Análisis de la hidrodinámica de un reactor de flujo pistón

Germán Giácoman Vallejos¹, Javier Frías Tuyín², Flor Arlene Hurtado Franco³ Víctor Coronado Peraza², Roger Méndez Novelo⁴

RESUMEN

La evolución en el diseño de reactores está relacionada con las reacciones (físicas, químicas y/o biológicas) que en ellos ocurren. Estas reacciones pueden ser cinéticas de transporte como se presentan en sedimentadores o cinéticas de reacción como ocurre en reactores químicos o biológicos. Generalmente se presentan más de un tipo de cinética en los reactores.

En el área de la biotecnología y sobre todo en el de los tratamientos de aguas residuales, el conocimiento de la hidrodinámica y la cinética son preponderantes, ya que a través de ellos que se puede lograr un incremento en la eficiencia de los procesos.

Dentro del diseño de reactores existen además factores constructivos que limitan el desarrollo ideal de los procesos, tal como fueron calculados en el diseño, por lo que es importante hacer una reevaluación de las variables de proceso en condiciones reales de operación.

El presente artículo presenta los resultados obtenidos en un modelo de reactor de flujo pistón, mediante el seguimiento de una variable denominada característica del tiempo de residencia.

Palabras clave: Flujo pistón, análisis de flujo, trazadores.

Introducción

En los procesos de tratamiento de las aguas residuales se pueden encontrar los tres estados de la materia (sólido, líquido y gas) y la interacción entre éstos está relacionada directamente con procesos de tratamiento que se pueden optimizar si se le procuran las condiciones hidrodinámicas más adecuadas. El conocimiento de las reacciones que ocurren en los procesos permitirían controlar las variables hidrodinámicas que los optimizaran.

Dado que se trata de sistemas heterogéneos en los que participan más de una fase, las características que deben cumplir son diversas y están relacionadas con el proceso mismo (Guder, 1997, Giácoman, 1998). Un ejemplo de ello lo constituyen la flotación o la sedimentación, donde se desea obtener un gradiente de concentración o de densidad contrariamente a los sistemas de lecho fluidificado, en los que se pretende tener un medio con el mayor grado de homogeneidad posible. Por lo que el diseño de reactores para el tratamiento de aguas residuales debe satisfacer en lo posible las exigencias que impone la operación, a fin de cumplir con los requerimientos de eficiencia planteados como metas mismas del proceso.

Si bien muchos fenómenos de transferencia de materia que se presentan en el tratamiento de aguas, fueron desarrollados en forma empírica, en la actualidad están siendo estudiados con bases teóricas más fundamentadas (Giácoman, 1998), no obstante existe aún un déficit de información y conocimiento, ya que las bases teóricas en las que se fundamentan los fenómenos también están limitadas por la falta de mejores técnicas de medición y manejo de datos. Un ejemplo de esto es el comportamiento dinámico de los sistemas dispersos. Para ser más explícitos en ello podemos citar el comportamiento de las burbujas de gas en fluidos newtonianos y fluidos no newtonianos (Räbiger, 1988), los cambios en las propiedades locales (densidad, viscosidad, grado de aglomeración o dispersión, velocidad, etc. (Guder 1997, Räbiger, 1988) de los fluidos por el movimiento de las otras fases. Estos cambios en las propiedades de los fluidos originan cambios en el tiempo de permanencia de los elementos del fluido dentro del sistema.

Por lo expuesto anteriormente, es importante el conocimiento de los aspectos hidrodinámicos que se desarrollan dentro de los diversos tipos de reactores. En este artículo se presentan resultados obtenidos de la medición continua de la característica de tiempo de residencia en un modelo de reactor de tipo flujo pistón. La característica de tiempo de residencia está definida aquí como la distribución de los tiempos de residencia de los elementos de un fluido dentro del sistema. El análisis de la característica de tiempo de residencia se efectuará a través de la curva de distribución que se obtiene de medir el cambio en la conductividad del fluido a causa de un trazador salino que es invectado en forma puntual al sistema. Las curvas de distribución serán analizadas posteriormente, a través de diversos modelos, con el fin de evaluar la influencia de

diversos factores sobre el comportamiento hidráulico.

En este trabajo, sólo se mostrará la variación en el comportamiento hidráulico como consecuencia del cambio en el caudal.

