

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE GUADALAJARA  
INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA DE CIENCIAS QUIMICAS



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

"ESTUDIO DE LA DISTRIBUCION DE TIEMPO DE  
RESIDENCIA (D.T.R.), DE UN LIQUIDO ( $H_2O$ ),  
CON UN FLUJO EN CONTRACORRIENTE DE GAS ( $CO_2$ ),  
EN UN TUBO EMPACADO"

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A

JESUS ARMANDO GUERRA MENDIVIL



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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 esta 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.

# I N D I C E

	Página
INTRODUCCION . . . . .	I
SIMBOLOGIA . . . . .	II
CAPITULO I	
TEORIA . . . . .	1
CAPITULO II	
DESCRIPCION DEL EQUIPO EMPLEADO . . . . .	23
CAPITULO III	
DESARROLLO EXPERIMENTAL . . . . .	26
CAPITULO IV	
RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS . . . . .	30
CAPITULO V	
COMPARACION CON MODELOS MATEMATICOS TEORICOS . . . . .	42
CAPITULO VI	
ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS METODOS DE TRAZADORES Y ABSORCION DE GAS EN UN SISTEMA SIMILAR Y EN LAS MISMAS CON DICIONES . . . . .	54
CONCLUSIONES . . . . .	59
BIBLIOGRAFIA . . . . .	61

## APENDICE I

OBTENCION DE ECUACIONES . . . . . 63

## APENDICE II

DESCRIPCION DEL EQUIPO EMPLEADO . . . . . 66

## APENDICE III

DESARROLLO EXPERIMENTAL . . . . . 71

## APENDICE IV

CALIBRACION DE MANOMETROS MEDIDORES DE FLUJO  
Y CALCULO DE NUMERO DE REYNOLDS ( $Re$ ) . . . . . 76

## APENDICE V

TABLAS DE VALORES PARA MODELOS TEORICOS . . . . . 86

## APENDICE VI

PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV . . . . . 93  
PARA BONDAD DE AJUSTE.

## APENDICE VII

EJEMPLOS DE CALCULOS REALIZADOS:  
OBTENCION DE PARAMETROS DE LAS ECUACIONES DE  
LOS MODELOS TEORICOS Y PRUEBAS ESTADISTICAS . . . . . 98

## I N T R O D U C C I O N

## I N T R O D U C C I O N

Este estudio se realizó con el fin de ayudar a conocer mejor el comportamiento del flujo a través de los tubos empacados, por medio de su D.T.R.

Se determinó la distribución de tiempos de residencia -- (D.T.R.), de un líquido ( $H_2O$ ), en contracorriente con un flujo de gas ( $CO_2$ ), auxiliándose de un trazador no reactivo.

El trazador se inyectó sobre el flujo de agua en la entrada del tubo y se tomaron muestras de éste a la salida, a las cuales se les determinó su concentración de trazador.

Se probó la confiabilidad de los datos experimentales y se compararon las curvas experimentales con curvas de modelos teóricos, para así determinar el modelo de flujo del sistema, por métodos estadísticos.

Se hizo la comparación de nuestro estudio con otro estudio previo, el cual se realizó en un sistema similar y bajo las mismas condiciones, pero enfocado a encontrar los coeficientes de difusión del  $CO_2$  en el agua.

S I M B O L O G I A

- AP : Absorbancia promedio de la corrida.  
 A1 : Desviación de la prueba estadística,  $\tilde{F}(x)_p - F(x) (t-1)$   
 A2 : Desviación de la prueba estadística,  $\tilde{F}(x)_p - F(x)$   
 Amax : Valor máximo de A1 y A2  
 a : Constante de orificio.  
 a<sub>p</sub> : Área específica de empaque, en m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.  
 a<sub>t</sub> : Área transversal, en m<sup>2</sup>  
 B1 : Desviación estadística,  $\tilde{F}(x)_p - \tilde{F}(x)$   
 B1max : Máximo valor de B1  
 b : Constante de orificio.  
 C : Concentración del trazador.  
 CX : Valor máximo permisible para la prueba estadística (bondad de ajuste).  
 CX<sup>0</sup> : Valor máximo permisible para la prueba estadística de consistencia de datos.  
 D : Diámetro de tubo, en m.  
 D/UL : Módulo de dispersión.  
 dp : Diámetro de las partículas del empaque.  
 DTETA : Incrementos de TETA  
 E : Función de distribución de tiempo de residencia a la salida.  
 E<sub>θ</sub> : Distribución del tiempo de residencia, basada en el tiempo adimensional.  
 ET-E1 : E<sub>θ</sub> experimental de la réplica 1.  
 ET-E2 : E<sub>θ</sub> experimental de la réplica 2.  
 ET-EP : E<sub>θ</sub> experimental promedio de las dos réplicas.

- ET-TA :  $E_{\theta}$  Teórico del modelo A.
- ET-TB :  $E_{\theta}$  Teórico del modelo B.
- FA-E<sup>1</sup> : Frecuencia acumulada experimental de la réplica 1 igual a  $\tilde{F}(x)^1$
- FA-E<sup>2</sup> : Frecuencia acumulada experimental de la réplica 2 igual a  $\tilde{F}(x)^2$
- FA-EP : Frecuencia acumulada experimental promedio igual a  $\tilde{F}(x)^p$
- FA-TA : Frecuencia acumulada teórica del modelo A,  $F(x)$  mod.A
- FA-TB : Frecuencia acumulada teórica del modelo B,  $F(x)$  mod.B
- K<sup>1</sup> : Coeficiente de transferencia de masa en la fase líquida, en m/hora.
- L : Gasto másivo, en litro/hora-m<sup>2</sup>.
- L<sub>A</sub><sup>1</sup> : Lectura de absorbancia de la réplica 1.
- L<sub>A</sub><sup>2</sup> : Lectura de absorbancia de la réplica 2.
- LAP : Lectura de absorbancia promedio de las dos réplicas.
- N<sup>o</sup> : Número progresivo de la muestra a la salida.
- N : Número total de muestras, para el tratamiento estadístico.
- n, m : Número de muestras de las réplicas.
- P(t)dt : Probabilidad de residencia en el reactor de una partícula de trazador, en el intervalo de t a t+dt.
- t : Tiempo de toma de muestra a la salida, en min.
- t<sub>i</sub> : Tiempo intermedio entre dos tiempos (t) continuos.
- $\bar{t}$  : Tiempo medio de residencia, representa la media estadística.
- $\bar{u}$  : Velocidad media de las partículas.

