

## 1.0.0 INTRODUCCIÓN

Para comprobar la exactitud de modelos matemáticos o investigar el comportamiento de procesos industriales con técnicas de radiotrazadores, se eligen generalmente, como funciones de excitación o de entrada, aquellas mas sencillas y fáciles de realizar en la práctica. En muchos casos la actividad es incorporada al sistema con velocidad constante durante un intervalo relativamente largo. Otras veces se prefiere inyectar la actividad total contenida en un volumen discreto de solución marcada, en un intervalo de tiempo muy pequeño. Se tiene, entonces, un pulso de excitación prácticamente instantáneo como función de entrada.

El ejemplo mostrado en la Fig. 1 (transparencia), referente a una operación de mezcla continua y uniforme en todo el volumen de un reactor, ilustra de un modo general la aplicación de radiotrazadores en ingeniería de procesos. El material procesado en el reactor ingresa y sale con caudal  $q$  constante, durante la experiencia. En el instante  $t = 0$  se dá comienzo a la inyección de la solución marcada, de concentración  $C_1$  y caudal  $q_1$  constantes, en un punto  $P_1$  muy próximo de la entrada. Se quiere estudiar las variaciones de la concentración  $C_o(t)$  del trazador en el fluido, en un punto  $P_o$  a la salida del reactor. Dicha concentración debería ser, en todo instante, igual a la que existe en el interior del mezclador si el mezclado fuera instantáneo y uniforme. El caudal  $q_1$  se elige muy pequeño frente a  $q$  para no perturbar las condiciones normales del proceso. Si hay una mezcla perfecta e instantánea de la solución marcada con el producto en punto de inyección, la expresión  $q_1 C_1 / q$  representará la concentración  $C_e$  del trazador en el fluido que ingresa al reactor de volumen  $V_o$ , y la concentración  $C_o$  observada a la salida será:

$$C_o = C_e \left[ 1 - \exp\left(-\frac{q}{V_o} t\right) \right]$$

Quando:

$$\frac{q}{V_o} t = 7$$

la concentración  $C_o$  a la salida deberá ser prácticamente igual a  $C_e$  y permanecer constante en ese valor, con lo que puede suspenderse la inyección y dar por terminado el ensayo.

Si el modelo matemático que fué supuesto (mezcla continua, instantánea y uniforme) describiese fielmente el proceso que tiene lugar en el reactor, en las condiciones reales de operación, la representación gráfica de  $\ln(1-C_o/C_e)$  en función del tiempo debería dar una recta de pendiente igual a  $-q/V_o$ .

En tal caso, conocido uno de esos parámetros, la pendiente de la recta experimental permitiría determinar el valor del restante. Inversamente, si  $q$  y  $V_o$  se conocen con precisión, la pendiente permitiría comprobar la exactitud del modelo y eventualmente verificar cual es el volumen efectivo de mezclado para las condiciones reales del proceso.

Por último, repitiendo los ensayos luego de efectuadas modificaciones en el sistema de agitación y mezcla, se puede determinar el momento en que se alcanzan las condiciones óptimas de diseño y funcionamiento.

El ejemplo considerado, aunque simple, da una clara idea de las potencialidades del método de trazadores radiactivos en el estudio y diseño de procesos industriales.

En la Sección siguiente serán presentadas en forma muy resumida, las aplicaciones industriales más comunes de las técnicas de radiotrazadores.

## 2.0.0 DESCRIPCIÓN GENÉRICA DE ALGUNAS APLICACIONES IMPORTANTES DE TRAZADORES RADIACTIVOS EN PROCESOS UNITARIOS DE INGENIERÍA.

### 2.1.0 EFICIENCIA DE LAS OPERACIONES DE MEZCLA

Los radiotrazadores son ideales para estudiar la mezcla de líquidos, grasas, coloides, lodos, gases y sólidos pulverulentos (como los catalizadores fluidizados). En general, los procesos de mezcla demandan un tiempo relativamente largo. Si las condiciones de operación no se conocen con certeza, los procesos de mezcla deben prolongarse aún más de lo necesario, demorando la producción y encareciendo los costos de producción. Esta conclusión es válida tanto para los mezcladores continuos como para los discontinuos (por tandas o "batch").

#### 2.1.1 Procesos de mezclado continuo

Este proceso está esquematizado en la Fig. 2 (transparencia), donde se ha supuesto un reactor de mezcla continua, de volumen  $V_0$ , alimentado por dos productos  $M_1$  y  $M_2$  a caudales constantes  $Q_1$  y  $Q_2$ , respectivamente. El producto  $M$ , a la salida, debe tener una composición homogénea y uniforme en  $M_1$  y  $M_2$  para garantizar una calidad estable, ya sea como producto final de consumo o como materia prima intermedia que irá a ser sometida a un tratamiento posterior cualquiera.

El proceso ha sido originalmente diseñado para que los productos  $M_1$  y  $M_2$  se mezclen en forma prácticamente instantánea y uniforme, a medida que ingresan al volumen  $V_0$  del reactor.

Los radiotrazadores permiten verificar si en la realidad se cumplen las previsiones teóricas de diseño y, en caso negativo, extraer los datos que permitan efectuar las alteraciones necesarias del proceso.