Descripción del proceso de desplazamiento de un fluido dentro de un sistema

Si se considera que un fluido está constituido por una infinidad de elementos, los cuales están expuestos a diversas y variadas fuerzas de empuje y obstrucción al movimiento de los mismos, se puede asumir que cada elemento del fluido tiene un comportamiento definido dentro del sistema que determina su permanencia en el mismo, por lo tanto, cada elemento esta relacionado directamente con su propia permanencia dentro del sistema y ello a su vez relacionado con el flujo completo en el sistema, lo que da lugar a la función de probabilidad del tiempo de residencia o lo que se conoce también como función de distribución del tiempo de residencia, ilustrado en la figura 1 (Krizan, 1988).



Figura 1. Representación del movimiento de los elementos del fluido en el sistema y su correspondiente función de densidad de la distribución del tiempo de residencia

La función de densidad de distribución se expresa como:

$$E(t) = \frac{1}{N_o} \frac{dN}{dt} = \frac{1}{V_t} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{m_o} \frac{dm}{dt}$$
(1)

Donde:

N es el número de moles de la sustancia medida a la salida del reactor en el tiempo "t"

N₀ el número de moles de la sustancia al inicio del experimento

V es el volumen de la sustancia medida a la salida del reactor en el tiempo "ť"

 V_0 es el volumen de la sustancia al inicio del experimento

m es la masa de la sustancia medida a la salida del reactor en el tiempo "t"

$$\bar{\mathbf{t}} = \int_0^\infty t \, \mathbf{E}(\mathbf{t}) \, \mathrm{d}\mathbf{t}$$

Para aspectos de evaluación de la característica del tiempo de residencia es frecuente recurrir tanto a la función de densidad como a la función suma o función cumulativa de la variable correspondiente, en este caso, el tiempo de residencia de los elementos de un fluido. La primera ya fue definida anteriormente. La segunda es también una

 m_0 es la masa de la sustancia al inicio del experimento

Cabe aclarar que el área bajo la curva de la función de distribución es por definición igual a la unidad (Levenspiel, 1984; Baerns, 1987).

Un importante parámetro que está relacionado con la función de distribución es el tiempo integral medio de residencia que se expresa como:



función probabilística, la cual es conocida en la bibliografía como la función o curva F y resulta de integrar la función de densidad respecto a la variable en cuestión (Levenspiel, 1984; Baerns, 1987).

La función suma o función cumulativa del tiempo de residencia esta definida por:

$$F(t) = \int \mathbf{E}(t) \, \mathrm{d}t \tag{3}$$

En la práctica es frecuente determinar cualquiera de estas dos funciones de probabilidad a través de la medición de la concentración de una sustancia (denominada trazador) u otra propiedad física ligada a la concentración. La obtención de estas funciones depende del tipo o forma de inyección del trazador. La inyección puntual de un trazador en el afluente de un reactor y el posterior seguimiento de su concentración en algún punto intermedio del rector o en el efluente, da como resultado la función (E(t)), denominada también curva o espectro de densidad; mientras que si la adición del trazador se realiza de manera continua, y se obtiene el registro de su concentración en el tiempo, también en algún punto interno del reactor o a la salida del mismo, se obtiene la función suma (F(t)). Con base en la determinación experimental de cualquiera de estas dos funciones es posible obtener la otra mediante cálculo matemático, ya que las funciones E y F están relacionadas entre sí tanto por la ecuación (3) o por su relación inversa, es decir por la siguiente expresión

$$E(t) = \frac{\mathrm{d} \mathbf{F}(t)}{\mathrm{d} t} \tag{4}$$

La función de la densidad de distribución integra todos los tiempos de retención de las partículas individuales. Esta función de densidad de distribución no proporciona ninguna información explicita sobre la estructura interna del flujo a su paso por el sistema, por lo que se puede pensar, que regímenes o sistemas de flujo completamente diferentes pueden tener el mismo tipo de espectro o función de distribución del tiempo de residencia.

Las dos funciones anteriormente descritas nos proporcionan, por lo tanto, información integral del régimen de flujo que se desarrolla dentro del sistema sin especificar las causas exactas del mismo. Para obtener un conocimiento detallado de las causas de dispersión en el flujo es necesario recurrir a mediciones locales.