- $V$  : Volumen del recipiente, en litros.  
 $v_d$  : Volumen muerto, en litros.  
 $V_0$  : Flujo de  $H_2O$ , en litros/hora.  
 $\alpha$  : Nivel de significancia para la prueba estadística.  
 $A_p$  : Lectura de presión en el manómetro.  
 $\delta$  : Función Delta de Dirac.  
 $E$  : Fracción de huecos en el empaque.  
 $\theta$  : TETA  $\theta$ , Tiempo adimensional,  $\theta = t/\tau$   
 $\lambda$  : Longitud de onda en  $A^\circ$   
 $\mu_L$  : Viscosidad de líquido, en kg/m-seg.  
 $\pi$  : Pi = 3.1416  
 $\rho_L$  : Densidad de líquido, en kg/litro.  
 $\sigma^2$  : Variancia estadística basada de la distribución de tiempo de residencia.  
 $\tau$  : Tiempo espacial,  $\tau = V/V_0$ , en hora.

CAPITULO I

TEORIA

CONCEPTOS BASICOS PARA LA DISTRIBUCION DE  
TIEMPOS DE RESIDENCIA (D.T.R.), (4)

Existen dos tipos de flujos ideales: de mezcla completa y pistón. Aunque en la realidad, el comportamiento en aparatos de procesos, nunca se ajusta exactamente a estas situaciones -- idealizadas, en muchos casos se aproximan tanto a estas condiciones, que podemos admitir el comportamiento ideal, sin incurrir en un error apreciable.

Hay otros casos en que las desviaciones pueden ser muy grandes, las cuales pueden ser causadas por: formación de canalizaciones del flujo, recirculación del fluido, zonas muertas, cortos circuitos, etc..

Con el fin de caracterizar el grado de desviación de la idealidad, del flujo en un recipiente, basta conocer cuánto -- tiempo permanece cada molécula (de una sustancia trazadora) en el recipiente o mejor dicho conocer su distribución de tiempos de residencia (D.T.R.)

Esta información se puede obtener por el método experimental estímulo-respuesta, en el cual se estimula el sistema mediante una perturbación y vemos cómo responde.

A este método también se llama método de trazadores, don

de el trazador es una sustancia con la cual se estimula el sistema y permite observar la respuesta, debido a este estímulo, - dándonos así información sobre el sistema.

En nuestro estudio trataremos de analizar el comportamiento del flujo, en un tubo empacado, en el cual se usó como estímulo una inyección de trazador (solución de colorante rojo de uva), en la corriente de entrada del flujo de agua, en un tiempo  $t=0$ , en forma instantánea (señal impulso), la respuesta es la concentración en la corriente de salida del recipiente, - que puede ser medida experimentalmente.

Se define como tiempo espacial ( $\tau$ ) la relación entre el volumen del recipiente y el flujo que circula a través de él, - según la ecuación:

$$(1-1) \tau = V / V_0$$

donde:

$V$  = volumen del recipiente, en litros.

$V_0$  = flujo que circula a través del recipiente en - litros/hora.

Si llamamos  $C(t)$  a la concentración en un tiempo  $t$ , el número de moléculas que salen en un intervalo de tiempo de  $t$  a  $t+dt$ , será proporcional a  $C(t)dt$ . Entonces el número total, pa ra todos los tiempos, será  $\int_0^{\infty} C(t)dt$  y, por lo tanto, la frac--

ción de moléculas que salen en el intervalo de  $t$  a  $t+dt$  es:

$$(I-2) \quad P(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt}$$

Esta fracción  $P(t)$  corresponde a un número  $E$  que representa la distribución del tiempo de residencia.

Para calcular  $\int_0^{\infty} C(t) dt$ , se inyecta un volumen de trazador, igual que el usado en las corridas experimentales, en un volumen de líquido igual al volumen del sistema en estudio y se toma su lectura entonces  $\bar{c} = V_0 \int_0^{\infty} C(t) dt / V$ .

La concentración normalizada (concentración sobre  $\int_0^{\infty} C(t) dt$ ) en la corriente de salida a un tiempo  $t$ , representa la esperanza matemática de que un elemento de trazador tenga ese tiempo de permanencia en el recipiente.

Esta esperanza se llama  $E$  y representa la distribución de tiempo de residencia del fluido, por cual:

$$(I-3) \quad \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} E dt = 1$$

Si se aproxima a elementos finitos

$$(I-4) \quad \sum_{0}^{\infty} E \Delta t \approx 1$$

Si se mide el tiempo en función del tiempo espacial, dando así un valor adimensional,  $\theta$ :

$$(I-5) \quad \theta = t/\tau$$

Se puede definir también la distribución de tiempo de residencia, basado en el tiempo adimensional ( $\tau$ ), de la siguiente forma:

$$(I-6) \quad \theta E_{\theta} = t E$$

De esta ecuación combinada con la ecuación (I-5), se obtiene la relación:

$$(I-7) \quad E_{\theta} = \tau E$$

Experimentalmente se puede calcular por medio de la ecuación:

$$(I-8) \quad E = \frac{LA}{AP} = \frac{C(t)}{\bar{C}}$$

donde: LA = lectura de absorbancia en el tiempo  $t$ .

AP = absorbancia promedio de la corrida.

Conviene hacer varias réplicas para tener valores mas confiables.

