce la eficiencia del sistema. Los problemas de fluidos no ideales se relacionan con los problemas de cambio de escala. La mayoría de las veces, el factor que no se puede controlar en un cambio de escala, es la magnitud de la no idealidad del fluido, el cual es muy diferente entre modelo y prototipo. (Sánchez y Cardona, 2009).

Por lo planteado se deduce que para garantizar una buena operación de un reactor es necesario evaluar su comportamiento hidrodinámico, con el fin de identificar el tipo de flujo y los problemas que los afectan.

El estudio detallado sobre el mecanismo hidráulico de un reactor biológico, posibilita verificar problemas asociados a fallas operacionales y de diseño, además permite desarrollar modelos matemáticos para su caracterización hidrodinámica (Nardiet et al., 1999).

El comportamiento hidrodinámico de reactores puede evaluarse siguiendo el método experimental estímulo-respuesta, el cual consiste en variar una propiedad de la corriente de entrada, mediante un estímulo con una sustancia trazadora de concentración conocida y registrar, la variación o respuesta de la propiedad estimulada en la corriente de salida, siempre y cuando la sustancia empleada no participe en ninguno de los procesos físicos y químicos que puedan alterar la hidrodinámica del fluido (Richa et al. 2000) (Capela et al., 2009).

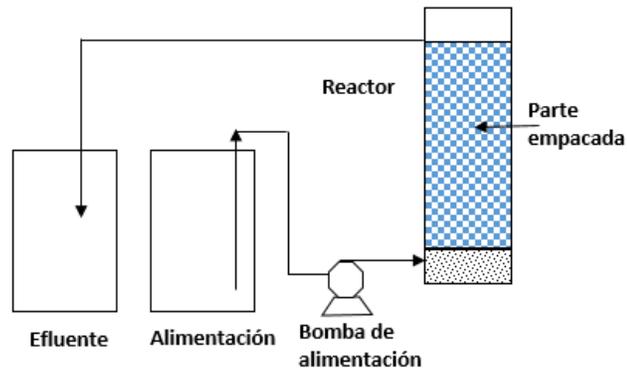
El trazador debe ser soluble en el agua y preferiblemente con elevado peso molecular para evitar problemas por difusión, rango de concentración con respuesta lineal y buena sensibilidad, ya sea si se mide por conductividad (para iones) o por espectrofotometría (moléculas coloreadas). Las sustancias trazadoras pueden ser: colorantes como fluoresceína o rodamina; iones como cloruros especialmente de sodio, potasio o litio; fluoruros o nitratos; elementos radiactivos como isótopos; ácido clorhídrico o benzoico y otras sustancias químicas como alizarim, sapirool y naftol (Pérez y Torres, 2008).

La aplicación del trazador puede realizarse en forma instantánea o continua, siendo la primera la más usada. En la dosis instantánea, el trazador se adiciona rápidamente a la entrada del reactor y en la dosis continua la aplicación se inicia de manera rápida y se mantiene constante durante un período de tiempo y finalmente se suspende una vez terminado el experimento.

En el presente trabajo empleando experimentos de estímulo respuesta, se estudian los modelos de flujos de dos reactores tipo filtros empacados de flujo ascendente de volúmenes de 3,4 y 6 litros respectivamente, usando trazadores y tiempos de retención hidráulicos diferentes en ambos reactores, con el objetivo de evaluar sus comportamientos hidrodinámicos.

## EXPERIMENTACIÓN

Para la realización de las pruebas de estímulo respuesta se trabajó con dos filtros empacados de flujo ascendente, que se emplean con mucha frecuencia como reactores en el tratamiento de aguas residuales. El esquema del sistema utilizado se muestra a continuación en la figura 1.



**Figura 1. Esquema del sistema utilizado para realizar las pruebas de estímulo respuesta**

El reactor de 3,4 L se alimentó con un flujo de 15,4 L/d, para un tiempo de retención hidráulico (TRH) promedio de 5,3 horas y el de 6 L el flujo de alimentación fue de 6,4 L/d para un TRH de 22,5 horas.