El concepto de distribución de tiempo de residencia de un reactor, adquiere importancia cuando se le relaciona con las cinéticas de reacción de los procesos de transformación de la materia que ocurren en él. Por ejemplo, en el proceso de coagulación se requieren tiempos de reacción muy bajos, del orden de centésimas de segundo; mientras que las reacciones biológicas que ocurren en las lagunas de estabilización ocurren en tiempos de retención largos, del orden de días.

A fin de ilustrar el comportamiento hidráulico en un determinado sistema (en algún reactor en estudio) se plantea el remontarse imaginariamente en las líneas de flujo que siguen cada uno de los elementos del fluido dentro del mismo, entonces encontraríamos o reconoceríamos dos importantes estructuras de flujo que conducen a la dispersión del tiempo de residencia. Estas estructuras de flujo se presentan cuando:

- a) Los elementos del fluido siguen amplias o espaciosas líneas de flujo con diferentes velocidades absolutas y en diversas direcciones. En los casos sencillos de sistemas de una sola fase, suele deberse dicha diferencia en las velocidades absolutas a la influencia de las paredes del sistema, a la presencia de deflectores o (en sistemas muy espaciosos) a inestabilidades en el flujo, etc. Estas influencias se suelen agrupar dentro del concepto de efectos de dispersión macroscópicas.
- b) Los elementos del fluido están sujetos a variaciones debido a las diversas formas de

turbulencia que se desarrollan en el sistema y las moléculas individuales en sí, al movimiento molecular Browniano, ambos de naturaleza fortuita, por lo que en estos casos no se puede sacar conclusiones sobre el comportamiento individual de los elementos dentro del sistema, sino sólo es posible tomar criterios teóricos probabilísticos sobre el colectivo de elementos del fluido. Dado que el análisis de estos efectos se realiza en volúmenes infinitesimales se les denomina efectos microscópicos.

Tanto los efectos macroscópicos como los microscópicos están entrelazados de una manera compleja, por lo que se ha considerado que los efectos de dispersión macroscópica en general están influenciados por la geometría de los dispositivos donde se desarrolla el flujo y no así por los efectos microscópicos.

En el caso de sistemas que están constituidos de una sola fase y que ésta es la fase líquida, se puede observar que el comportamiento de los elementos del fluido en el flujo está influenciado por los efectos de tipo macroscópico. Un ejemplo de ello es el flujo laminar, en el que la velocidad de los elementos dentro del sistema varían en función a su posición respecto al área transversal de flujo y muestran un perfil parabólico cuando estos son conducidos a través de tuberías (sección cilíndrica).

Cuando los efectos de difusión entre los elementos del fluido son poco significativos, los elementos del fluido tendrán el mismo recorrido, y según la línea de flujo en la que se encuentren desde su ingreso en el sistema, tendrán un tiempo de residencia propio. Este tiempo de residencia será característico para todos los elementos del fluido que se encuentren en la misma línea de flujo. Así los elementos que se mueven en la línea más céntrica del sistema (es decir la parte central de la sección transversal al flujo) tendrán la máxima velocidad y por lo tanto el menor tiempo de residencia, contrario a los elementos que se mueven lentamente en las líneas cercanas a las paredes del sistema, debido a la fricción (fuerzas de rozamiento) con las paredes del sistema y por lo tanto su permanencia en el sistema aumenta, lo que da lugar a la formación de una larga cola en el espectro o en la función de distribución del tiempo de residencia, como se ilustra en la Figura 2.



Figura 2: Representación de la influencia del perfil de velocidad en la distribución del tiempo de residencia

No obstante a que se hace referencia a una determinada forma del perfil de velocidad, es posible sacar conclusiones teóricas probabilísticas sobre el tiempo de residencia. Así la función densidad de distribución del tiempo de residencia para el flujo laminar en tuberías está dada por:

$$E(t) = \frac{t^2}{(2t^3)}$$
(5)

A la distribución del tiempo de residencia obtenida como consecuencia del perfil de velocidad se le denominará perfil de flujo disperso. Esta es una forma de evaluar y simplificar los problemas convectivos de un flujo en dos dimensiones por medio del tratamiento en una sola dimensión, como un problema de tipo convectivo disperso (Krizan, 1988). Los efectos de dispersión microscópica pueden explicarse de acuerdo con la Ley de Fick que relaciona la velocidad con que se mueve un elemento en una fase, con la concentración del elemento en la fase. La influencia debido a las fluctuaciones fortuitas de los efectos de dispersión microscópica sobre la distribución del tiempo de residencia se denominará como flujo de una fase con turbulencias.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -k_d \left(\frac{dc}{dt}\right) d_y d_z \tag{6}$$

