

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE GUADALAJARA

INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA DE CIENCIAS QUIMICAS



"ESTUDIO DE LA DISTRIBUCION DE
TIEMPOS DE RESIDENCIA EN UN MODELO
CON DOS ZONAS DE AGITACION
Y UN REFLUJO INTERNO"

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A

ELIZABETH MAYELA GALINDO ORTIZ

ASESOR: I.Q. MA. DEL CONSUELO LOPEZ LIMON

GUADALAJARA, JAL., 1986



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

Capítulo	pág.
INTRODUCCION	1
Simbologgia	3
I. TEORIA	6
Distribución de tiempos de residencia - Curvas E, C y F - Tiempo medio de residencia, tiempo espacial - Mode- lo para flujo no ideal - Tanque real con agitación - Modelos combi- nados con escala de tiempos grande - Modelo combinado "L" de Levens- piel	6
II. DESARROLLO EXPERIMENTAL	15
Equipo utilizado - Plan de trabajo - Resumen de las condiciones de ope- ración	15
III. RESULTADOS OBTENIDOS	21
IV. TRATAMIENTOS ESTADISTICOS DE LOS DATOS	24
Estadísticos para: prueba bimuestral, curvas experimentales comparadas con el modelo "L", modelo "L" com- parado con Modelo de mezcla perfec- ta, curvas experimentales compara- das con modelo de mezcla perfecta	25
ANALISIS DE LOS RESULTADOS ESTADISTICOS	29
CONCLUSIONES	33
APENDICES	35
1. Pruebas estadísticas usadas	35
2. Generalidades y manejo del espectrofotómetro	38
3. Ejemplos de los cálculos estadísticos	41
4. Datos de las gráficas de la DTR	48
5. Ruta Experimental	53

INTRODUCCION

Debido a la carencia de información acerca del comportamiento real de los tanques con agitación, se realiza la presente investigación, estudiando en ella la Distribución de Tiempos de Resistencia, o "DTR", para un modelo de flujo.

El objetivo al estudiar esta distribución es conocer el grado de influencia de las variables que suponemos importantes dentro del sistema de flujo; porque conociéndolo, se pueden realizar ajustes para mejorar así la eficiencia del proceso, que al final de cuentas es lo que se pretende en la Industria Química.

El modelo de flujo que aquí se analiza, es el modelo combinado de dos parámetros, designado por Octave Levenspiel [4], como "MODELO L" (Fig. 1.1), constituido por dos tanques de mezcla, los cuales representan el comportamiento de un sistema de agitación para una escala de tiempos grande y que tiene en cuenta las regiones relativamente estancadas con una retención grande de fluido.

Mediante el análisis de las variables: "Posición de entrada de alimento del primer tanque al segundo" y "Relación de reflujo en la recirculación", se desean obtener conclusiones a los siguientes puntos:

1. Conocer cuáles de las diferentes posiciones se ajustan a la ecuación teórica del modelo "L" de Levenspiel.
2. Conocer cuáles de las relaciones de reflujo interno propuestas se ajustan a la ecuación teórica del modelo "L" de Levenspiel.
3. Comparar las ecuaciones teóricas y resultados experimentales del modelo "L", con la ecuación teórica del modelo de mezcla perfecta.

SIMBOLOGIA

- a Diferencia máxima entre las curvas experimentales
Valor estadístico para la prueba bimuestral de Kolmogorov-Smirnov.
- a_1, a_2 Números máximos absolutos. Valores estadísticos
para la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov.
- Abs_1 Lectura de absorbancia de cada muestra de la prueba
1.
- Abs_2 Lectura de absorbancia de cada muestra de la prueba
2.
- \overline{Abs} Lectura de absorbancia promedio del sistema.
- b Relación de caudales (v_R/v_o). Parámetro de la ecuación de flujo del modelo "L" de Levenspiel.
- C Distribución de la respuesta normalizada del trazador, correspondiente a una señal impulso idealizada.
- C_0 Respuesta adimensional de una señal trazadora, que corresponde a una señal impulso idealizada.
- d Relación de volúmenes (V_1/V). Parámetro de la ecuación de flujo del modelo "L" de Levenspiel.
- DTR Distribución de tiempos de residencia.
- E Distribución de edades a la salida del recipiente o DTR.

- E_e Función de la distribución de salida, adimensional.
- $E_{e_{m,n}}$ Distribución de edades adimensional experimental, siendo m y n las diferentes posiciones de las bocas de salida del primer tanque y la entrada al segundo tanque respectivamente.
- E_{e_L} Distribución de edades adimensional, del modelo "L" de Levenspiel.
- $E_{e_{MP}}$ Distribución de edades adimensional, del modelo de mezcla perfecta.
- E_{e_1} Distribución de edades adimensional, experimental de la prueba # 1.
- E_{e_2} Distribución de edades adimensional, experimental de la prueba # 2.
- $\overline{E_e}$ Distribución de edades adimensional, experimental resultado del promedio entre las pruebas 1 y 2.
- F Curva representativa de la concentración del trazador a la salida del recipiente (midiendo esta concentración a la salida, en función de su concentración a la entrada) cuando se le impone una señal en escalón.
- F_e Distribución de la respuesta adimensional del trazador que corresponde a una señal de entrada en escalón.
- F_{e_1} Curva F adimensional de la prueba # 1.
- F_{e_2} Curva F adimensional de la prueba # 2.

$\overline{F_e}$	Curva F adimensional, promedio experimental.
t	Tiempo, minutos.
\bar{t}	Tiempo medio de residencia, minutos.
V_1	Volumen del tanque # 1, litros.
V_2	Volumen del tanque # 2, litros.
V	Volumen total del sistema ($V_1 + V_2$), litros.
v_o	Caudal en la alimentación al sistema, l/min.
v_R	Caudal en la recirculación, l/min.
e	Medida adimensional del tiempo, (t/\bar{t}), tiempo reducido.
T	Tiempo espacial global del sistema, (V/v_o), min.
#	Número de la muestra de las distintas pruebas.

Capítulo I

TEORIA

En el estudio del FLUJO NO IDEAL existen algunos nuevos conceptos, los cuales se numerarán a continuación y explicarán en detalle.

1. La Distribución de Tiempos de Resistencia o DTR es la expresión de la frecuencia probable del tiempo de permanencia de cada una de las moléculas que conforman un fluido en un reactor.

Estudiando la DTR de un sistema de flujo, es posible predecir el comportamiento de un reactor.

El principal objetivo de una investigación sobre la DTR es conocer el grado de flujo no ideal, es decir, la desviación del modelo de flujo real con respecto al modelo de flujo ideal, por medio de la función de Distribución de Tiempos de Salida.

A la DTR se le denomina también Distribución de Edades a la Salida del Recipiente, E, o simplemente Curva E y es necesario tomarla muy en cuenta en cualquier flujo no ideal.

Se dice que la Curva E está normalizada cuando el área bajo la curva vale la unidad.

Cuando los valores de la Curva E se transforman en cantidades adimensionales (es decir, valores independientes de las unidades empleadas), tenemos la curva E_0 , resultando de gran valor en la comparación estadística de distribuciones.

Mediante un método experimental llamado "estímulo-respuesta" es posible determinar fácilmente la DTR. En este método debe estimularse al sistema mediante una inyección de una sustancia trazadora o "señal impulso idealizada" en el flujo de entrada, siendo ésta una señal trazadora que se inyecta de modo virtualmente instantáneo.

Representando la concentración de la sustancia trazadora a la salida del recipiente frente al tiempo, y analizando la función de distribución obtenida, se cuenta con la información deseada sobre el comportamiento real del sistema de flujo.

2. La Curva C, es la representación de la respuesta del trazador en la corriente de salida del recipiente frente al tiempo, cuando se le impone al sistema una señal impulso idealizado o "pulsación".

En estado estacionario y cuando la curva C es normalizada tenemos como resultado la curva E.

3. La Curva F es la distribución de la concentración de la sustancia trazadora a la salida del recipiente

(midiendo esta concentración a la salida, en función de su concentración a la entrada), cuando se le impone al sistema de flujo una señal escalón, es decir, una corriente continua de trazador con una concentración conocida.

La curva F representa la probabilidad acumulada del tiempo de residencia de las moléculas dentro de un sistema de flujo desde 0 hasta 1.

La característica principal de la curva F, es que siempre es ascendente desde 0 hasta 1 y viene dada por:

$$F = \int_0^t E dt$$

en donde E dt es la probabilidad de una partícula de permanecer un tiempo t en el recipiente.

4. El Tiempo Medio de Residencia para el flujo de fluidos en estado estacionario y densidad constante, se define como:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t C dt}{\int_0^{\infty} C dt}$$

5. El Tiempo Espacial \mathcal{T} , es igual al volumen del recipiente, V, entre el caudal de entrada, v_0 .

El tiempo espacial coincide con el tiempo medio de residencia, cuando no hay cambios de densidad, ni volumen muerto en el sistema de flujo.

MODELOS PARA FLUJO NO IDEAL

En el estudio de los distintos modelos de flujo, es conveniente medir el tiempo t , en función del tiempo espacial τ , para poder comparar las diferencias existentes entre distribuciones, y el parámetro resultante llamado e es una medida adimensional del tiempo, que viene dada por:

$$e = t / \tau$$

Las curvas E, C y F se relacionan con las curvas E_e , C_e y F_e (o sea, las curvas de distribución basadas en el tiempo adimensional e), de la siguiente manera:

$$E_e = E \tau$$

$$C_e = C \tau$$

$$F_e = F$$

La curva E_e adimensional, es decir, la distribución de edades a la salida del recipiente, adimensional, es igual a la concentración de la sustancia trazadora inyectada en pulso instantáneo entre la concentración promedio de

esta misma sustancia trazadora en el sistema, es decir:

$$E_e = \frac{C}{C \text{ media}}$$

Existen diversos modelos para caracterizar los diferentes tipos de flujo no ideal en los recipientes.

Algunos modelos son útiles para explicar las desviaciones de los sistemas reales respecto al flujo de pistón, otros describen las desviaciones de los tanques reales con agitación respecto al tanque de mezcla perfecta o ideal.

Dentro de estos modelos, los hay de un solo parámetro y también de varios parámetros.

Cuando los modelos de un solo parámetro no representan satisfactoriamente las desviaciones del flujo ideal en pistón o en mezcla perfecta, se ensayan otros modelos más complicados.

En estos modelos, se supone que el reactor real está constituido por una serie de regiones interconectadas entre sí, de diferentes formas.

Las curvas que se obtienen de estos modelos, son diferentes unas de otras, y, se distinguen fácilmente a partir de ciertos valores de los parámetros que los conforman.

Esta propiedad sugiere un método para caracterizar flujos desconocidos, y se emplea para diagnosticar flujos

anómalos en los recipientes.

TANQUE REAL CON AGITACION

En los procesos industriales que utilizan tanques con agitación, se tiene que tomar en cuenta la desviación existente entre comportamientos real e ideal.

Para representar al tanque real con agitación, es necesario emplear modelos combinados de varios parámetros. Una aplicación de estos modelos es el caso de tanques grandes con agitación insuficiente.

MODELOS COMBINADOS CON ESCALA DE TIEMPOS GRANDE

Estos modelos se analizan cuando la escala de tiempos θ (teta) es grande, comparada con el tiempo medio de residencia del fluido en el sistema, es decir, cuando no es importante el comportamiento del reactor en tiempos pequeños, tales como retraso inicial, paso rápido, o la señal de descenso periódica.

Con estos modelos, se desea encontrar el comportamiento de un sistema que tenga en cuenta zonas relativamente estancadas, con una retención grande de fluido, utilizando modelos de dos o más parámetros, para ajustar mejor a la realidad.

En cambio no son recomendables para reacciones rá-

pidas en las que el tiempo de reacción es pequeño, comparado con el tiempo de mezcla necesario para alcanzar la uniformidad en la composición.

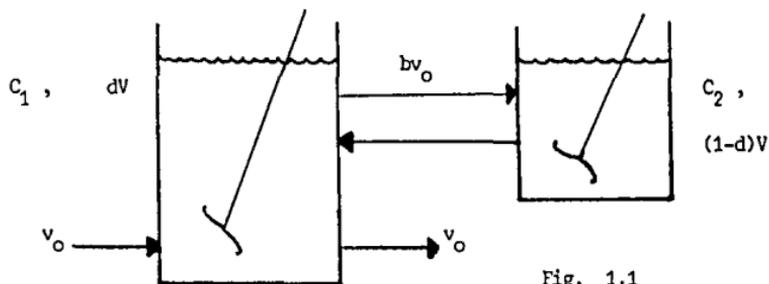
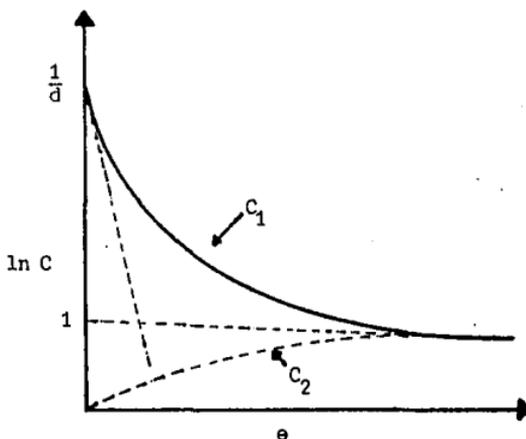


Fig. 1.1

MODELO COMBINADO "L" DE LEVENSPIEL [4]



Este es el modelo de flujo, al cual se le realiza la presente investigación, tratándose de un modelo de dos parámetros, con escala de tiempos grande.

