

Análisis de la hidrodinámica de fluidos con flujo no ideal en un reactor flujo-pistón

Jorge A. Garnero, Silvina Daghero, Natalia A. Santillán, Juan R. García, Alfonsina E. Andreatta
 UTN – FR San Francisco, jgarnero64@gmail.com

Resumen—El objetivo principal de esta investigación consistió en el análisis del modelo de flujo de un fluido dentro de un reactor flujo-pistón, evaluado a escala piloto con el fin de reproducir luego el flujo de efluentes industriales en condiciones controladas para determinar las posibilidades de estabilización del mismo a través de métodos naturales. Para ello, se realizaron ensayos en un reactor abierto alimentado con agua por medio de una bomba dosificadora y se analizó la distribución de los tiempos de residencia mediante la medición de la conductividad de muestras tomadas a la salida del reactor a intervalos regulares de tiempo, luego de realizar una inyección instantánea de un pulso de solución concentrada de cloruro de sodio como trazador en la entrada del sistema. Las curvas obtenidas respondieron al modelo hidrodinámico de flujo no ideal. El ensayo ha sido reiterado modificando el caudal de alimentación, y se encontró que las curvas presentaron mayor aproximación a dicho modelo cuando el caudal tomó un valor promedio de 0,133 L/min.

Palabras clave—hidrodinámica, reactor flujo-pistón, flujo no ideal.

I. INTRODUCCIÓN

SI bien el comportamiento real de los reactores puede aproximarse a los diferentes modelos teóricos conocidos, existen condiciones propias de cada equipo, en las que las desviaciones pueden resultar considerables, incurriendo luego en errores apreciables a la hora de la interpretación y futura utilización de los datos obtenidos. Por otro lado, muchos son los casos en los que los modelos ideales de flujo no representan adecuadamente al sistema en cuestión. Las condiciones de flujo no ideal en los reactores afectan su desempeño; las causas más comunes son las zonas de recirculación interna por corrientes cinéticas y/o de densidad, cortocircuitos y zonas muertas [1].

Las características hidráulicas del flujo dentro de un reactor no ideal pueden ser evaluadas a partir de lo que se denomina distribución de los tiempos de residencia (DTR), que expresa cuánto tiempo permanece cada una de las partículas o moléculas del fluido dentro del sistema, con la intención de conocer la respuesta a las perturbaciones naturales o inducidas en el mismo. Las curvas de DTR ayudan a describir la forma y la extensión de la desviación de la idealidad en el reactor [2]. Dichas curvas pueden determinarse por medio de métodos de estímulo-respuesta utilizando trazadores, donde el sistema es perturbado en un instante determinado por la adición de una cantidad conocida de un compuesto conservativo e inerte que cuenta con una propiedad de fácil detección (por ejemplo: color, absorción de luz, radioactividad, conductividad, etc.) y que no participa en ninguno de los procesos físicos y químicos que puedan alterar la hidrodinámica real del fluido [3]. Luego, el trazador es estudiado a la salida por medio de la medición de dicha propiedad, tomando muestras a intervalos regulares de

tiempo, con lo que se logra conocer el comportamiento del fluido dentro del reactor por un cierto intervalo de tiempo. Es decir, el trazador ingresa al sistema en un determinado momento denominado λ acompañado por una cierta cantidad del fluido; luego, la cantidad de trazador que abandona el sistema para cualquier tiempo superior a λ , será proporcional a la cantidad de fluido que ha ingresado al sistema durante el mismo tiempo λ [4].

Conociendo el comportamiento del fluido dentro del reactor, y el tiempo que permanece dentro del sistema (tiempo de retención hidráulico, τ), se pretende, a futuro, evaluar la estabilización de ciertas características de efluentes industriales, como por ejemplo la demanda bioquímica de oxígeno (DBO). El diseño de los sistemas de tratamiento de aguas residuales se ha centrado fundamentalmente en el proceso bioquímico, dejando en segundo plano aspectos hidrodinámicos como las características del flujo, régimen de mezcla, tiempos de residencia, geometría del reactor, etc., los cuales influyen en el desempeño de los procesos que se llevan a cabo durante el tratamiento. Por tanto, el conocimiento de la hidrodinámica del sistema permitirá mejorar su eficiencia [3]. Los efectos de los patrones de flujo no ideales, pueden ser de suma importancia en la reducción de los contaminantes de las corrientes, principalmente debido a las diferencias de velocidad entre las capas de agua, donde las capas con movimiento más lento, interactúan fuertemente con los contaminantes generando mayor alteración química que las capas con velocidades mayores [5]. De aquí, la importancia del conocimiento de los aspectos hidrodinámicos que se pueden desarrollar en los distintos reactores que se presentan en los sistemas de tratamiento de aguas residuales [6].

