

INVESTIGACION DE PROCESOS INDUSTRIALES CON APLICACION DE TRAZADORES RADIATIVOS

**** W. PIPPEL**

Dedicado a Don Enrique Kirberg, Rector de la U.T.E.

RESUMEN :- En este artículo se mostró la utilidad de trazadores radiactivos para la aplicación en la investigación de procesos industriales.

Se discuten las ventajas de los dos métodos de trazación - el método corriente y el método de activación del trazador -, frente a otros métodos de marcación. A través de varios ejemplos - como la investigación de procesos de amasamiento y mezclado discontinuo, mezclado continuo, hasta procesos químicos continuos -, se mostró que el método sirve tanto para la solución de problemas de industria pequeña, como para la producción continua en gran escala.

SUMMARY. This discussion shows the usefulness of radioactive tracers, applied in the research of industrial processes.

The advantages of the two tracing methods are discussed, i.e. the current method and the tracer activating method -, compared with other marking methods. Various examples, such like the research of kneading processes and discontinuous mixing, continuous mixing, including continuous chemical processes show that the method holds both for the solution of small industry problems as well as for those of continuous production on a large scale.

* Los resultados dados en este artículo han sido publicados en varias revistas alemanas: "Isotopenpraxis" y "Chemische Technik".-

** W. PIPPEL, doctorado en Ingeniería (Dr. Ing.) en la Universidad Técnica de Dresden, es profesor del Laboratorio Central de Química. Universidad Técnica del Estado. Santiago.-

1.- **INTRODUCCION.**- Los métodos radiactivos desempeñan un gran papel en la investigación moderna, tanto en la investigación básica como en la aplicada. En lo que se refiere a la química, no existe ningún renglón de esta ciencia donde no se apliquen métodos radiactivos con gran éxito.

Generalmente, estos métodos se clasifican en:

- 1.- Métodos basados en la absorción y dispersión de rayos radiactivos.
- 2.- Métodos de trazadores.
- 3.- Métodos basados en la ley de desintegración radiactiva.

Los métodos basados en la absorción y dispersión de los rayos radiactivos se han generalizado tanto, que hoy en día apenas si existe una empresa química, grande o mediana, en la que esos métodos no hayan sido añadidos a los otros métodos convencionales de medición y regulación.

Citemos, como ejemplo, el aprovechamiento de la absorción de los rayos gamma en la medición y regulación del nivel de contenido de los depósitos, reactores y recipientes; medición y regulación de la densidad y concentración en tuberías de transporte

Las ventajas de estos métodos continuos son obvias: independencia frente a diferentes factores de la industria química, que frecuentemente hacen problemática la aplicación de métodos convencionales, tales como la regulación del nivel en depósitos y reactores con medios agresivos (cloro líquido, ácido sulfúrico, etc.). Sencillez del método: las mediciones se realizan fuera de las instalaciones sin necesidad de introducir sondas de medición.

Sin embargo, este artículo va a dedicarse exclusivamente a otro método de la radiactividad aplicada, muy importante para las investigaciones industriales: el Método de Tradazadores Radiactivos.

La medición de la radiactividad se realiza, generalmente, con ayuda de diferentes detectores, como por ejemplo, el contador de GEIGER - MÜLLER o el contador de centelleo, cuya sonda consta de un cristal, por ejemplo, ioduro de sodio activado con talio, NaI (TI), y un multiplicador de electrones (véase fig. 1). El contador indica el número de cuentas por minuto z (cpm), que es proporcional a la radiactividad $A = \lambda N$

$$z = f \cdot A = \frac{0,693}{T} N \quad (1)$$

f es un factor de proporcionalidad relacionado con la eficacia del contador (probabilidad de reacción del contador, tiempo muerto, factor de geometría, etc.) y el número de partículas o rayos electromagnéticos emitidos por un acto de desintegración. Puede suponerse que, para la instalación mostrada en la fig. 1, este factor tiene un valor de 0,1 para medición de rayos gamma. Como el número de partículas N de una sustancia está relacionada con su masa m y peso molecular M

$$N = \frac{N_A}{M} m \quad (2)$$

encontramos, suponiendo (2) en (1)

$$m = \frac{z T M}{0,693 f N_A} \quad (3)$$

De (3) resulta la gran sensibilidad del método. Ella puede ser demostrada por el siguiente ejemplo: Supongamos que se necesita para comprobar el radiosótomo ^{24}Na ($T = 14,9$ h), un cpm mínimo de $z = 120$ (2 cps). De la relación (3) tenemos una masa mínima comprobable de

$$m_{\min} = \frac{2 \cdot 5,4 \cdot 10^4 \cdot 24}{0,693 \cdot 0,1 \cdot 6,23 \cdot 10^{24}} = 6,2 \cdot 10^{-18} \text{ [gr].}$$

ésta es una masa que químicamente no se puede comprobar.

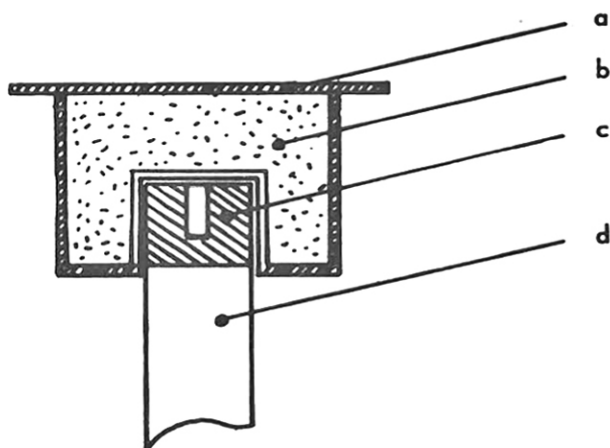


Figura 1.- Equipo de medición.-

- a.- material diseñado especialmente para grandes muestras;
- b.- material radiactivo;
- c.- cristal NaI (Tl) con pozo para muestras pequeñas;
- d.- fotomultiplicador.

Otra gran ventaja del método es que el trazador puede ser elegido químicamente idéntico al sistema que marca. Tales investigaciones, como la autodifusión, el intercambio de isótopos, etc., no hubieran sido posibles sin la aplicación de los isótopos radiactivos o estables. El trazador radiactivo satisface casi por completo las exigencias que se plantean a un trazador ideal: la de comportarse completamente igual a la materia trazada y la de ser, al mismo tiempo, bien distinguible de ella.

Otras grandes ventajas de trazadores radiactivos se basan en:

- La indiferencia de la radiactividad frente a medios agresivos y a temperaturas elevadas (muchos trazadores convencionales se descomponen en estos casos);
- La ley de desintegración radiactiva. La radiactividad introducida en un producto industrial desaparece al fin de un cierto tiempo (10 tiempos de media vida) casi por completo, y el producto puede ser utilizado como materia inactiva (colorantes p.e.no pueden ser aplicados en la industria textil).