El modelo está diseñado por dos tanques de diferentes volúmenes conectados entre sí, formando con éste, un reflujo interno, con un caudal de recirculación constante, $v_R = b v_o$.

El parámetro "d" de la ecuación de la DTR del fluido representa la relación existente entre el volumen del tanque 1, sobre el volumen total del sistema, $d = V_1/V$.

El parámetro "b" de la ecuación de flujo del modelo, representa la relación de caudales del sistema, $b = v_R/v_o$.

La ecuación de la Distribución de Tiempos de Residencia viene dada por:

$$E\theta = C_1 = \frac{1}{d(1-d)(m_1-m_2)} \left[(m_1-dm_1 b) e^{m_1\theta} - (m_2-dm_2 b) e^{m_2\theta} \right] \quad (\text{Ec. 1-1})$$

La concentración del trazador en el compartimiento estancado (tanque 2), viene dada por:

$$C_2 = \frac{b}{d(1-d)(m_1-m_2)} \left[e^{m_1\theta} - e^{m_2\theta} \right] \quad (\text{Ec. 1-2})$$

siendo m_1 y m_2 , en ambas ecuaciones:

$$m_1, m_2 = \frac{1-d+b}{2d(1-d)} \left[-1 \pm \sqrt{\frac{1-4bd(1-d)}{(1-d+b)^2}} \right] \quad (\text{Ec. 1-3})$$

Capítulo II

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Equipo Utilizado

Para poder construir físicamente el modelo de flujo "L" de Levenspiel, se utilizó el siguiente equipo (Fig. 2.1).

DESCRIPCION DEL EQUIPO	MATERIAL	DIMENSION	CAPACIDAD
Tanque cilíndrico con fondo de casquete esférico y 7 perforaciones axiales a diferentes alturas, además de orificios de desagüe al fondo.	Lámina galvanizada.	h = 40 cm ϕ = 34.9 " e = 0.159 "	31.7 l
Tanque cilíndrico con fondo de casquete esférico y 6 perforaciones axiales a diferentes alturas, además de orificios de desagüe al fondo.	Lámina galvanizada	h = 40 cm ϕ = 25 " e = 0.159 cm	15.8 l
Rotámetro "GILMONT" Nº 5.	Vidrio	h = 30 cm ϕ = 5 cm	0 - 1.8 l/min.
Bomba de pistón "GORMAN RUPP INDUSTRIES"		h = 6.6 cm l = 22 " a = 8.7 "	0 - 1.0 l/min.

DESCRIPCION DEL EQUIPO	MATERIAL	DIMENSION	CAPACIDAD
Flecha con aspa rectangular	Acero inoxidable	h = 40 cm Ø 0.79 cm	
Bomba rotatoria de compresión recíproca de Lab. PUMP, con válvula de control de flujo (115V, 50/60 Hz)	Acero inoxidable y hule	h = 6.35 cm l = 22.9 " a = 8.89 "	0 - 1 l.
Agitador INFRAMO con indicador graduado de velocidad para facilitar putnos reproducibles (115V, 50/60 Hz)	Fierro	h = 7.0 cm l = 12.0 " a = 9.5 "	30-650 RPM
Agitador CAFRAMO con iguales características al anterior.			
Espectrofotómetro SPECTRONIC 20 de Bausch & Lomb, con abertura espectral media de 20 nm y rango fotométrico de 0-100% de transmitancia y de 0-2 de absorbancia. (115V, 50/60 Hz).		h = 20.95 cm Ø = 33.02 " l = 41.75 " W = 10.9 Kg	340-950 nm.
Tanque de alimentación a una altura de 2.3 m arriba de los otros dos tanques, el cual descansa en una estructura de fierro, la cual sirvió para montar todo el equipo.	Lámina galvanizada	h = 75.0 cm l = 45.0 " a = 45.0 "	15.0 l

DESCRIPCION DEL EQUIPO	MATERIAL	DIMENSION	CAPACIDAD
Válvula de paso	Vidrio	l = 1.27 cm	0 - 2 l/min.
Jeringas	Plástico	l = 15.0 c,	0.02/0.03 l
Llave triple	Acero inoxidable	l = 2.5 cm	
Tubos de ensayo	Vidrio	l = 12.5 cm φ = 1.5 "	0.015 l.
Gradilla para 20 tubos de ensayo.	Madera	l = 15.0 cm a = 5.0 "	
Reloj de cuarzo con cronómetro y precisión de centésimas de seg.			

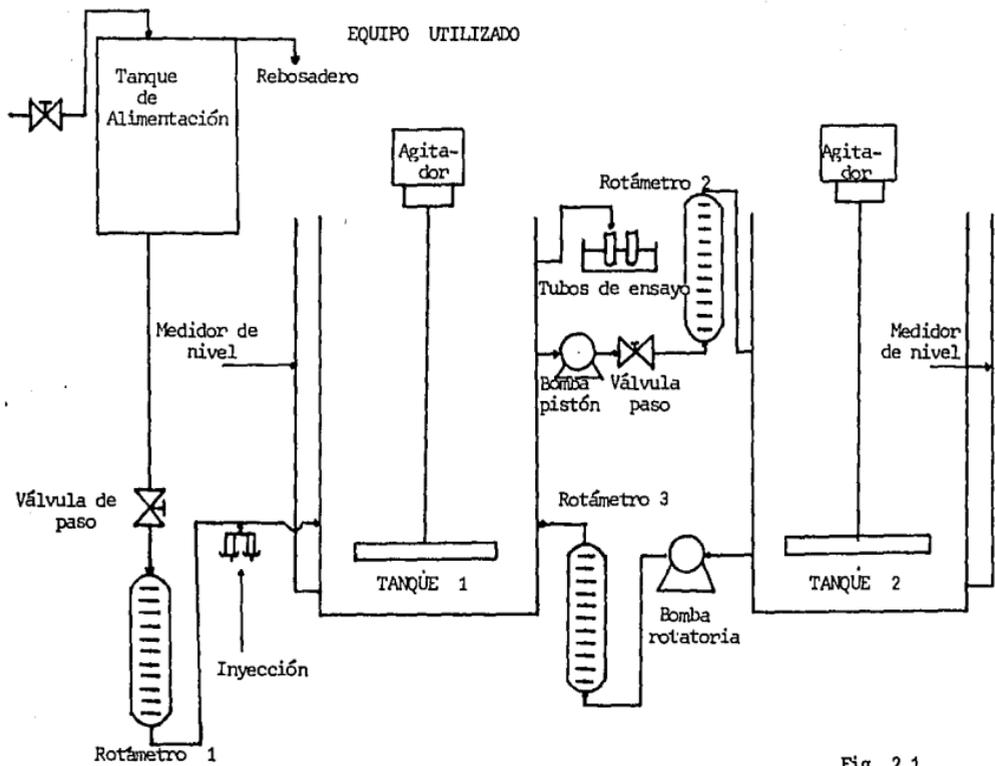


Fig. 2.1

Plan de Trabajo

Teniendo como objetivo principal en esta investigación el de analizar, mediante la distribución de tiempos de residencia, el comportamiento experimental de un sistema de flujo con dos zonas de agitación y un reflujo interno y, compararlo con las distribuciones teóricas del modelo de mezcla perfecta y del modelo "L" de Levenspiel, se planeó trabajar de la siguiente manera.

1) Desarrollar 12 pruebas (cada una por duplicado para tener la certeza de su confiabilidad y su respetabilidad), variando entre cada una de ellas la posición de entrada de alimento del primer tanque al segundo, así como la relación de reflujo interno.

Así, las posiciones de entrada de alimento del primer tanque al segundo quedaron determinados por: BOCA DE SALIDA DEL PRIMER TANQUE / BOCA DE ENTRADA AL SEGUNDO TANQUE (Fig. 2.2)

Primera Posición 3/3

Segunda Posición 4/4

Tercera Posición 5/4

Cuarta Posición 6/5

Y, las relaciones de reflujo interno quedaron definidas como: 0.8512, 0.5000 y 0.2422 representando, cada

una, la relación existente entre el caudal en la recirculación y el caudal de alimentación (parámetro "b" de la ecuación de flujo del modelo "L" de Levenspiel), con caudales de 1.230, 0.7225 y 0.350 l/min., respectivamente.

2) Trabajar con los promedios de las dos pruebas repetitivas.

3) Mantener constantes durante el transcurso de cada una de las pruebas, los parámetros que a continuación se mencionan.

- a) Volúmenes de ambos tanques; V_1 y V_2
- b) Velocidad de flujo de alimentación; v_0
- c) Tiempo espacial global;
- d) Posiciones de ambos agitadores
- e) Posiciones de entrada del alimento y de salida del producto.
- f) Velocidades de agitación; v_1 y v_2
- g) Posición del reflujo interno
- h) Volumen y concentración de la sustancia trazadora V_c y C , al inyectar la señal.

4. Fijar el valor de teta (θ) máximo requerido para los propósitos de la investigación, quedando determinado como

5. Por tanto, el tiempo máximo es igual a $5T$.

5. Distribuir la escala de tiempos de muestreo.

Resumen de las Condiciones
de Operación

$$\begin{aligned}
 V_1 &= 31.7 \text{ l.} & V_1 &= 605 \text{ rpm} \\
 V_2 &= 15.8 \text{ l.} & V_2 &= 471 \text{ rpm} \\
 v_o &= 1.445 \text{ l/min.} & V_c &= 50 \text{ ml} \\
 T &= 32.87 \text{ min.} & C &= 2 \text{ gr/l.}
 \end{aligned}$$

Relación de reflujo; $b = \frac{v_R}{v}$	Caudal del reflujo; l/min	T_2 , min	T_2 / T_{global}
0.8512	1.2300	12.845	0.391
0.5000	0.7225	21.853	0.665
0.2422	0.3500	45.143	1.373

POSICIONES DE ENTRADA DEL ALIMENTO DEL PRIMER TANQUE
AL SEGUNDO

- 3/3 Primera posición
- 4/4 Segunda posición
- 5/4 Tercera posición
- 6/5 Cuarta posición
- 7/6 Reflujo interno

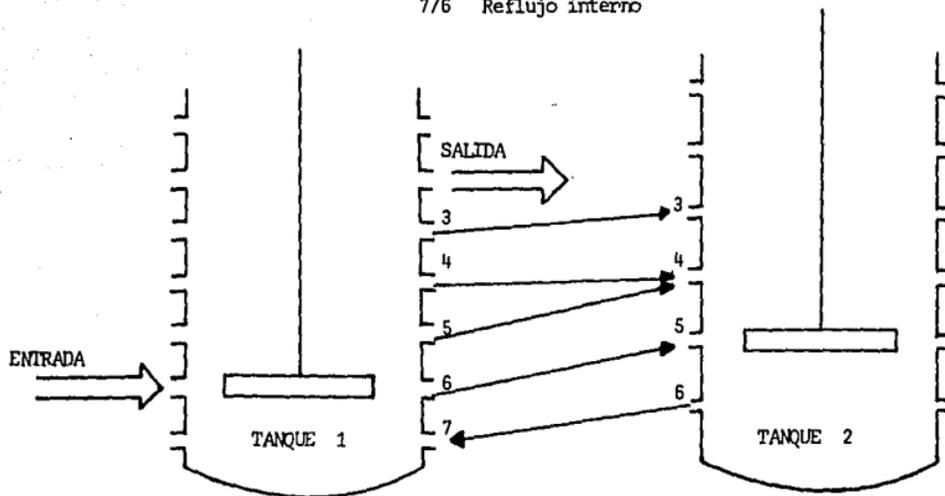


Fig. 2.2

Capítulo III
RESULTADOS OBTENIDOS

Valores experimentales constantes en nuestro caso, que influyen en la ecuación teórica del modelo "L" de Levenspiel

$$V_1 = 31.7 \text{ l.}$$

$$V_2 = 15.8 \text{ l.}$$

$$d = V_1/V_2 = 0.6674$$

$$v_0 = 1.445 \text{ l/min.}$$

Las ecuaciones teóricas de la DTR para el modelo de flujo "L" de Levenspiel (Ec. 1.1), con las diferentes relaciones de reflujo ("b") utilizadas dan:

a) $b = 0.8512$
$$E_e = 0.7048 e^{-0.8566e} + 0.7936 e^{-4.4763e} \quad \text{Ec. III.1}$$

b) $b = 0.5000$
$$E_e = 0.5014 e^{-0.7509e} + 0.9971 e^{-2.999e} \quad \text{Ec. III.2}$$

c) $b = 0.2422$
$$E_e = 0.1943 e^{-5297e} + 1.3039 e^{-2.0597e} \quad \text{Ec. III.3}$$

Experimentalmente se obtuvo la absorbancia promedio del trazador en el sistema para cada una de las pruebas, para lo cual se agitaron ambos tanques el tiempo suficiente hasta tener una lectura constante de dicha absorbancia. Se observó que, conforme iba pasando el tiempo de la investigación esta absorbancia promedio fue disminuyendo debido muy probablemente al envejecimiento del colorante. La curva resultante de este envejecimiento está representada en la figura 3.1.

Se calcularon enseguida los valores de la DTR y de e , en cada punto de la prueba, mediante:

$$Ee = \frac{\text{Abs}}{\overline{\text{Abs}}} \quad e = \frac{t}{T}$$

donde:

Abs: Lectura de la absorbancia en cada punto de muestreo

$\overline{\text{Abs}}$: Lectura de la absorbancia promedio del sistema

t: Tiempo transcurrido entre cada muestra

T: Tiempo espacial global del sistema

e: Tiempo adimensional para cada muestra

Ee: Función de la DTR adimensional

Se realizó la prueba estadística bimestral de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov a las dos réplicas de cada prueba, para tener la certeza de su repetibilidad.