## REQUERIMIENTOS BASICOS PARA UN BUEN TRAZADOR. (8)

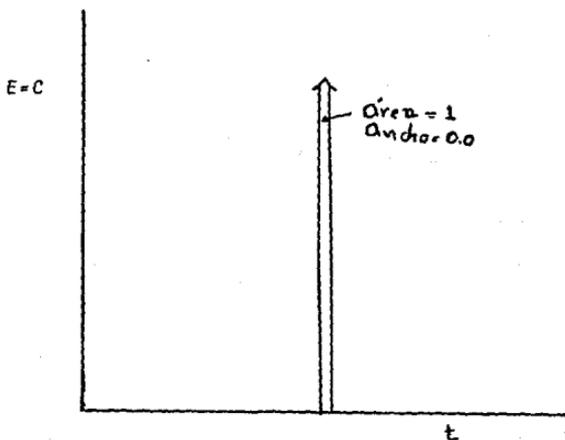
- 1.- El trazador deberá ser miscible y tener propiedades físicas similares al fluido cuya mezcla está en investigación.
- 2.- El trazador deberá ser detectable en pequeñas concentraciones, de tal forma que, al introducirlo al sistema, no afecte el flujo del fluido principal.
- 3.- La concentración del trazador debe ser medida en forma fácil, y cualquier valor debe ser linealmente proporcional a la concentración, de forma que la calibración del instrumento sea sencilla.
- 4.- El trazador no debe sufrir absorción o adsorción en sólidos presentes, como catalizadores, ni en las paredes del recipiente.
- 5.- El trazador deberá ser químicamente inerte en las condiciones en que se va a usar.

## FLUJO DE PISTON IDEAL (4).

En el flujo de pistón ideal todas las partículas tienen el mismo tiempo de residencia, poseen un perfil de velocidad -- plano, de tal forma que las partículas en el centro del tubo -- tienen la misma velocidad que las de la orilla, no modificando así las señales y se cumple que:

El tiempo medio de residencia es igual que el tiempo espacial e igual al tiempo de residencia de cada partícula. Y el grado de dispersión expresado por la variancia estadística es -- cero:  $\sigma^2 = 0.0$

La representación de su D.T.R. es:



Y se define como una pulsación discontinua llamada función delta de Dirac ( $\delta$ ), de modo que  $\delta(t-\tau)$  es una curva de distribución que siempre es igual a cero, excepto para  $t-\tau=0$ , en que vale infinito.

El área debajo de la curva es igual a la unidad y el ancho de la pulsación vale cero.

Matemáticamente:

$$(I-9) \quad \left. \begin{array}{l} \delta(t-\tau) = \infty \text{ para } t = \tau \\ \delta(t-\tau) = 0 \text{ en los demás puntos} \end{array} \right\} \text{ siendo } \int_0^{\infty} \delta(t-\tau) dt = 1$$

MODELO DE DISPERSION (FLUJO DISPERSO EN PISTON) (4)

En un flujo de pistón en el cual se superpone un grado de retromezcla o intermezcla, existe fluctuaciones debido a las diferentes velocidades de flujo, difusión molecular y turbulencias. Por lo cual, las señales se van difundiéndose y la velocidad de cada partícula no es igual a la velocidad media.

En este modelo, variando las intensidades de turbulencia o las condiciones de intermezcla, las características del flujo pueden variar desde el flujo ideal en pistón hasta el flujo de mezcla completa. Fig. I-1

En consecuencia el volumen necesario para el recipiente estará comprendido entre el volumen de flujo de pistón y el volumen de mezcla completa.

Se denomina al grupo adimensional  $D/UL$  como módulo de dispersión, el cual mide el grado de dispersión, de tal forma que:

$D/UL \rightarrow 0$  (dispersión despreciable), tiende a flujo de pistón.

$D/UL \rightarrow \infty$  (dispersión grande), tiende a flujo de mezcla completa.

Donde:

$D$  = coeficiente de dispersión longitudinal en  $M^2/hora$ .

$U$  = velocidad longitudinal media de las partículas en  $m/hora$ .

$L$  = Longitud del recipiente en  $m$ .

Este modelo se puede caracterizar como:

1.- Dispersión en grado pequeño.

2.- Dispersión en grado grande.

Del primero trataremos en este estudio.

#### MODELO DE DISPERSION EN GRADO PEQUEÑO (4).

Para grados de dispersión pequeños la curva de trazador no cambia significativamente de forma, a su paso por el punto de medida.

En esta condición la ecuación de la D.T.R. basada en el tiempo adimensional  $\theta$  es:

$$(I-10) \quad E_{\theta} = C_{\theta} = \frac{1}{2\sqrt{\pi} (D/UL)} \exp \left[ - \frac{(1 - \theta)^2}{4 (D/UL)} \right]$$

donde:

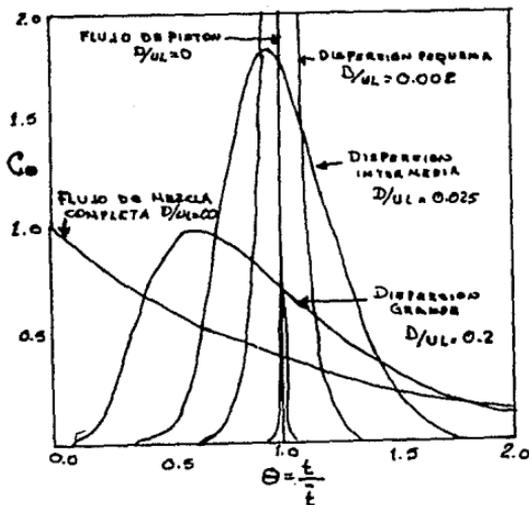
$$(I-10') \quad D/UL = \frac{\sigma^2}{2} = \frac{\sigma^2}{2\bar{x}^2}$$

$\sigma_{\theta}^2$  = variancia estadística basada en  $\theta$ .