Los reactores se alimentaron con agua desionizada en sistema continuo y en un instante determinado se introdujo en el punto de alimentación un pulso con una disolución de la sustancia trazadora y a partir de ese momento se comenzó a intervalos de tiempo, el muestreo en la salida de la concentración del trazador.

En el caso del reactor de 3,4 L el trazador empleado fue Cloruro de Sodio (NaCl), inyectándosele 40 mL de concentración 4 g/L y se midió la concentración a la salida durante 13,5 horas, tiempo que equivale a 2,55 veces el TRH del reactor. Las concentraciones de salida se midieron a través de la conductividad de la solución con un conductímetro WPA modelo CMD 8500. Las conductividades fueron transformadas en concentraciones en g/L con una curva patrón que fue obtenida relacionando estos dos parámetros.

En el reactor de 6 L, el trazador utilizado fue Dextrana Azul, con una concentración de 1 g/L y dosificando en la alimentación 50 mL de la misma. La concentración en la salida se midió durante 72 horas, tiempo que equivale a 3,2 veces el TRH. En este caso como el trazador presenta coloración, la concentración se midió determinado la absorbancia de la solución de salida con un Espectrofotómetro UV MANDEL UV mini 1240 Shimadzu y transformando estos valores a concentración con una curva patrón de concentración contra absorbancia construida anteriormente.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### **Análisis de las curvas de tendencia de concentración de salida contra tiempo.**

Con los resultados de las concentraciones de los trazadores a la salida de cada reactor en los diferentes tiempos, se obtuvieron las curvas de concentración contra tiempo. En ellas puede

apreciarse para los dos reactores la existencia de un tiempo en el cual no hay presencia de trazador en el efluente, después la concentración crece hasta un valor máximo y posteriormente decrece hasta valores cercanos a cero.

En las figuras 2 y 3 se pueden ver las gráficas correspondientes a los dos reactores

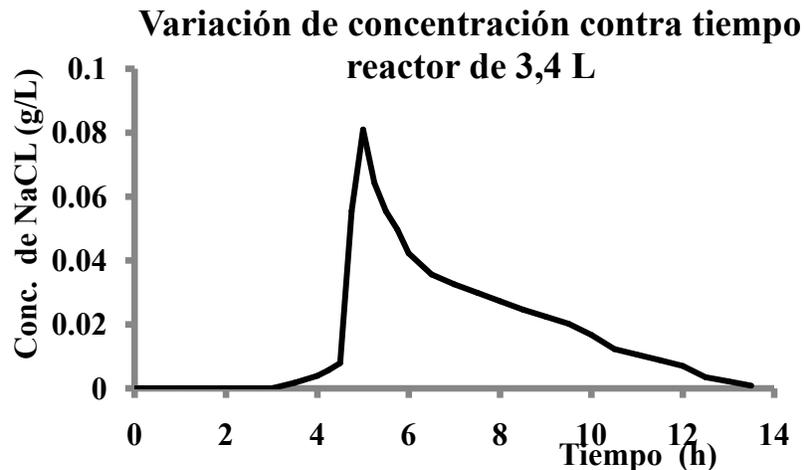


Figura 2. Curvas de concentración de trazador contra tiempo para el reactor de 3,4 L

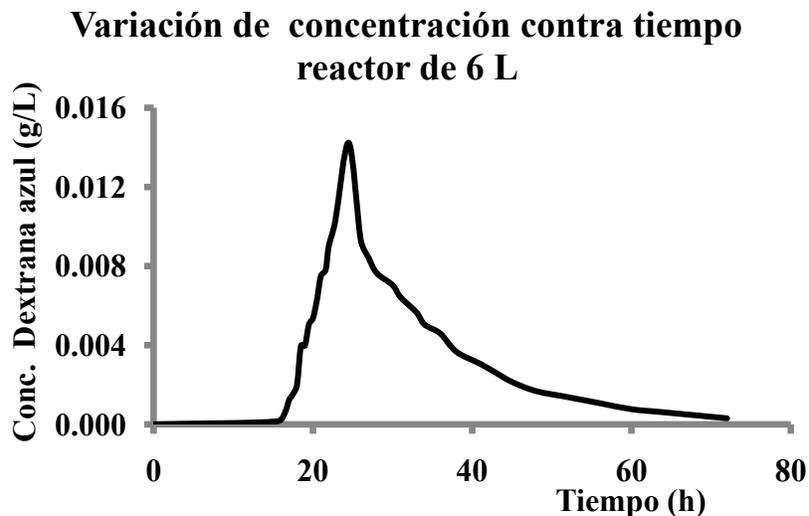


Figura 3. Curvas de concentración de trazador contra tiempo para el reactor de 6 L