Una vez no rechazada la hipótesis de igualdad de esta prueba, se utilizan los valores promedios para desarrollar las demás pruebas estadísticas.

Las DTR tanto teóricas del modelo "L" de Levenspiel y del modelo de mezcla perfecta, como experimentales, se representan en las gráficas, dándoles el orden que a continuación se indica:

Figura	Relación de reflujo	Posición de entrada	Posición de salida	Datos tabla #
3.2	0.8512	3/3	7/6	A4.2
3.3	0.8512	4/4	7/6	A4.2
3.4	0.8512	5/4	7/6	A4.2
3.5	0.8512	6/5	7/6	A4.2
3.6	0.5000	3/3	7/6	A4.3
3.7	0.5000	4.4	7/6	A4.3
3.8	0.5000	5/4	7/6	A4.3
3.9	0.5000	6/5	7/6	A4.3
3.10	0.2422	3/3	7/6	A4.4
3.11	0.2422	4/4	7/6	A4.4
3.12	0.2422	5/4	7/6	A4.4
3.13	0.2422	6/5	7/6	A4.4

Ver tablas en el apéndice N° 4.

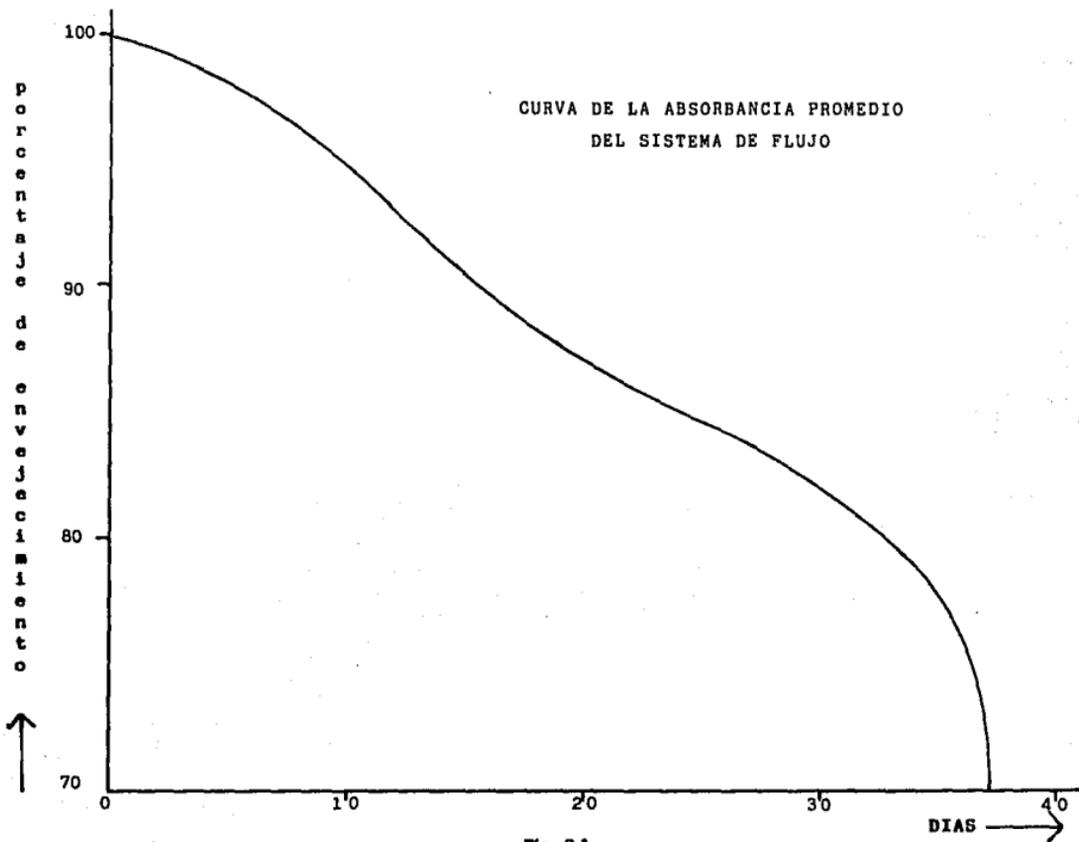


Fig. 3-1

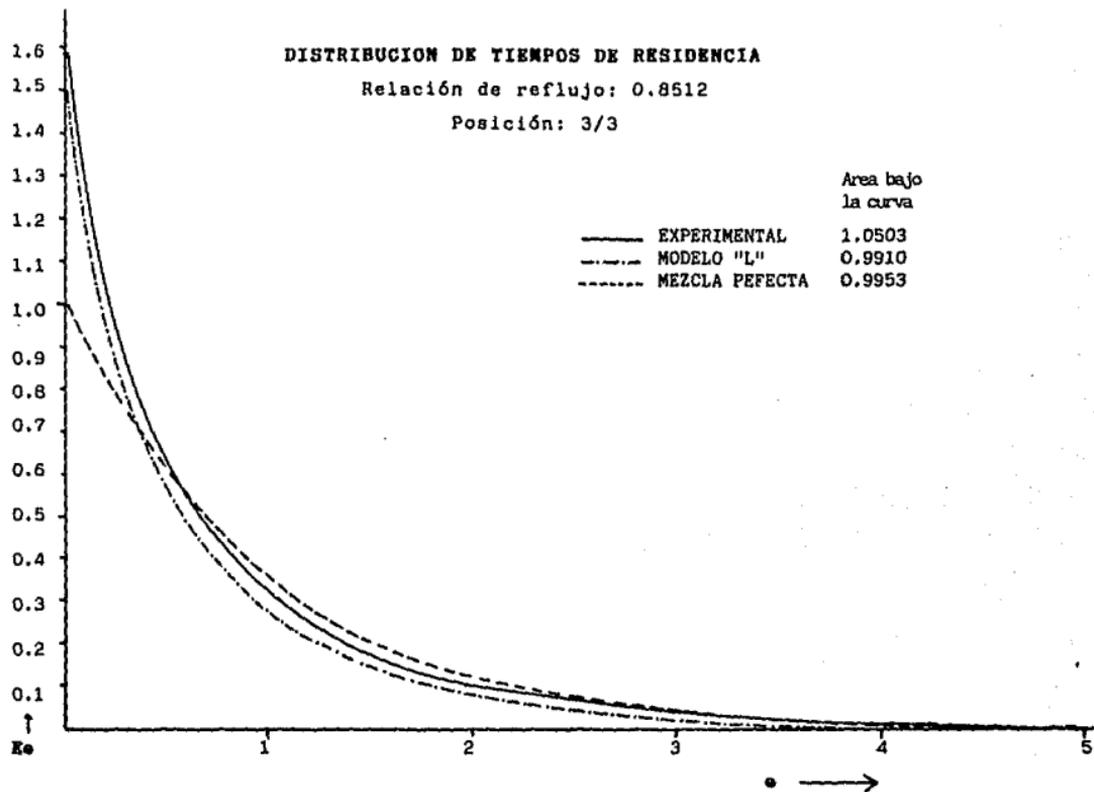


Fig. 3.2

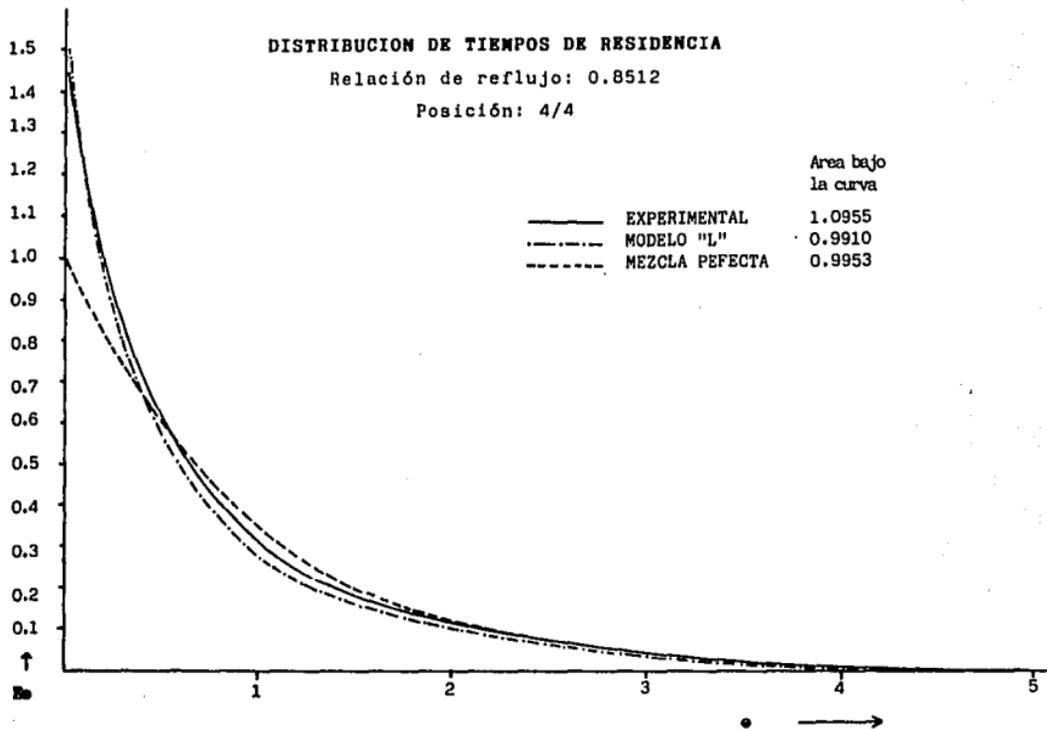


Fig. 3.3

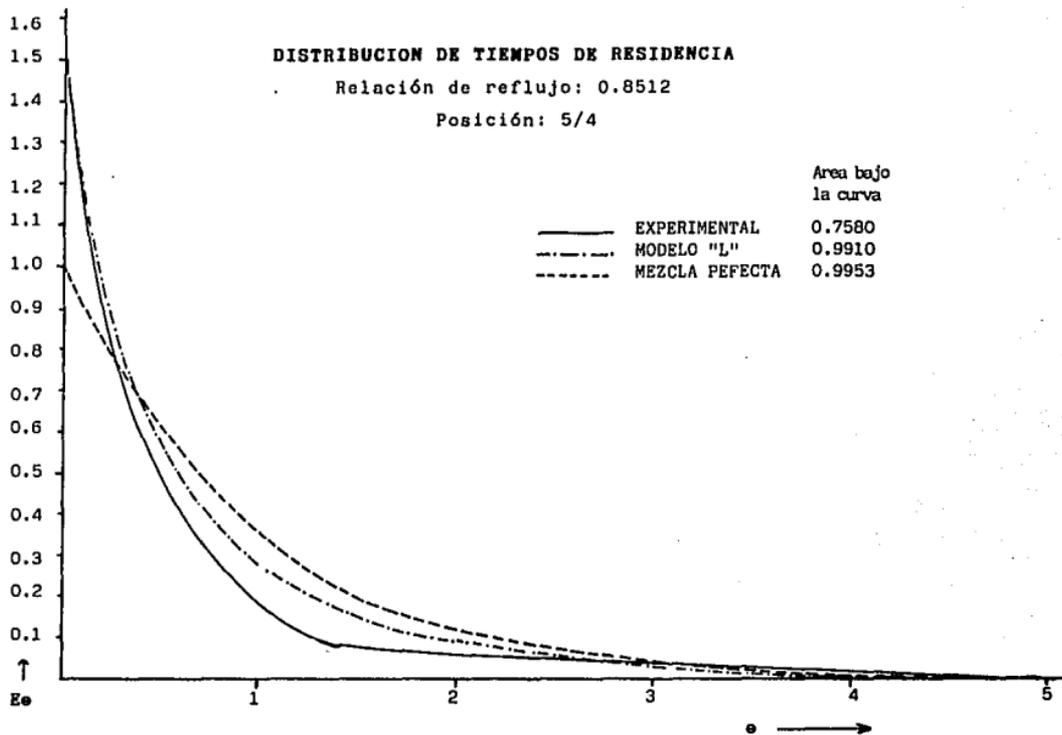


Fig. 3.4

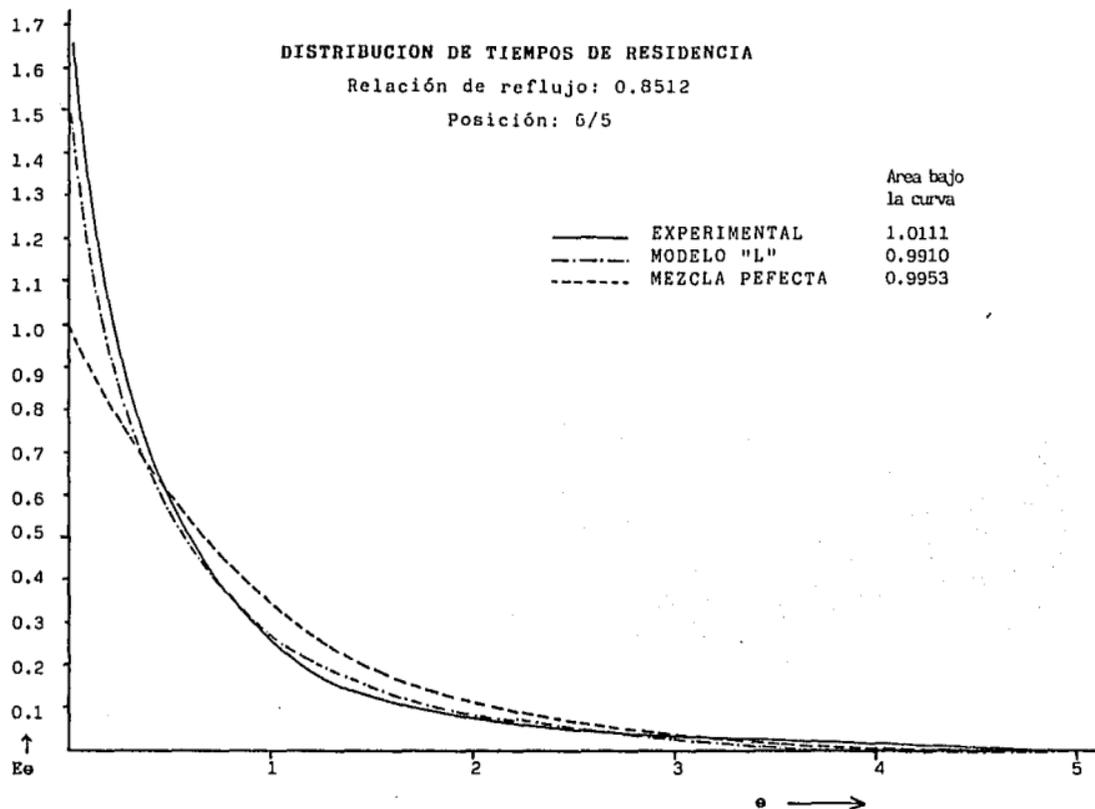


Fig. 3.5

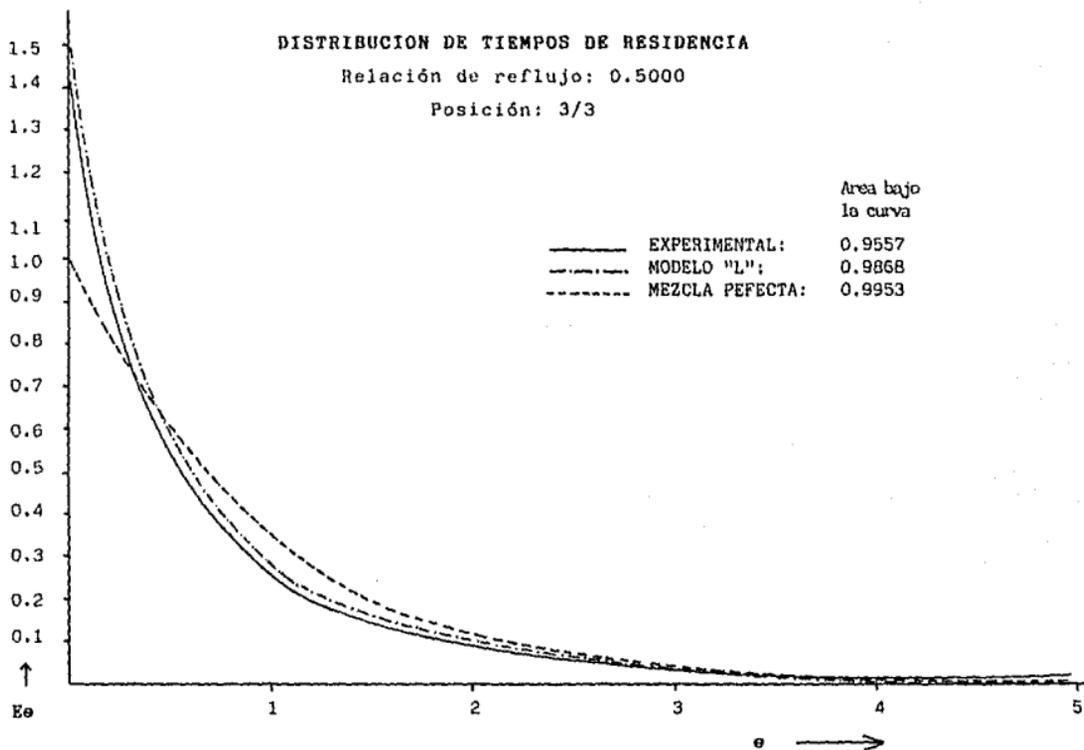


Fig. 3.6

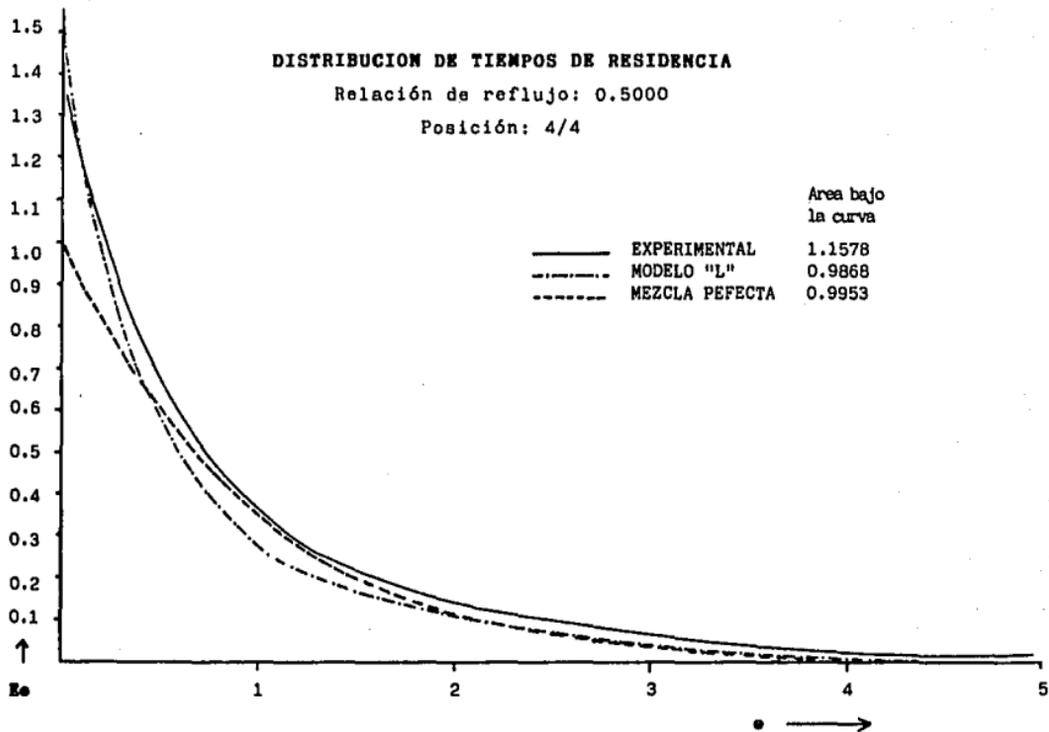


Fig. 3.7

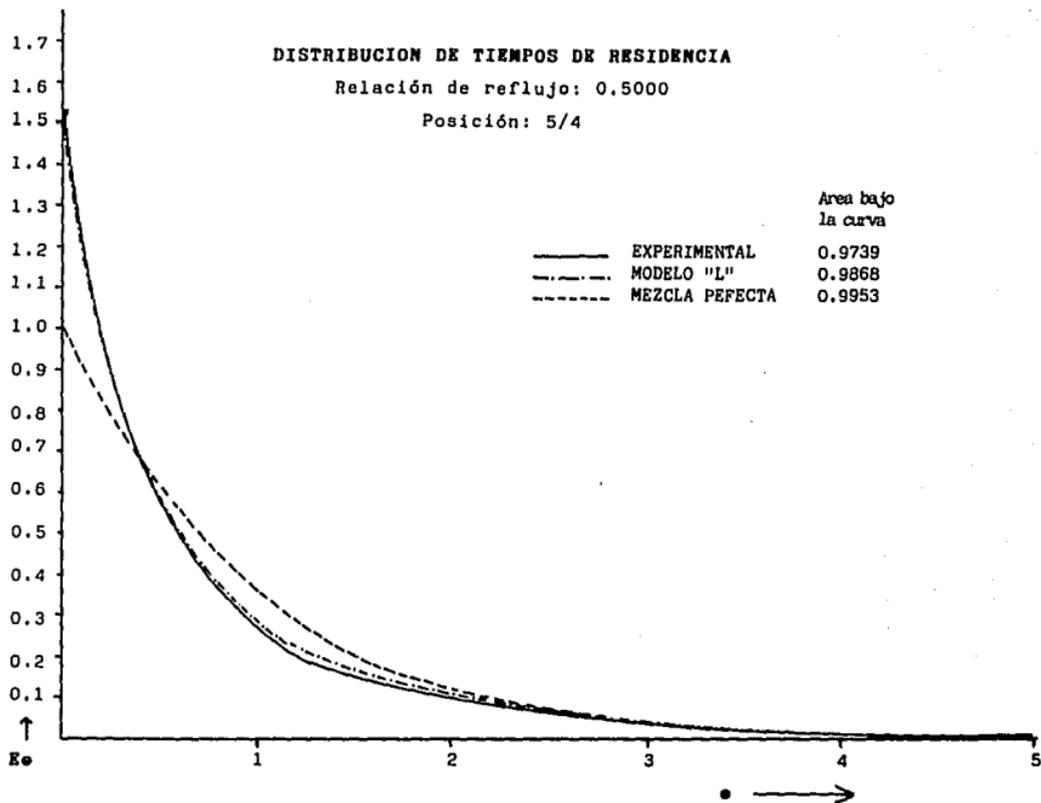


Fig. 3.8

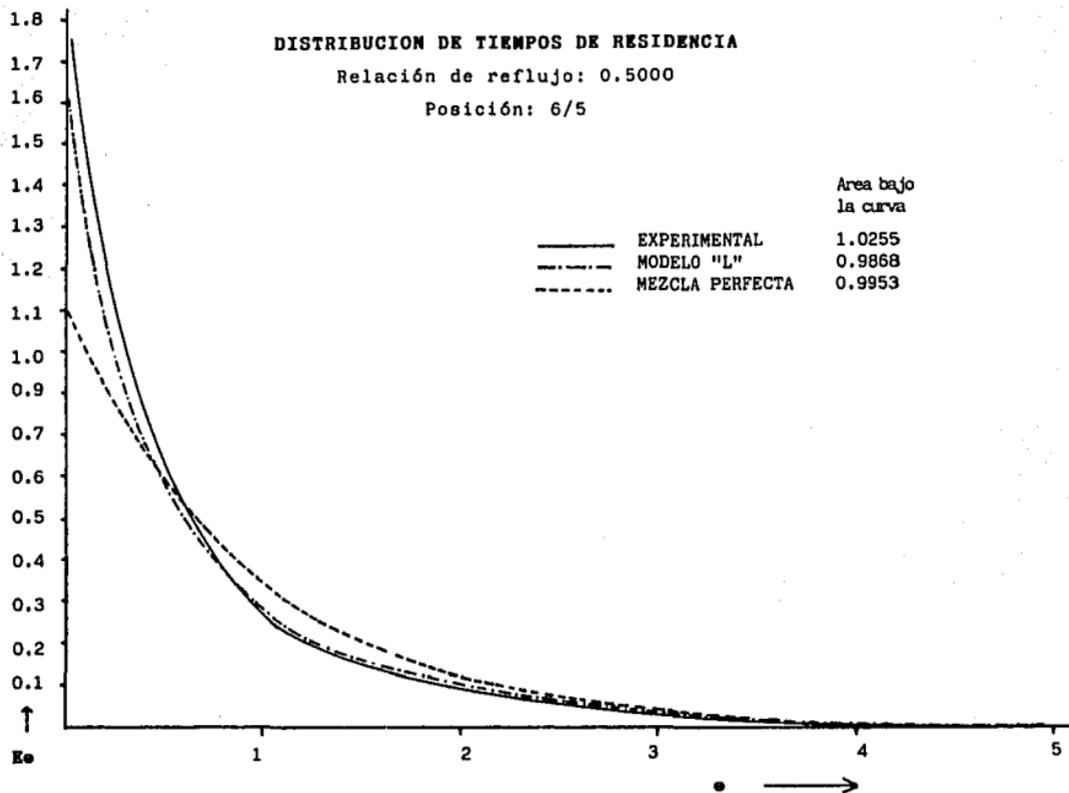


Fig. 3.9

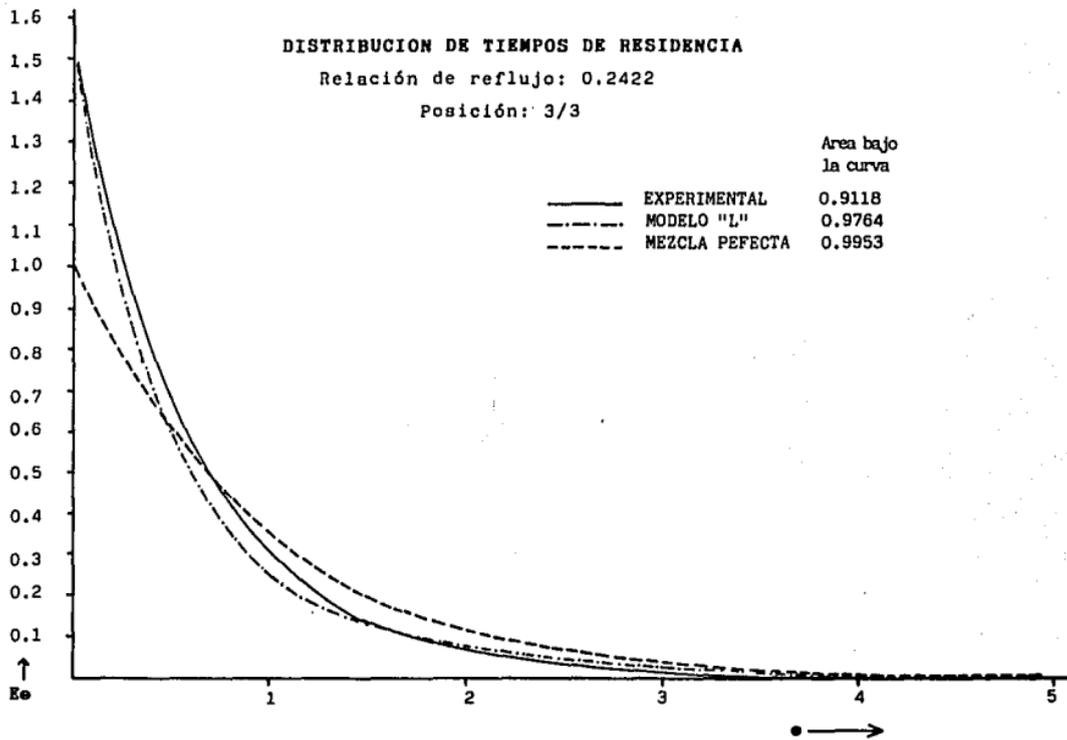


Fig. 3.10

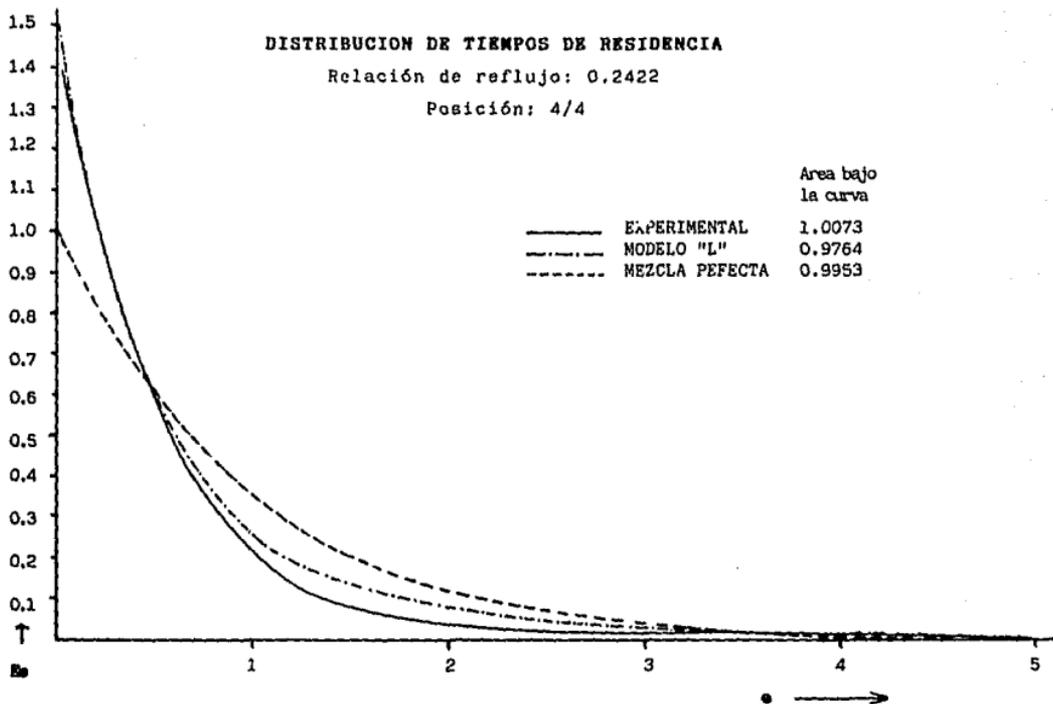


Fig. 3.11

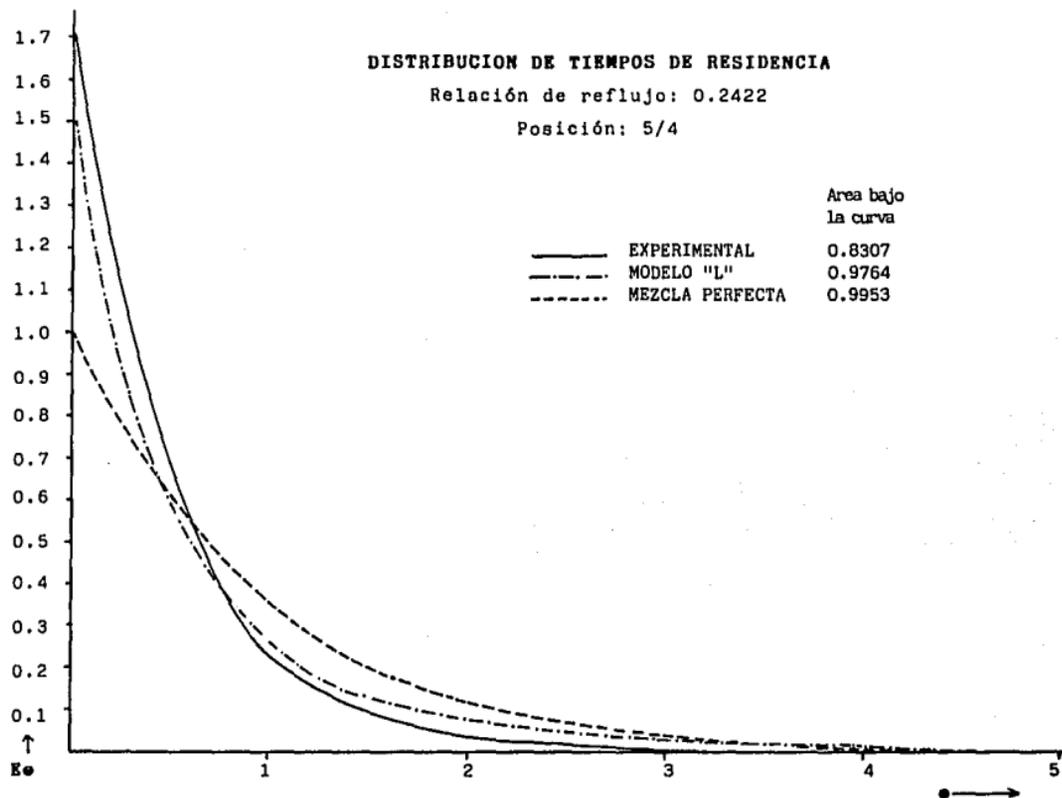


Fig. 3.12

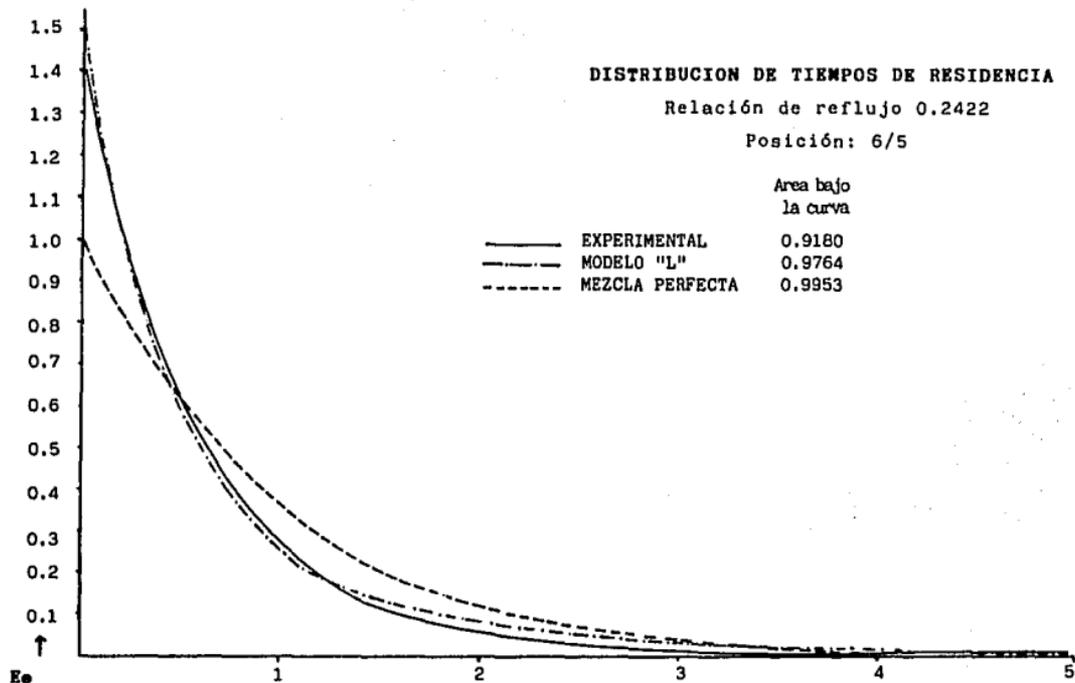


Fig. 3.13

Capítulo IV

TRATAMIENTO ESTADISTICO DE LOS DATOS

En este capítulo se manejarán estadísticamente los datos obtenidos experimentalmente, para poder con ésto analizar los resultados que se obtengan a partir de este tratamiento.

Para ello, es necesario llevar a cabo una prueba estadística, con la cual se pueda concluir sobre el comportamiento de tanques reales con agitación.

Las pruebas estadísticas existentes para este fin son:

a) La Prueba bimuestral de Kolmogorov-Smirnov. Prueba mediante la cual se decide si se debe rechazar o no, la hipótesis de que dos distribuciones muestrales proceden de la misma población. Esta prueba fue utilizada para decidir sobre las dos réplicas de cada prueba experimental.

b) La Prueba estadística de Bondad de Ajuste de Kolmogorov. Prueba que es empleada para determinar de qué forma distribuciones teóricas se ajustan a distribuciones empíricas (distribuciones obtenidas a partir de datos muestrales). Esta prueba fue utilizada para comparar:

b.1) Los valores experimentales con los teóricos del modelo "L" de Levenspiel.

b.2) Los valores teóricos del modelo "L" con los teóricos del modelo de mezcla perfecta.

b.3) Los valores experimentales con los teóricos del modelo de mezcla perfecta.

El estadístico de estas pruebas es el valor máximo de la diferencia existente entre las frecuencias acumuladas de las dos distribuciones que se comparan. Los estadísticos de las pruebas se encuentran resumidos en las tablas 4.1 a 4.4, así como los valores críticos para rechazar o no la hipótesis nula de las pruebas estadísticas.

VALORES ESTADISTICOS DE LA PRUEBA BIMESTRAL
PARA LAS DOS REPLICAS DE CADA PRUEBA

Relación de Reflujo	P O S I C I O N E S			
	3/3	4/4	5/4	6/5
0.8512	0.0110	0.0158	0.1032	0.0608
0.5000	0.0114	0.0338	0.0193	0.0444
0.2422	0.0612	0.0118	0.0209	0.0303

TABLA 4-1

VALORES CRITICOS DE LA PRUEBA ESTADISTICA A DIFERENTES
NIVELES DE SIGNIFICANCIA (α .) Ref.

α	a
0.20	0.1280
0.10	0.1460
0.05	0.1624
0.02	0.1812
0.01	0.1944

PRUEBA DE KOLMOGOROV PARA COMPARAR LOS VALORES EXPERIMENTALES
CON LOS VALORES TEORICOS DEL MODELO L

Relación de Reflujo		P O S I C I O N E S			
		3/3	4/4	5/4	6/5
0.8512	a ₁	0.0634	0.1668*	0.0325	0.0869
	a ₂	0.0771	0.1552	0.0356	0.0645
0.5000	a ₁	0.0760	0.1226	0.2427*	0.0702
	a ₂	0.0701	0.1163	0.2507*	0.0502
