

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE REACTORES DE FLUJO CONTINUÓ PARA DESINFECCIÓN UV.

3.1 Modelos de flujo.

En las unidades de tratamiento de una planta, desde el punto de vista hidráulico, el flujo del líquido puede ser de dos tipos: discontinuo o intermitente y continuo.

El flujo de tipo discontinuo o intermitente es el menos habitual y consiste en llenar la unidad y dejar un tiempo el líquido en ella mientras se produce el proceso correspondiente que puede realizarse con o sin mezcla para posteriormente vaciar la unidad y repetir el ciclo. Este tipo de flujo, en la mayoría de los casos, no es práctico y por ello los procesos en una planta de tratamiento son de flujo continuo. No obstante, los reactores de flujo continuo pueden presentar diferentes condiciones hidrodinámicas y en base a éstas pueden clasificarse en reactores: 1) de flujo pistón (plug-flow en inglés), 2) de mezcla completa o 3) no ideal.

Reactor de flujo de pistón: Se describe como aquel en el que todas las partículas de fluido que entran a la unidad permanecen en ella el mismo tiempo. De esta manera, los elementos de fluido pasan a través del sistema y son descargados en la misma secuencia en que fueron introducidos y no hay ningún tipo de "dispersión axial" mientras el fluido se desplaza a lo largo del reactor.

Reactor de Mezcla Completa: Un reactor con flujo completamente mezclado es aquel en el que todo elemento que ingresa al reactor se dispersa inmediatamente dentro de él. Además, se cumplirá que la concentración de una sustancia a la salida de la unidad es igual a la existente en todo el reactor en cualquier instante. En la práctica es muy difícil lograr un flujo con estas características y éste sólo se presentará bajo condiciones ideales.

Reactor de Flujo no Ideal: Este tipo de flujo corresponde a cualquier grado intermedio entre flujo de pistón y mezcla completa. Es el tipo de flujo con el que nos encontraríamos usualmente en las unidades de tratamiento en las plantas.

3.2 Hidrodinámica de un reactor de flujo continuo.

3.2.1 Calculo de la velocidad, velocidad promedio y flujo en el reactor.

El procedimiento para analizar el comportamiento hidrodinámico de un reactor de flujo continuo anular, como el que se requiere para la desinfección de agua con UV, ha sido descrito previamente por Bird et al (1960).

El análisis comienza con la consideración de un líquido incompresible que está fluyendo, de manera estable (steady state), en la región anular entre dos cilindros circulares, coaxiales, de radio kR y R como se muestra en la Figura 3.1.

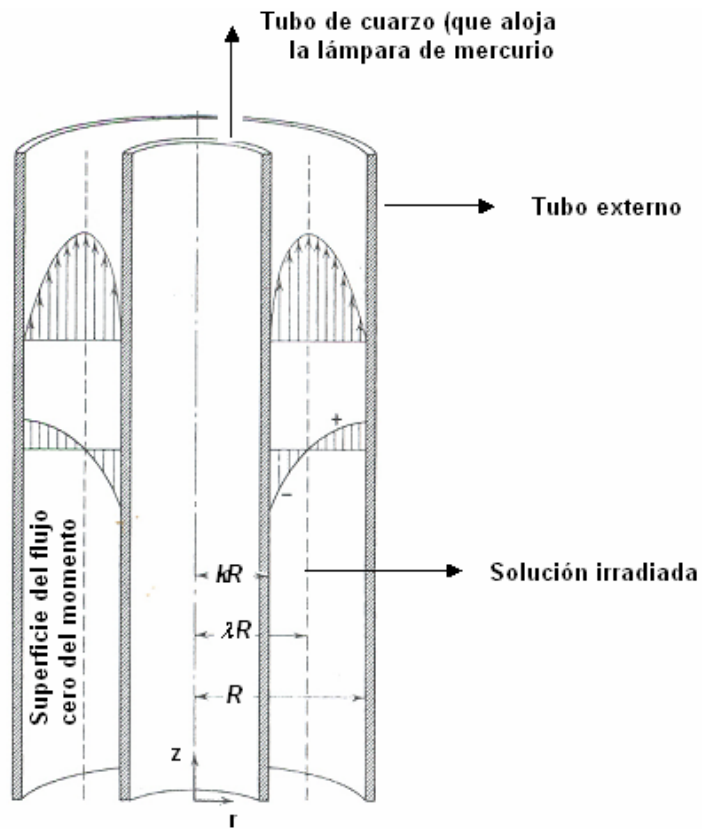


Figura 3.1 Flujo incompresible (hacia arriba) a través de una pieza anular cilíndrica (Tomado de Bird et al, 1960).