En la tabla 1 se muestran parámetros que se midieron para analizar el comportamiento de la curva de tendencia, así como sus relaciones y su significación (CEPIS, 2004) (Pérez y Torres 2008)

**Tabla 1 Parámetros para analizar la curva de tendencia**

Parámetros	Relación	Significado
$t_0$		$t_0$ Tiempo de retención hidráulico
$t_p$	$t_p/t_0$	$t_p/t_0 \approx 0$ Predomina flujo mezclado $t_p/t_0 \approx 1$ y $t_i/t_0 > 0,5$ Predomina flujo pistón
$t_i$	$t_i/t_0$	$T_i/t_0 = 0$ Flujo mezcla completa $t_i/t_0 = 1$ Flujo pistón $t_i/t_0 < 0,3$ Cortos circuitos
$t_c$	$t_c/t_0$	$t_c/t_0 = 0,693$ Flujo mezcla completa
$t_b$	$t_b/t_0$	$t_b/t_0 \approx 2,3$ Flujo mezcla completa
$t_m$	$t_m/t_0$	$t_m/t_0 < 1$ Cortos circuitos y/o zonas muertas $t_m/t_0 > 1$ acumulación indeseada de trazador

donde:

$C_p$ : Concentración máxima a la salida.

$t_p$ : Tiempo transcurrido para alcanzar la máxima concentración del trazador.

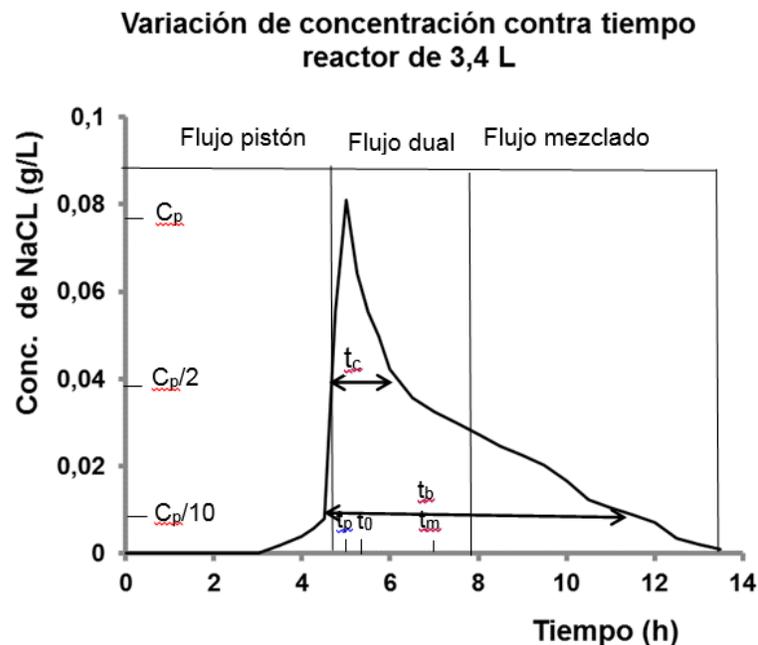
$t_i$ : Tiempo desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.

$t_c$ : Tiempo en que la concentración es mayor que  $C_p/2$ .