II. MARCO TEÓRICO

Para la evaluación hidrodinámica del flujo dentro del reactor se tienen en cuenta determinadas variables que dependen fundamentalmente de las características del mismo y del caudal de trabajo.

La primera a definir, es el tiempo de retención hidráulico (TRH, τ), que es el tiempo necesario para que los procesos dentro del reactor sean llevados a cabo garantizando un tratamiento adecuado. La expresión teórica del TRH viene dado por (1)

$$\tau = \varepsilon \frac{V}{v} \quad (1)$$

Donde ε representa la porosidad del medio, V el volumen del reactor y v el caudal del fluido.

En condiciones reales, este valor se ve afectado por la forma del reactor, las características hidráulicas de las estructuras de entrada y salida, etc.

Una vez que el sistema comienza a funcionar, los distintos elementos del fluido seguirán diferentes caminos a lo largo del reactor, por lo que cada uno tardará un tiempo diferente en recorrerlo, la distribución de estos tiempos es lo que se define como distribución de los tiempos de residencia (DTR) del fluido. Esta distribución es determinada utilizando el método de estímulo-respuesta; el análisis de la respuesta brinda la información requerida del sistema. El estímulo es la inyección en impulso (instantánea) del trazador en el fluido en la entrada del recipiente, y la respuesta es una representación frente al tiempo de la propiedad del trazador a la salida.

Se denominará curva C a la respuesta normalizada del trazador en la corriente de salida frente al tiempo. Dicha normalización se logra dividiendo a la concentración C por Q (área bajo la curva concentración-tiempo), obteniendo (2)

$$\int_0^{\infty} C dt = \int_0^{\infty} \frac{C}{Q} dt = 1 \tag{2}$$

Donde Q viene dado por (3),

$$Q = \int_0^{\infty} C dt \tag{3}$$

En la Fig. 1 se representa la señal de salida del trazador, curva C para sistemas de flujo no ideal con inyección de trazador en impulso.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos de laboratorio fueron realizados en Planta Piloto de la UTN-Facultad Regional San Francisco.

A. Equipos y materiales

El equipo utilizado para el ensayo consta de las siguientes partes constituyentes:

-Depósito de agua: con el fin de asegurar la continua alimentación de la bomba, se utilizó un tanque de polietileno de mediana densidad (PEMD) con tapa a rosca marca Ares de 95 L de capacidad.

-Bomba: se utilizó una bomba dosificadora electromagnética marca Ares, modelo DX-7-1-PP. La misma cuenta con regulador de caudal manual de 0 a 100 imp/min, equivalente a 0-1,5 L/h.

-Reactor: construido en vidrio, de forma rectangular, abierto en su superficie, con una capacidad de 45 L. El reactor cuenta con tuberías perforadas en la entrada y salida con el fin de crear la dispersión del fluido, y con deflectores ubicados como puede observarse en la Fig. 2.

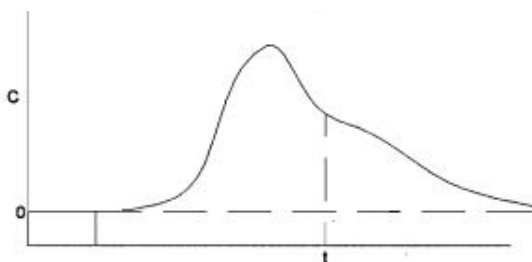


Fig. 1: Señal característica a la salida del sistema en respuesta a la inyección del trazador en la entrada.

Los materiales utilizados se detallan a continuación:

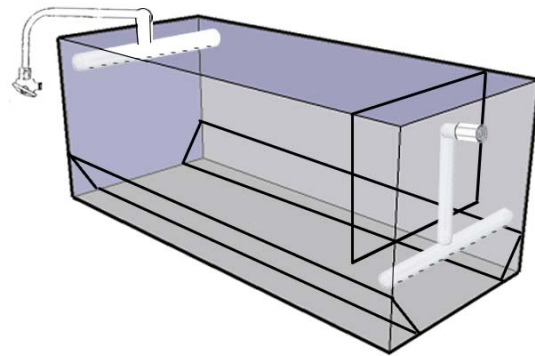


Fig. 2: Esquema del reactor utilizado.