El método consiste en inyectar en el punto  $PI$ , bien próximo a la entrada, un cierto volumen  $V_I$  de uno de los productos previamente marcado con la actividad  $A_I$ , y observar, en el punto  $PO$  a la salida, como varía en función del tiempo la concentración  $C_0(t)$  del trazador en el producto final  $M$ . La "función de entrada", tal como se definió anteriormente, dependerá de la manera en que se inyecta  $V_I$  (inyección continua o instantánea). En la Sección 1.0.0 fue analizado el caso de la inyección continua. Se verá ahora la respuesta del proceso (función de salida) frente a una inyección instantánea del trazador, aunque en la realidad sólo se tendrá una aproximación de una "función impulso", pues la inyección siempre demandará un intervalo finito de tiempo  $\Delta t$ . Sin embargo, si  $\Delta t$  es muy pequeño frente al tiempo medio de permanencia de los productos en el reactor, la inyección podrá ser considerada para los fines prácticos del ensayo, como correspondiendo a una función impulso de magnitud  $A_I$ .

Si  $A(t)$  es la actividad remanente dentro del reactor después de transcurrido un tiempo  $t$  desde la inyección, la concentración instantánea del trazador en el volumen  $V_0$  será igual a

la concentración a la salida (por tratarse de un reactor de mezclado instantáneo y uniforme) y valdrá:

$$C_o(t) = A(t)/V_o.$$

Entre  $t$  y  $t+dt$  egresa del reactor una actividad:

$$dA(t) = - C_o(t).dV = - C_o(t).Q.dt$$

El correspondiente decrecimiento de concentración en el interior del reactor, durante el mismo intervalo, es:

$$dC_o(t) = - C_o(t).Q.dt/V_o$$

Integrando esa expresión entre  $0$  y  $t$  y considerando que para  $t = 0$  la concentración inicial es  $C_i = A_i/V_o$  se obtiene, finalmente, la función teórica de salida para las condiciones supuestas de mezcla:

$$C_o(t) = C_i.exp[-(Q/V_o).t]$$

Durante el ensayo, en lugar de  $C_o(t)$  se mide la tasa de recuento ("counting rate")  $N_o(t)$  en cuentas por segundo (cps) que es proporcional a  $C_o(t)$ , independientemente de si la medición es continua o por muestreo en el punto  $P_o$  de observación.

Por lo tanto, si se cumple el modelo matemático supuesto, en el caso ideal de una inyección instantánea, la variación de  $N_o(t)$  en función del tiempo, medida a la salida del mezclador sería:

$$N_o(t) = K.C_o(t) = N_i.exp[-(Q/V_o).t] \text{ (cps), siendo,}$$

$N_i$ : lectura en el tiempo  $t = 0$  en (cps);

$K$ : factor de proporcionalidad o eficiencia de detección en (cps).cm<sup>3</sup>/mCi.

La representación gráfica de esta última ecuación daría una curva del tipo ilustrado en la Fig. 3 (transparencia). Para interpretar los datos experimentales conviene representar gráficamente el logaritmo natural de  $N_o(t)$  en función del tiempo. Si el mezclado es instantáneo y homogéneo como se supuso en el modelo matemático, la parte descendente de la función será una línea recta cuya pendiente valdrá  $-Q/V_e$ , donde  $V_e$  representa ahora el volumen efectivo de mezcla (que puede coincidir o no) con el volumen total  $V_o$  de diseño del reactor. Un primer resultado del ensayo es, precisamente, verificar esa circunstancia. Para ello basta medir  $Q$  y calcular del gráfico el valor  $m$  de la pendiente:

$$V_e = - (Q/m)$$

Si  $V_e$  es menor que  $V_o$  significa que en el reactor hay zonas muertas (donde los productos quedan retenidos sin participar del proceso de mezcla dinámica) y que, por lo tanto, no se está aprovechando al máximo su capacidad de diseño. Se impone entonces efectuar las modificaciones pertinentes en el sistema de agitación, cuyos resultados pueden a su vez comprobarse con un nuevo ensayo de radiotrazador.

Una situación opuesta a la recién considerada ocurre cuando parte del caudal que ingresa se deriva directamente a la salida, siguiendo una trayectoria de "cortocircuito" dentro del reactor de mezcla. El diagrama equivalente del proceso en tal caso y la correspondiente función teórica de salida están representadas en la Fig. 4 (transparencia).

### 2.1.2 Procesos de mezclado discontinuo ("batch mixing")

En estos procesos los radiotrazadores se utilizan para determinar el tiempo mínimo de mezclado total y los ensayos pueden tener dos objetivos diferentes:

1. establecer las condiciones óptimas de operación para un determinado equipo (tiempo óptimo de mezclado);
2. comparar el rendimiento de diferentes equipos o, lo que es equivalente, evaluar los resultados de modificaciones en el diseño de un mismo mezclador (eficiencia de mezcla)

Las técnicas de radiotrazadores para determinar el tiempo de mezcla total, implican la marcación de una cantidad adecuada de uno de los constituyentes con un tipo y actividad de radioisótopo apropiados a las características del proceso. El producto marcado se incorpora al proceso en el instante  $t = 0$  y se mide el tiempo  $T_m$  transcurrido hasta alcanzar una concentración homogénea del trazador en todo el volumen de la mezcla, dentro de los límites admisibles de fluctuación estadística.

La concentración del trazador durante el proceso puede determinarse por medición continua de la actividad específica en algún punto del reactor de mezcla o por medición de muestras discretas, conforme ilustran, respectivamente, las Figs. 5 y 6 (transparencias).