El planteamiento de un balance en la cantidad de movimiento sobre una cáscara cilíndrica - contenida dentro de la región anular - proporciona la siguiente relación entre fuerzas normales (presiones) y fuerzas de corte (esfuerzo cortante):

$$\frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rz}) = \left(\frac{P_o - P_L}{L}\right)r \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

donde:

T_{rz} = esfuerzo de corte producido por el movimiento del agua sobre la superficie de los tubos que definen la región anular.

Para este problema $P = p - \rho gz$, ya que las fuerzas de gravedad y presión actúan en la dirección vertical. La ecuación 3.1 puede integrarse para obtener que:

$$\tau_{rz} = \left(\frac{P_o - P_L}{2L} \right) r + \frac{C_1}{r} \dots\dots\dots(3.2)$$

En donde C_1 no puede ser determinarse inmediatamente, puesto que no se cuenta con información alguna sobre el flujo situado en la superficie ($r = kR$ o $r = R$). Lo que si podemos afirmar es que habrá un máximo en la curva de la velocidad en un cierto plano r (hasta ahora desconocido) en el cual el esfuerzo cortante será igual a cero. De aquí que C_1 se pueda remplazar por $-(P_o - P_L)(\lambda R)^2 / 2L$, obteniendo la siguiente ecuación:

$$\tau_{rz} = \frac{(P_o - P_L)R}{2L} \left[\left(\frac{r}{R} \right) - \lambda^2 \left(\frac{R}{r} \right) \right] \dots\dots\dots(3.3)$$

Hay que considerar que λ continúa siendo una constante de integración desconocida. La única razón para remplazar C_1 por λ es que se conoce el significado físico de λ .

Al sustituir la Ley de viscosidad de Newton $\tau_{rz} = -\mu \left(\frac{dV_z}{dr} \right)$ en la ecuación (3.3)

(recordando que el agua es un fluido newtoniano), se obtiene la siguiente ecuación diferencial para V_z :

$$\frac{dV_z}{dr} = -\frac{(P_o - P_L)R}{2L} \left[\left(\frac{r}{R} \right) - \lambda^2 \left(\frac{R}{r} \right) \right] \dots\dots\dots(3.4)$$

Al integrar la ecuación (3.4) se obtiene una expresión para la velocidad del agua en la región anular V_z :

$$V_z = -\frac{(P_o - P_L)R^2}{4\mu L} \left[\left(\frac{r}{R} \right)^2 - 2\lambda^2 \ln \left(\frac{r}{R} \right) + C_2 \right] \dots\dots\dots(3.5)$$

Ahora evaluamos las dos constantes de integración λ y C_2 , tomando en cuenta las condiciones iniciales de no deslizamiento: (1) $r = kR$, $V_z = 0$; (2) $r = R$ $V_z = 0$. Con ello

encontramos que $C_2=1$ y $\lambda = \sqrt{\frac{1-k^2}{2\ln(1/k)}}$

Al sustituir estos valores en las ecuaciones 3.3 y 3.5, se obtienen respectivamente el esfuerzo de corte y la velocidad de flujo:

$$\tau_{rz} = \frac{(P_o - P_L)R}{2L} \left[\left(\frac{r}{R} \right) - \left(\frac{1-k^2}{2\ln(1/k)} \right) \left(\frac{R}{r} \right) \right] \dots\dots\dots(3.6)$$

$$v_z = \frac{(P_o - P_L)R}{4\mu L} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 + \left(\frac{1-k^2}{\ln(1/k)}\right) \ln\left(\frac{r}{R}\right) \right] \dots\dots\dots(3.7)$$

Note que, para k=0, estas ecuaciones pueden utilizarse para modelar flujos en tuberías (ductos cerrados de sección circular). Una vez obtenida en una línea de corriente se puede calcular la velocidad promedio del agua a través de la sección anular como:

$$(v_z) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_{kR}^R v_z r \partial r \partial \theta}{\int_0^{2\pi} \int_{kR}^R r \partial r \partial \theta} = \frac{\pi(P_o - P_L)R^2}{8\mu L} \left(\frac{(1-k^4)}{1-k^2} - \frac{(1-k^2)^2}{\ln(1/k)} \right) \dots\dots\dots(3.8)$$

Con esta velocidad promedio es fácil calcular el flujo volumétrico (Q) empleando la expresión:

$$Q = \pi R^2 (1-k^2)(v_z) = \frac{\pi(P_o - P_L)R^4}{8\mu L} \left((1-k^4) - \frac{(1-k^2)^2}{\ln(1/k)} \right) \dots\dots\dots(3.9)$$

3.2.2 Cálculo del tiempo de retención hidráulico.

En varios procesos de tratamiento de agua es importante caracterizar el tiempo hidráulico de retención, entendido este como el tiempo que, en promedio, una partícula permanece dentro de un sistema o parte de él. En otras palabras, el tiempo de retención hidráulico puede concebirse como el tiempo que tardaría una partícula cualquiera del fluido

en entrar y salir de la unidad, en el caso de que todas las partículas del fluido evolucionaran en la misma forma.

