



**Metsolver.com**

lmarin@metsolver.com  
www.metsolver.com

# **Determinación Experimental de la Distribución de Tiempos de Residencia en un Estanque Agitado con Pulpa**

---

Luis Marín Escalona

Julio de 2007

## Índice

Resumen	3
Antecedentes Generales	3
Procedimiento Experimental	11
Discusiones	14
Conclusiones	15

## Resumen

Se realizaron pruebas con el fin de estudiar la fluidodinámica de un reactor continuo, a partir de la determinación de la concentración a la salida del reactor de un pulso de cloruro de sodio. De los resultados obtenidos se dedujo la distribución de tiempo de residencia, el modelo que mejor correlaciona la experiencia y algunas consideraciones respecto al comportamiento real del reactor

## Antecedentes Generales

Un modelo de distribución de Tiempos de Residencia es un modelo matemático de orden estadístico, que tiene como finalidad, describir como ocurre el transporte de masa al interior de un reactor que trabaja en forma continua.

Un modelo de Distribución de Tiempos de Residencia se deduce experimentalmente mediante la adición de un trazador junto a la alimentación del reactor. Un trazador es una pequeña porción de una sustancia que se comporta en forma similar al material de alimentación y que posee una propiedad que lo distingue de él y que permite su detección a la salida del reactor.

Dependiendo del proceso, se pueden utilizar trazadores cuya propiedad a medir es la conductividad, la absorción de la luz, la concentración de un determinado catión, o la radioactividad. Por este motivo dependiendo del trazador utilizado, se requieren diferentes técnicas experimentales. Entre los factores que deben ser considerados para la selección del trazador para una determinada aplicación se puede mencionar:

- Disponibilidad del trazador
- Equipo de detección
- Límite de detección a baja concentración
- Propiedades físicas similares a las del material que se transporta
- No debe reaccionar químicamente
- No debe absorberse en las paredes del reactor o en las partículas

Un modelo de Distribución de tiempos de residencia posee 2 extremos, definidos por el tipo de flujo que se presenta en el reactor:

- Flujo pistón, cuando la salida súbita de todo el material trazado después de un tiempo promedio de residencia, lo que implica que no se produce una mezcla hacia adelante o hacia atrás del material mientras se mueve a través del reactor.
- Mezcla perfecta, cuando todo el material marcado se mezcla instantáneamente en el seno de la carga y la concentración del material marcado, en el reactor y en el material que deja el reactor, es igual y disminuye exponencialmente con el tiempo.

Existen tres factores que están que intervienen en estos modelos de flujo:

1. El RTD ( $E(t)$ ), o distribución del tiempo de residencia del material que está fluyendo a través del reactor.
2. La forma en que se adiciona el material que fluye.
3. La anticipación o retardo del mezclado del material dentro del reactor.

El conocimiento del comportamiento del fluido dentro del reactor es muy importante, porque uno de los factores no controlables al momento de hacer el escalamiento de un diseño es la no idealidad del flujo; y frecuentemente este factor difiere mucho entre unidades pequeñas y grandes, el desconocimiento del patrón de flujo puede conducir a grandes errores.

El estudio de la fluidodinámica en reactores, se puede realizar a través de dos maneras; la primera en la cual se observan dos regiones: flujo pistón con dispersión y flujo en mezcla perfecta. Para el análisis de la región de flujo pistón se debe considerar si la dispersión ocurre en la entrada o en la salida de dicha región. En base a esto se pueden encontrar cuatro modalidades:

1. Recipiente cerrado-cerrado (cc): No hay dispersión ni en la entrada ni en la salida.
2. Recipiente abierto-abierto (aa): Hay dispersión tanto en la entrada como en la salida.

3. Recipiente abierto-cerrado (ac): Existe dispersión en la entrada del recipiente, pero no en la salida.
4. Recipiente cerrado-abierto (ca): Existe dispersión a la salida, pero no en la entrada.

Para las últimas dos modalidades se obtiene la misma función RTD ( $E(t)$ ), por lo que las cuatro posibilidades se reducen a tres. Estas modalidades no son más que las condiciones de frontera de un balance de masa en la geometría del reactor, que una vez resuelto va a permitir conocer matemáticamente el tipo de flujo del líquido, pero para lograr esto se requiere conocer precisamente lo que está sucediendo dentro del recipiente, y además tener un mapa completo sobre la distribución de la velocidad del fluido dentro del recipiente. Desafortunadamente esta aproximación es poco práctica, asimismo los modelos matemáticos son muy rígidos. Además es necesario poder ajustar otros modelos a parte del descrito con anterioridad, en los que se tomen en cuenta tres factores fundamentales que hacen que el comportamiento real se aleje del ideal, estos son; la distribución del tiempo de residencia, La forma en que se adiciona el material y la anticipación o retardo del mezclado del material. A continuación se presenta cómo interviene cada uno en el comportamiento real del fluido en el reactor.