### 2.1.3 Distribución de tiempos de residencia (RTD)

En muchos procesos continuos interesa conocer la distribución del tiempo de permanencia de una sustancia cualquiera, dentro de un reactor. Dicha distribución está referida, generalmente, al tiempo medio de residencia, el cual se define como el tiempo promedio en el que un dado material permanece dentro del sistema investigado.

Supóngase que entre  $t_1$  y  $t_1 + \Delta t$  (para  $\Delta t$  tendiendo a cero) ingresan  $X_1$  moléculas de un determinado producto en el volumen  $V_0$  de un material procesado en un reactor y se desea saber cuántas de esas moléculas originales permanecieran todavía en el reactor, después de transcurrido un tiempo  $t$  desde la inyección, si el material circula con caudal  $Q$  constante. En otras palabras, se trata de determinar la función:

$$X(t) = f(X_1, V_0, Q, T)$$

teniendo en cuenta que la dilución de  $X_1$  en  $V_0$  puede no ser homogénea.

La Fig. 7 (transparencia) ilustra esta aplicación y la interpretación de los resultados obtenidos en un caso particular. El baricentro de la superficie delimitada por la curva de respuesta  $N_0(t)$ , coincide con el valor del tiempo medio de permanencia  $T_m$  y la dispersión de los tiempos de residencia alrededor de  $T_m$  da idea de la uniformidad de tratamiento del producto a la salida del reactor.

### 2.1.4 Medición de caudales

Existen tres métodos para la medición de caudales con radiotrazadores:

1. método de los dos picos;
2. método de las cuentas totales;
3. método de inyección o dilución continua.

Por limitaciones de tiempo, sólo ha sido ilustrada en la Fig. 8 (transparencia) la aplicación del método de los dos picos, que es el más utilizado en la práctica en razón de su simplicidad. En un punto **PI** de la tubería se realiza una inyección "instantánea" de un pequeño volumen **VI** de fluido, marcado con una actividad **AI** de trazador. En dos puntos **P1** y **P2** separados entre sí por la distancia **d**, y localizados corriente abajo del punto de inyección, se registran las variaciones de concentración del trazador en función del tiempo. Se obtienen así, dos picos o máximos en el registro de la tasa de recuento **No** (cps).

El tiempo **T** transcurrido entre la aparición de los dos máximos de actividad, relacionado con la distancia **d** que separa a los detectores, permite determinar la velocidad lineal media **Vm** de circulación del fluido ( $Vm = d/T$ ). Si **S** es el área de la sección transversal interna de la tubería, el caudal **Q** resulta:

$$Q = S.Vm = (S.d)/Tm = V/Tm$$

siendo **V** el volumen de fluido limitado por las dos secciones de medición. El método requiere determinar **V**, o que la sección **S** sea conocida y constante entre los puntos de medición. En general se obtienen resultados más exactos midiendo el tiempo de tránsito **T** entre los baricentros de las superficies limitadas por las curvas de los picos, en lugar de considerar el intervalo entre los máximos. Como trazadores se emplean emisores gama de vida media corta (**I-131**, **Br-82**, **Na-24**, etc) para permitir su detección a través de las paredes de las tuberías y minimizar los riesgos radiológicos. Los dispositivos de inyección se diseñan teniendo en cuenta la presión del fluido dentro del conducto y que la incorporación del trazador debe efectuarse en un intervalo extremadamente corto.

### 2.1.5 Medición de volúmenes por dilución isotópica (mass balance)

Este método se utiliza para determinar pesos y volúmenes de líquidos donde es impracticable o inconveniente efectuar mediciones gravimétricas o volumétricas de soluciones almacenadas en recipientes o que recirculan en un proceso industrial cualquiera. La técnica de dilución se basa en la medida de la radiactividad de muestras, una vez que una cantidad **MI** conocida de fluido marcado con una determinada concentración de trazador ha sido incorporada y homogéneamente diluida en toda la masa **M** del fluido contenido en el sistema. El valor de **M** se calcula mediante la expresión:

$$M = MI[(NI/No)-1]$$

donde **NI** y **No** son, respectivamente, las tasas de recuento (en cps) correspondientes a la concentración de actividad en la masa inyectada y en las muestras del producto extraídas después de la dilución homogénea del trazador.

### **2.1.6 Estudios de corrosión y desgaste**

La marcación localizada de un componente de un sistema, estático o dinámico, permite estudiar mediante la medición de radiactividad del componente marcado o de los materiales que circulan en contacto con él, los procesos de desgaste o corrosión a que pudiera estar eventualmente expuesto. El trazador puede ser insertado en el componente investigado o inducido por activación (neutrónica o por bombardeo con haz de partículas, generalmente protones). Ejemplo típico del primer caso es el control de desgaste y/o corrosión del recubrimiento refractario en altos hornos y, del segundo, los estudios de desgaste de piezas de máquinas.

### **2.1.7 Solución de problemas de proceso ("trouble shooting")**

Las técnicas descritas en las secciones precedentes, pueden aplicarse también para la solución de problemas de proceso como localización de pérdidas de fluidos y obstrucciones en tuberías y reactores, origen de contaminación o impurezas, aferición de instrumentos de medición etc.