Sin embargo, en determinados terrenos de la investigación, por motivos de seguridad, no se recomienda la aplicación de trazadores en forma directa y, en algunos casos de la industria alimenticia y farmacéutica \leftrightarrow está terminantemente prohibido por la ley. Por ese motivo se ha desarrollado otra variante de ese método: **el Método de Activación del Indicador.**

En la fig. 2 se muestran esquemáticamente las dos variantes aplicadas.

a) El Método corriente con las siguientes etapas:

- 1.- Activación del trazador (generalmente en el reactor)
- 2.- Marcación
- 3.- Dispersión del trazador en el experimento
- 4.- Toma de muestras
- 5.- Medición de la concentración del trazador

Como muestra la figura, solamente las etapas 1 y 5 se realizan en edificios y laboratorios con instalaciones de protección radiológica. Una gran parte de la radiactividad producida en el reactor nuclear (etapa 1), se dispersa en el proceso.

b) El método de activación del indicador con las etapas:

- 1.- Marcación
- 2.- Dispersión del trazador (inactivo)
- 3.- Toma de muestras (inactivo)
- 4.- Activación del trazador
- 5.- Medición de la concentración del trazador

Todas las etapas del procedimiento que se realizan fuera de los laboratorios radioquímicos son inactivas.

De aquí resulta que los métodos de trazadores radiactivos son variables y pueden ser aplicados en una gran escala de investigaciones.

Hay dos clases de trazación: **Isotópica** y **No Isotópica**. Para la investigación y medición de la solubilidad de una sustancia química en un solvente, medición de presión parcial, difusión y autodifusión, intercambio de isótopos, mecanismo de reacciones químicas, etc., la marcación isotópica es indispensable. Los procesos técnicos, como mezclado, trituración, transporte o investigaciones de caminos de un flujo, detección de escapes en cañerías, recipientes, depósitos, etc., en cambio, no requieren la trazación isotópica.

Este artículo se dedica especialmente a las investigaciones de proceso de mezclado y del transporte de materia a través de aparatos técnicos y reactores químicos.

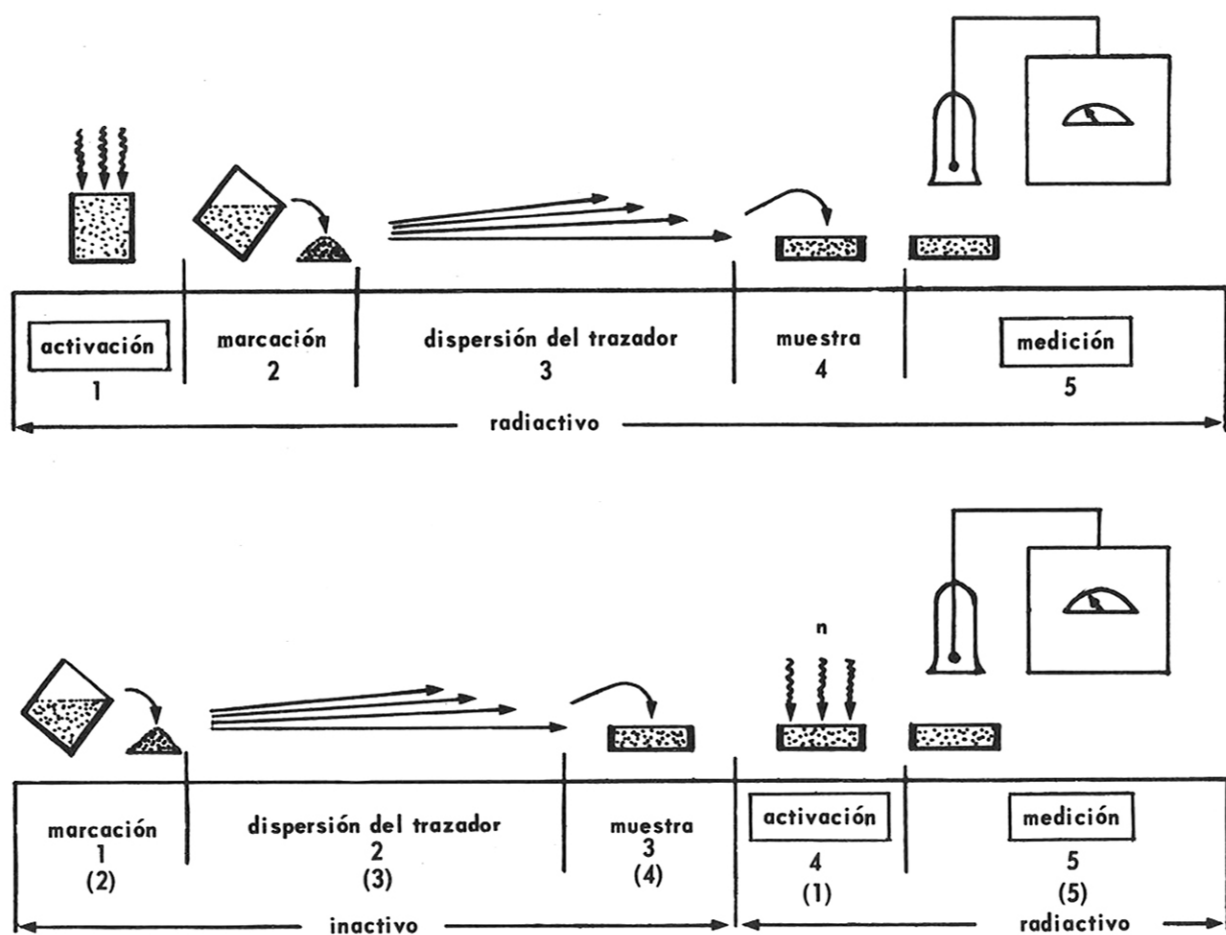


Figura 2.- Representación esquemática de las dos variantes de aplicación del método de trazadores.-

arriba: el método corriente;
abajo: el método de activación del trazador.

2.- INVESTIGACIONES DE PROCESOS DISCONTINUOS Y CONTINUOS DE MEZCLADO

Los procesos de mezclado tienen, por regla general, gran importancia en numerosas ramas de la industria, tanto en la industria química como en la industria farmacéutica, de la cerámica y en la construcción civil.

Los ejemplos siguientes muestran como se pueden investigar procesos de mezclado con el método de trazadores radiactivos.

2.1.- **Investigación de un mezclador discontinuo para preparación de material de balatas:**- Una fábrica produce balatas de una mezcla de asbesto, talco, caucho y otros materiales técnicos. El mezclador que trabaja discontinuamente aparece esquemáticamente en la fig. 3.