$\sigma^2$  = variancia estadística basada en  $t$ .

$\bar{x}$  = tiempo medio de residencia.

Para el cálculo de las variables  $\sigma_{\theta}^2$ ,  $\sigma^2$ ,  $\bar{x}$ ,  $D/UL$ , ver apéndice VII.



Gráfica (I+1)

CURVA  $C_0 = E_0$  PARA DISTINTAS INTENSIDADES  
 DE RETORNECIDA DEDICHA POR EL MODELO DE  
 DISPERSION (4)

## FLUJO LAMINAR (4, 12)

El flujo laminar existe cuando en los recipientes tubulares no hay dispersión radial a lo largo de la sección normal y debido a la viscosidad existen diferencias entre los tiempos de residencia de las partículas, de acuerdo a su posición respecto a las paredes. El gradiente de velocidad es parabólico, con un máximo en el centro, igual al doble del valor medio y disminuye gradualmente hasta anularse en las paredes.

$$(\bar{u} = 1/2 \bar{u}_{\max}).$$

Tiene las siguientes características:

$$\gamma = \frac{V}{V_0} = \frac{L}{\bar{u}}$$

Donde:  $L$  = longitud del recipiente en m.

$\bar{u}$  = velocidad media de las partículas en m/seg.

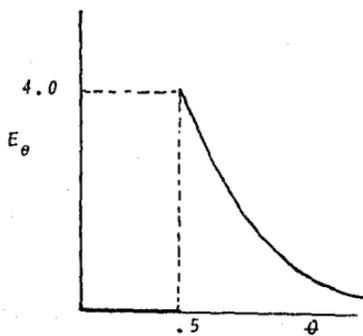
El tiempo espacial ( $\gamma$ ) sigue coincidiendo con el tiempo medio de residencia ( $\bar{t}$ ).

La D.T.R. la representa la ecuación basada en el tiempo-adimensional  $\theta$ :

$$[I-11] \quad E_{\theta} = 1/2\theta^3, \text{ para } 1/2 \leq \theta \leq \infty$$

$$E_{\theta} = 0, \text{ para } \theta < 1/2.$$

Su representación gráfica es:



### EFECTOS DEL VOLUMEN MUERTO.

El volumen muerto en un flujo representa que existe en ese flujo zonas muertas o canalizaciones del flujo, de tal forma que parte de la señal trazadora se queda estancada o encuentra caminos en el recipiente, sin mezclarse con el resto del fluido.

Se puede calcular según la ecuación:

$$(1-12) \quad Vd\% = \frac{\tau - \bar{\tau}}{\tau} \times 100$$

En un sistema en el cual existe este fenómeno sucede lo siguiente:

La D.T.R. basada en el tiempo  $t$  ( $E=f(t)$ ) no sufre ningún cambio, sigue siendo la misma relación para un sistema sin o con volumen muerto.

Pero se ve afectado el tiempo espacial ( $\tau$ ), desplazando se su valor con respecto al tiempo medio de residencia ( $\bar{\tau}$ ), como consecuencia de esto se afecta también el valor del tiempo adimensional TETA ( $\theta$ ), esto sucede porque se debe considerar el volumen muerto existente en el sistema para el cálculo de estas propiedades.

La ecuación que representa la D.T.R. basada en el tiempo adimensional  $\theta$  es afectada también como consecuencia de los cam bios anteriores.

EFFECTOS DEL VOLUMEN MUERTO EN EL MODELO DE DISPERSION EN GRADO PEQUEÑO.

Cuando el modelo de dispersión en grado pequeño es afectado por un volumen muerto, la ecuación matemática que cumple este modelo se ve afectado por el factor  $\frac{V_1+V_d}{V_1}$

Donde:

$V_d$  = volumen muerto, en litros.

$V_1$  = volumen eficaz del sistema, en litros.

$V_1+V_d$  = volumen total del sistema, en litros.

A este modelo lo llamamos aquí modelo A y la ecuación de D.T.R., cuya deducción hacemos en el apéndice I, es la siguiente:

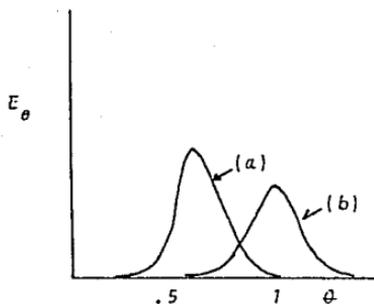
$$(I-13) \quad E_{\theta} = \frac{\left( \frac{V_1 + V_d}{V_1} \right)}{2 \sqrt{\pi \tau (D/UL)}} \exp \left[ - \frac{\left[ 1 - \left( \frac{V_1 + V_d}{V_1} \right) \theta \right]^2}{4 (D/UL)} \right]$$

Donde:  $\theta = t/\tau$

$$\tau = \frac{V_1+V_d}{V_0}$$

$D/UL$  = coeficiente de dispersión longitudinal.

La representación gráfica de este modelo A, en una curva de  $E_{\theta}$  vs  $\theta$  y comparativamente con el modelo de dispersión sin volumen muerto es:



Gráfica del modelo de dispersión grado pequeño para un mismo  $D/UL$

b) Modelo de dispersión Sin  $Vd$ .

a) Modelo A.

A medida que el volumen muerto ( $Vd$ ) aumenta, las señales se adelantan,  $E_0$  máximo aumenta y el grado de dispersión de los datos disminuye.

EFFECTOS DEL VOLUMEN MUERTO EN EL MODELO DE FLUJO  
LAMINAR.