No obstante, es difícil que esto ocurra en la práctica, ya que las condiciones hidráulicas del fluido (zonas muertas, corrientes de inercia o cortocircuitos hidráulicos) hacen imposibles las condiciones de flujo ideal. En otras palabras, el tiempo de retención en reactores reales es distinto para las diferentes fracciones del volumen que entran al sistema al tiempo $t_0 = 0$. Es necesario, por tanto, estudiar la distribución del tiempo de retención de las diversas fracciones, para poder conocer la forma como ha quedado sometida la masa líquida a un determinado tratamiento. Como se expone a continuación, una opción para caracterizar el tiempo de retención hidráulico de un proceso de desinfección con UV podrían ser las pruebas de trazadores (o "tracer tests" en inglés).

3.2.3 Uso de trazadores para determinar el tiempo de retención y características hidráulicas de un reactor

Para visualizar el funcionamiento de una unidad desde el punto de vista hidráulico, es conveniente utilizar una sustancia trazadora (alguna sal, colorante, ácido o sustancia radioactiva) que pueda ser aplicada al flujo de entrada de la unidad, y que simultáneamente se comience a registrar la concentración del trazador a la salida de la unidad como se ilustra en la Figura 3.2.

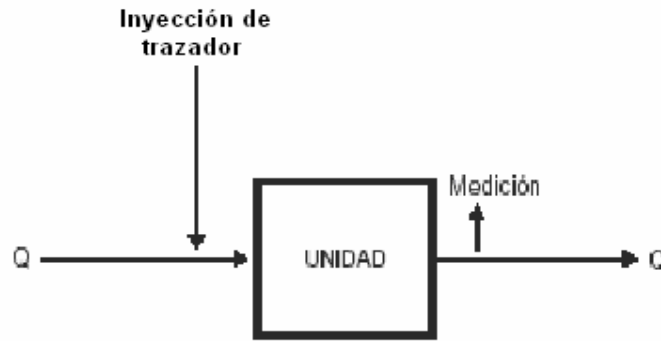


Figura 3.2. Aplicación de trazadores a un reactor

La aplicación del trazador puede hacerse en forma continua (step input) o instantánea (pulse input).

Trazador de inyección instantánea: En la inyección instantánea (pulse input), el trazador se inyecta "de golpe", en un solo instante. En este tipo de prueba, la concentración del trazador a la salida del sistema puede generar una curva como las mostradas en la Figura 3.3. si el reactor en cuestión fuera del tipo flujo pistón, entonces la curva de salida sería similar a la mostrada en la Figura 3.3a. Por otro lado, si el reactor fuera no-ideal, entonces podría esperarse algún grado de dispersión axial y con ello se produciría una curva de registro parecida a la de la Figura 3.3b.

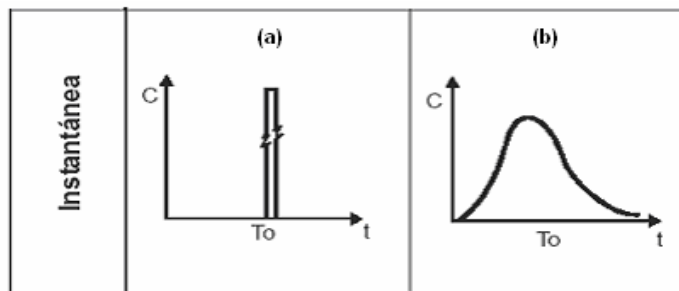


Figura. 3.3 Registros típicos que resultan de una prueba de trazadores de inyección instantánea (pulse input).

Trazador de inyección continua: Existe un segundo tipo de prueba de trazadores en la que el indicador es inyectado de manera constante, a la entrada del reactor, y la concentración de salida es monitoreada al igual que en la prueba anterior.