0.2422	a ₁	0.0698	0.0536	0.1457	0.0656
	a ₂	0.0780	0.0398	0.1461	0.0584

* Valores estadísticos superiores a los críticos, con un nivel de significancia α de 0.05

TABLA 4-2

PRUEBA DE KOLMOGOROV PARA COMPARA LOS VALORES TEORICOS DE
LOS MODELOS L DE LEVENSPIEL Y MEZCLA PEFECTA

Relación de Reflujo	E S T A D I S T I C O S	
	a_1	a_2
0.8512	0.0585	0.0490
0.5000	0.0760	0.0497
0.2422	0.0991	0.0657

TABLA 4-3

PRUEBA DE KOLMOGOROV PARA COMPARAR LOS VALORES EXPERIMENTALES
Y TEORICOS DEL MODELO DE MEZCLA PERFECTA

Relación de Reflujo		P O S I C I O N E S			
		3/3	4/4	5/4	6/5
0.8512	a_1	0.0755	0.1625*	0.0632	0.1096
	a_2	0.0900	0.1509	0.0683	0.0794
0.5000	a_1	0.1105	0.1088	0.2585*	0.1334
	a_2	0.0834	0.1044	0.2672*	0.1004
0.2422	a_1	0.0993	0.1374	0.1646*	0.1530
	a_2	0.1045	0.1105	0.1650*	0.1254

* Valores estadísticos superiores a los críticos con un nivel de significancia α de 0.05

TABLA 4-4

ANALISIS DE LOS RESULTADOS ESTADISTICOS

En este capítulo se analizarán estadísticamente los resultados obtenidos del estudio de la DTR en nuestro sistema de flujo conformado por dos zonas de agitación y un reflujo interno.

Analizando por parte, tenemos que:

1. Las réplicas de cada una de las pruebas son consistentes entre sí. Esto se comprueba mediante la prueba estadística para distribuciones muestrales de Kolmogorov-Smirnov queriendo ésto decir, que, en cualquier momento es posible repetir el experimento bajo iguales condiciones y siempre se obtendrán resultados muy parecidos a los actuales.

2. En las posiciones 4/4 y 5/4, el modelo de flujo experimental se desvía tanto del modelo "L" de Levenspiel como del modelo de Mezcla perfecta, cuando las relaciones de reflujo son 0.8512 y 0.5000 respectivamente. La comprobación estadística de este punto se realizó con el rechazo de la hipótesis de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov.