-Fluido: como se ha mencionado, se utilizó agua proveniente de la red de agua corriente como fluido.

-Trazador: se utilizó NaCl, inyectando 20 mL de solución de 0,5 M de concentración. La propiedad medida en el fluido a la salida del sistema fue la conductividad.

-Conductímetro: Se utilizó un equipo portátil de marca Hanna Instruments, modelo HI98129, denominado Waterproof Tester que determina pH (0-14), conductividad eléctrica (0-3999 µS/cm), sólidos totales (0-2000 ppm) y temperatura (0-60 +/- 0,5 °C).

-Jeringas: para la inyección del trazador se utilizaron dos jeringas de 10 mL.

B. Variables

En la Tabla I se presentan las variables del sistema.

TABLA I

Variables consideradas durante los ensayos

Variables no controladas	Variables de control	Variables de respuesta
Condiciones ambientales (temperatura, humedad)	Caudal	Concentración de trazador a la salida
Calidad del agua	Concentración de la solución trazadora	

C. Procedimiento

En primer lugar, para comenzar con el ensayo se procedió al llenado y estabilización de caudal del reactor. Esto se llevó a cabo dejando que el agua fluya a través del reactor por medio de la bomba durante unos 20 minutos, controlando el caudal de salida hasta que el mismo fue constante. Se registró la conductividad y temperatura del agua previo a la inyección de la solución trazadora.

Una vez estabilizado el régimen de flujo del reactor, se prepararon las jeringas con la solución trazadora y las mismas fueron inyectadas a través de la tubería de entrada de fluido al reactor, de manera que las perforaciones permitan una distribución uniforme del trazador en el flujo de ingreso. La solución fue inyectada instantáneamente, resguardando que no genere turbulencia o modificaciones considerables en el régimen de flujo establecido.

Inmediatamente luego de la inyección del trazador, comenzaron a recolectarse muestras, cada 1 minuto, a las cuales se les realizó una determinación de conductividad y temperatura. El caudal se registró cada 10 minutos, aproximadamente.

La toma de muestras se extendió hasta que la conductividad registrada en las mismas retornara al valor inicial y se mantuviera constante.

Este procedimiento se repitió para distintos caudales.

Con los datos de conductividad obtenidos en cada ensayo, se determinó la concentración de NaCl en cada muestra. Estos valores fueron graficados en función del tiempo, obteniendo un conjunto de puntos que debieron ser normalizados previo a efectuar el ajuste matemático.

La bomba utilizada permite la regulación del caudal mediante la selección de la cantidad de impulsos, que va de 0 a 100 imp/min. Los ensayos se realizaron en cada uno de dichos puntos, seleccionando luego los correspondientes a 20, 50, 70 y 90 pulsos, ya que los valores obtenidos en los ensayos con caudales intermedios no presentaron mayores diferencias entre sí. Luego, de los 4 caudales mencionados, se seleccionó el correspondiente a 70 pulsos para la realización del ajuste y análisis matemático detallado en el presente informe, dado que fue el caudal cuyas mediciones presentaron una mejor aproximación a la curva teórica en cuanto a la distribución de los puntos.

IV. AJUSTE MATEMÁTICO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Para los resultados obtenidos en el experimento realizado con la bomba configurada a 70 imp/min (correspondiente a un caudal $Qm=0,133$ L/min), se llevó a cabo el análisis de la curva de respuesta. En la Fig. 3 se presenta la curva experimental obtenida.

Dado que la curva experimental presentó un valor de base, con una conductividad de $439 \mu S/cm$, se restó a toda la curva un valor constante de $263,4$ mg/L, de manera tal que la nueva curva (trasladada verticalmente) parta de cero y regrese a cero luego de un intervalo de tiempo grande (esta es una condición que debe cumplir toda curva de respuesta ante la introducción rápida de una cantidad finita de trazador, lo cual puede asemejarse a un pulso). Una vez realizada la traslación, se prescindió de los valores obtenidos a tiempos inferiores a 4 minutos, y de los puntos correspondientes a tiempos superiores a 83 minutos, que arrojarían valores de señal (trasladada) negativos. En la Fig. 4 se presenta la gráfica resultante de la traslación en el eje de las concentraciones.