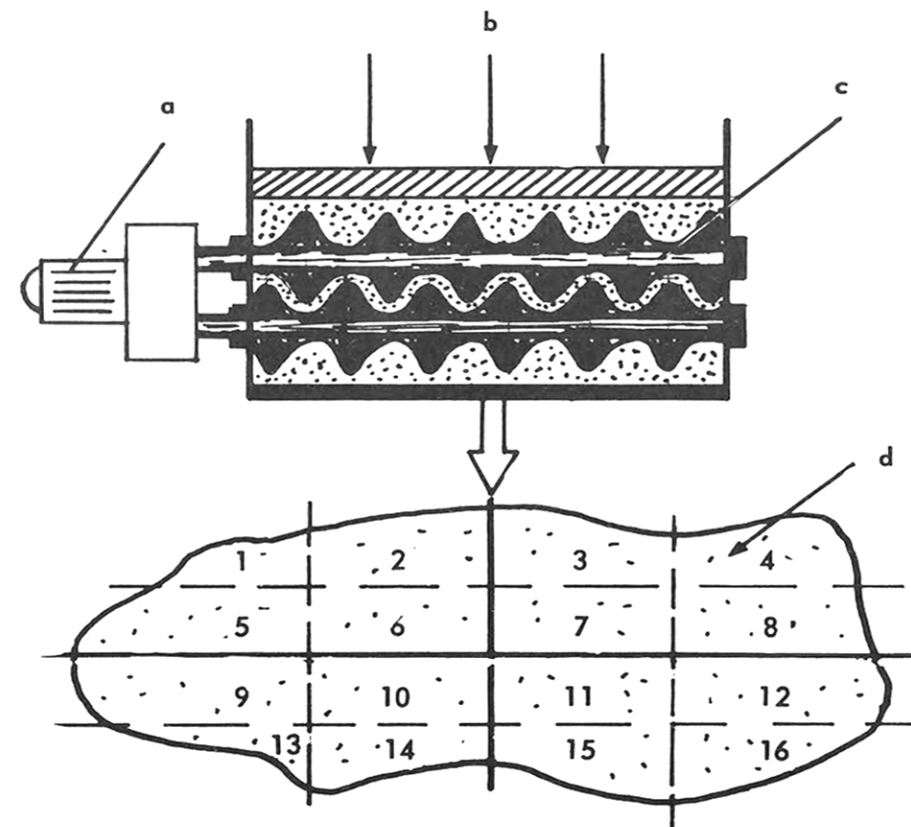


Figura 3.- Mezclador discontinuo (esquemáticamente).-

- a.- motor
- b.- pistón de presión
- c.- árbol de levas de amasamiento
- d.- esquema de toma de muestras

Para realizar el proceso de mezclado, los diferentes componentes se introducen en el mezclador en un orden determinado. Una parte de calor producido por el proceso se elimina con ayuda de un sistema de refrigeración. Un pistón ejerce presión desde arriba sobre la mezcla y hace que ésta se conserve en forma compacta durante el proceso. Después de un tiempo determinado se abre el cierre inferior del aparato y la masa mezclada pasa a una cinta continua, con ayuda de la cual es transportada para su elaboración sucesiva.

Para la fábrica es importante saber qué tiempo demora el proceso en este aparato, para producir una buena mezcla (un problema muy importante para la economía de la producción y la calidad de productos en general). Este problema puede resolverse con

ayuda de trazadores radiactivos [1 - 8]. A una muestra de 500 grs. de asbesto se agregó una solución de $^{24}\text{NaCl}$ con una radiactividad de 10 mCi diluida con 500 ml. de agua. El asbesto marcado fue introducido en una bolsa de polietileno en el orden corriente, con ayuda de unas tenazas largas. Este momento fue fijado con un cronómetro como comienzo del experimento ($t = 0$). Después de un cierto tiempo t de mezcla, se interrumpió el experimento, se abrió el cierre inferior y la masa fue extraída del mezclador.

Una vez extraído el mezclador, la sustancia mezclada fue llevada a un recinto adyacente que había estado bien cerrado y que correspondía a los reglamentos de la protección radiológica. Aquí el material se extendió sobre una superficie de 2 x 2 m (Fig. 3) y se dividió en diferentes partes, de las que fueron tomadas muestras. La principal premisa para tales experimentos, es que la toma de muestras se haga totalmente al azar, lo cual fue garantizado en el presente experimento.

Los experimentos fueron repetidos en la forma descrita, para diferentes tiempos, tomándose cada vez a continuación una serie de muestras.

En total fueron elegidas los siguientes tiempos de mezclas:

$$t = 1, 2, 4, 6, 9, 12, 15, 30, (\text{min.})$$

Si la mezcla es perfecta con respecto al componente marcado, en cada muestra deberá ser medida la misma concentración media (radiactividad específica). La **dispersión relativa (*)** con respecto al valor promedio puede ser considerada como medida de heterogeneidad de la mezcla. Así, para cada serie de pruebas vinculada a un cierto tiempo de mezcla fue calculada la magnitud:

$$\sigma_r = \frac{1}{\bar{c}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}{n-1}} \quad (4)$$

La medición de las muestras se realizó en tubos de ensayo que fueron introducidos en el pozo del detector.

Los resultados aparecen en forma gráfica en la fig. 4. Como se ve, la dispersión disminuye rápidamente con el tiempo, hasta alcanzar un valor constante, causado por el error del método de medición y la fluctuación natural de la radiactividad.

Se analizaron muestras grandes (20 grs.) y pequeñas (1 gr.). Ambas dieron el mismo resultado, el cual puede ser representado por una curva común. Como se puede ver, ya después de 9 min. el valor σ_r no sufre alteración alguna, lo cual significa que, a partir de ese momento ha concluido la distribución estadística y que la continuación del proceso significaría solamente una redistribución del material.

En la fábrica, antes de los experimentos, habían sido establecidos tiempos de medición de 20 a 25 minutos. Basándose en los resultados de los experimentos, el tiempo pudo ser reducido, lo cual se tradujo en un aumento del rendimiento.

Con ayuda del método pueden realizarse, además, los siguientes experimentos:

- a) Determinación del grado del desgaste de las levas de amasamiento;
- b) Comparación de la efectividad de diferentes variantes técnicas de aparatos mezcladores.

2.2.- Mezclador Tubular:- En forma similar fue investigada la efectividad de un mezclador tubular. En este aparato fueron mezcladas discontinuamente, varias cargas trituradas del producto de reacción de un proceso de policondensación. Para determinar el tiempo en que se logra una mezcla completa, se agregó a las dos cargas del mezclador una tercera muestra radiactiva. El número de revoluciones del mezclador tubular era de 6 por minuto. Después de lapsos determinados de tiempo, el aparato, se detenía. A través de una entrada pudieron ser extraídas 10 muestras tomadas al azar por toda la superficie. De los valores de radiactividad específica medidos, se calcularon, co-

(*) En la literatura (véase p.e.[9] se proponen también otras magnitudes como criterio de estado de mezclado. Sin embargo, en el caso considerado la magnitud mencionada demostró ser suficiente.-

mo se describe arriba, el valor promedio y la dispersión. En forma similar a la descrita en el experimento anterior, fue determinado el tiempo efectivo de mezcla. Se obtuvo un tiempo efectivo de mezcla de cerca de 40 minutos, es decir, un valor que se halla muy por encima del tiempo empleado anteriormente en la fábrica.