Cuando el modelo de flujo laminar es afectado por un volumen muerto, al igual que el modelo de dispersión, su ecuación matemática es afectada por el factor  $\frac{V1+Vd}{V1}$ , obteniéndose así una ecuación, que para nuestro estudio la llamemos modelo B, y es de la forma:

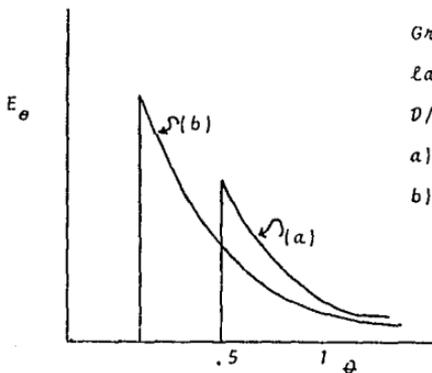
$$(I-14) \quad E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3 \frac{V1+Vd}{V1}^2}$$

donde:  $\theta = t/\tau$

$$\tau = \frac{V1 + Vd}{V0}$$

$$\text{Para } \theta \geq .5 \left( \frac{V1}{V1+Vd} \right)$$

En la representación gráfica que da el sistema como respuesta para con un estímulo, en una curva de  $E_{\theta}$  vs  $\theta$  sucede algo semejante al modelo de dispersión:



Gráfica de modelo de flujo laminar para un mismo  $D/UL$ .

- a) Laminar sin  $Vd$
- b) Modelo B.

Las señales de respuesta se adelantan y  $E_{\theta}$  máximo aumenta su valor.

Para los cálculos de la ecuación de este modelo ver el apéndice 1.

## CONCEPTOS MATEMATICOS USADOS.

## NUMERO DE REYNOLDS

El número de Reynolds es un grupo adimensional, viene dado por el cociente de las fuerzas de inercia entre las fuerzas de viscosidad en un sistema de flujo.

Para tuberías circulares, en flujo a tubería llena es:

$$(I-15) \quad N_{RC} = \frac{DVP}{\mu_i} \quad (7,6)$$

Donde:  $D$  = Dimensión lineal característica del canal de flujo, en m.

$V$  = Velocidad lineal media del flujo, m/hora.

$P$  = Densidad del fluido, en kg/litro.

$\mu_i$  = Viscosidad del fluido, en kg/m-hora.

Para tubos empacados se encontró la relación ( 6 ).

$$(I-16) \quad N_{RC} = \frac{L}{A_p \mu_i}$$

Donde:  $L$  = Gasto másico, en litro/hora- $m^2$ .

$A_p$  = Area específica de empaque,  $m^2/m^3$ .

$\mu_i$  = Viscosidad del  $H_2O$ , en kg/m-hora.

### MEDIA (4,3).

La media es una medida de la tendencia central y es el tamaño promedio de los valores de la muestra, en nuestro caso está basada en la distribución de tiempos de residencia, también se le denomina centroide de la distribución y viene dada por: el tiempo medio de residencia, según ecuación:

$$(1-17) \quad \bar{x} = \frac{\int_0^{\infty} t c dt}{\int_0^{\infty} c dt} = \frac{\int_0^{\infty} t A dt}{\int_0^{\infty} A dt}$$

NOTA:  $C$  es proporcional a la absorbancia ( $A$ ).

Si la curva de distribución solamente se conoce para un número de valores discretos del tiempo,  $t$  y los intervalos de tiempo ( $\Delta t$ ) son constantes entonces:

$$(1-18) \quad \bar{x} \approx \frac{\sum t_i A_i}{\sum A_i}$$

donde:  $t_i$  = tiempos intermedios entre 2 tiempos.

$A_i$  = Absorbancia de cada prueba.

### VARIANCIA (4,3)

La variancia mide el grado de dispersión de una muestra, en nuestro caso es la amplitud de la distribución, está basada en los tiempos de residencia y mide el grado de dispersión respecto al tiempo medio de residencia equivalente a la media antes descrita y se mide por:

$$(I-19) \quad \sigma^2 = \frac{\int_a^b t^2 A dt}{\int_a^b A dt} - \bar{x}^2$$

Que para valores discretos e intervalos constantes de --  
tiempos ( $\Delta t = \text{ctes}$ ) toma la forma:

$$(I-20) \quad \sigma^2 = \frac{\sum (x_i^2 A_i)}{\sum A_i} - \bar{x}^2$$

## CAPITULO II

### DESCRIPCION DEL QUIPO EMPLEADO.

## DESCRIPCION DEL EQUIPO EMPLEADO

El equipo usado en este estudio, fue un tubo de vidrio, vertical, empacado con perlas de ebullición, dicha unidad funciona también, como torre de absorción. Fig. II-1.

Está auxiliado por:

Controladores de flujo: manómetros y llaves de paso

Controladores de volúmenes: depósitos con rebosadero.

Tanque alimentador de  $\text{CO}_2$ .

Toma de alimentación de  $\text{H}_2\text{O}$ .

Tuberías de transporte: de vidrio y mangueras de latex.

Tubos de ensayo y jeringa.

Espectrofotómetro y cronómetro.

Para mayores detalles ver apéndice II.