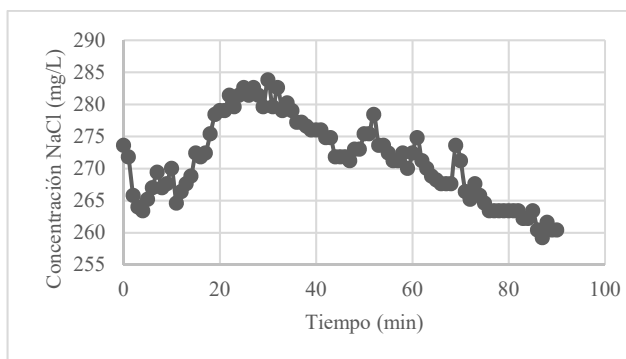


Fig. 3: Curva de respuesta experimental.

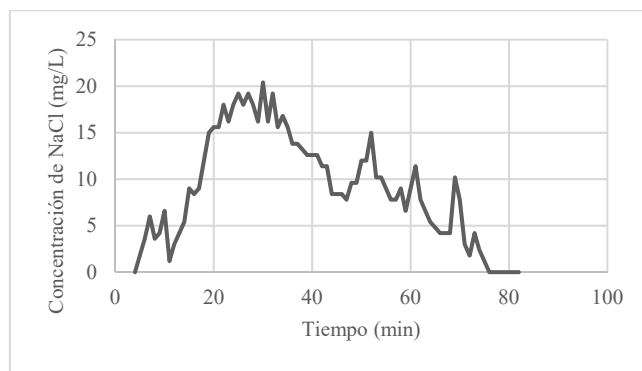


Fig. 4: Curva de respuesta modificada.

Los valores de concentración a la salida versus tiempo se ajustaron mediante (4), cuya forma dimensional viene dada por (5), donde, utilizando los valores de la curva trasladada, se determinaron los tres parámetros que caracterizan a este sistema, C^* , t^* y $\frac{D}{uL}$, que representan la concentración de trazador a la salida, el tiempo de retención hidráulico y el grado de dispersión, respectivamente

$$C_{\theta} = \frac{1}{2\sqrt{\pi\theta\left(\frac{D}{uL}\right)}} e^{-\left[\frac{\theta(1-\theta)^2}{4\theta\left(\frac{D}{uL}\right)}\right]} \quad (4)$$

$$\frac{C(t)}{C^*} = \frac{1}{2\sqrt{\pi\left(\frac{t}{t^*}\right)\left(\frac{D}{uL}\right)}} e^{-\left[\frac{\left(1-\frac{t}{t^*}\right)^2}{4\left(\frac{t}{t^*}\right)\left(\frac{D}{uL}\right)}\right]} \quad (5)$$

Donde C_{θ} representa la curva C en función del tiempo adimensional $\theta=t/t^*$. t representa el tiempo; t^* el tiempo medio de residencia del fluido en el reactor ($t^*=V/v$, siendo V el volumen del reactor y v el caudal) y C^* la concentración de trazador.

La determinación de los parámetros se realizó mediante el mejor ajuste del modelo descrito por (5) al conjunto de puntos experimentales de la Fig. 4, utilizando el método de los mínimos cuadrados con un algoritmo de gradiente reducido generalizado (GRG) para solución de problemas no lineales [8].

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

$$\begin{aligned} C^* &= 23,0832 \text{ +/- } 0,0075 \text{ mg/L} \\ t^* &= 1929,574 \text{ +/- } 0,357 \text{ s} \\ \left(\frac{D}{uL}\right) &= 0,14951 \text{ +/- } 0,00011 \end{aligned}$$

con un coeficiente de determinación R^2 de 0,9537 (los intervalos de confianza fueron calculados para un nivel de confianza del 95%).

El valor del coeficiente de dispersión obtenido indica un grado intermedio de dispersión [9].

En la Fig. 5 se muestra el conjunto de puntos observados experimentalmente, como así también los puntos predichos por el modelo de (5) junto con los parámetros estimados.

El modelo utilizado es válido para “recipientes abiertos”; no obstante la metodología experimental utilizada (método de las muestras múltiples) puede asemejarse más a las condiciones de contorno de un “recipiente cerrado” [7].