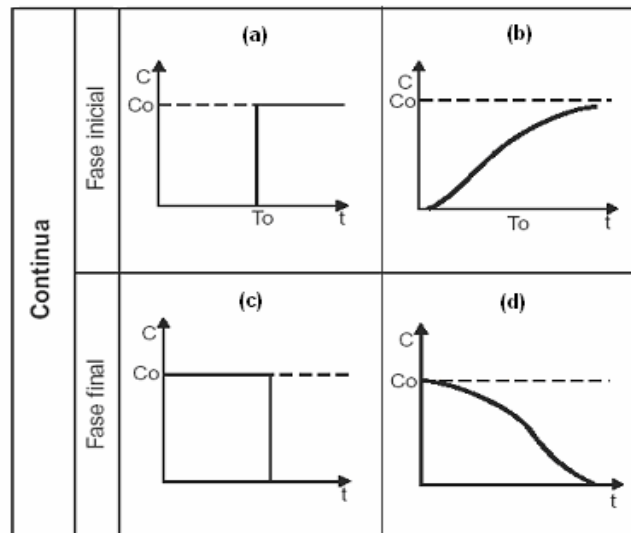


Figura 3.4 Concentración del trazador de inyección continua a la entrada y salida del mismo.

En este segundo tipo de pruebas se pueden obtener registros de salida como los que se muestran en la Figura 3.4. Al aplicar trazadores a un reactor y analizar las muestras de agua a la salida, se obtiene una serie de valores de concentración que aumentan con el tiempo - hasta llegar a un máximo - y luego disminuyen progresivamente.

Una vez obtenidos los registros de salida del trazador, éstos pueden emplearse para calcular el tiempo hidráulico de retención del reactor. Algunos de los parámetros necesarios para dicho análisis se ilustran en la Figura 3.5 y se definen a continuación:

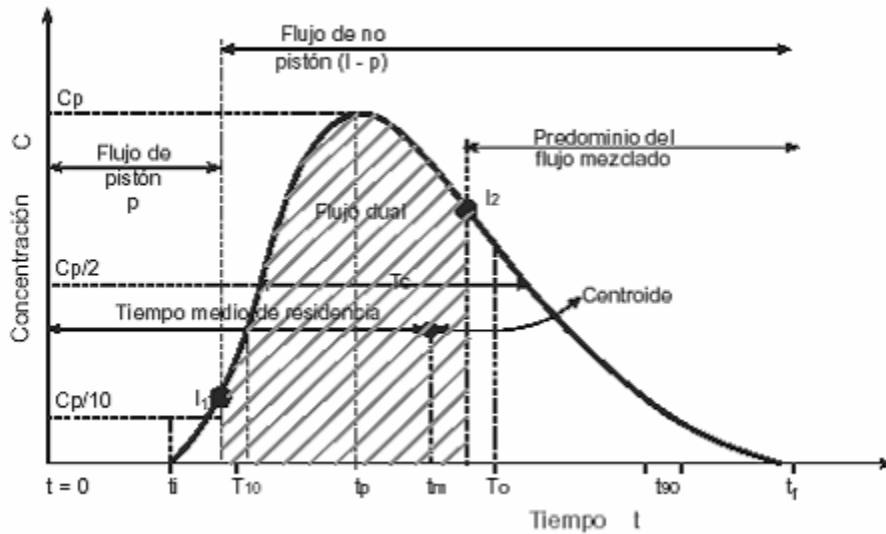


Figura 3.5. Concentración del trazador en el efluente de un reactor.

en donde: t_i = tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.

t_{10} = tiempo correspondiente al paso del 10% del total del trazador

t_p = tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración.

t_m = tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad del trazador.

t_0 = tiempo medio de retención o tiempo teórico de retención = V/Q .

t_{90} = tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador.

t_f = tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador al reactor.

C_0 = concentración inicial.

C_p = concentración máxima a la salida.

Se observa que el cálculo del tiempo hidráulico promedio de retención (o residencia) puede obtenerse mediante relaciones de áreas parciales bajo la curva y el área total bajo la misma.

3.2.4 Determinación de la intensidad de la radiación UV en reactores de flujo continuo.

Hasta aquí se ha observado que la hidrodinámica de un reactor de desinfección UV puede cambiar la eficiencia germicida del proceso mediante la alteración del tiempo promedio de exposición. Sin embargo, las condiciones de mezclado del reactor pueden también alterar la cantidad de radiación que un microorganismo podría recibir en virtud de su trayectoria (posición) a su paso por el sistema. Jacob y Dranoff (1970) propusieron un método para evaluar la intensidad UV alrededor de una lámpara de arco en un fotoreactor del laboratorio, donde la lámpara es “encamisada” en un tubo de cuarzo para permitir su sumersión en agua. En el caso general, la absorbancia de la lámpara “encamisada” es diferente a la del líquido. La situación física descrita por este modelo es enteramente análoga a la de un sistema UV de desinfección convencional; por lo tanto, el modelo propuesto por estos autores ha sido extensamente utilizado para estimar la intensidad de la radiación UV de flujo anular continuo.