 $\label{eq:w} \begin{array}{l} w = \text{Peso de la sustancia o elemento disuelto} \\ t = \text{Tiempo} \\ c = \text{Concentración} \\ k_d = \text{Coeficiente de difusión molecular} \end{array}$

Las mediciones reales de la función de distribución de tiempo de residencia para el flujo

laminar por tuberías son más amplias que las que se obtendrían para el caso de las fluctuaciones estocásticas de efectos difusivos (Krizan, 1988). En el caso de flujo turbulento por tuberías el perfil de flujo respecto a la sección transversal de flujo sería en lo posible uniforme. Este es el caso que se conoce como de flujo pistón en el que el perfil de velocidad con respecto al área transversal de flujo es idealmente uniforme. En los casos reales sin embargo existen variaciones locales en las velocidades de las líneas de flujo debido a turbulencias o a las fluctuaciones estocásticas previamente mencionadas. No obstante el espectro o función de distribución de tiempo de residencia que aquí se registra, mostrará una curva de distribución que será más amplia cuanto mayor sea el grado de turbulencias, sin embargo estas curvas serán más angostas a aquellas obtenidas por el flujo laminar por tuberías.

La función de distribución que se obtiene en el caso en que se tenga un perfil plano de velocidades con referencia al área transversal de flujo, representando así la forma de un embolo que se mueve en dirección axial, está dado por :

$$E(t) = \delta \left(\mathbf{t} - \tau_{c} \right) \tag{7}$$

donde el tiempo teórico de retención (τ_c) puede calcularse con:

$$\tau_c = \frac{A H}{Q} \tag{8}$$

Donde:

Q es el gasto A el área superficial H la profundidad

En este tipo de flujo sólo se tiene un movimiento convectivo (Krizan, 1988), por lo que la función de densidad de distribución de tiempo de residencia en el caso del flujo pistón está dada por la función Dirac (δ) corrida en el eje del tiempo en una magnitud τ_c .

En el caso de que el sistema cuente con elementos que incrementan la dispersión del flujo como los sistemas con agitación, donde se genera un flujo completamente mezclado la función de distribución del tiempo de residencia está dada por:

$$E(t) = \frac{1}{\tau_{\rm c}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\rm c}}\right) \tag{9}$$

donde

$$\tau_c = \frac{V}{Q} \tag{10}$$

Complementando lo anteriormente expuesto sobre las funciones de distribución del tiempo de residencia para flujos reales, se planteó considerar al sistema como un conjunto de módulos conectados en serie. Los módulos fueron considerados como subsistemas con características de flujo ideales de mezcla completa (Levenspiel, 1984; Baerns, 1987). Este concepto de módulos conectados en serie representa el comportamiento de mezcla del sistema y que para un número infinito de tanques agitados pequeños (con mezcla completa) describe el comportamiento hidráulico de un flujo en pistón y para N igual a uno describe el comportamiento del flujo de mezcla completa. La función de distribución del tiempo de residencia para este caso es la siguiente:

$$E(t) = \frac{n}{\tau_{\rm c}} \left(\frac{n\,t}{\tau_{\rm c}}\right)^{n-1} \frac{1}{(n-1)!} \,\exp\!\left(\frac{n\,t}{\tau_{\rm c}}\right) \tag{11}$$

donde n es el número de compartimentos o celdas y τ_c es el tiempo total de residencia en el sistema (en

todas las celdas, equivalente al tiempo teórico de retención) y esta dada por:

$$\tau_{\rm C} = \frac{\rm V}{\rm Q} \tag{12}$$

En la Figura 3 ilustra gráficamente la trayectoria de las funciones densidad y suma para los diferentes casos expuestos hasta ahora.



Figura 3: Trayectoria de las Funciones de densidad y suma de la Distribución del tiempo de residencia para distintas formas de flujo.