Analizando la curva de distribución experimental de la posición 4/4 y relación de reflujo de 0.8512 podemos observar que durante gran parte del tiempo de la prueba ex-

perimental, la desviación existente con respecto a ambos modelos teóricos es positiva (es decir, se encuentra por arriba de la curva teórica), significando muy probablemente la "presencia de cortos circuitos" de flujo en el sistema, que impiden la homogeneidad de la sustancia trazadora, provocando que ésta salga casi inmediatamente, después de la señal inyectada, antes de poder incorporarse al sistema de flujo. Además podemos observar que el área bajo la curva sobrepasa a la unidad o sea que cuando e (teta) llegó a 2.3 es decir, mucho antes del tiempo considerado, toda la sustancia trazadora ya había salido del sistema, reafirmando la idea de la existencia de cortos circuitos.

Realizando un análisis similar de curvas de distribución podemos pensar, en el caso de la posición 5/4 y una relación de reflujo de 0.5000, las desviaciones presentes se deben al efecto contrario a un corto circuito, es decir debido a "zonas estancadas". Esto puede afirmarse debido a que el área bajo la curva experimental no se acerca a la unidad, significando que a pesar de tener un largo tiempo de corrida, la cantidad de sustancia trazadora inyectada no ha salido en su totalidad. En este caso la desviación de la curva experimental con respecto a las curvas teóricas es negativa (es decir, se encuentra por debajo de la curva teórica).

3. Existe también el rechazo de la hipótesis de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov, en comparación

de la distribución experimental con la del modelo de Mezcla perfecta en la posición 5/4 con una relación de reflujo de 0.2422.

Analizando este punto, se puede pensar que cuando la posición de entrada del primer tanque al segundo se encuentra muy próxima a la zona en la cual se forman remolinos de gran fuerza provocados por la agitación en el segundo tanque el modelo de flujo experimental sufre una gran desviación de la idealidad representada por el modelo de flujo de Mezcla.

4. La influencia de la variables "Posición" es siempre más importante que la influencia de la variable "Relación de Reflujo" en el comportamiento real del modelo de flujo, ya que en las posiciones más cercanas físicamente al nivel de agitación, ocurren más frecuentemente las desviaciones con respecto al comportamiento ideal del modelo de flujo, no importando la relación de reflujo utilizada.

5. Las ecuaciones teóricas del modelo "L" de Levenspiel, con los rangos probados de relación de reflujo, se ajustan a la ecuación del modelo de Mezcla perfecta, es decir, estadísticamente se asegura que el comportamiento ideal de ambos modelos es el mismo, sin influir en absoluto la variable Relación de Reflujo o parámetro "b" de la ecuación del modelo de flujo "L" de Livenspiel.

6. En las posiciones 3/3 y 6/5, y con cualquier relación de reflujo, el sistema de flujo real logra tener una

muy buena agitación y por lo tanto también gran homogeneidad o distribución de las partículas, con lo que se obtiene una mayor cercanía tanto hacia el modelo "L" de Levenspiel como hacia el modelo de Mezcla perfecta.

CONCLUSIONES

Para el sistema de flujo conformado por dos zonas de agitación y un reflujo interno, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- a) La variable de mayor influencia (de entre las dos probadas), es la "Posición de entrada de alimentos del primer tanque al segundo".
- b) En el rango de relación de reflujo probado, el modelo de Mezcla perfecta puede representar, teórica y estadísticamente, al modelo de flujo "L" de Levenspiel.
- c) El modelo de flujo experimental no se ajusta al modelo de mezcla perfecta en las posiciones 4/4 con relación de reflujo 0.8512, y, 5/4 con relación de reflujo de 0.5000 y 0.2422.
- d) El modelo de flujo experimental no sigue el comportamiento ideal del modelo "L" de Levenspiel en las posiciones 4/4 y 5/4, cuando las relaciones de reflujo son de 0.8512 y 0.5000 respectivamente.

Se sugiere realizar investigaciones de este tipo, cambiando variables que se supongan influyentes en el modelo de flujo, a fin de contribuir con un granito de arena

en el estudio de los modelos de flujo reales con agitación.

APENDICE I

PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE DE KOLMOGOROV

Basándose en la ley de Kolmogorov relativa a las diferencias entre las frecuencias acumuladas para los valores de una muestra (frecuencias observadas) respecto a las probabilidades acumuladas correspondientes de la función de distribución de la variable continua considerada (frecuencias esperadas), se ha propuesto recientemente una prueba de legitimidad de ajuste.

Esta prueba es apropiada para distribuciones continuas únicamente y se aplica cuando se quiere una comparación del ajuste entre una curva teórica y una curva experimental.

La hipótesis a probar es que cierta función $F_t(x)$ es la función de distribución de una población de la que se han tomado muestras $x_1 \dots x_n$, con una distribución $F_s(x)$.

Los pasos a seguir para desarrollar esta prueba estadística son:

1. Calcular los valores de la función de distribución $F_s(x)$ de la muestra $x_1 \dots x_n$.
2. Determinar los estadísticos a_1 y a_2 para medir la diferencia entre las curvas ajustadas, siendo éstos:

$$a_1 = \max_x \left| F_S(x)_z - F_t(x)_z \right|$$

$$a_2 = \max \left| F_t(x)_z - F_S(x)_{z-1} \right|$$

en donde:

$F_S(x)_z$ son las frecuencias acumuladas relativas a cada uno de los valores x de la muestra de tamaño n .

$F_t(x)$ son las probabilidades acumuladas teóricas para los mismos valores.

z representa el número de la muestra.

$z-1$ representa el número de la muestra anterior a z .

Por lo tanto, los estadísticos a_1 y a_2 , representan dos longitudes absolutas de las desviaciones verticales y horizontales entre las dos funciones acumuladas.

3. Escoger un nivel de significancia o riesgo.

4. Determinar la solución c de la ecuación:

$$P(A \leq c) = 1 - \alpha$$

Kolmogorov y Smirnov probaron que la distribución de a es independiente de la forma de $F_t(x)$, y es la misma para todas las distribuciones continuas.

5. Si $a_1, a_2 \leq c$ no se rechaza la hipótesis

Si $a_1, a_2 > c$ se rechaza la hipótesis.

PRUEBA BIMUESTRAL DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

El problema de dos muestras consistentes en decidir si se puede aceptar la hipótesis de que ambas proceden de la misma población, viene resuelto por la prueba bimuestral de Kolmogorov-Smirnov.

Esta muestra es uno de los procedimientos no paramétricos o de distribución libre, con los que contamos para comparar dos distribuciones muestrales.

El procedimiento en general es exactamente igual al de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov.

El valor estadístico a es ahora definido como:

$$a = \max_x \left| F_{B_1}(x) - F_{B_2}(x) \right|$$

en donde:

$F_{B_1}(x)$ es el ajuste de la curva de distribución experimental de la primera prueba.

$F_{B_2}(x)$ es el ajuste de la curva de distribución experimental de la segunda prueba.

a es la longitud absoluta de la desviación vertical entre las dos distribuciones acumuladas.

APENDICE 2

GENERALIDADES Y MANEJO DEL ESPECTROFOTOMETRO

El espectrofotómetro es la combinación de un espectroscopio y un fotómetro.

El espectroscopio, mediante un prisma o una red de difracción, produce luz de una longitud de onda determinada (color), por lo que se denomina generalmente monocromador.

El fotómetro mide la concentración de una solución coloreada (según la intensidad de la luz transmitida o absorbida) mediante una célula fotoeléctrica y un instrumento eléctrico registrador. La magnitud de esta medida es proporcional a la concentración en que se halla el componente que en la solución absorbe la luz.

Una solución coloreada absorbe especialmente los rayos luminosos de determinada longitud de onda o los correspondientes a una estrecha banda del espectro.

La Ley de Beer determina que el poder de absorción de una solución es directamente proporcional a la concentración del soluto coloreado.

La Ley de Bouguer, atribuida generalmente a Lambert, establece que, al atravesar la luz un medio absorbente homogéneo experimenta una reducción logarítmica en su

intensidad a medida que el espesor del medio aumenta aritméticamente. No existe, pues una proporción aritmética simple entre la absorción de la luz y la concentración del soluto coloreado, sino una relación logarítmica.

MANEJO DEL ESPECTROFOTOMETRO

Pasos a seguir para el buen manejo del espectrofotómetro:

1. Conectar el espectrofotómetro a la corriente eléctrica y esperar aproximadamente 15 min. antes de empezar a leer.
2. Seleccionar de acuerdo al tipo de trazador utilizado la longitud de onda adecuada, mediante la perilla correspondiente.
3. Llenar la celdilla del espectrofotómetro con el blanco de la solución y llevar el indicador al 100% de transmitancia, mediante otra perilla.
4. Llenar otra celdilla con la solución de la muestra coloreada y leer su valor de % de transmitancia.
5. Lavar la celdilla con un solvente adecuado para con ésto evitar la adherencia a las paredes del colorante y repetir los pasos 3 y 4 hasta leer todas las muestras.
6. Desconectar el aparato, si es que no se va a seguir utilizando.

7. Calcular el valor de la absorbancia de cada muestra mediante:

$$\text{ABSORBANCIA} = 2 - \log \text{"\% de transmitancia"}$$

APENDICE 3

EJEMPLOS DE LOS CALCULOS ESTADISTICOS

El fundamento de las pruebas estadísticas utilizadas en este trabajo, es la comparación entre distribuciones relativas acumuladas.

En nuestro caso, contamos con tres distribuciones, de las cuales dos son teóricas (modelos de mezcla perfecta y "L" de Levenspiel) y la otra es experimental.

La acumulación de cada una de estas distribuciones viene siendo la curva representativa adimensional de la concentración del trazador a la salida del recipiente, es decir F_e :

$$F_e = \int_0^e E_e dt$$

Debido a que contamos con distribuciones tanto teóricas como experimentales, que caen dentro del tipo de las distribuciones denominadas escalonadas, (continuas por partes) la acumulación se realiza de la siguiente manera:

$$F_e = \sum_{t=0}^e E_e \Delta t$$

en donde:

E_n es el valor de la función en cada punto de la prueba.

e es el incremento del tiempo adimensional entre una muestra y la siguiente.

Los cálculos realizados para la prueba bimuestral de Kolmogorov-Smirnov están representadas en las tabla A y B tomando para éstos, los valores experimentales obtenidos de la prueba cuya posición fue 3/3 y cuya relación de reflujo, 0.8512.

Las tablas C, D y E indican los cálculos de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov para las distribuciones acumuladas de los modelos "L" de Levenspiel y experimental; mezcla perfecta y experimental; "L" de Levenspiel y mezcla perfecta, respectivamente.

CALCULOS PARA LA PRUEBA BIMESTRAL

TABLA A

 $(\overline{Abs} = 0.1955)$

α	Abs_1	Abs_2	E_{α_1}	E_{α_2}
0.0000	0.0022	0.0022	0.0113	0.0113
0.0152	0.3029	0.2894	1.5442	1.4803
0.0304	0.3098	0.3121	1.5847	1.5964
0.0456	0.2882	0.2925	1.4742	1.4862
0.0608	0.2848	0.2878	1.4568	1.4721
0.0760	0.2636	0.2698	1.3483	1.3801
0.0913	0.2596	0.2618	1.3279	1.3391
0.1065	0.2503	0.2546	1.2803	1.3023
0.1217	0.2366	0.2424	1.2102	1.2399
0.1369	0.2255	0.2298	1.1535	1.1754
0.1521	0.2219	0.2275	1.1350	1.1637
0.1825	0.2204	0.2208	1.1274	1.1294
0.2130	0.2083	0.2178	1.0655	1.1141
0.2434	0.1952	0.1966	0.9985	1.0056
0.2738	0.1838	0.1863	0.9402	0.9529
0.3042	0.1746	0.1761	0.8931	0.9008
0.3651	0.1524	0.1531	0.7795	0.7831
0.4259	0.1427	0.1427	0.7299	0.7299
0.4868	0.1308	0.1315	0.6691	0.6726
0.5476	0.1192	0.1193	0.6097	0.6102
0.6084	0.1051	0.1046	0.5376	0.5350
0.6693	0.1024	0.1010	0.5238	0.5166
0.7301	0.0942	0.0909	0.4818	0.4650
0.7910	0.0862	0.0849	0.4409	0.4343
0.8510	0.0711	0.0711	0.3637	0.3637
0.9127	0.0615	0.0638	0.3146	0.3263
1.0648	0.0555	0.0555	0.2839	0.2839
1.2169	0.0458	0.0458	0.2343	0.2343
1.3690	0.0410	0.0404	0.2097	0.2066
1.5211	0.0339	0.0345	0.1734	0.1765
1.6732	0.0306	0.0314	0.1565	0.1606
1.8254	0.0273	0.0272	0.1396	0.1391
1.9775	0.0246	0.0246	0.1258	0.1258
2.2817	0.0177	0.0177	0.0905	0.0905
2.5859	0.0132	0.0144	0.0675	0.0737
2.8902	0.0123	0.0115	0.0629	0.0588
3.1944	0.0110	0.0105	0.0563	0.0537
3.4986	0.0088	0.0088	0.0450	0.0450
3.8028	0.0066	0.0061	0.0338	0.0312
4.1071	0.0048	0.0036	0.0246	0.0184
4.4113	0.0022	0.0017	0.0113	0.0087
4.7155	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5.0198	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