La distribución del tiempo de residencia, RTD ( $E(t)$ ). La desviación de cualquiera de estos dos modelos de flujo puede ser causada por la canalización del fluido, por recirculación, o por la aparición de zonas muertas en el reactor.

Un completo conocimiento acerca del flujo es muy complejo. En muchos casos, no es necesario conocer tantas cosas, tan solo basta con conocer cuanto tiempo permanece cada molécula dentro del recipiente, o bien, la distribución de tiempos de residencia del fluido. Esta información puede ser fácil y directamente determinada por un método de investigación ampliamente utilizado, el experimento de estímulo-respuesta.

La forma en que se adiciona el material que fluye: Algunos materiales presentan una forma particular de adición, que depende de la naturaleza del material. En los casos extremos se pueden clasificar en: macrofluidos y microfluidos. En los primeros las moléculas se mueven en conjunto y no se dispersan, mientras que en los segundos, las moléculas se mueven independientemente.

Curva  $E(t)$ , distribución de tiempo de residencia ó RTD. Es evidente que si los elementos de un fluido toman diferentes rutas a través del reactor pueden tardar diferentes intervalos de tiempo para pasar a través de él. La distribución de estos tiempos para la corriente de fluido que sale del recipiente se denomina distribución de tiempos de salida  $E(t)$ , ó distribución del tiempo de residencia RTD del fluido. La función  $E(t)$  posee unidades de tiempo a la inversa.

Cuando no es posible representar satisfactoriamente las desviaciones del flujo ideal en flujo pistón o en mezcla perfecta por los modelos mencionados anteriormente, se ha de emplear otros modelos que representan la segunda manera de resolver el problema de flujo no ideal. Estos modelos combinados propuestos por Levenspiel (1979) son modelos de flujo con un campo de aplicación más amplio, porque supone que el reactor real está constituido por una combinación de varios elementos, como flujo en mezcla perfecta, flujo pistón, zonas muertas, flujo en “*bypass*”, flujo con recirculación o cruzado, todos los anteriores interconectados entre sí de distintas formas. En cada combinación pueden estar presentes dos o más elementos, con una distribución de tiempos de residencia  $E(t)$  distinta para cada caso.

En las siguientes figuras (1-8) se representan los tipos sencillos de estos modelos combinados, y se puede observar que las curvas son diferentes y pueden distinguirse unas de otras. Esta propiedad sugiere un método para caracterizar flujos desconocidos, o para diagnosticar flujos anómalos en los reactores.