Las influencia de los efectos de dispersión macroscópica sobre el flujo se manifiesta a través de diferentes fenómenos, de los cuales la presencia de espacios muertos en el sistema es uno de los principales. Frecuentemente se presentan casos de zonas muertas, ya sea por limitaciones técnicas de construcción o por razones relacionadas directamente con el flujo, en las cuales se da un estancamiento del fluido, generando así que estas zonas tengan poco o nada de intercambio con el resto del flujo. La Figura 4 ilustra este caso. El intercambio de elementos del fluido entre la zona activa y las zonas pasivas (o sea los volúmenes muertos) se conduce muy lentamente, de tal modo que los elementos del fluido que fueron atrapados en las zonas muertas llegan a tener tiempos de residencia mucho mayores. El punto central de la velocidad media de los elementos que fueron

atrapados en las zonas muertas puede ser considerado como despreciable. La existencia de espacios muertos en un sistema implica que el espectro o la curva de distribución del tiempo de residencia presentará una gran cola y por lo tanto t (el punto central o tiempo medio de residencia) se encontrará más hacia valores mayores del eje del tiempo.

Wolf y Resnick propusieron un modelo empírico (de caja negra) para determinar de manera objetiva y sencilla el porcentaje de espacios muertos en el sistema, el porcentaje del flujo que presenta una característica de pistón, así como la zona de mezcla completa (CEPIS, 1975). La ecuación propuesta por Wolf y Resnick para la función de densidad de distribución está dada por:

$$E(t) = \frac{\eta}{\tau_0} \exp\left(-\frac{\eta(t-\varphi)}{\tau_0}\right)$$
(13)

donde el parámetro:

$$\varphi = p(1 - m) \tag{14}$$

representa el desplazamiento de la curva o espectro del tiempo de residencia debido a los espacios muertos.



Figura 4: Representación de la influencia del perfil de velocidad en la distribución del tiempo de residencia

$$\eta = \frac{1}{(1-p)(1-m)}$$
(15)

representa la eficiencia de mezcla.

Cholette y Cloutier Baerns, (1987); Giácoman, (1998) propusieron otro modelo más teórico que también considera espacios muertos y además corto circuitos, con base en un balance tanto de volúmenes como caudales. Así, el modelo considera que una parte del caudal cruza por el sistema tan rápidamente sin que se mezcle con el resto y constituye un corto circuito o vía rápida, donde el movimiento de los elementos del fluido es del tipo pistón. Además, considera también que una parte del volumen de reactor es zona muerta y por lo tanto no participa como zona activa.

La función densidad para este tipo de modelo está expresada por la siguiente ecuación:

$$E(t) = \left(\frac{Q_a}{Q_0}\right)^2 \frac{1}{\tau} \frac{V}{V_a} \exp\left(-\frac{Q_a}{Q_0} \frac{V}{V_a} \frac{t}{\tau}\right) + \frac{Q_b}{Q_0} \frac{1}{\tau} \delta(t - \tau)$$
(16)

Donde V_a representa el volumen de la zona activa; Q_a el caudal en la zona activa; V el volumen total del sistema; Q_0 el caudal total de la fase continua que atraviesa el sistema, Q_b la fracción del

caudal que pasa por la zona de corto circuito; V_b volumen de la zona muerta y la variable τ está representada por la siguiente relación:

$$\tau = \frac{V}{Q_0} \tag{17}$$

Esta función de tipo exponencial resulta más compleja en su evaluación.

Los efectos microscópicos de dispersión que influyen en el comportamiento del tiempo de residencia para el caso de sistemas de una sola fase se deben fundamentalmente a la presencia, al mismo tiempo, de varios tipos de turbulencia, entre los que se destaca la turbulencia de Reynolds. Aquí, se entenderá como turbulencia de Reynolds a aquella que es producida por la variación local de la velocidad (que está influenciada por el efecto que las paredes ejercen sobre el fluido) o por el choque de dos corrientes de velocidad diferentes.

Metodología

Los datos que a continuación se reportan fueron determinados en un modelo de rector a escala laboratorio de flujo pistón cuyo volumen es de 4.7 litros. En la Figura 5 se ilustra el perfil lateral del reactor que cuenta con tres deflectores que obligan al fluido a circular en forma ascendente y descendente a lo largo del reactor.