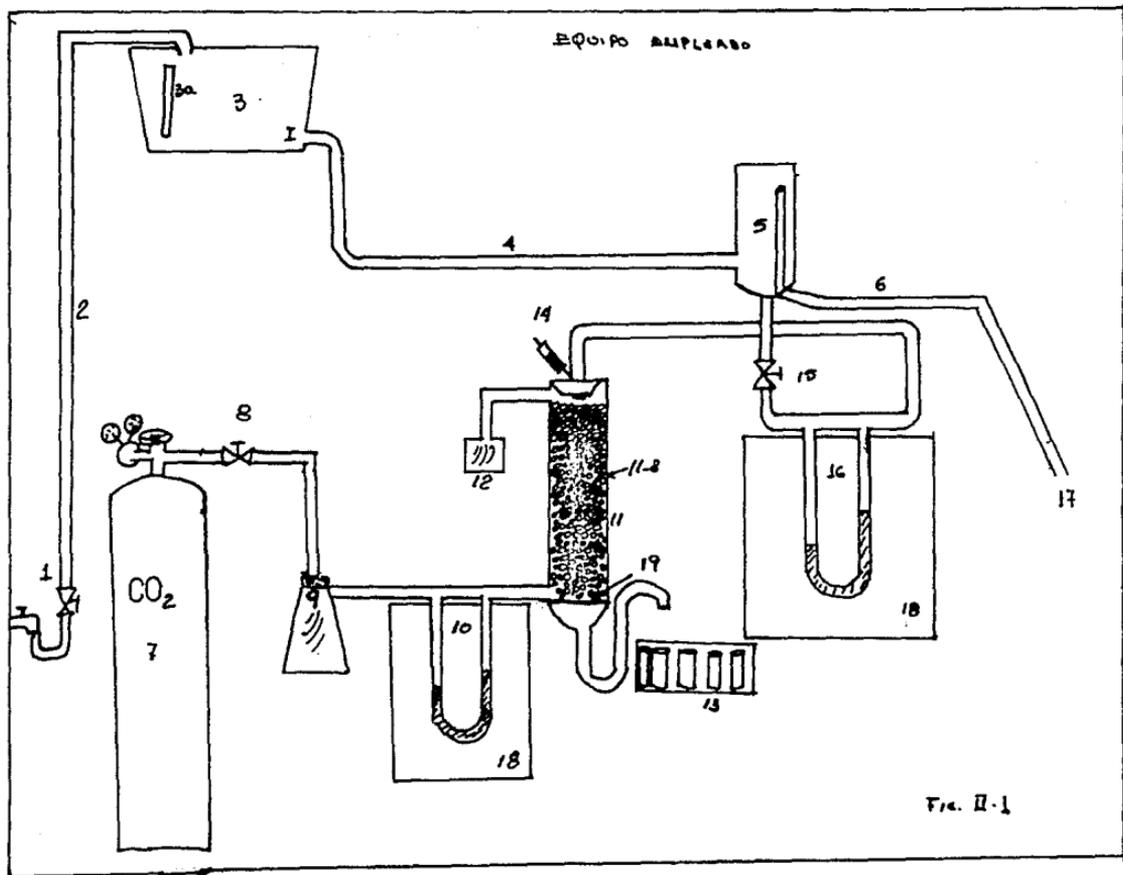


FIG. II-1

## DESCRIPCIÓN DE LA FIGURA II-1

- 1.- Llave de alimentación de  $H_2O$  de la tubería al tinaco.
- 2.- Tubería alimentadora de  $H_2O$  al tinaco.
- 3.- Tinaco (volumen de control I).
- 4.- Tubería de alimentación de  $H_2O$  del tinaco al recipiente - de vidrio.
- 5.- Recipiente de vidrio (volumen de control II).
- 6.- Rebosadero del recipiente de vidrio.
- 7.- Tanque alimentador de  $CO_2$ .
- 8.- Llave de paso de  $CO_2$ .
- 9.- Homogenizador de gas.
- 10.- Manómetro de control de flujo de  $CO_2$ .
- 11.- Tubo empacado con perlas de ebullición.
- 11a.- Perlas de ebullición.
- 12.- Burbujeador de gas.
- 13.- Gradilla con tubos de ensayo.
- 14.- Jeringa para inyección de trazador.
- 15.- Llave de paso de  $H_2O$
- 16.- Manómetro de control de flujo de  $H_2O$ .
- 17.- Hacia el drenaje.
- 18.- Papel milimétrico.

**CAPITULO III**

**DESARROLLO EXPERIMENTAL**

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental de este estudio consiste: en obtener información sobre la distribución de tiempos de residencia (D.T.R.), de un tubo empacado, la cual se obtiene inyectando un colorante al sistema de estudio, en la parte superior y sobre el flujo de  $H_2O$  como trazador que recorre todo el sistema y es recolectado al final en muestras en forma continua\* una tras otra.

A estas muestras se les mide su absorbancia que es proporcional a la concentración de trazador y por medio de estos datos, se obtienen las curvas experimentales de  $E_0$  vs  $\theta$ , las cuales se comparan por medio de métodos estadísticos con curvas de modelos teóricos.

\*Nota: Como las muestras se tomaron en forma continua y tiempos muy pequeños; una muestra representa un promedio de concentraciones y los datos se tomaron como marca de clase, por lo tanto las gráficas deben ser en forma escalonada.

Los pasos a seguir son los siguientes:

1.- Se hicieron pruebas preliminares, que establecen los ran-

gos de trabajo del sistema.

- 2.- Montaje del aparato.
- 3.- Establecimiento del flujo de  $\text{CO}_2$ , representado en lecturas de  $\Delta P$  en un manómetro, constante para todas las corridas.
- 4.- Establecimiento del flujo constante de  $\text{H}_2\text{O}$ , representado en lecturas de  $\Delta P$ . en un manómetro diferentes para cada corrida.
- 5.- Inyección de una cantidad adecuada de trazador ( $t=0$ ).
- 6.- Tomar muestras de trazador a la salida del equipo a diferentes tiempos y medir la absorbancia de cada una de ellas en el espectofotómetro.
- 7.- Tratamiento matemático de los datos experimentales.

Los cálculos y pruebas preliminares, que permitieron el buen funcionamiento del experimento, para así obtener datos válidos son:

i) Se encontró la longitud de onda de absorbancia máxima ( $\lambda$ ) de nuestro colorante, concentración y cantidad óptima de trazador.

ii) Se hicieron gráficas de calibración del espectofotómetro y de los manómetros medidores de flujo de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .

iii) Se calculó el volumen del sistema estudiado.

Se calibraron los tubos de ensayo donde se tomaron las muestras, etc..

Se desarrollaron 6 pruebas experimentales, cada una por duplicado, manteniéndose como parámetros constantes:

- a) Flujo de  $\text{CO}_2$ , igual a 28.1242 l/hora, que corresponde a una lectura del manómetro de  $\Delta P = 1.5$  cm.
- b) Volumen hueco del sistema en estudio igual a 87 ml.
- c) Dimensiones del sistema.
- d) Sentido de flujos en contracorriente.
- e) Posiciones de entrada y salida de los flujos.
- f) Cantidad de trazador inyectada.