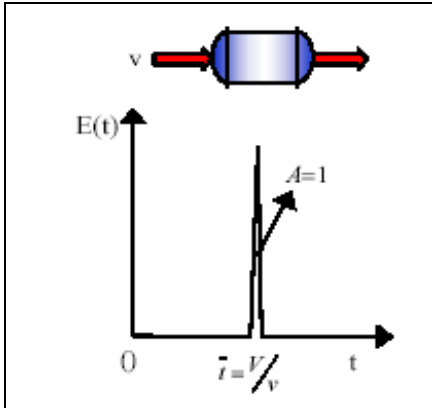


Figura 1: Flujo Pistón

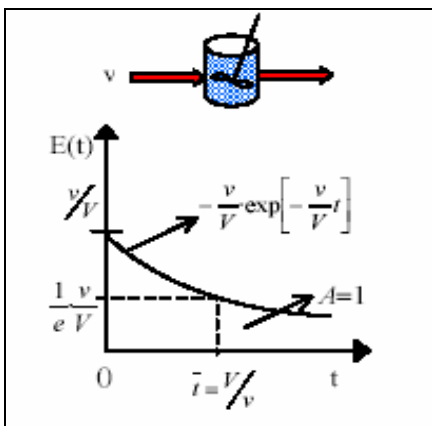


Figura 2: Mezcla Perfecta

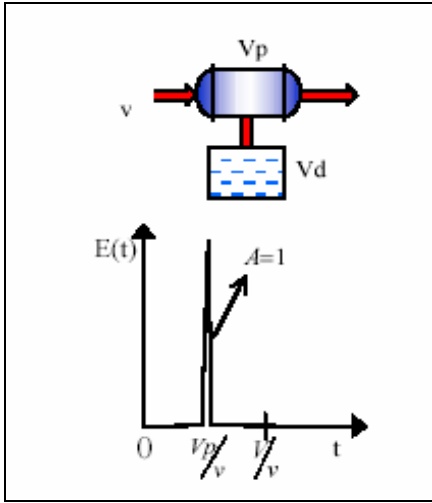


Figura 3: Flujo Pistón con Zona Muerta

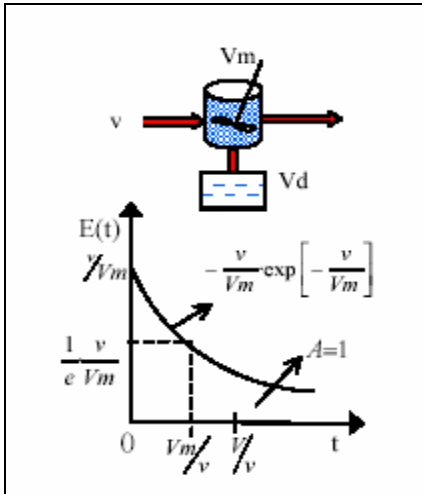


Figura 4: Mezcla Perfecta con Zona Muerta



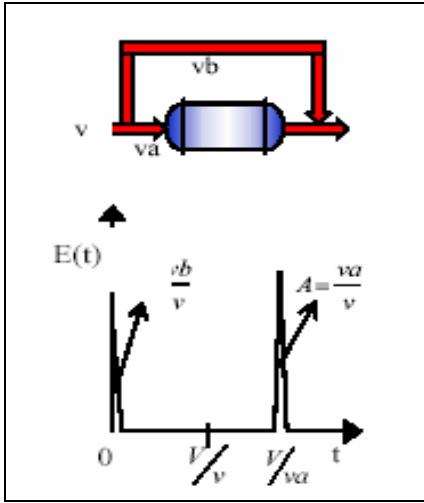


Figura 5: Flujo Pistón con Bypass

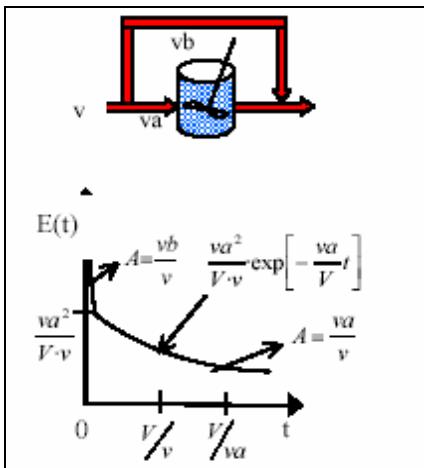


Figura 6: Mezcla Perfecta con Bypass

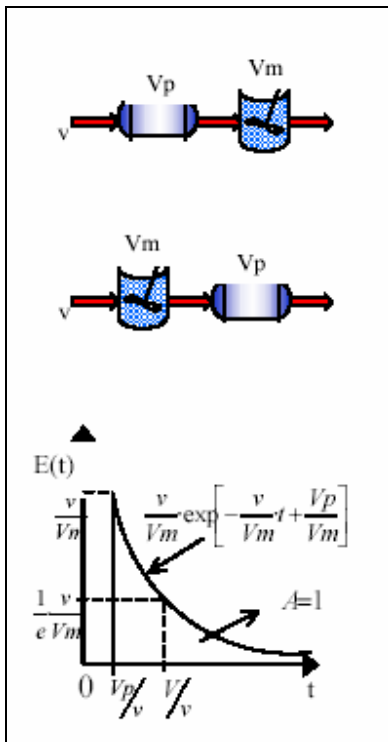


Figura 7: Flujo Pistón y Mezcla Perfecta en Serie

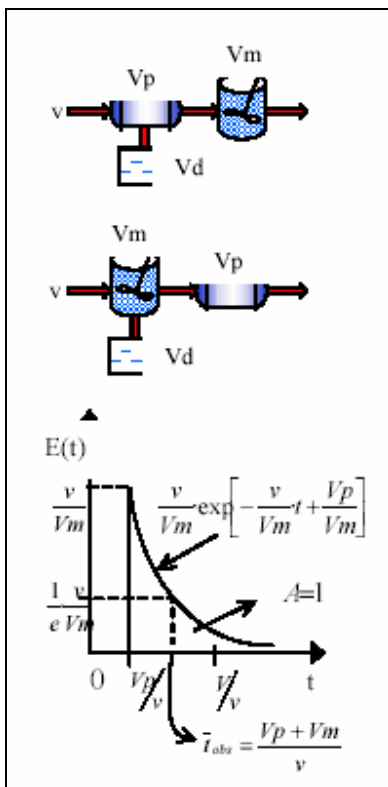


Figura 8: Flujo Pistón y Mezcla Perfecta en Serie con Zona Muerta

A partir de un ajuste de la función  $E(t)$  teórica con la obtenida experimentalmente, se puede determinar los parámetros del modelo combinado de flujo que representa el recipiente real.