Figura 5: Vista lateral del modelo de reactor de flujo pistón a escala laboratorio

Se instalaron dos electrodos para medir la conductividad (μ S/cm) de manera continua: uno al inicio de la primera cámara y el otro al final de la última cámara. Para evitar la formación de gradientes de conductividad, los electrodos no permanecían fijos en algún punto del reactor, sino que flotaban cerca de los puntos indicados. Las pruebas se realizaron ajustando el caudal de alimentación de agua con una bomba de diafragma y se ensayaron caudales de: 0.97, 0.092, 0.086, 0.083 y 0.053 l/min. La inyección del trazador (salmuera) se realizó de manera puntual en el conducto afluente del reactor.

Dado que el agua posee un cierto valor de conductividad, a las determinaciones obtenidas en los ensayos se les restó la conductividad base (la que poseía el agua) para obtener la conductividad producida por el trazador.

Resultados y discusión

En la Figura 6, se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de conductividad al inicio de la primera cámara para los caudales de 0.092, 0.086, 0.083 y 0.053 1/min. No se notan diferencias en los tiempos requeridos para alcanzar la máxima conductividad, sin embargo, se nota la presencia de zonas muertas en la porción comprendida entre el punto de inyección y el de muestreo, lo cual es indicado por las largas "colas" que corresponden al paso del trazador por el punto de muestreo. Este efecto se hace más evidente cuando el flujo decrece. Lo que cabría esperar en este gráfico, es una alta concentración del trazador desde el tiempo inicial (o cerca de él) y un rápido decremento de la concentración para que se cumplan las características de una inyección puntual.

El anterior resultado implica que no se cumplen los supuestos teóricos de la inyección puntual, lo que tendrá un efecto en el monitoreo al final del rector.



Figura 6: Datos obtenidos de la Distribución del tiempo de residencia en la zona de ingreso de reactor

En las Figuras 7 y 8 se presentan los resultados obtenidos tanto al inicio como a la salida del reactor. Los datos de la Figura 7 corresponden al caudal de 0.97 l/min. y corresponden a pruebas con un flujo rápido dentro el sistema. Es importante mostrar que para esta condición de operación del sistema, el pico más alto en la zona de ingreso se presentó a los 20 s con un valor de 1474 S/cm y en la zona de salida fue a los 185 s con 391 S/cm. También se observa que debido a la velocidad del flujo, a un corto intervalo de tiempo después de la inyección del trazador se empezaron a obtener las primeras lecturas en la primera cámara del reactor y a los 70 s empieza a salir por la última cámara. Esto demuestra precisamente la fracción de flujo pistón del reactor durante el avance del flujo.

El tiempo teórico de retención para estas condiciones de operación es de 291 s, sin embargo, una porción del trazador sale del reactor después del tiempo teórico de retención, lo que se interpreta como que existe un volumen del reactor que puede ser considerado como zona muerta, o bien, es el efecto de la forma imprecisa de inyectar el trazador. Otra porción del trazador sale del rector a tiempos menores del teórico de retención, lo que evidencia zonas de corto circuito en el sistema.

Los datos de la Figura 8 corresponden al caudal de 0.083 l/min y representa un flujo lento del fluido a través del sistema. Bajo estas condiciones de operación se observa que el trazador empieza a ser registrado en la primera cámara a un tiempo t = 765 s de iniciado el monitoreo, pero la inyección del trazador se realizó en t = 600 s, por lo que el tiempo de flujo desde el punto de inyección hasta la cámara de ingreso en el reactor fue de t = 165 s. El pico máximo de la curva al inicio de la cámara de ingreso se presenta a t = 955 s y llega a un valor máximo de conductividad de 2002 S/cm, terminando de pasar el trazador por el punto de muestreo en la primera cámara a los t = 5220 s. En el segundo punto de muestreo, el trazador se empieza a detectar a los 2250 s, llegando el valor máximo de conductividad de 302

S/cm a partir de t = 2860 s y oscilando en este valor hasta 3085 s. Estos datos permiten visualizar la influencia o existencia de zonas muertas en el reactor, dado que existe un lento cambio en la concentración del trazador a la salida del sistema.

El tiempo teórico de retención en este ensaye fue de 3398 s. Se nota, al igual que con el gasto mayor, la existencia de zonas muertas y de cortos circuitos. Como en el caso anterior, esta "zona muerta" incluye el volumen del reactor en que la transferencia es mínima y el efecto de la deficiencia en la inyección del trazador.