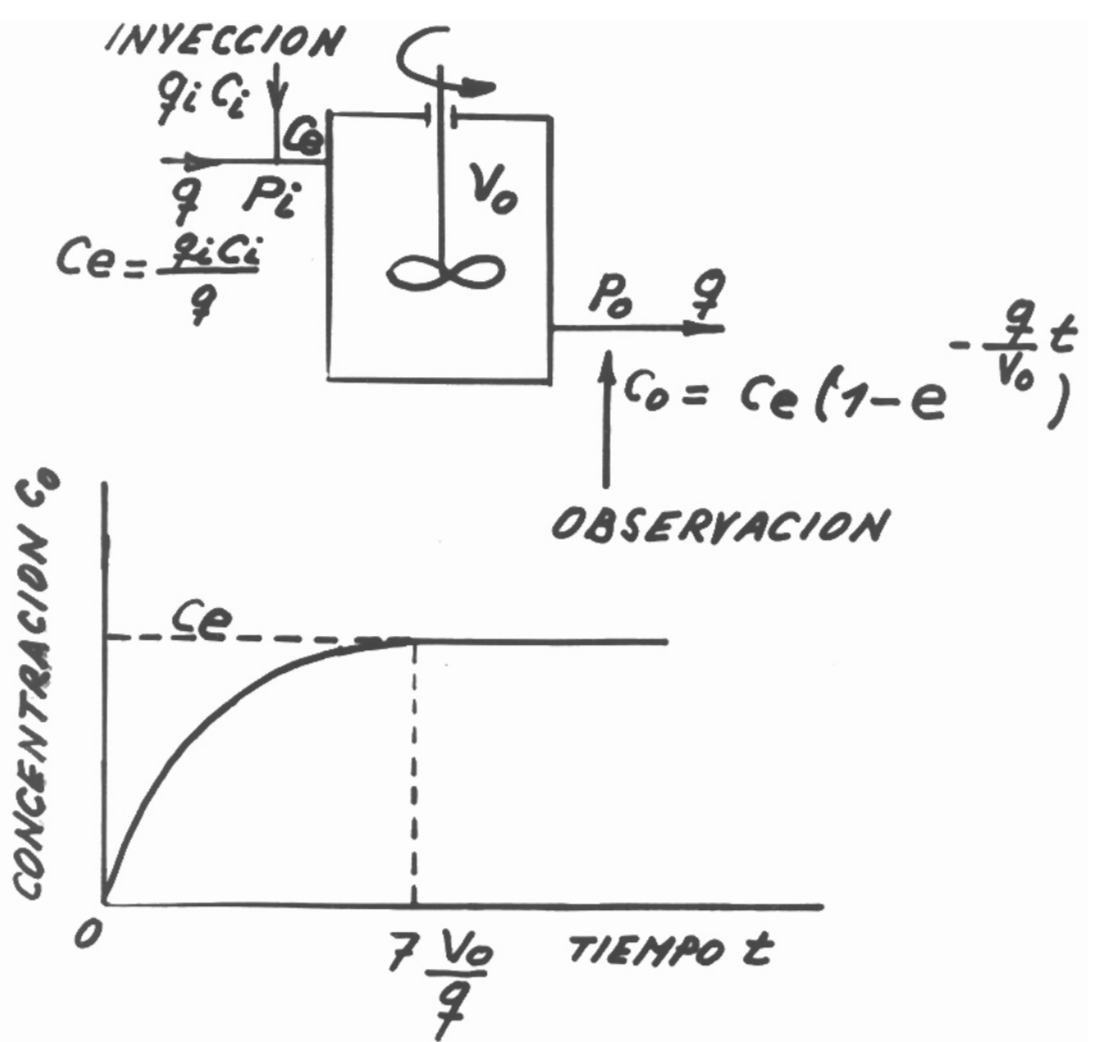


FIG. 1. REACTOR DE MEZCLADO INSTANTANEO  
 OBSERVACION: LA REPRESENTACION GRAFICA  
 DE  $\ln(1 - C_o/C_e)$  EN FUNCION DEL TIEMPO  
 DEBERIA DAR UNA RECTA DE PENDIENTE  
 $m = \text{tang } \alpha = -q/V_o$