En base a estos experimentos, la fábrica decidió reemplazar el mezclador por un aparato más efectivo.

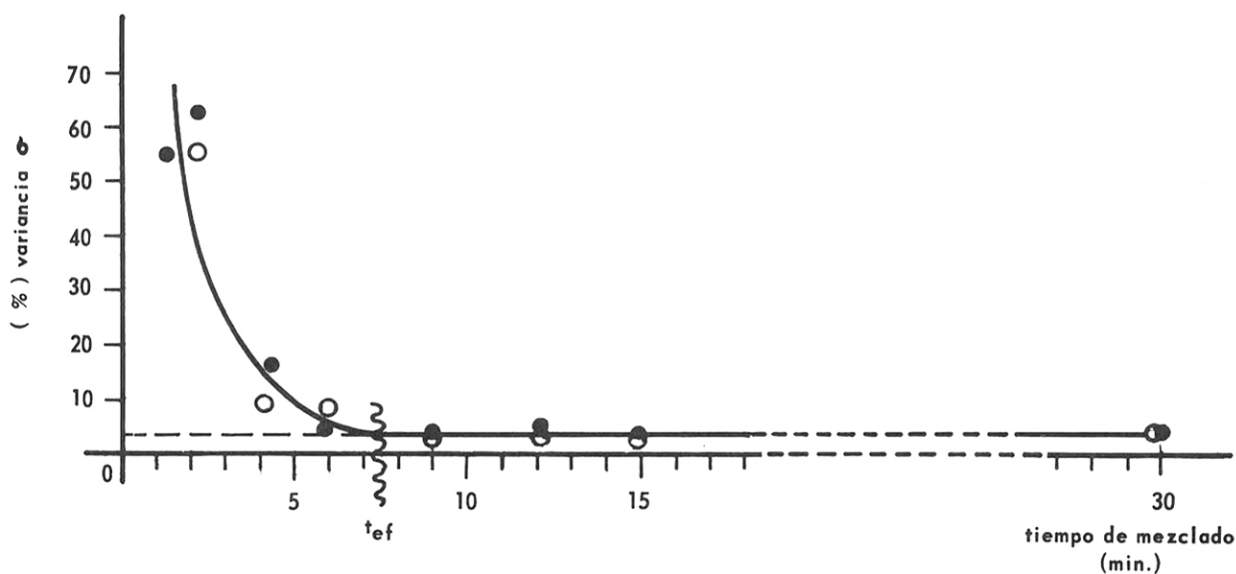


Figura 4.- Resultados obtenidos.- La variancia versus el tiempo de mezclado baja hasta un valor constante.

- .- muestras grandes (20 gr.)
- .- muestras pequeñas (1 gr.)

2.3.- Reactor Discontinuo Agitado:- Otro método para la investigación de mezcladores discontinuos, consiste en tomar continuamente pruebas en un lugar determinado, después de haber introducido el trazador. De este modo fue investigado un reactor agitado de acción discontinua (fig. 5). En este caso, se trataba de constatar cuánto tiempo necesitaba la masa de reacción para formar una mezcla uniforme con las sustancias adicionales.

El trazador radiactivo, preparado de acuerdo con las condiciones del experimento, se añadió al comienzo del proceso a la masa de reacción. Durante el proceso, la válvula inferior quedó un poco abierta, por la cual continuamente dejaba pasar una reducida cantidad del contenido del reactor. Las pérdidas eran extremadamente pequeñas con relación a la cantidad total de la masa.

Con un tubo de ensayo se tomaba cada minuto una muestra, que se medía en el pozo del detector (fig. 1).

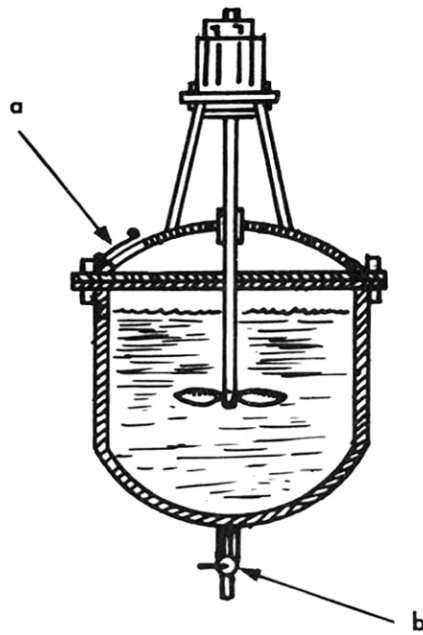


Figura 5.- Reactor discontinuo de agitación.-

- a.- entrada de carga
- b.- salida

Los resultados - radiactividad específica versus tiempo de reacción - están representados esquemáticamente en la figura 6.

Como se puede ver, al principio del experimento las fluctuaciones de la radiactividad específica son muy elevadas y con el tiempo disminuyen hasta alcanzar un valor estacionario. Este valor del tiempo corresponde al momento desde que la masa de reacción puede ser considerada completamente homogenizada.

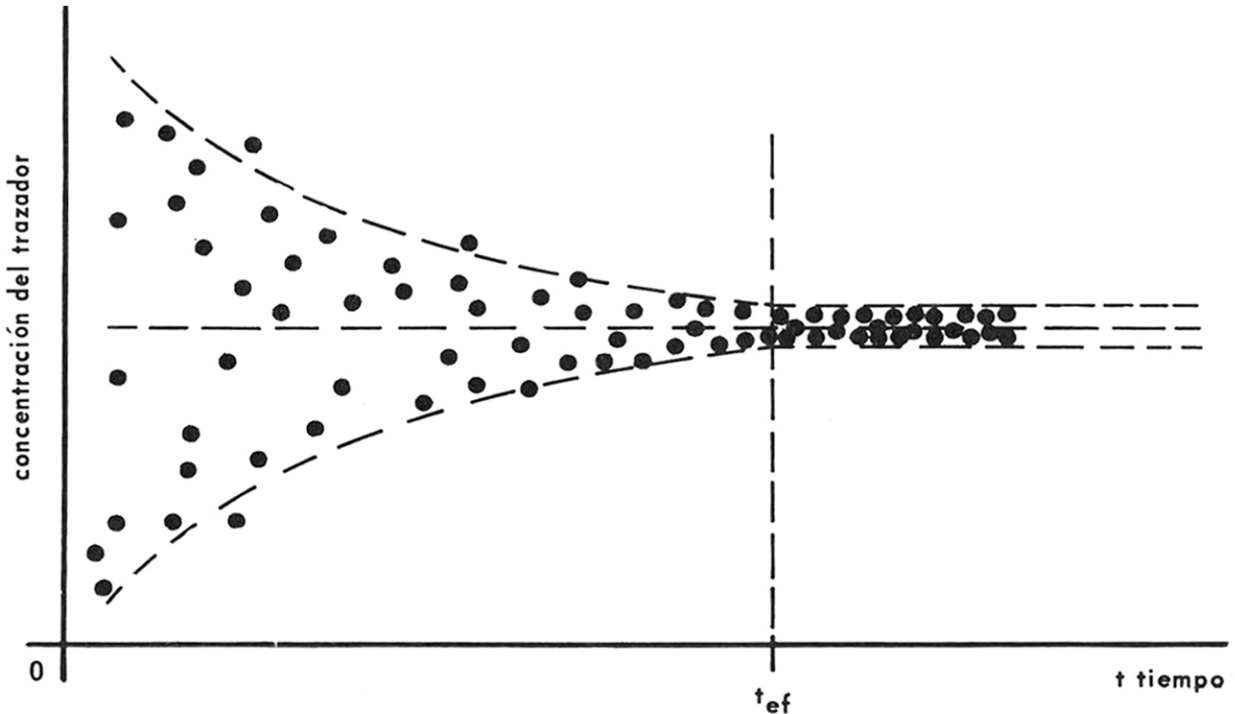


Figura 6.- Resultados de la investigación del reactor agitado.- La concentración versus el tiempo.