Figura 7: Representación de la distribución del tiempo de residencia en la entrada y salida del sistema para un flujo rápido.



Figura 8: Representación de la distribución del tiempo de residencia en la entrada y salida del sistema para un flujo lento.

Conclusiones

Este artículo muestra que la determinación de la distribución del tiempo de residencia en un sistema, mediante la medición del cambio de conductividad debido a la inyección puntual de un trazador en el ingreso de sistema, proporciona información sobre el régimen de flujo que se desarrolla al interior del sistema.

La inyección puntual del trazador tiene influencia en la curva de tendencia del reactor, propiciando que una fracción del trazador entre lentamente al reactor, lo que se interpreta como un incremento en el volumen de la zona muerta del reactor.

Los resultados presentados en este articulo hacen ver que al inicio del sistema ya se presentan los efectos de dispersión en el flujo, principalmente debido a factores de orden macroscópico como a la influencia del perfil de velocidad y que a través de los datos registrados a la salida del sistema se demuestra la existencia de zonas muertas, considerado también como un factor macroscópico de dispersión, puesto que debido a este efecto los tiempos de permanencia de los elementos del trazador se incrementan y más aún cuando el caudal que circula por el sistema es bajo.

De acuerdo a la teoría expuesta en este artículo, donde se presentaron las diferentes funciones de distribución del tiempo de residencia en las que se destaca, en primera instancia, que el flujo en un sistema de una fase puede ser descrito por un modelo de tipo convectivo disperso, pueden ser aplicadas como funciones en la evaluación cuantitativa de los efectos que dan lugar a la dispersión del flujo dentro del sistema.

Estas funciones probabilísticas del tiempo de residencia, como la función densidad y la función cumulativa o función suma, hacen posible obtener información importante sobre porcentajes volumétricos de zonas muertas existentes en un sistema durante su operación así como el grado de mezcla completa del sistema.

La evaluación cuantitativa de los efectos de dispersión puede llevarse a efecto mediante el uso de técnicas de identificación de parámetros. Se ha mostrado que la identificación de un sistema está relacionado al conocimiento de los fenómenos que en ella se desarrollan; por lo que la elección o la deducción matemática de un modelo que describa el comportamiento hidrodinámico del sistema está sujeta a la capacidad de poder medir dichos efectos, lo cual es aún materia de investigación.

El desarrollo de nuevas técnicas de medición de los efectos locales de dispersión permitirá no solo un mejor diseño de reactores, sino también una mejor descripción de los procesos que conduzcan a la mejor operación de los mismos.

Agradecimientos

Este artículo es un producto del proyecto de investigación "Diseño y evaluación del comportamiento hidráulico de un prototipo de reactor de lecho fluidificado", el cual es financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Clave: 34429-U)

Referencias

Barens, M; Hofmann, H.; Renken, A. (1987). Chemische Reaktionstecnik. Georg Thieme Verlag. Suttgart. ISBN: 3-13-687501-X.

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), (1975). Teoría, Diseño y Control de Procesos de Clarificación de Aguas. Lima, Perú.

Giácoman Vallejos, G (1998). Dynamische Prozeßsimulation der biologischen Abwasserbehandlung in gekoppelten Prozeßsystemen. VDI-Verlag. Dusseldorf. ISBN: 3-18-320015-5

Guder, R. (1997). Fluiddynamik von dreiphasenströmungen in Treibstrahl-Schlaufenreaktoren. VDI-Verlag. Dusseldorf. ISBN: 3-18-346103-X

Krizan, P. (1988). Analyse des dynamischen Verhaltens disperser Mehrphasensystemen bei ausgeprägter Groβraumströmung am Beispiel einer Gegenstrom-Blasensäule. IDEA Verlag GmbH, Puchheim. ISBN: 3-88793-083-5.

Giácoman et. al. / Ingeniería (2003) 7-19

Levenspiel, O. (1984). The chemical reaction. Omnibook. Corvallis. Oregon. ISBN: 0 88246-069-9.

Räbiger, N. (1988) Hydrodynamik und Stoffaustausch in strahlgetriebenen Schlaufenreaktoren. TÜV-Rheinland – Verlag. Köhl.