## Procedimiento Experimental

La forma más sencilla y directa de encontrar la curva  $E(t)$  ó RTD es mediante un proceso experimental, conocido como estímulo-respuesta, que emplea un trazador físico y no reactivo, que consiste en introducir instantáneamente en un reactor de volumen,  $V$ , y caudal volumétrico,  $v$ , conocidos, una cantidad de masa,  $M$ , dentro del fluido que entra al reactor. Luego se registra la concentración del trazador en la corriente de flujo a la salida en función del tiempo, esto se hace recolectando en tubos ensayo pequeñas cantidades de fluido a la salida del reactor.

La corriente de fluido que entra al reactor no contiene trazador y se le impone una señal de tipo pulso, que se inyecta de modo instantáneo y que frecuentemente se conoce con el nombre de función delta de Girac.

Puede emplearse como trazador cualquier sustancia que se pueda detectar y que no perturbe el tipo de flujo en el reactor, es decir, que no sea capaz de alterar la densidad del fluido, que no se adsorba en las paredes del reactor, o cambie de fase.

Las concentraciones en función del tiempo se determinan a través de una curva de calibración para un conductímetro.

Para obtener la curva de calibración es necesario preparar más de una solución de NaCl, cada una con concentraciones distintas. Luego se procede a medir la conductividad de cada una de las soluciones, con el fin de encontrar una correlación que permita predecir la concentración del trazador a cada una de las muestras experimentales.

NaCl [g/l]	Conductividad [ms]
1,000	0,200
2,090	0,310
3,120	0,720
4,542	1,320
6,312	1,870
7,891	2,540
9,350	3,200

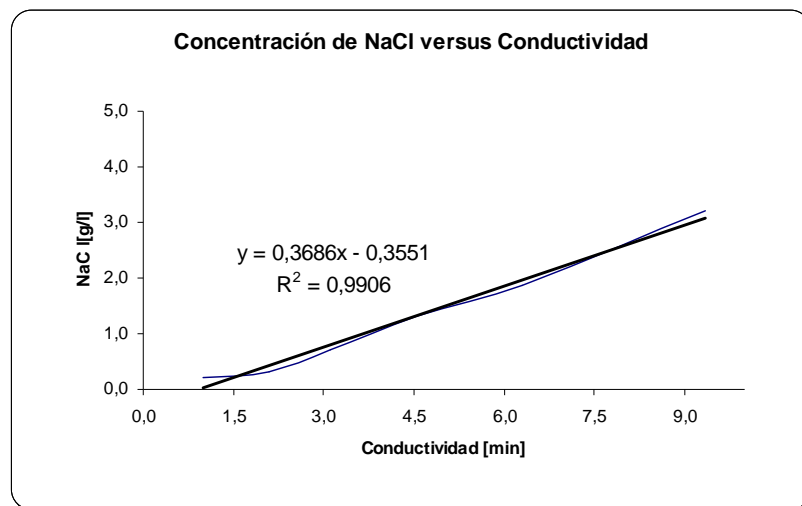


Gráfico 1: Curva de calibración

Como el objetivo experimental pretende caracterizar el grado de flujo no ideal por medio de la distribución de tiempos de residencia, se deben obtener los datos de concentración en función del tiempo, realizar una gráfica de estos datos y calcular el área bajo la curva a partir de la ecuación (1):

$$A = \int_0^{\infty} C(t) dt \quad (1)$$

O bien, a partir de los siguientes métodos:

Método de Integral por trapecios:

$$A = \sum_{i=0}^n \frac{(C(t_i) + C(t_{i+1}))(t_{i+1} - t_i)}{2} \quad (2)$$

Método de Simpson:

$$A = \frac{3}{8} \Delta t (C(t_0) + 3C(t_1) + 3C(t_2) + 2C(t_3) + 3C(t_4) + \dots + 3C(t_{n-1}) + C(t_n)) \quad (3)$$