En estos experimentos puede constatar, al mismo tiempo, y según el principio del método de dilución de isótopos, cuál es la magnitud de la masa restante que queda, después de cada experimento, en las paredes y en la superficie del agitador.

Se encuentra el valor de 8^o/o .

3.- MEZCLADORES CONTINUOS

En un mezclador continuo, se mezclan sales de abono con materias adicionales (fig. 7). El análisis de la homogeneidad del producto, puede llevarse a cabo en forma similar a la descrita en el experimento anterior. No obstante, en este mezclador se trata de aclarar otra cuestión importante: el tiempo de permanencia.

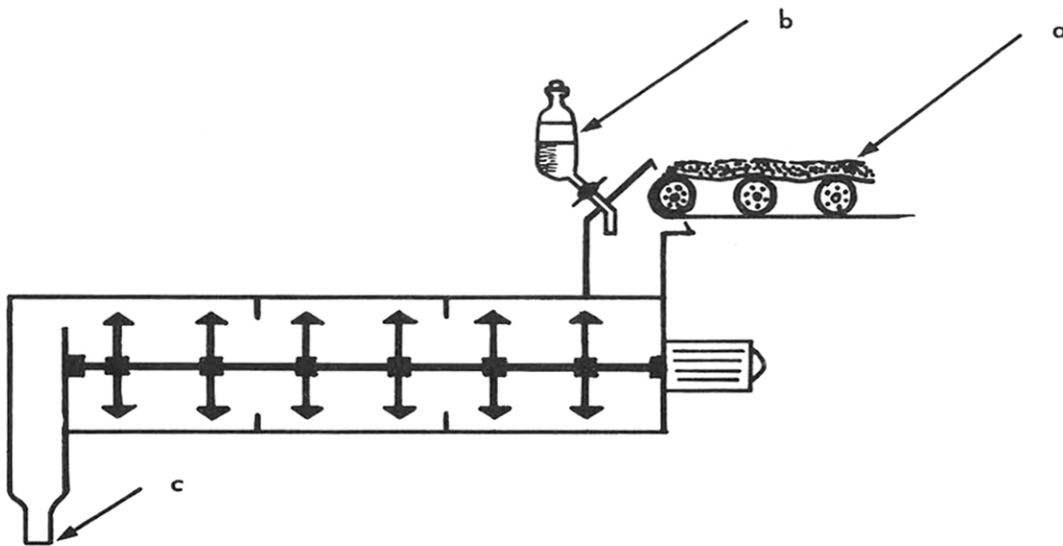


Figura 7.- Agitador continuo.-

- a.- material marcado con $^{24}\text{NaCl}$;
- b.- material adicional;
- c.- salida del producto mezclado.

Como el mezclador efectúa no sólo en dirección radial, sino también axial, algunas de las partículas que caen en el mezclador llegan más rápidamente a la salida, mientras que otras pueden ser lanzadas hacia atrás, en dirección contraria a la dirección del transporte de material, quedándose de este modo durante largo tiempo en el aparato.

Para que todas las partículas pasen en un mismo tiempo por el mezclador, es decir, para que, en lo posible, su tiempo de mezclado sea el mismo, los constructores de estas instalaciones tienen que tratar de conseguir una disminución de la acción axial.

La determinación de la curva del tiempo de residencia por medio de experimentos nos mostrará hasta qué punto se ha realizado ese principio.

La curva de distribución del tiempo de residencia, llamada también curva E^* (Levenspiel [10]), puede medirse con ayuda de trazadores radiactivos. En el caso dado, primero se roció 1 kg de sal de abono seca con una solución de 3 mCi $^{24}\text{NaCl}$, observándose las medidas de seguridad necesarias y después se secó lentamente. Ese indicador radiactivo se colocó a la cinta del transportador, encima del aparato. El momento en que la sal radiactiva cayó en el mezclador, fue definido como principio del experimento ($t=0$). A la salida se fueron tomando muestras en breves espacios de tiempo. (5 segundos).

La radiactividad específica medida de las muestras tomadas es directamente proporcional al valor E^* de la curva del tiempo de residencia (la figura 8 muestra una de esas curvas).

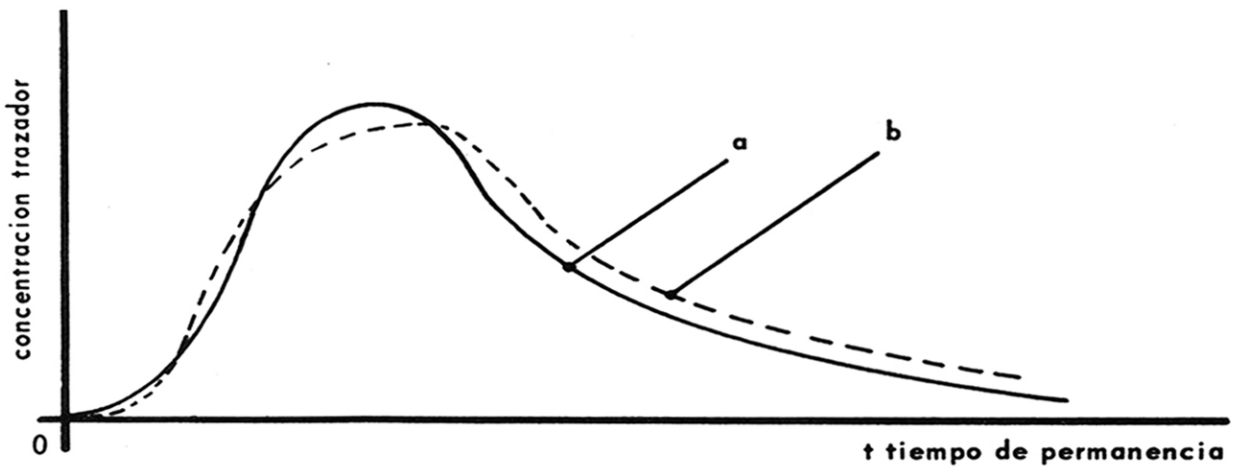


Figura 8.- Distribución del tiempo de residencia para el mezclador continuo.- (esquemáticamente).-

a.- curva idealizada de una serie de tres tanques, idealmente agitados;
b.- la curva medida.