CONTINUACION DE LA PRUEBA BIMESTRAL

TABLA B

e	Fe ₂	Fe	Fe ₂	Fe	a
0.0000	0.0113	0.0113	0.0000	0.0000	0.0000
0.0152	1.4803	1.5123	0.0113	0.0116	0.0003
0.0304	1.5964	1.5906	0.0347	0.0352	0.0005
0.0456	1.4962	1.4852	0.0582	0.0586	0.0004
0.0608	1.4721	1.4645	0.0808	0.0810	0.0002
0.0760	1.3801	1.3642	0.1025	0.1025	0.0000
0.0913	1.3391	1.3391	0.1231	0.1231	0.0000
0.1065	1.3123	1.2913	0.1427	0.1430	0.0003
0.1217	1.2399	1.2251	0.1620	0.1622	0.0002
0.1369	1.1754	1.1645	0.1803	0.1802	0.0001
0.1521	1.1637	1.1494	0.1981	0.1978	0.0003
0.1825	1.1294	1.1294	0.2334	0.2329	0.0005
0.2130	1.1141	1.0898	0.2677	0.2668	0.0009
0.2434	1.0056	1.0021	0.3001	0.2988	0.0013
0.2738	0.9529	0.9466	0.3301	0.3287	0.0014
0.3042	0.9008	0.8970	0.3584	0.3569	0.0015
0.3651	0.7831	0.7813	0.4096	0.4079	0.0017
0.3259	0.7299	0.7299	0.4556	0.4538	0.0018
0.4868	0.7826	0.6709	0.4983	0.4964	0.0019
0.5476	0.6102	0.6100	0.5373	0.5353	0.0020
0.6084	0.5350	0.5363	0.5721	0.5702	0.0019
0.6693	0.5166	0.5202	0.6040	0.6023	0.0017
0.7301	0.4650	0.4734	0.6339	0.6325	0.0014
0.7910	0.4343	0.4376	0.6612	0.6602	0.0010
0.8510	0.3637	0.3637	0.6855	0.6846	0.0009
0.9127	0.3263	0.3204	0.7065	0.7054	0.0011
1.0658	0.2834	0.2837	0.7528	0.7513	0.0015
1.2169	0.2343	0.2343	0.7922	0.7907	0.0015
1.3690	0.2066	0.2082	0.8257	0.8244	0.0013
1.5211	0.1765	0.1750	0.8548	0.8535	0.0013
1.6732	0.1606	0.1586	0.8805	0.8789	0.0016
1.8254	0.1391	0.1394	0.9032	0.9015	0.0017
1.8775	0.1258	0.1258	0.9234	0.9217	0.0017
2.9817	0.0905	0.0905	0.9565	0.9546	0.0019
2.5859	0.0737	0.0706	0.9813	0.9791	0.0022
2.8902	0.0588	0.0609	1.0014	0.9991	0.0023
3.1944	0.0537	0.0550	1.0100	1.0167	0.0067
3.4986	0.0450	0.0450	1.0250	1.0344	0.0094
3.8028	0.0312	0.0325	1.0366	1.0462	0.0096
4.1071	0.0184	0.0215	1.0441	1.0544	0.0103
4.4113	0.0087	0.0100	1.0482	1.0592	0.0110
4.7155	0.0000	0.0000	1.0482	1.0592	0.0110
5.0198	0.0000	0.0000	1.0482	1.0592	0.0110

CALCULOS PARA LA PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE

TABLA C (Distribuciones modelo L - experimental)

e	F_{eL}	$\overline{F_e}$	a_1	a_2
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0224
0.0152	0.0224	0.0116	0.0108	0.0324
0.0304	0.0440	0.0352	0.0088	0.0298
0.0456	0.0650	0.0586	0.0064	0.0266
0.0608	0.0852	0.0810	0.0042	0.0238
0.0760	0.1048	0.1025	0.0023	0.0213
0.0913	0.1238	0.1230	0.0008	0.0191
0.1065	0.1421	0.1430	0.0009	0.0169
0.1217	0.1599	0.1622	0.0023	0.0149
0.1369	0.1771	0.1802	0.0031	0.0135
0.1521	0.1937	0.1978	0.0041	0.0280
0.1825	0.2258	0.2329	0.0071	0.0230
0.2130	0.2559	0.2668	0.0109	0.0174
0.2434	0.2842	0.2988	0.0146	0.0121
0.2738	0.3109	0.3287	0.0178	0.0074
0.3042	0.3361	0.3569	0.0208	0.0252
0.3651	0.3821	0.4079	0.0258	0.0155
0.4259	0.4234	0.4538	0.0304	0.0067
0.4868	0.4605	0.4964	0.0359	0.0023
0.5476	0.4941	0.5353	0.0412	0.0107
0.6084	0.5246	0.5702	0.0456	0.0178
0.6693	0.5524	0.6024	0.0499	0.0244
0.7301	0.5779	0.6325	0.0546	0.0312
0.7910	0.6013	0.6602	0.0589	0.0372
0.8510	0.6230	0.6846	0.0616	0.0416
0.9127	0.6430	0.7054	0.0624	0.0180
1.0648	0.6874	0.7513	0.0639	0.0264
1.2169	0.9249	0.7907	0.0658	0.0336
1.3690	0.7671	0.8244	0.0673	0.0395
1.5211	0.7849	0.8535	0.0686	0.0443
1.6732	0.8092	0.9889	0.0697	0.0483
1.8254	0.8306	0.9015	0.0709	0.0521
1.9795	0.8494	0.9217	0.0723	0.0407
2.2817	0.8810	0.9546	0.0736	0.0487
2.5859	0.9059	0.9791	0.0732	0.0534
2.8902	0.9257	0.9991	0.0734	0.0577
3.1944	0.9414	1.0167	0.0754	0.0629
3.4986	0.9538	1.0344	0.0806	0.0707
3.8028	0.9637	1.0462	0.0825	0.0746
4.1071	0.9716	1.0544	0.0828	0.0765
4.4113	0.9779	1.0592	0.0813	0.0763
4.7155	0.9829	1.0592	0.0763	0.0724
5.0198	0.9868	1.0592	0.0724	

CALCULOS PARA LA PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE

TABLA D (Distribuciones mezcla perfecta-experimental)

e	F_{eMP}	\bar{F}_e	a_1	a_2
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0151
0.0152	0.0151	0.0116	0.0035	0.0183
0.0304	0.0299	0.0352	0.0053	0.0094
0.0456	0.0446	0.0586	0.0140	0.0004
0.0608	0.0590	0.0810	0.0220	0.0090
0.0760	0.0732	0.1025	0.0293	0.0153
0.0913	0.0872	0.1230	0.0358	0.0221
0.1065	0.1009	0.1430	0.0421	0.0285
0.1217	0.1145	0.1622	0.0477	0.0343
0.1369	0.1279	0.1802	0.0523	0.0392
0.1521	0.1410	0.1978	0.0568	0.0309
0.1675	0.1669	0.2329	0.0660	0.0409
0.2130	0.1920	0.2668	0.0748	0.0504
0.2434	0.2164	0.2988	0.0824	0.0588
0.2738	0.2400	0.3287	0.0887	0.0658
0.3042	0.2629	0.3569	0.0940	0.0504
0.3651	0.3065	0.4079	0.1014	0.0661
0.4259	0.3474	0.4538	0.1064	0.0678
0.4868	0.3860	0.4964	0.1104	0.0742
0.5476	0.4222	0.5353	0.1131	0.0790
0.6084	0.4563	0.5702	0.1139	0.0817
0.6693	0.4885	0.6023	0.1138	0.0836
0.7301	0.5187	0.6325	0.1138	0.0854
0.7910	0.5471	0.6602	0.1131	0.0863
0.8510	0.5739	0.6846	0.1107	0.0856
0.9127	0.5990	0.7054	0.1064	0.0496
1.0648	0.6558	0.7513	0.0955	0.0468
1.2169	0.7045	0.7907	0.0862	0.0443
1.3690	0.7464	0.8244	0.0780	0.0420
1.5211	0.7824	0.8535	0.0711	0.0402
1.6732	0.8133	0.8789	0.0656	0.0391
1.8254	0.8398	0.9015	0.0617	0.0389
1.9775	0.8626	0.9217	0.0591	0.0226
2.2817	0.8991	0.9546	0.0555	0.0285
2.5859	0.9261	0.9791	0.0530	0.0331
2.8902	0.9460	0.9991	0.0531	0.0384
3.1944	0.9607	1.0167	0.0560	0.0452
3.4986	0.9715	1.0344	0.0629	0.0549
3.8028	0.9795	1.0462	0.0667	0.0608
4.1071	0.9854	1.0594	0.0690	0.0646
4.4113	0.9898	1.0592	0.0694	0.0642
4.7155	0.9950	1.0592	0.0662	0.0639
5.0198	0.9953	1.0592	0.0639	

CALCULOS PARA LA PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE

TABLA E (Distribuciones modelo L - mezcla perfecta)

e	F_{eL}	F_{eMP}	a_1	a_2
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0151
0.0152	0.0224	0.0151	0.0073	0.0075
0.0304	0.0440	0.0299	0.0141	0.0006
0.0456	0.0650	0.0446	0.0206	0.0060
0.0608	0.0852	0.0590	0.0262	0.0120
0.0760	0.1048	0.0732	0.0316	0.0176
0.0913	0.1238	0.0872	0.0366	0.0229
0.1065	0.1421	0.1009	0.0412	0.1276
0.1217	0.1599	0.1145	0.0454	0.0320
0.1369	0.1771	0.1279	0.0492	0.0358
0.1521	0.1937	0.1411	0.0520	0.0271
0.1825	0.2258	0.1668	0.0590	0.0342
0.2130	0.2559	0.1917	0.1642	0.0400
0.2434	0.2842	0.2159	0.0683	0.0449
0.2738	0.3109	0.2394	0.0715	0.0487
0.3042	0.3361	0.2622	0.0739	0.0303
0.3651	0.3821	0.3057	0.0764	0.0354
0.4259	0.4234	0.3467	0.0767	0.0381
0.4868	0.4605	0.3852	0.0753	0.0390
0.5476	0.4941	0.4215	0.0726	0.0385
0.7084	0.5246	0.4556	0.0690	0.0368
0.6693	0.5524	0.4876	0.0647	0.0345
0.7301	0.5749	0.5179	0.0600	0.0314
0.7910	0.6013	0.5464	0.0549	0.0282
0.8510	0.6230	0.5731	0.0499	0.0246
0.9127	0.6430	0.5983	0.0447	0.0116
1.0648	0.6874	0.6550	0.0320	0.0160
1.2169	0.7249	0.7038	0.0211	0.0205
1.3690	0.7571	0.7457	0.0114	0.0242
1.5211	0.7849	0.7816	0.0033	0.0272
1.6732	0.8092	0.8125	0.0029	0.0295
1.8254	0.8306	0.8390	0.0082	0.0309
1.9775	0.8494	0.8618	0.0120	0.0487
2.2817	0.8810	0.8984	0.0172	0.0441
2.5859	0.9059	0.9254	0.0191	0.0391
2.8902	0.9257	0.9457	0.0194	0.0341
3.1944	0.9414	0.9600	0.0184	0.0292
3.4986	0.9538	0.9708	0.0168	0.0248
3.8028	0.9637	0.9788	0.0149	0.0208
4.1071	0.9716	0.9847	0.0129	0.0172
4.4113	0.9879	0.9890	0.0109	0.0141
4.9155	0.9829	0.9922	0.0091	0.0114
5.0198	0.9868	0.9946	0.0074	

APENDICE 4

DATOS DE LAS GRAFICAS DE LA DISTRIBUCION DE TIEMPOS DE RESIDENCIA

En la tabla A 4.1 se enlistaron en columnas los valores teóricos de la DTR de los modelos de mezcla perfecta y "L" de Levenspiel para las tres relaciones de reflujo con las cuales se desarrolló la investigación.