El tiempo de residencia experimental viene dado por:

$$t_e = \frac{\int_0^{\infty} tC(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad (4)$$

O bien puede se evaluado a partir de la siguiente expresión:

$$t_e = \frac{\sum_{i=0}^n [ t_i C(t_i) + t_{i+1} C(t_{i+1}) ] (t_{i+1} - t_i)}{\sum_{i=0}^n [ C(t_i) + C(t_{i+1}) ] (t_{i+1} - t_i)} \quad (5)$$

Por definición, se asume que el tiempo de residencia teórico viene dado por:

$$t_t = \frac{V}{\nu} \quad (6)$$

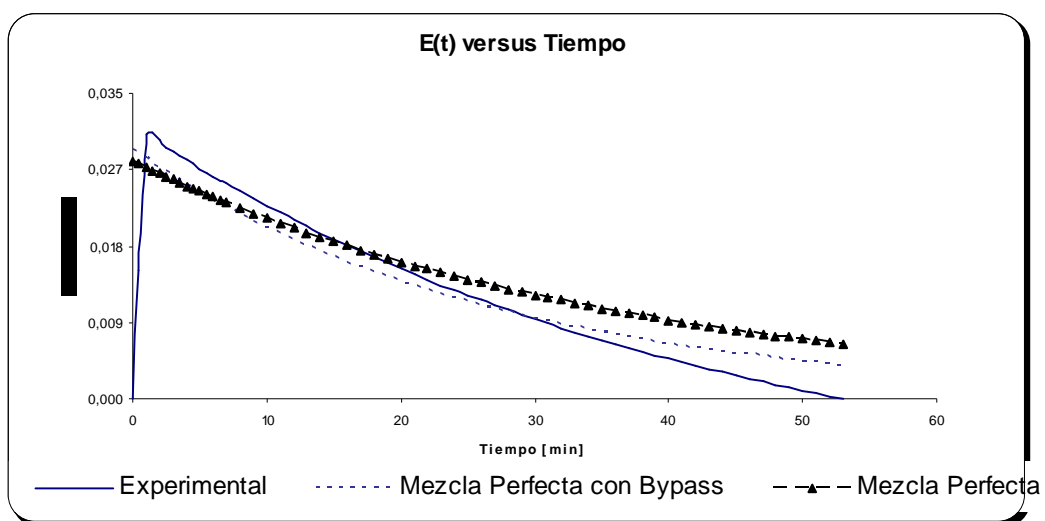
Cuando el tiempo de residencia experimental es igual al tiempo de residencia teórico, se deduce que no existen zonas muertas en el reactor. Por el contrario, si el tiempo de residencia experimental es mayor que el tiempo de residencia teórico, entonces se deduce que hay presencia de zonas muertas o zonas de estancamiento en el reactor.

## Discusiones

Luego de comparar los modelos teóricos, con lo determinado en forma experimental, se puede observar que el modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales es el modelo de mezcla perfecta con bypass. Este modelo fue el que entregó la mejor correlación. En el gráfico 2 se puede apreciar que el modelo de mezcla perfecta se ajusta razonablemente entre 10 - 20 minutos sobre los 20 minutos este modelo no predice razonablemente la distribución de tiempos de residencia, tal como se puede apreciar en el grafico 2.

El modelo de mezcla perfecta con bypass, se ajusta en un rango de tiempo mucho más amplio 10 - 40 minutos, sin embargo, ninguno de los modelos planteados es capaz de correlacionar los datos experimentales durante los primeros 5 minutos. La existencia de bypass se ve confirmada por la discrepancia existente entre el tiempo de residencia experimental y el tiempo de residencia teórico, 13.4 y 16.5 minutos respectivamente.

El grado de agitación en el reactor, permitió la inexistencia de zonas muertas, lo que se vio confirmado por la correlación entregada por el modelo de mezcla perfecta con zona muerta. Esto nos permite afirmar que el sistema de agitación del reactor se comporto bien bajo las condiciones operacionales impuestas durante el desarrollo experimental.



## Conclusiones

- El conocimiento de la fluidodinámica de un reactor es muy importante, porque uno de los factores no controlables al momento de hacer el escalamiento de diseño es la no idealidad del flujo.
- El tiempo de residencia experimental fue 13.4 minutos
- El tiempo de residencia teórico fue de 16.5 minutos
- El modelo de distribución que mejor se ajustó a los datos experimentales fue el modelo de mezcla perfecta con bypass.