Por regla general, esas curvas son sometidas a diferentes procedimientos de cálculo. Estos, generalmente, son tan extensos (amplios), que sería recomendable emplear computadoras. Principalmente, se emplean los siguientes procedimientos de evaluación.

1.- Determinación de magnitudes estadísticas, como:

$$E(t) = \frac{\int_0^{\infty} c(t) \cdot t \cdot dt}{\int_0^{\infty} c(t) dt} \quad (5)$$

$$Z(\theta^2) = \frac{\int_0^{\infty} c(\theta) (\theta - 1)^2 d\theta}{\int_0^{\infty} c(\theta) d\theta} \quad (6)$$

$$\theta = \frac{t}{E(t)} \quad (6a)$$

$$Z(\theta^r) = \frac{\int_0^{\infty} c(\theta) (\theta - 1)^r d\theta}{\int_0^{\infty} c(\theta) d\theta} \quad (7)$$

con $r > 2$.

2.- Derivación de otras distribuciones y funciones, como por ejemplo, la función de intensidad. [11].

$$\lambda(\theta) = \frac{E^*}{I^*} \quad (8)$$

- 3.- Comparación de las distribuciones establecidas con modelos de reactor matemático - físicos, como por ejemplo:
- Modelo de difusión [12 - 14]
 - Modelo de batería de reactores agitados [15 - 17]
 - Modelo de circulación, etc. [18]

Una descripción de una gran parte de esos modelos se encuentra en [19].

Los presentes experimentos demostraron que el mezclador equivale a una batería de n tanques agitados con el número equivalente de $n = 3$.

A base de estos experimentos fue posible hacer los cálculos matemáticos del mezclador y determinar el valor de la carga máxima.

4.- INVESTIGACION DE REACTORES QUIMICOS CONTINUOS

En los reactores químicos continuos, la distribución del tiempo de permanencia juega el mismo papel extraordinariamente importante que en los mezcladores continuos, con la única diferencia que, en este caso, se trata de una reacción química en vez de un proceso unitario.

La dispersión acerca del valor medio, demuestra que unas partículas permanecen en el reactor más tiempo y otras menos que el valor promedio. Las primeras abandonan el reactor sin haber reaccionado, mientras que las últimas pueden ser sometidas a reacciones consecutivas indeseables.

Este caso se da, por ejemplo, en los procesos de polimerización o policondensación. La parte de los productos que se transportan con demasiada rapidez, no alcanzan al grado necesario de polimerización, mientras que otros lo han sobrepasado. Todo esto influye considerablemente en la calidad del producto.

Comúnmente, los procesos continuos de polimerización y policondensación se realizan en baterías de tanques agitados o en reactores tubulares. Mientras para el primer tipo de reactor la distribución del tiempo de permanencia es bien conocida, en el segundo tipo, éste se la conoce solamente en forma muy aproximativa. Para conocimientos exactos es necesario determinarla en forma experimental.

Así, en una fábrica de fibras químicas fueron ensayados diferentes variantes de reactores tubulares para la policondensación continua de caprolactam. La medición de la distribución del tiempo de residencia con ayuda de isótopos radiactivos, dio aquí importantes resultados. Los tubos con "malas" instalaciones pudieron ser retirados inmediatamente.

El trazador radiactivo, ácido acético brómico $\text{CH}_2 \text{ Br COOH}$ marcado con ^{82}Br fue introducido de manera instantánea en forma de un pulso, en la entrada. Fue elegido el ^{82}Br porque ese isótopo brómico posee un tiempo de media vida $T = 35,7$ horas, adecuado para el proceso y porque se le puede sustituir fácilmente al ácido acético que en el proceso descrito se añade al flujo del monómero constantemente en la entrada del aparato.

La figura 9 muestra en forma esquemática dos de los tubos investigados. La concentración de trazadores no sólo se midió a la salida de la instalación, donde se tomaron muestras, sino también en diferentes lugares desde fuera.

Estos experimentos demuestran claramente las ventajas de los trazadores radiactivos: 1^o.- sin necesidad de modificar en forma considerable la instalación, puede observarse desde fuera el transporte del material; 2^o.- el trazador no influye sobre la calidad del producto (lo cual no sucede cuando se añaden colorantes); 3^o.- el trazador desaparece prácticamente después de unas 300 horas, con la desintegración radiactiva.

En esta serie de experimentos se emplearon los dos procedimientos de marcación reproducidos en la figura 2: el método corriente y el método de activación del trazador. Para el segundo caso, se agregó al flujo, en la entrada del aparato, una cierta cantidad de MnO_2 que fue activado en las muestras en el reactor nuclear.

Ambos procedimientos dieron los mismos resultados. En la figura 9, se comparan las curvas de las variantes A y B (representación esquemática). Sin necesidad de su estudio detallado, se puede ver que la curva de la variante B es mejor. El procesamiento de esas curvas con la computadora de la Universidad Técnica de Dresden confirmó esta afirmación.