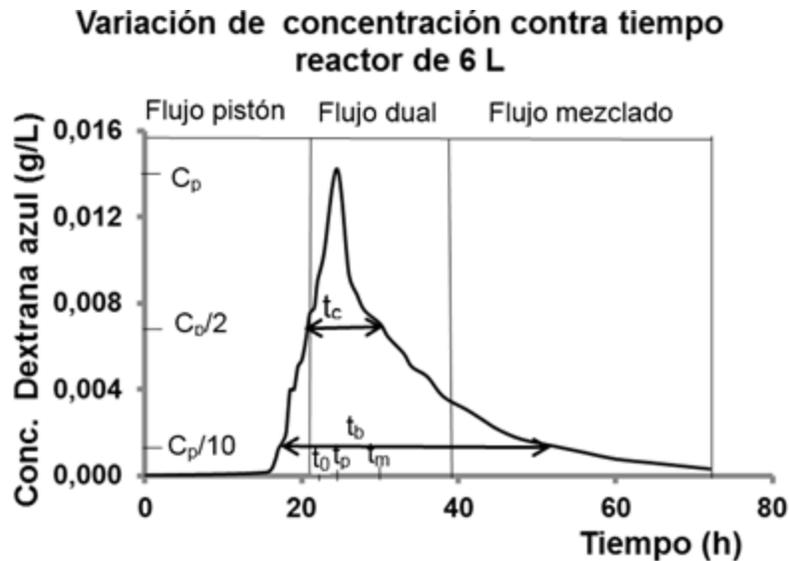
$t_b$ : Tiempo en que la concentración es mayor que  $C_p/10$ .

$t_m$ : Tiempo correspondiente a la salida del 50% de la cantidad de trazador inyectado.

En las figuras 4 y 5 se representan las curvas con los diferentes tiempos señalados.



**Figura 4. Curvas de concentración de trazador contra tiempo para los reactores de 3,4 L, con los tiempos señalados**



**Figura 5. Curvas de concentración de trazador contra tiempo para los reactores de 6 L, con los tiempos señalados**

En la tabla 2 se reportan los valores de las relaciones para los dosreactores

**Tabla 2. Relaciones entre los parámetros medidos en las curvas de los dos reactores**

Relaciones	Reactor de 3,4 L TRH = 5,3 h	Reactor de 6 L TRH = 22,5 h
$t_p/t_0$	0,94	1,09
$t_i/t_0$	0,66	0,69
$t_c/t_0$	0,28	0,38
$t_b/t_0$	1,15	1,53
$t_m/t_0$	1,32	1,33

Para ambos reactores las relaciones entre los parámetros estudiados, no tuvieron mucha diferencia; a pesar de haber trabajado con dos tipos de trazadores, diferentes volúmenes y TRH

Los valores cercanos a 1 de la relación  $t_p/t_0$  y mayores de 0,5 de la relación  $t_i/t_0$  indican el predominio de flujo tipo pistón.

Las relaciones de  $t_c/t_0$  y  $t_b/t_0$  inferiores respectivamente a 0,693 y 2,3 indican también tendencia a flujo pistón, aunque por los valores obtenidos pueden existir algunas recirculaciones internas.

La valores  $t_i/t_0$  superiores a 0,3 y los de la relación  $t_m/t_0$  mayores de 1 permiten establecer que en reactores empacados se produce acumulación indeseada de trazador en los espacios vacíos de los mismos, lo cual indica que debe suceder lo mismo cuando el reactor este trabajando con un sustrato y el tiempo de retención real del sustrato se hace mayor en el reactor. Indican la acumulación del trazador en los anillos de la empaquetadura, lo cual es lógico por el movimiento del fluido por la parte interior del empaque, originando el alargamiento de la cola en la salida de los reactores.

**Modelo de dispersión (Levenspiel 1998)**

Este modelo se basa, en aplicar los resultados de la curva de concentración contra tiempo normalizada de trazador ( $C_n$ ) y con ellas, determinar el tiempo medio ( $t_m$ ) que el trazador está dentro del reactor el cual puede determinarse:

$$t_m = \int_0^{\infty} C_n \cdot t \cdot dt \quad (1)$$

Si  $t_m > TRH$  indica la existencia de dispersión en el interior del reactor. Dicho grado de dispersión ( $D/\mu L$ ) se determinó través de la ecuación:

$$8 \cdot \left(\frac{D}{\mu L}\right)^2 + 2 \left(\frac{D}{\mu L}\right) - \frac{\sigma^2}{t_m^2} = 0 \quad (2)$$

donde:

$D$  : Coeficiente de dispersión longitudinal o axial.

$\mu$  : Viscosidad del fluido.

$L$  : Longitud del reactor.