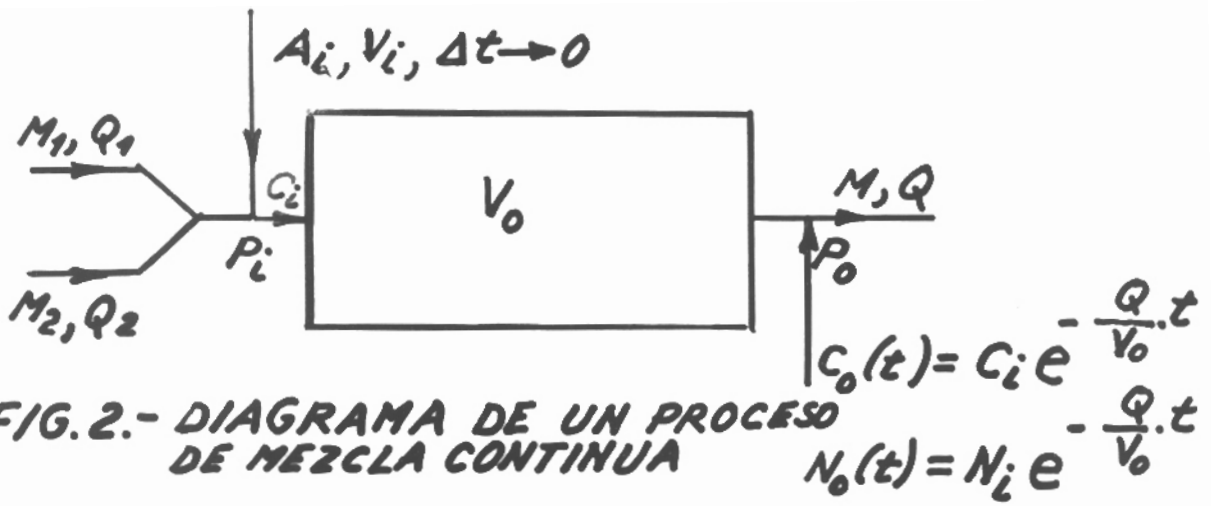


FIG. 2.- DIAGRAMA DE UN PROCESO DE MEZCLA CONTINUA

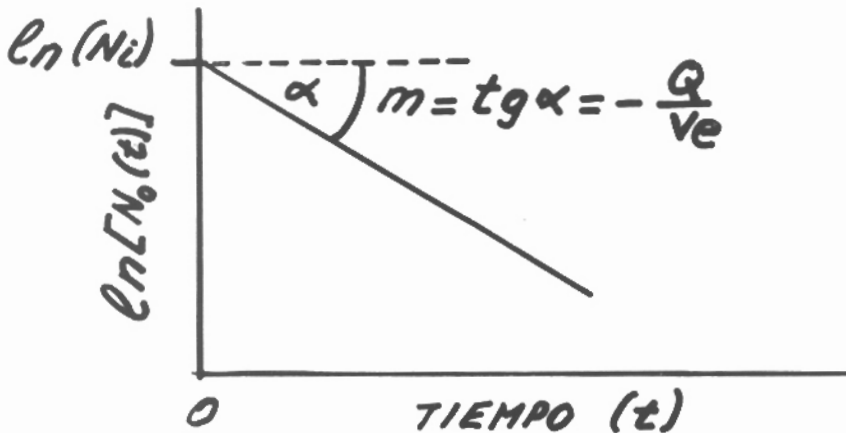
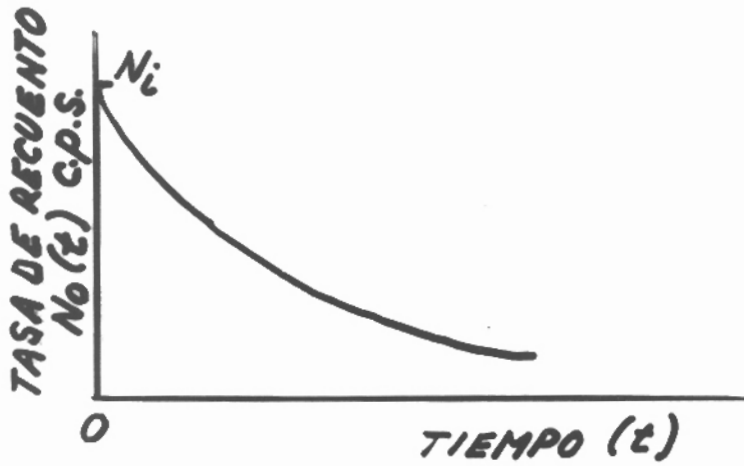


FIG. 3.- RESPUESTA DE UN SISTEMA DE MEZCLADO TOTAL PARA UNA INYECCION INSTANTANEA DE TRAZADOR (CASO IDEAL)