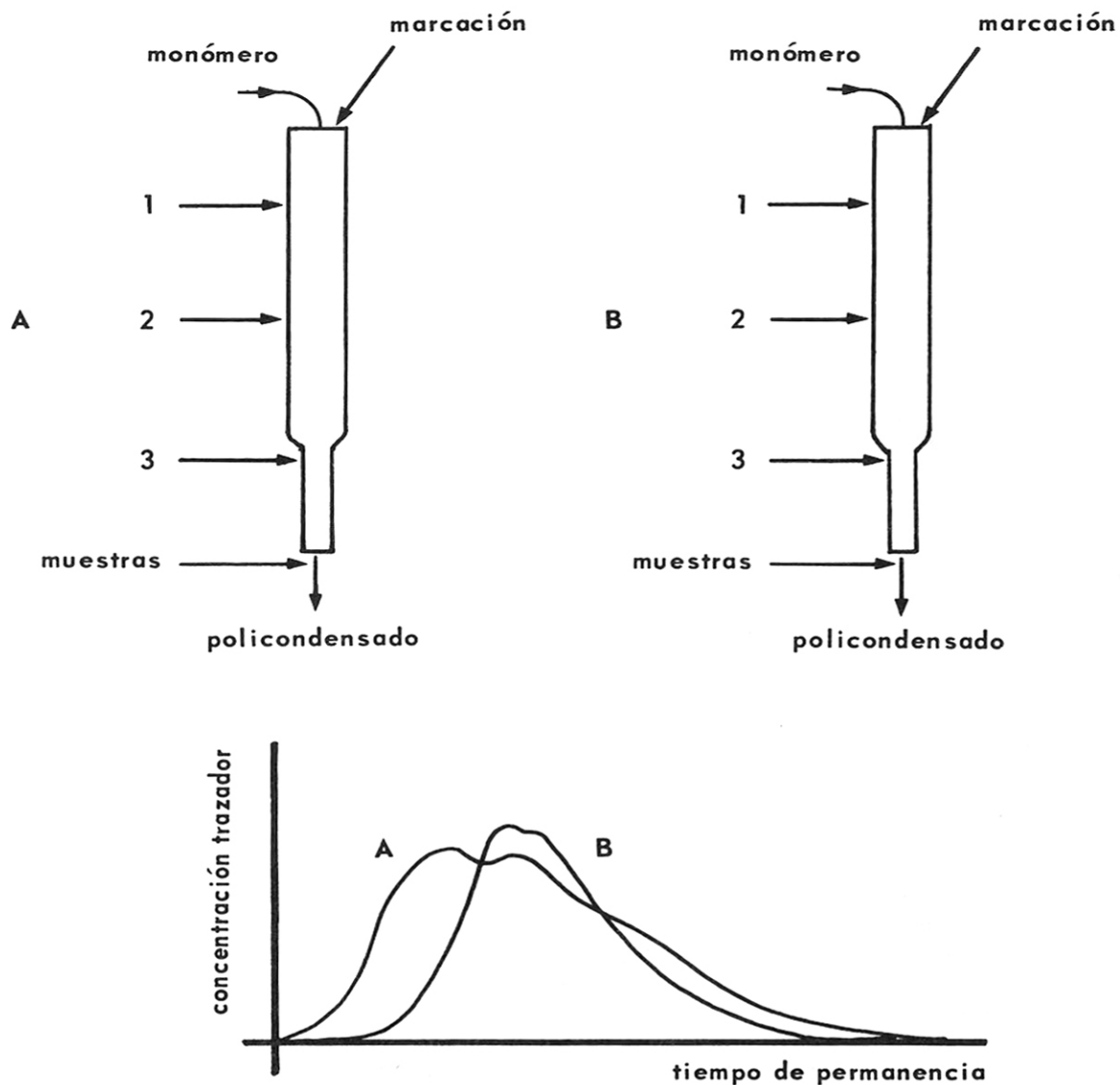


Figura 9.- Reactores de policondensación.-

Arriba: Las variantes A y B se distinguen entre sí según los obstáculos interiores; 1,2,3 - puntos de medición continua de la concentración del trazador con tubos de GEIGER de construcción especial;
 Abajo: Curvas de tiempo de permanencia para los aparatos A y B medidas en las muestras tomadas en la salida.

5.- REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO

Para concluir, vamos a detenernos en un ejemplo de la serie de experimentos del Reactor de Lecho Fluidizado. Los reactores de lecho fluidizado, tipo gas - sólido, se emplean para los fines más diversos. Un importante terreno de su aplicación son los procesos de secado. La fig. 10 representa uno de esos reactores, que se emplea para el secado de sales de abono. Para el diseño y cálculo de esa instalación, también es importante la distribución del tiempo de residencia. Se planteaba la tarea de hallar un procedimiento que permitiera determinar rápidamente el proceso de retromezclado.

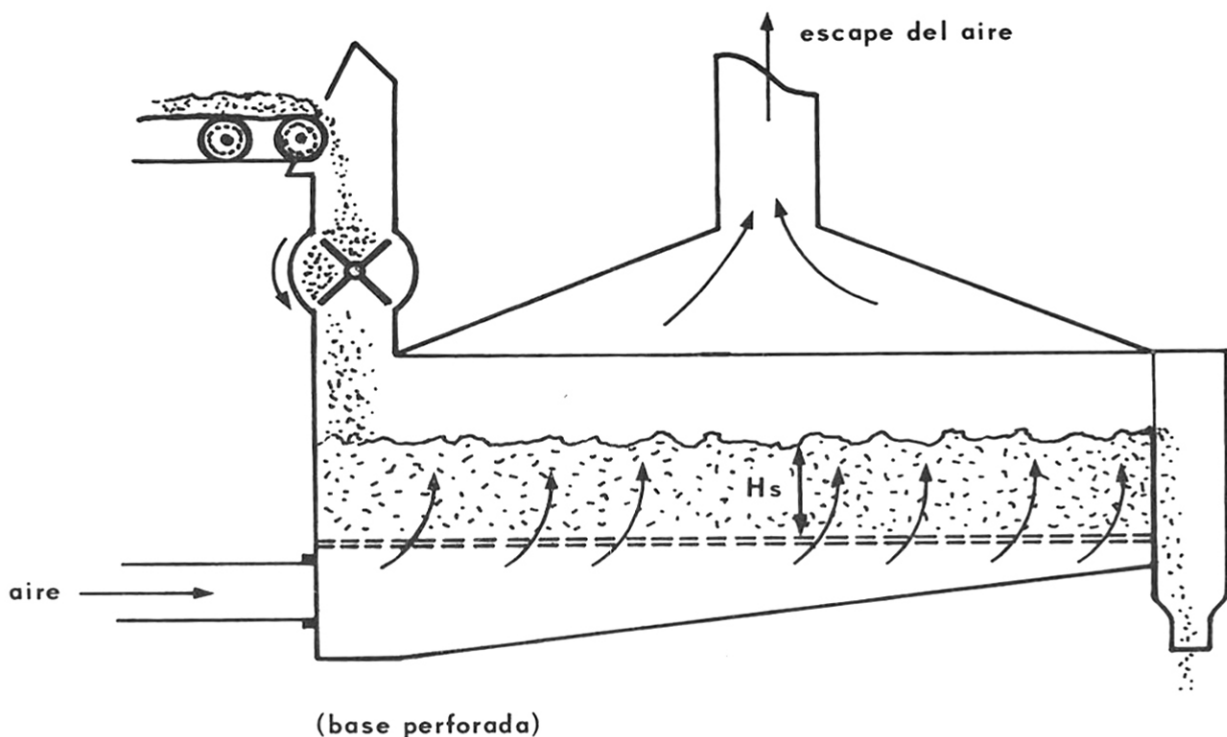


Figura 10.- Reactor de lecho fluidizado para el secado de abonos.-

altura del lecho fluidizado H_s

El modelo de difusión propuesto por LEVENSPIEL [12 - 14], parecía ser apropiado para la descripción del mencionado proceso. Un trazador que, en forma de una fina capa, se introduce en el centro del aparato, deberá distribuirse, durante el proceso en forma similar como sucede en un proceso de difusión.