De la tabla A 4.2 a la A 4.4 se enlistaron los valores experimentales de la DTR para las relaciones de reflujo de 0.8512, 0.5000 y 0.2422 respectivamente y para las diferentes posiciones de entrada de alimento del primer tanque al segundo.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

TABLA A4-1

	b=0.8512	b=0.5000	b=0.2422	
σ	E_{σ_L}	E_{σ_L}	E_{σ_L}	$E_{\sigma_{MP}}$
0.0000	1.4984	1.4985	1.4982	1.0000
0.0152	1.4371	1.4484	1.4564	0.9849
0.0304	1.3794	1.4003	1.4160	0.9701
0.0456	1.3247	1.3541	1.3767	0.9554
0.0608	1.2735	1.3099	1.3385	0.9410
0.0760	1.2248	1.2674	1.3013	0.9268
0.0913	1.1792	1.2264	1.2655	0.9127
0.1065	1.1360	1.1873	1.2307	0.8990
0.1217	1.0953	1.1497	1.1970	0.8854
0.1369	1.0568	1.1137	1.1642	0.8721
0.1521	1.0204	1.0791	1.1325	0.8589
0.1825	0.9534	1.0139	1.0718	0.8332
0.2130	0.8933	0.9538	1.0146	0.8082
0.2434	0.8392	0.8980	0.9606	0.7840
0.2738	0.7905	0.8468	0.9100	0.7605
0.3042	0.7464	0.7993	0.8622	0.7377
0.3651	0.6703	0.7147	0.7748	0.6941
0.4259	0.6073	0.6421	0.6974	0.6532
0.4868	0.5543	0.5795	0.6286	0.6147
0.5476	0.5093	0.5253	0.5675	0.5783
0.6084	0.4706	0.4782	0.5132	0.5442
0.6693	0.4370	0.4372	0.4648	0.5121
0.7301	0.4073	0.4014	0.4218	0.4819
0.7910	0.3810	0.3694	0.3835	0.4534
0.8510	0.3573	0.3419	0.3493	0.4266
0.9127	0.3358	0.3172	0.3188	0.4015
1.0648	0.2899	0.2663	0.2560	0.3448
1.2169	0.2519	0.2270	0.2084	0.2962
1.3690	0.2199	0.2961	0.1719	0.2544
1.5211	0.1924	0.1704	0.1436	0.2185
1.6732	0.1685	0.1493	0.1216	0.1876
1.8254	0.1478	0.1315	0.1043	0.1612
1.9775	0.1297	0.1162	0.0904	0.1384
2.2817	0.0998	0.0915	0.0699	0.1021
2.5859	0.0769	0.0723	0.0557	0.0753
2.8902	0.0593	0.0574	0.0454	0.0546
3.1944	0.0457	0.0457	0.0376	0.0410
3.4986	0.0352	0.0363	0.0315	0.0302
3.8028	0.0271	0.0288	0.0264	0.0223
4.1071	0.0219	0.0230	0.0224	0.0165
4.4113	0.0161	0.0183	0.0189	0.0121
4.7155	0.0124	0.0145	0.0161	0.0090
5.0198	0.0096	0.0116	0.0136	0.0066

TABLA A 4-2

Relación de Reflujo = 0.8512

Abs=0.1955 Abs=0.1740 Abs=0.1681 Abs=0.1525

θ	$E_{e_{3,3}}$	$E_{e_{4,4}}$	$E_{e_{5,4}}$	$E_{e_{6,5}}$
0.0000	0.0113	0.0299	0.0000	0.0144
0.0152	0.5123	1.2960	1.4521	1.6616
0.0304	0.5906	1.4253	1.3629	1.6459
0.0456	1.4852	1.4471	1.2772	1.6007
0.0608	1.4645	1.3213	1.2267	1.5908
0.0760	1.3642	1.3552	1.1570	1.5416
0.0913	1.3391	1.3598	1.1529	1.5075
0.1065	1.2913	1.2339	1.0773	1.2708
0.1217	1.2251	1.1931	1.0934	1.3384
0.1369	1.1645	1.1971	1.0309	1.2983
0.1582	1.1494	1.1138	0.9774	1.2269
0.1825	1.1294	1.1138	0.9179	1.0984
0.2130	1.0898	1.0563	0.8453	1.1023
0.2434	1.0021	0.9299	0.7781	1.0361
0.2738	0.9466	0.8937	0.7329	0.9672
0.3042	0.8970	0.8868	0.7091	0.9751
0.3651	0.7813	0.7787	0.6157	0.7705
0.4259	0.7279	0.8201	0.5098	0.7259
0.4868	0.6709	0.6489	0.4658	0.6748
0.5476	0.6100	0.5506	0.3896	0.5823
0.6084	0.5356	0.5569	0.3540	0.5134
0.6693	0.5202	0.4500	0.3272	0.4630
0.7301	0.4734	0.4351	0.3010	0.4328
0.7910	0.4376	0.4057	0.2695	0.3967
0.8510	0.3637	0.4057	0.2153	0.3318
0.9127	0.3204	0.3764	0.2100	0.3003
1.0648	0.2857	0.3190	0.1600	0.2374
1.2169	0.2343	0.2643	0.1327	0.2066
1.3690	0.2082	0.2356	0.0999	0.1462
1.5211	0.1750	0.1149	0.0785	0.1311
1.6732	0.1586	0.1810	0.0732	0.1134
1.8254	0.1394	0.1253	0.0708	0.1016
1.9675	0.1258	0.1414	0.0547	0.1161
2.2817	0.0905	0.1282	0.0494	0.0721
2.5859	0.0706	0.1017	0.0494	0.0577
2.8902	0.0609	0.0891	0.0393	0.0575
3.1944	0.0550	0.0764	0.0309	0.0441
3.4986	0.0450	0.0580	0.0262	0.0433
3.8028	0.0325	0.0632	0.0262	0.0341
4.1071	0.0215	0.0052	0.0393	0.0289
4.4113	0.0100	0.0017	0.0393	0.0289
4.7155	0.0000	0.0017	0.0208	0.0289
5.0198	0.0000	0.0000	0.0184	0.0000

TABLA A 4-3

Relación de Reflujo = 0.5000

Abs=0.1949 Abs=0.1728 Abs=0.1675 Abs=0.1486

e	E _e _{3,3}	E _e _{4,4}	E _e _{5,4}	E _e _{6,5}
0.0000	0.0021	0.0127	0.072	0.0296
0.0192	0.7789	0.5139	0.3893	0.6891
0.0304	1.4141	1.2836	1.5266	1.6534
0.0456	1.3935	1.3472	1.3588	1.6427
0.0608	1.3648	1.2627	1.2979	1.4684
0.0760	1.3561	1.2054	1.2639	1.4448
0.0913	1.2524	1.2755	1.2358	1.3546
0.1065	1.2140	1.2425	1.1594	1.3506
0.1217	1.1755	1.1649	1.1528	1.2638
0.1521	1.0688	1.1024	1.0370	1.2887
0.1825	1.0123	1.0828	0.9779	1.1272
0.2130	0.9600	1.0480	0.9630	1.0848
0.2434	0.8758	0.9618	0.9075	0.9926
0.2738	0.8430	0.9144	0.8794	0.9482
0.3042	0.7789	0.9144	0.7817	0.8802
0.3651	0.7014	0.8293	0.7039	0.7981
0.4259	0.6142	0.7569	0.6392	0.7261
0.4868	0.5536	0.6898	0.5773	0.6561
0.5476	0.4972	0.6406	0.5528	0.6083
0.6084	0.4423	0.5608	0.5110	0.5518
0.6693	0.4284	0.5544	0.4687	0.5027
0.7301	0.3884	0.5139	0.4531	0.4240
0.7910	0.3571	0.4988	0.4149	0.4139
0.8510	0.3361	0.4381	0.3176	0.4071
0.9127	0.3104	0.3646	0.3104	0.3573
1.0648	0.2591	0.3212	0.2454	0.2759
1.2169	0.2104	0.2922	0.2173	0.2759
1.3690	0.1857	0.2373	0.1845	0.2436
1.5211	0.1857	0.2315	0.1540	0.2120
1.6732	0.1380	0.2095	0.1373	0.1501
1.8254	0.1144	0.1823	0.1116	0.1501
1.9775	0.1026	0.1690	0.1033	0.0888
2.2817	0.0677	0.1291	0.0925	0.0949
2.5859	0.0564	0.0897	0.0657	0.0592
2.8902	0.0452	0.0764	0.0567	0.0532
3.1944	0.0452	0.0509	0.0436	0.0296
3.4986	0.0452	0.0509	0.0394	0.0148
3.8028	0.0339	0.0509	0.0287	0.0148
4.1071	0.0452	0.0382	0.0263	0.0061
4.4113	0.0452	0.0382	0.0263	0.0061
4.7155	0.0339	0.0382	0.0263	0.0027
5.0198	0.0226	0.0278	0.0263	0.0000

TABLA A 4-4

Relación de Reflujo = 0.2422

Abs=0.1939 Abs=0.1693 Abs=0.1668 Abs=0.1384

θ	$E_{\theta_{3,3}}$	$E_{\theta_{4,4}}$	$E_{\theta_{5,4}}$	$E_{\theta_{6,5}}$
0.0000	0.0227	0.0130	0.0000	0.0000
0.0152	0.0913	1.4649	1.2488	1.7095
0.0304	1.3595	1.4784	1.3957	1.6987
0.0456	1.4007	1.4784	1.3519	1.6662
0.0608	1.3801	1.4194	1.3213	1.5513
0.0760	1.3595	1.3751	1.2914	1.5513
0.0913	1.3430	1.3579	1.2782	1.4747
0.1065	1.2790	1.3148	1.2488	1.4249
0.1217	1.2589	1.2469	1.1823	1.3757
0.1369	1.2125	1.1890	1.1295	1.3136
0.1521	1.1815	1.1453	1.0384	1.2803
0.1825	1.1439	1.1453	1.0624	1.2803
0.2130	1.0707	1.1093	1.0042	1.1647
0.2434	1.0031	1.0662	0.9664	1.1105
0.2738	0.9649	0.9894	0.9287	1.0224
0.3042	0.8473	0.9622	0.8591	0.9877
0.3651	0.8989	0.8606	0.7662	0.9364
0.4259	0.6895	0.8429	0.7074	0.8201
0.4868	0.6591	0.7041	0.6139	0.8201
0.5176	0.5565	0.6373	0.5647	0.7001
0.6084	0.4997	0.5724	0.5006	0.6033
0.6693	0.4446	0.5405	0.4382	0.5183
0.7301	0.4172	0.4719	0.3987	0.4733
0.7910	0.3667	0.4412	0.3477	0.4371
0.8610	0.3249	0.4017	0.2686	0.3483
0.9127	0.3378	0.3219	0.2398	0.2962
1.0648	0.2362	0.2422	0.1888	0.2211
1.2169	0.1748	0.2138	0.1337	0.1817
1.3690	0.1625	0.1589	0.1061	0.1249
1.5211	0.1269	0.1317	0.0761	0.0954
1.6732	0.1031	0.1045	0.0737	0.0636
1.8254	0.0799	0.0992	0.0528	0.0477
1.9775	0.0681	0.0780	0.0528	0.0318
2.2817	0.0340	0.0520	0.0474	0.0376
2.5859	0.0340	0.0520	0.0396	0.0318
2.8902	0.0340	0.0390	0.0288	0.0159
3.1944	0.0340	0.0260	0.0210	0.0159
3.4986	0.0248	0.0260	0.0210	0.0029
3.8028	0.0248	0.0260	0.0132	0.0029
4.1071	0.0227	0.0260	0.0132	0.0014
4.4113	0.0227	0.0260	0.0054	0.0014
4.7145	0.0227	0.0130	0.0034	0.0000
5.0198	0.0227	0.0130	0.0000	0.0000

APENDICE 5

RUTINA EXPERIMENTAL

Para obtener los resultados de cada una de las pruebas experimentales se desarrolló la siguiente rutina de trabajo:

- Cerrar los orificios de desagüe de los tanques.
- Con ayuda de una manguera, llenar ambos tanques del fluido utilizado (agua en nuestro caso), hasta el nivel de trabajo.
- Llenar el tinaco que alimenta al sistema hasta que el agua empiece a rebozar, logrando de esta manera mantener una caudal de entrada constante.
- Conectar a la altura adecuada el flotador del rotámetro # 2 dependiendo del caudal deseado, con ayuda de una válvula de paso colocada antes de éste.
- Colocar el flotador del rotámetro # 3 con ayuda del control de flujo que viene integrado a la bomba rotativa.
- Colocar el flotador del rotámetro # 1 a su nivel de trabajo con el objetivo de mantener constante el flujo a la entrada del sistema durante todo el tiempo de muestreo de la prueba experimental.

- Abrir inmediatamente la válvula de paso de la salida del sistema.
- Esperar un tiempo suficiente para obtener el estado estacionario.
- Inyectar en el flujo de entrada al sistema 50 ml. del colorante "cristal violeta", el cual tiene una concentración de 2 g/l, con ayuda de dos jeringas de 30 y 20 ml, además de una llave triple de acero inoxidable, por medio de la cual se logra tener una señal impulso.
- En este mismo instante empieza el muestreo.
- La distribución de tiempos de muestreo se realiza como a continuación se menciona:

11 muestras a intervalos de 30 segundos cada una

5 muestras a intervalos de 1 minuto cada una

10 muestras a intervalos de 2 minutos cada una

7 muestras a intervalos de 5 minutos cada una

10 muestras a intervalos de 10 minutos cada una

obteniéndose con esto un tiempo total de muestreo de 165.5 minutos.

- Una vez tomadas las muestras, se procede a leer la absorbancia de cada una, en el espectrofotómetro, enjuagando la celdilla cada vez que se toma una lectura y después de tres lecturas, realizar este enjuague con acetona para evitar

la adherencia del colorante a las paredes de la celdilla.

- Durante el tiempo de realización de las lecturas, el sistema de flujo se está lavando mediante la circulación de abundante agua y dándole por último una pasada a las paredes de los tanques con acetona, para remover el posible colorante adherido.

BIBLIOGRAFIA

- 1) BURGHARDT A., LIPOWSKA L., Mixing Phenomena in Continuous Tank Reactor, International Chemical Engineering (Vol. 13 Nº 2, April 1973)
- 2) FROMENT AND BISCHOFF, Chemical Reactor Analysis & Design, John Wiley & Sons.
- 3) GUENTHER WILLIAM C., Introducción a la Inferencia Estadística, Mc. Graw Hill (1968).
- 4) LEVENSPIEL OCTAVE, Ingeniería de las Reacciones Químicas, Ed. Reverté S.A. (1981)
- 5) LEVINSON MACFATE, Diagnóstico Clínico de Laboratorio, Ed. El Ateneo (3a. Ed.).
- 6) MOTHERS J., TORRENS IBERN J., Estadística Aplicada a la Ingeniería, Ed. Ariel (1970).
- 7) RIOS SIXTO, Métodos Estadísticos, Mc. Graw Hill (5a. Ed., 1967).
- 8) WINKLER ROBERT L., HAYS WILLIAM L., Statistics, Probability, Inference and Decision Holt, Rinehart & Winston, Mc Graw Hill.
- 9) GODOY ROMERO JOSE MANUEL, Estudio de la DTR en un Reactor Continuo de Mezcla Completa (Tesis U.A.G., 1980).
- 10) RAMIREZ BECERRA ZEFERINO ISMAEL, Influencia de la Posición del Agitador en la DTR (Tesis U.A.G., 1981).
- 11) Estudio de la DTR de un Sistema de dos Tanques en Paralelo (Tesis U.A.G., 1981).