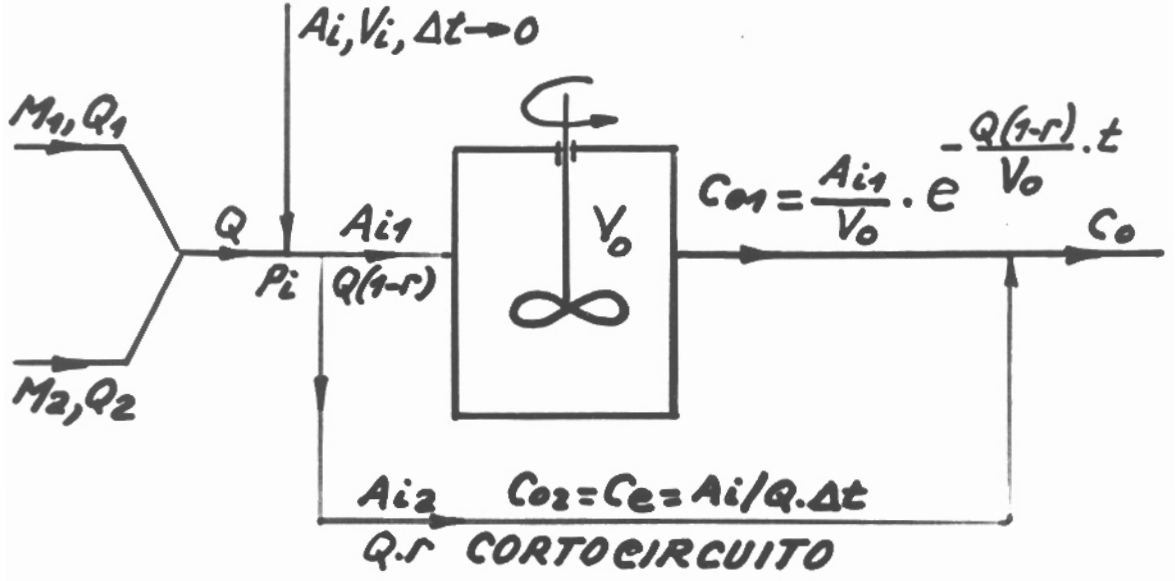


DIAGRAMA EQUIVALENTE

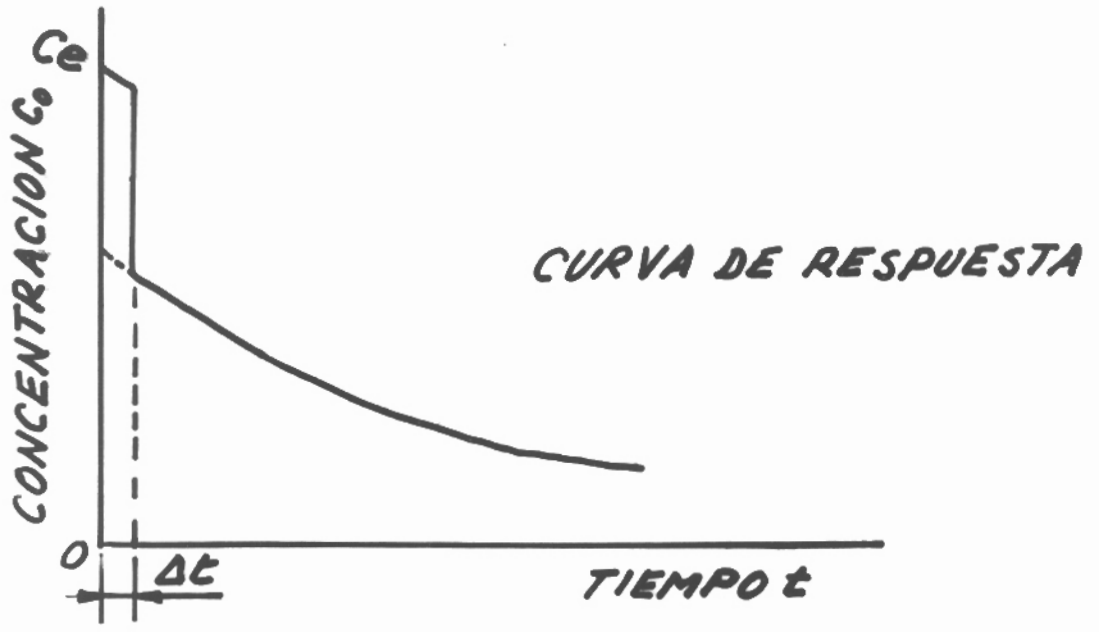


FIG.4.- REACTOR DE MEZCLADO TOTAL CON CORTOCIRCUITO ("BY PASS") A LA ENTRADA.