En caso uno dimensional ello significa que:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = M \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \nu_M, \quad (9)$$

y para las condiciones iniciales:

$$\left. \begin{aligned} c &= 0, \text{ para } t < 0 \\ \nu_M &= c_k \delta(t) \delta(x), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

el resultado obtenido es:

$$c(x,t) = \frac{c_k \theta(t)}{\sqrt{4 \pi M t}} \exp \left\{ - \frac{x^2}{4 M t} \right\} \quad (11)$$

Para sistemas fluyentes se obtiene la solución:

$$c(x,t) = \frac{c_k \theta(t)}{\sqrt{4 \pi M t}} \exp \left\{ - \frac{(x - wt)^2}{4 M t} \right\} \quad (12)$$

Aquí reviste interés la siguiente pregunta: ¿En la práctica, el experimento de difusión llevado a cabo en proceso discontinuo, da el mismo coeficiente de mezclado que la evaluación de una curva de distribución del tiempo de residencia? Si así fuera, entonces la distribución del tiempo de residencia - y con ella la efectividad de semejantes instalaciones -, puede ser investigada en forma sencilla. En el centro de la instalación se coloca una sustancia marcada, se pone en marcha la instalación y después de un tiempo determinado, se detiene. En intervalos fijados exactamente desde el origen (centro $x = 0$) se toman muestras y con ayuda del aparato (fig. 1), se determina la radiactividad específica. Los resultados se evalúan según la ecuación (11).

Con ayuda del M encontrado, puede ser calculada la distribución del tiempo de residencia y los experimentos en procesos continuos no son necesarios. Para evitar el gasto de los materiales, los experimentos pueden llevarse a cabo con una sustancia barata, como por ejemplo, arena.

En el caso dado, los experimentos se realizaron en procesos continuo y discontinuo con $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$ y arena. La trazación se hizo con $^{24}\text{NaCl}$.

Se hizo evidente que el coeficiente de mezclado obtenido en los experimentos discontinuos, puede ser efectivamente aprovechado para calcular la distribución del tiempo de residencia.

Como muestra la figura 11, ambas series de medición coinciden en una misma curva.

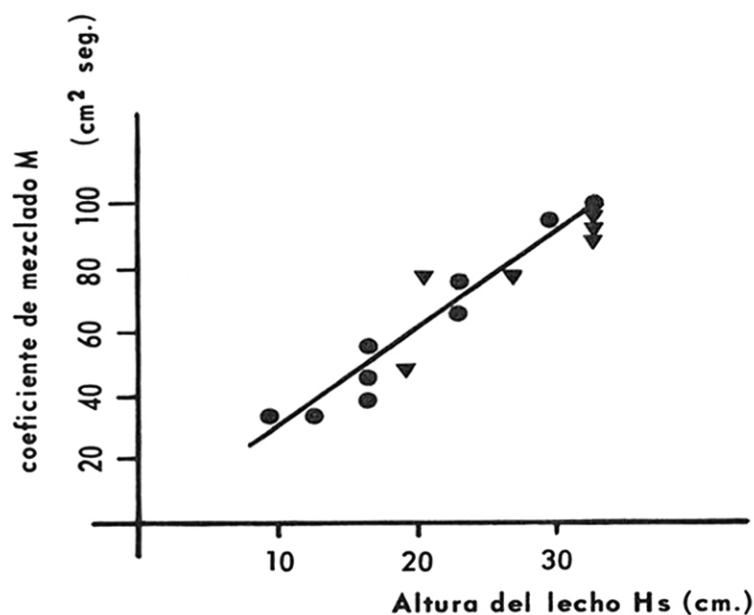


Figura 11.- Resultados de investigación del reactor de lecho fluidizado.- El coeficiente de mezclado versus altura del lecho H_s

- resultados obtenidos en los experimentos discontinuos.
- ▼ resultados de los experimentos continuos.

LISTA DE SIMBOLOS

A	radiactividad, número de transformaciones elementales por unidad de tiempo (tpm o tps)
c	radiactividad específica medida (cpm/gr) o (cps/gr), concentración del trazador
E (t)	valor de espectación (promedio)
E*	distribución del tiempo de residencia (exit age distribution, Levenspiel)
f	factor de proporcionalidad relacionado con la eficacia de un equipo de medición radiactiva
I*	distribución. : "Internal age distribution", según Levenspiel
l	sección del reactor
m	masa de una sustancia radiactiva (gr)
M	coeficiente de mezclado
n	número de muestras
N	número de átomos o moléculas de una especie
N_A	número de Avogadro
t	tiempo (seg., min., h.)
T	tiempo de media vida (seg.)
w	velocidad promedia de lecho fluidizado
x	coordiinada espacial
z	radiactividad medida (counts per minute, cmp, o counts per second, cps)
$Z(\theta^r)$	momento central (con respecto al valor promedio) de grado r
ν	símbolo para el término de fuente (en este caso la marcación radiactiva en forma de un pulso).
δ	función de DIRAC
θ	tiempo de permanencia reducido con respecto al valor promedio.
λ	constante de la descomposición radiactiva
$\lambda(\theta)$	función de intensidad, según Naor y Shinnar
σ_r	la dispersión relativa estadística.

BIBLIOGRAFIA

- 1).- HULL, D. E. et al., Nucleonics 14 (1956) 5,50.-
- 2).- BEEN, U. y E. SAELAND, Some Industrial Uses of Radioisotopes in Norway, P/882 en: AI Conf. 8, tomo 15, New York (1956), 170.-
- 3).- WEYDANZ, W. Chemie - Ingenieur - Technik 32 (1960) 343.-
- 4).- GREGORY, I. N. en: Radioisotopes in the Physical Sciences and Industry, Tomo 1, Vienna (1962), 415.-
- 5).- EZER, E. y T. RAKITOVSKY, Gyógyszerészet (Budapest) tomo 7, (1963) 259.-
- 6).- WAGNER, K. et al., Kernenergie 8 (1965), 185.-
- 7).- DUFTSCHMIDT, K. E., Atomwirtschaft 11 (1966), 188.-
- 8).- PIPPEL, W., K. RUNGE y W. BAR, Isotopenpraxis 2 (1966) 364 - 366.-
- 9).- RAOUF, M. S. : Continuous Mixing of Solids, Wageningen Holanda 1963. (Mededelingen van de Landbouwhogeschool te Wageningen).-
- 10).- LEVENSPIEL, O. : Chemical Reaction Engineering, New York (1962), 245.-
- 11).- NAOR P. y R. SHINNAR; Industrial and Engineering Chemistry, Fundamentals 2 (1963) 278 - 286.-
- 12).- LEVENSPIEL, O.: Industrial and Engineering Chemistry, 50 (1958) 343.-
- 13).- VAN DER LAAN, E. Th. : Chemical Engineering Science, 7 (1958), 187.-
- 14).- BISCHOFF, K. B. Y O. LEVENSPIEL: Chemical Engineering Science, 17 (1962) 245 - 267.-
- 15).- MASON, D. R. y E. L. PIRET, Industrial and Engineering Chemistry, 42 (1950) 817.-
- 16).- SCHOENEMANN, K. : Dechema - Monographien, tomo 21, Weinheim (1952).-
- 17).- PIPPEL, W. : Chemische Technik, 17 (1965) 729.-
- 18).- VAN DE VUSSE, I. G. : Chemical Engineering Science 17 (1962) 507.-
- 19).- WEN, C. Y. y S. F. CHUNG: The Canadian Journal of Chemical Engineering 43 (1965) 101.-