El método consiste en simular una lámpara como una serie de fuentes colineales al punto de la radiación (ver Figura 3.6). El campo de la intensidad alrededor de una fuente del punto se puede cuantificar exactamente si se conocen la disipación y la absorbancia, las cuales se pueden describir en función de la distancia de la fuente al punto de interés. La

intensidad en cualquier sitio dado del fluido receptor se estima como la suma de todas las contribuciones de la intensidad de fuentes del punto dentro del sistema, mediante la siguiente expresión:

$$I_i(R, z) = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{4\pi\rho_i^2} \exp\left[-(\sigma_q t_q + \sigma_w (R - r_q)) \frac{\rho_i}{R}\right] \dots\dots\dots(3.10)$$

en donde: I_i = intensidad de la radiación de longitud de onda λ (mW/cm²)

R = distancia radial del eje de la lámpara al receptor (cm)

z = coordenada cartesiano que define distancia vertical (cm)

P_i = potencia de salida de la lámpara longitud de onda λ (W)

n = número de puntos usados en el análisis PSS

ρ_i = distancia del punto i th al lugar de recepción (cm)

σ_q = coeficiente de absorbanca de la lámpara de cuarzo (cm⁻¹)

t_q = grueso de la placa de cuarzo (cm)

σ_w = coeficiente de absorbanca del agua (cm⁻¹)

r_q = radio de salida de la placa de cuarzo (cm)

La Figura 3.6 proporciona una representación esquemática de los términos empleados en esta ecuación para un sistema que contiene una sola lámpara.

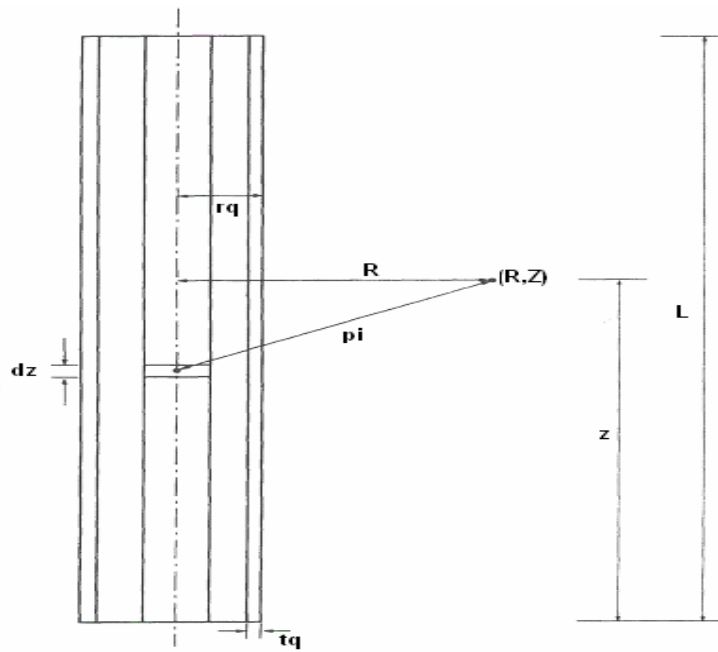


Figura 3.6 Modelo utilizado para el cálculo de la intensidad.

3.2.5 Cálculo de la dosis de la radiación UV.

Considerando que la intensidad promedio se presenta a la mitad del anillo de flujo (Figura 3.7) la dosis aplicada por el reactor de flujo continuo será:

$$Dosis \left[\frac{mW}{cm^2} seg \right] = (I_i(r, z))^* (t) \dots\dots\dots (3.12)$$

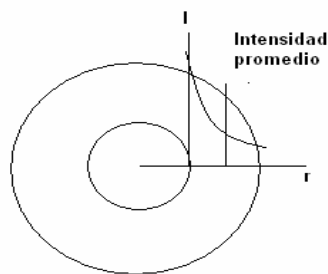


Figura 3.7 Corte del reactor de flujo continuo.

En la ecuación anterior la intensidad $(I_i(r, z))$ es obtenida a partir de modelos matemáticos tales como el propuesto por Jacob y Dranoff (1970) y el tiempo de retención (t) es obtenido a partir de prueba de trazadores como se explico anteriormente.