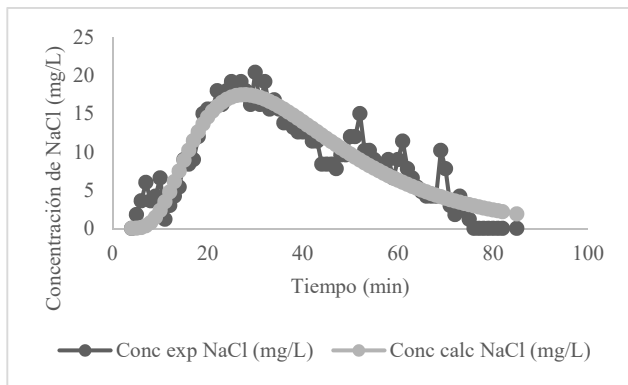


Fig. 5: Ajuste del modelo de dispersión a los datos experimentales.

A partir de los parámetros determinados, se obtuvo la media y la varianza (de la concentración a la salida del recipiente) adimensionales, según:

$$\bar{\theta}_C = \frac{\bar{t}_C}{t^*} = 1 + 2 \left(\frac{D}{uL} \right) = 1,3 \quad (6)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{t^{*2}} = 2 \left(\frac{D}{uL} \right) + 8 \left(\frac{D}{uL} \right)^2 = 0,4778 \quad (7)$$

$$\Delta\sigma_{\theta}^2 = \frac{\Delta\sigma^2}{t^{*2}} = 2 \left(\frac{D}{uL} \right) = 0,3 \quad (8)$$

A su vez, el valor del parámetro \bar{t}_c puede determinarse de manera independiente [10]. La relación \bar{t}_c/t^* calculada con ese valor fue de 1,16; levemente diferente a la determinada mediante (6) debido probablemente a cuestiones asociadas a la integración numérica, como así también a incertidumbres en las mediciones experimentales.

Si bien la forma de la señal de entrada (estímulo) se asumió como la de un pulso ideal, para estas condiciones experimentales, la verdadera forma es desconocida.

V. CONCLUSIONES

En términos generales, puede concluirse que las curvas de DTR obtenidas en los ensayos experimentales se adaptan a las propuestas por la teoría de fluidos en flujo no ideal, considerando que la técnica estímulo-respuesta utilizada es la definida como “señal de entrada en impulso”, donde se puede observar una primera aproximación a un comportamiento de flujo-pistón, seguido por una tendencia al modelo de flujo en mezcla completa, lo cual guarda relación con la configuración de entrada y salida del flujo utilizada en el reactor (superior e inferior, respectivamente).

La experimentación mediante el uso de trazadores es una herramienta excelente para determinar cuándo las desviaciones del flujo ideal son grandes, y así definir el modo de abordar dichas desviaciones. Dicho esto, debe considerarse en futuras aplicaciones de los resultados encontrados, la gran diferencia encontrada entre el TRH teórico (τ), basado en las dimensiones del reactor y el caudal de la bomba, tal como se expresa en (1) y el tiempo de residencia medio obtenido experimentalmente. Esto se traduce en una disminución de la eficiencia hidráulica del sistema. Una posible solución a este inconveniente puede ser

la implementación de nuevos deflectores del flujo en el equipo, que favorezcan el desempeño hidrodinámico.

REFERENCIAS

- [1] A. Pérez, P. Torres, *Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo*, p. 27, Colombia, 2007.
- [2] T. Werner, R. Kadlec, *Application of residence time distributions to stormwater treatment systems*, p 215. EE.UU. 1995.
- [3] A. Pérez, P. Torres, *Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo*, p. 29, Colombia, 2007.
- [4] T. Werner, R. Kadlec, *Application of residence time distributions to stormwater treatment systems*, p 216. EE.UU. 1995.
- [5] T. Werner, R. Kadlec, *Application of residence time distributions to stormwater treatment systems*, p 214. EE.UU. 1995.
- [6] G. Unigarro, H. Zambrano, S. Gallo, *Caracterización y modelización del comportamiento hidráulico de un reactor UASB*, ción del comportamiento hidráulico de un reactor UASB. Revista EIA, 11(22) julio-diciembre, p. 68.
- [7] O. Levenspiel, *Ingeniería de las Reacciones Químicas*, Editorial Reverté. pp. 305, (9-37) 2002.
- [8] Lasdon, et al. ACM, *Transactions on Mathematical Software*, vol. 4, No 1. pp. 34-50, 1978.
- [9] A. Pérez, P. Torres, *Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo*, p. 34, Colombia, 2007.
- [10] O. Levenspiel, *Ingeniería de las Reacciones Químicas*, Editorial Reverté. pp. 285, (9-9b), 2002.