La variable que se adoptó en este estudio, fue el flujo de  $\text{H}_2\text{O}$  alimentado al sistema fundamental, el cual varió de - - 4.008 l/hora hasta 9.3011 l/hora, de la siguiente manera:

Tabla (III-1).

CORRIDA	FLUJO DE $\text{H}_2\text{O}$ (Vo)	$\Delta P(\text{H}_2\text{O})$ *
1	4.0080 l/hora	3 cm
2	5.3745 "	5 "
3	6.5195 "	7 "
4	7.5312 "	9 "
5	8.4506 "	11 "
6	9.3011 "	13 "

\* $\Delta P(\text{H}_2\text{O})$ : Lectura registrada en el manómetro medidor -- de flujo de  $\text{H}_2\text{O}$ .

Se comprobó la absorbancia promedio para cada corrida -- (AP).

Se calculó el tiempo especial ( $\tau$ ).

Se midió la absorbancia de cada muestra tomada en forma continua, una tras otra.

Se calculó el tiempo medio de residencia ( $\bar{x}$ ), y el volumen muerto ( $V_d$ ), que son constantes para cada corrida.

Se calcularon los valores de  $E_0$  experimental.

Se hicieron las curvas experimentales de  $E_0$  experimental.

Se hicieron las curvas experimentales de  $E_0$  vs  $\theta$  y se -- analizaron estadísticamente, se comprobó la consistencia de los datos, se compararon las curvas experimentales con curvas de mo delos técnicos.

Para mayores detalles ver apéndices III, IV, VI.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

### RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS.

Los resultados experimentales obtenidos se resumen en -- las tablas que a continuación se presentan, donde se muestran -- las siguientes características:

- $\Delta P(H_2O)$ : Lectura del manómetro medidor de flujo de  $H_2O$  en cm.
- $V_0(H_2O)$ : Flujo de  $H_2O$  en l/hora.
- $\tau$ : Tiempo especial.
- No: Número de muestra.
- TETA:  $\theta = t/\tau$ : tiempo adimensional.
- LAP: Lectura de absorbancia promedio de dos réplicas de cada muestra.
- ET-EP:  $E_0$  experimental promedio de dos réplicas.
- FA-EP: Frecuencia acumulada experimental promedio de dos réplicas.
- Son valores constantes para todas las corridas.

Nota:  $\Delta P(CO_2)$  = lectura del manómetro medidor de flujo de  $CO_2 = 1.5$  cm.

$V_0(CO_2)$  flujo de  $CO_2 = 28,1242$  l/hora.

AP = Absorbancia promedio = .146

TABLA 4-1

CORRIDA No. 1

 $\Delta P (H_2O) = 3 \text{ cm}$  $V_0(H_2O) = 4.008 \text{ l/hora}$  $\tau = 78.13 \text{ 30}$ 

No.	TETA	LAP	ET-EP	FA-EP
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0512	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.1024	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.1536	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.2048	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.2560	0.0060	0.0411	0.0021
7	0.3072	0.0397	0.2717	0.0160
8	0.3584	0.1280	0.8767	0.0609
9	0.4096	0.3063	2.0981	0.1683
10	0.4608	0.7100	4.8630	0.4173
11	0.5120	0.6800	4.6575	0.6558
12	0.5632	0.3967	2.7169	0.7479
13	0.6144	0.2933	2.0091	0.8978
14	0.6658	0.1400	0.9589	0.9469
15	0.7167	0.0897	0.6141	0.9784
16	0.7679	0.0590	0.4042	0.9991
17	0.8191	0.0287	0.1963	1.0092
18	0.8703	0.0213	0.1461	1.0167
19	0.9215	0.0077	0.0502	1.0193
20	0.9727	0.0000	0.0000	1.0193

TABLA 4-2

CORRIDA No 2

 $\Delta P (H_2O) = 5 \text{ cm}$  $V_0 (H_2O) = 5.3745 \text{ l/Hora}$  $\tau = 58.2752 \text{ seg.}$ 

No.	TETA	LAP	ET-EP	FA-EP
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0558	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.1115	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.1673	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.2231	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.2788	0.0077	0.0525	0.0029
7	0.3346	0.0230	0.1575	0.0117
8	0.3908	0.1247	0.8539	0.0594
9	0.4462	0.2980	2.0411	0.1731
10	0.5019	0.5767	3.9498	0.3934
11	0.5577	0.6533	4.4749	0.6432
12	0.6135	0.4200	2.8767	0.8035
13	0.6692	0.2483	1.7009	0.8984
14	0.7250	0.1123	0.7694	0.9413
15	0.7808	0.0860	0.5890	0.9741
16	0.8365	0.0450	0.3082	0.9913
17	0.8923	0.0290	0.1986	1.0021
18	0.9481	0.0220	0.1507	1.0108
19	1.0039	0.0117	0.0799	1.0152
20	1.0596	0.0000	0.0000	1.0152

TABLA 4-3

CORRIDA No 3

 $\Delta P (H_2O) = 7 \text{ cm.}$  $V_0 (H_2O) = 6.5195 \text{ l/hora.}$  $\tau = 48.0405 \text{ seg.}$ 

No.	TETA	LAP	ET-EP	FA-EP
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0572	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.1145	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.1717	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.2290	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.2862	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.3435	0.0040	0.0274	0.0016
8	0.4007	0.0390	0.2671	0.0169
9	0.4579	0.1050	0.7192	0.0581
10	0.5152	0.2900	1.9873	0.1717
11	0.5724	0.4400	3.0137	0.3378
12	0.6297	0.7117	4.8744	9.6232
13	0.6869	0.4817	3.2991	0.8123
14	0.7442	0.3277	2.2443	0.9406
15	0.8014	0.1917	1.3141	1.0159
16	0.8587	0.0970	0.6644	1.0538
17	0.9159	0.0563	0.3859	1.0759
18	0.9731	0.0330	0.2260	1.0888
19	1.0304	0.0213	0.1461	1.0972
20	1.0876	0.0073	0.0502	1.1001
21	1.1449	0.0000	0.0000	1.1001