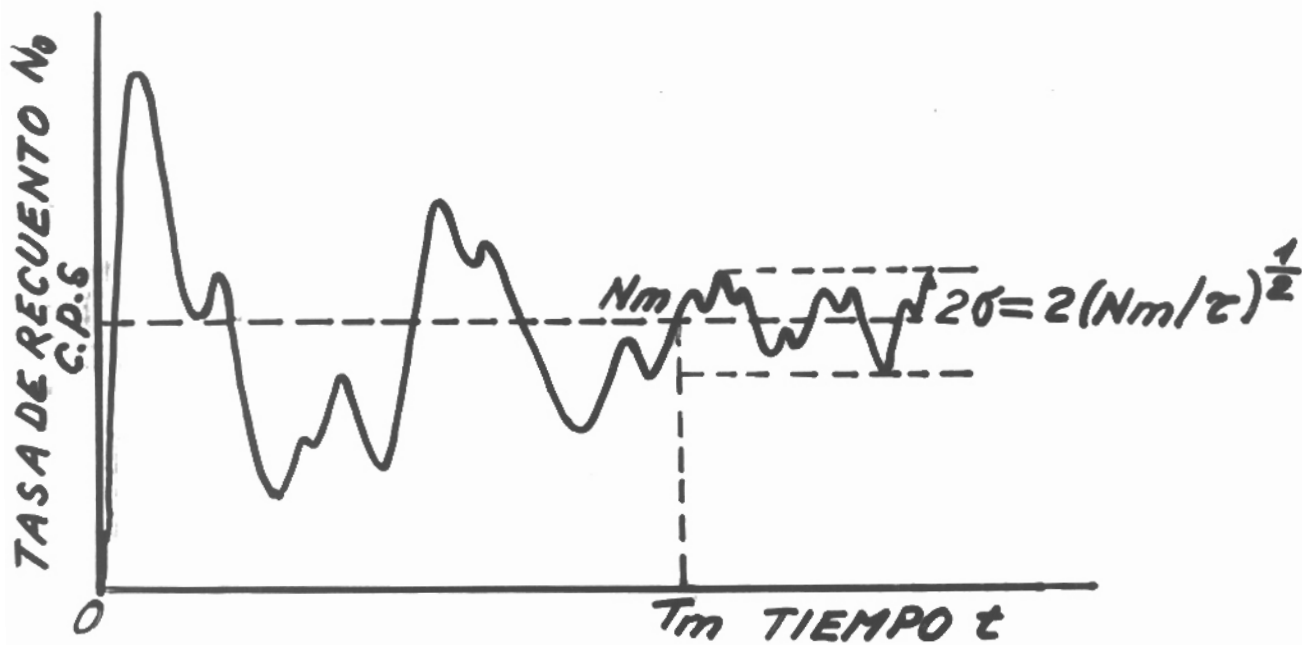
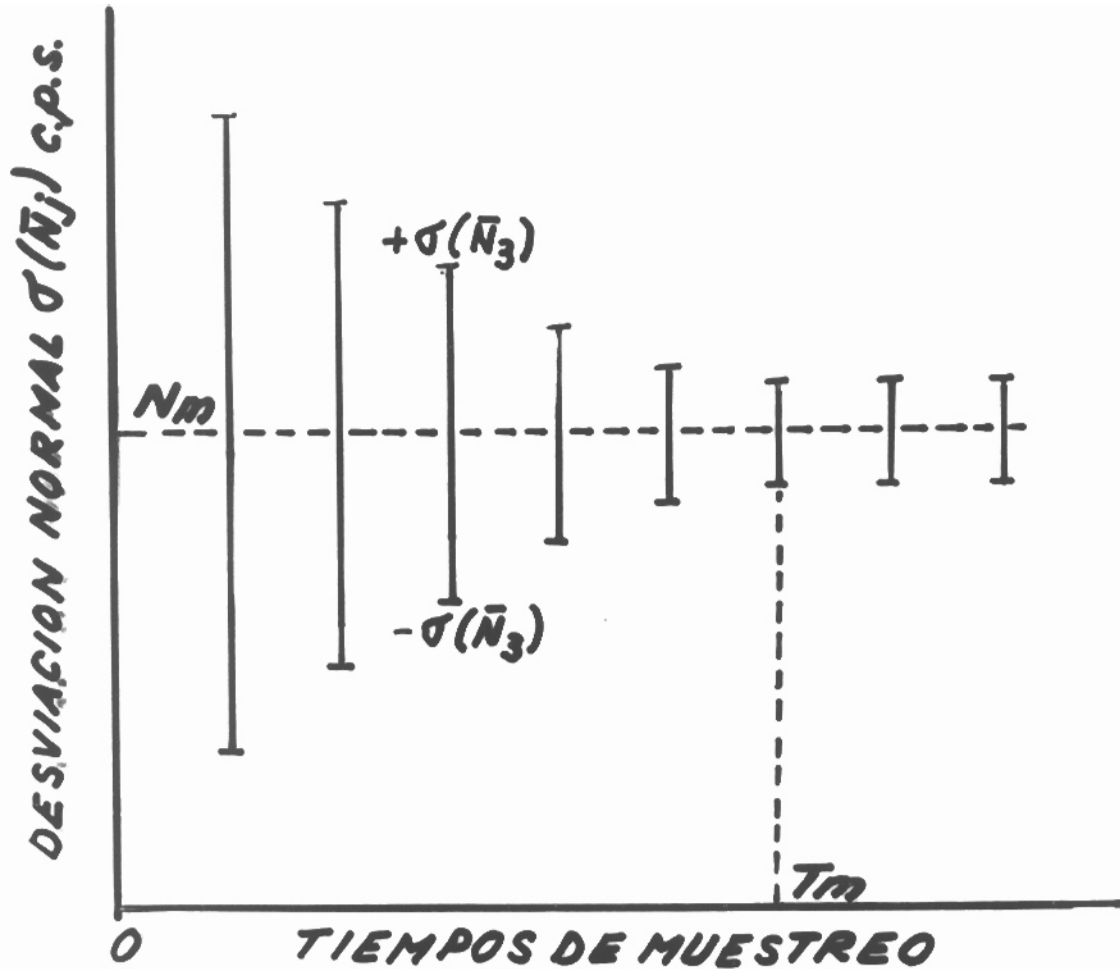
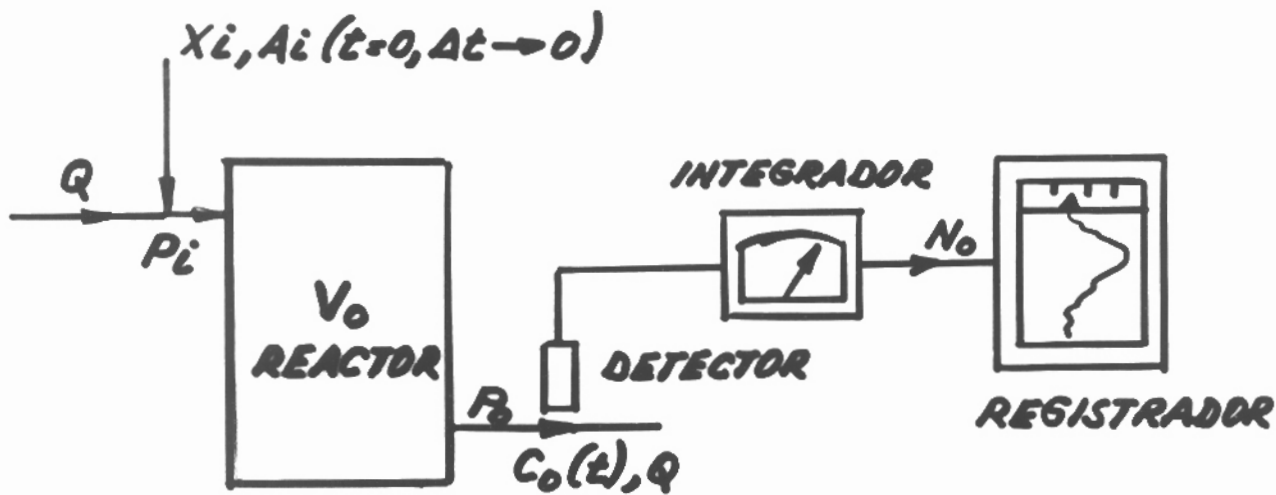