$t_m$  : tiempo medio del fluido dentro del reactor.

$\sigma^2$  : Varianza.

La varianza  $\sigma^2$  se determinó por la ecuación:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - t_m)^2 \cdot C_n \cdot dt \quad (3)$$

Aplicando este modelo, a las curvas de concentración contra tiempo normalizadas de los reactores de 3,4 L y 6 L, se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3 Valores obtenidos en el modelo de dispersión**

Parámetro	Reactor de 3,4 L Con NaCl	Reactor de 6L con Dextrana azul
$t_m$	7,21	32,4
$\sigma^2$	4,15	127,8
$D/\mu L$	0,035	0,049

Los valores de  $t_m$  en ambos casos son mayores que los tiempos de retención hidráulicos, lo que indica la existencia de algún grado de dispersión, lo cual es corroborado al determinar el grado de dispersión, cuyos valores son indicativos de una dispersión intermedia, lo que permite concluir que el modelo de flujo de ambos reactores es una mezcla de flujo pistón con una fracción de mezcla completa.

## CONCLUSIONES

Los valores de las relaciones entre los tiempos ( $t_p$ ,  $t_i$ ,  $t_c$ ,  $t_b$  y  $t_m$ ) con respecto a  $t_0$ , tuvieron poca diferencia entre ambos reactores. No influyendo los volúmenes, tiempo de retención hidráulico y diferentes trazadores.

Las relaciones de los diferentes tiempos analizados demostró el predominio de flujo pistón, aunque se aprecia la existencia de recirculaciones internas. Se produce acumulación de trazador en los espacios interiores de la empaquetadura, lo mismo debe suceder cuando el reactor está trabajando con un sustrato y el tiempo de retención del mismo se hace mayor que el teórico.

El modelo de dispersión corrobora lo obtenido en el análisis de las curvas, al determinar que los tiempos medios que están los trazadores dentro de los reactores, son mayores que los tiempos de retención hidráulicos y la existencia en ambos de una dispersión media, ambos modelos reafirman que los reactores empacados de flujo ascendente con que se trabajó presentan características de flujo pistón con una fracción de mezcla completa.

## REFERENCIAS

- Capela, I.; Bilé, M.; Silva, F.; Nadais, H.; Prates, A. and Arroja, L.** (2009). "Hydrodynamic behavior of a full-scale anaerobic contact reactor using residence time distribution technique". *Journal Chemical Technology Biotechnology*. Vol. 84 No 6: pp. 716–724, New York. USA.
- CEPIS Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental** (2004). "Tratamiento de agua para consumo humano" Monografía de Filtración Rápida. Biblioteca del CEPIS. Lima Perú.
- Giácoman, G.; Rejón, L. y Aguilar, S.** (2006) "Evaluación de las características hidráulicas de un reactor de lecho fluidizado para el tratamiento aerobio de las aguas residuales", XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencia Ambiental, Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (FEMISCA), Memoria impresa del evento, pp. 1 - 14.
- Levenspiel, O.** (1998). "Ingeniería de las reacciones químicas". Editorial Reverté, Barcelona España.
- Nardiet, I.R.; Zaiat, M. and Foresti, E.** (1999). "Influence of the tracer characteristics on hydrodynamic models of packed-bed bioreactors", *Bioprocess Engineering*, Vol.21, No. 5, pp. 469 – 476, Berlin, Germany.
- Pérez, A. y Torres, P.** (2008). "Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo". *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, No 45, Septiembre, pp. 27 – 40, Merida, Colombia.
- Richa, M.; Normando, H. y Onofre, C.** (2000) "Aplicação de tracers em filtros anaeróbicos para avaliação das características hidrodinâmicas" XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitaria e Ambiental, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – Região Rio Grande do Sul (ABES/RS), Memoria impresa del evento, pp 74 – 85.
- Sánchez Molina, J. y Cardona Gallo, S.** (2009) "Evaluación del comportamiento hidrodinámico de un reactor aerobio y un reactor anaerobio, en una planta de tratamiento de agua residual doméstica de pequeña escala". *Avances en Recursos Hídricos*, No 20, Junio-octubre, pp. 65 – 80, Colombia.