FIG.5.- PROCESO DE MEZCLADO DISCONTINUO ("BATCH MIXING") CON MEDICION CONTINUA.  $T_m$  ES EL TIEMPO DE HOMOGENEIZACION Y  $N_m$  LA TASA MEDIA DE RECUENTO PARA LA DISPERSION UNIFORME DEL TRAZADOR.



**FIG. 6.- MEZCLADO DISCONTINUO Y MEDICION POR MUESTREO: DESVIACION NORMAL DE LA TASA MEDIA DE RECuento  $\bar{N}_j$  DE GRUPOS DE MUESTRAS RETIRADAS SIMULTANEAMENTE DE DIFERENTES PUNTOS DEL MEZCLADOR EN FUNCION DEL TIEMPO DE MUESTREO.  $T_m$  Y  $N_m$  TIENEN EL MISMO SIGNIFICADO QUE EN LA FIG. 5**



MOLÉCULAS QUE SALIERON ENTRE  $t=0$  Y  $t=T$ :  $Q \int_0^T C_0(t) \cdot dt$

MOLÉCULAS RESIDUALES AL TIEMPO  $T$ :  $X(T) = X_i - Q \int_0^T C_0(t) dt$

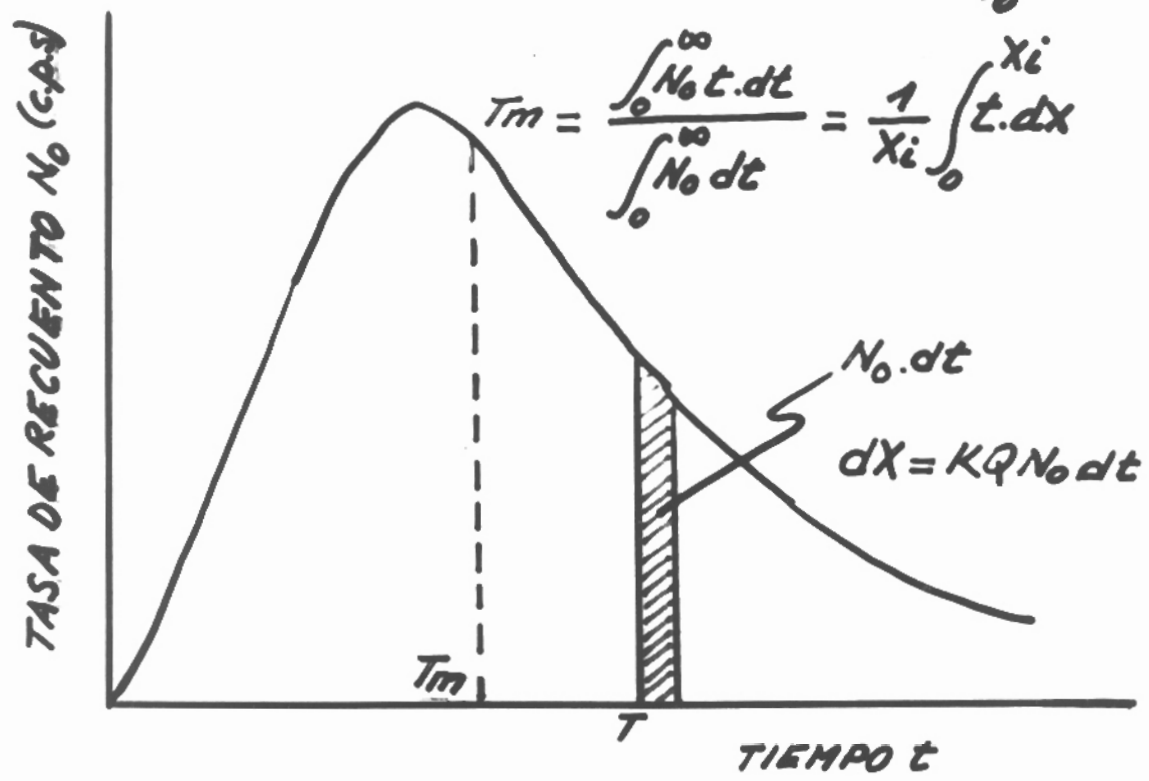


FIG.7.- DETERMINACION DE LA DISTRIBUCION DIFERENCIAL DEL TIEMPO DE RESIDENCIA DE LAS MOLECULAS INYECTADAS

## MEDIÇÃO DE VAZÃO

- MEDIR COM MAIOR EXATIDÃO
- DADOS NÃO PREVISTOS
- CALIBRAÇÃO

TRAÇADORES NÃO INTERFEREM COM A PRODUÇÃO

*MÉTODO DOS DOIS PICOS:*