TABLA 4-4

CORRIDA No 4

 $\Delta P (H_2O) = 9 \text{ cm.}$  $V_0 (H_2O) = 7.5312 \text{ l/hora}$  $\tau = 41.5870 \text{ seg.}$ 

No	TETA	LAP	ET-EP	FA-EP
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0601	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.1203	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.1804	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.2405	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.3006	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.3608	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.4209	0.0305	0.2089	0.0126
9	0.4810	0.1570	1.0754	0.0772
10	0.5411	0.3500	2.3973	0.2213
11	0.6013	0.4695	3.2158	0.4149
12	0.6614	0.4465	3.0582	0.5987
13	0.7215	0.3600	2.4658	0.7469
14	0.7816	0.2650	1.8151	0.8560
15	0.8418	0.2125	1.4555	0.9436
16	0.9017	0.0525	0.3596	0.9652
17	0.9618	0.0335	0.2295	0.9790
18	1.0220	0.0310	0.2124	0.9918
19	1.0823	0.0175	0.1199	0.9990
20	1.1424	0.0095	0.0651	1.0029
21	1.2025	0.0000	0.0000	1.0029

TABLA 4-5

CORRIDA No 5

AP (H<sub>2</sub>O) - 11 cmVo (H<sub>2</sub>O) = 8.4508 l/hora

τ = 37.0625 seg.

No.	TETA	LAP	ET-EP	FA-EP
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0607	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.1214	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.1821	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.2428	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.3035	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.3643	0.0230	0.1576	0.0096
8	0.4250	0.0725	0.4966	0.0398
9	0.4857	0.1125	0.7706	0.0865
10	0.5464	0.1885	1.2911	0.1649
11	0.6071	0.2675	1.8322	0.2761
12	0.6678	0.3050	2.0891	0.4029
13	0.7285	0.3275	2.2432	0.5391
14	0.7892	0.2850	1.9151	0.6575
15	0.8499	0.2575	1.7637	0.7646
16	0.9106	0.2300	1.5753	0.8603
17	0.9713	0.1725	1.1815	0.9320
18	1.0320	0.0975	0.6678	0.9725
19	1.0928	0.0525	0.3596	0.9943
20	1.1535	0.0325	0.2226	1.0078
21	1.2142	0.0190	0.1302	1.0157
22	1.2749	0.0105	0.0719	1.0201
23	1.3356	0.0000	0.0000	1.0201

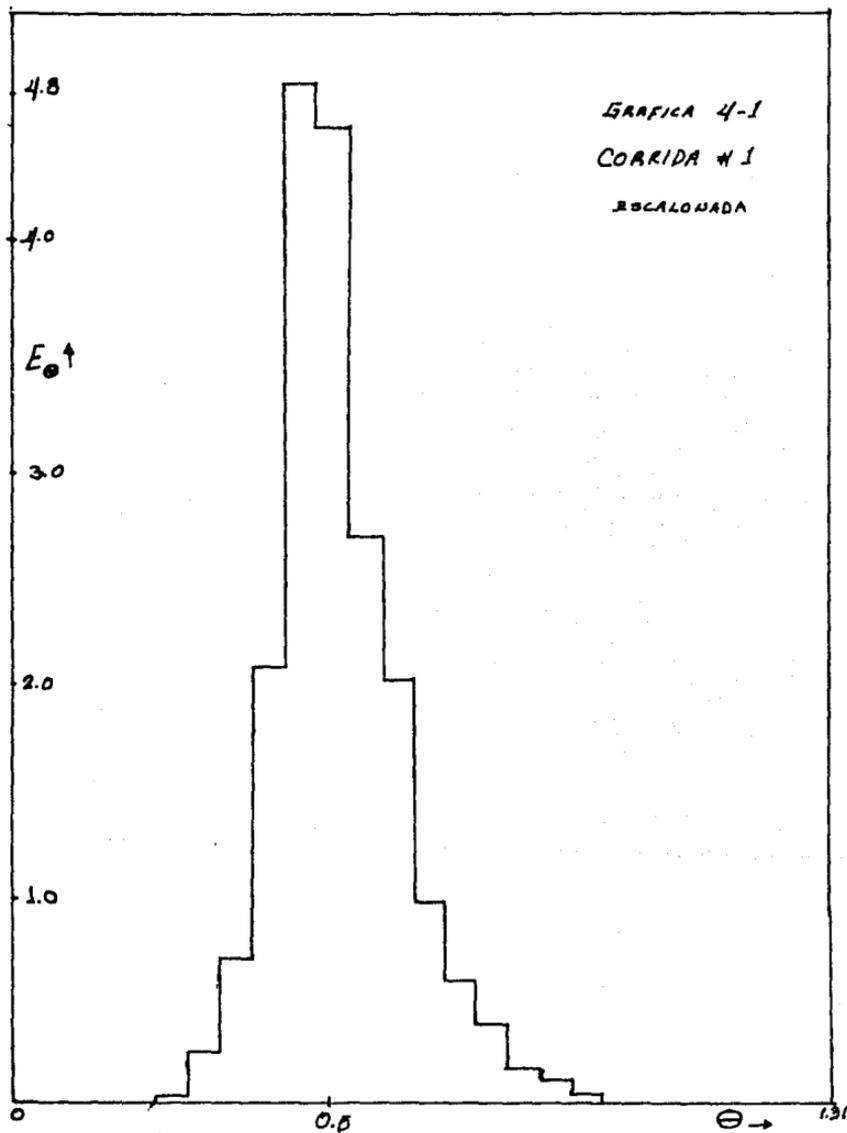
TABLA 4-6

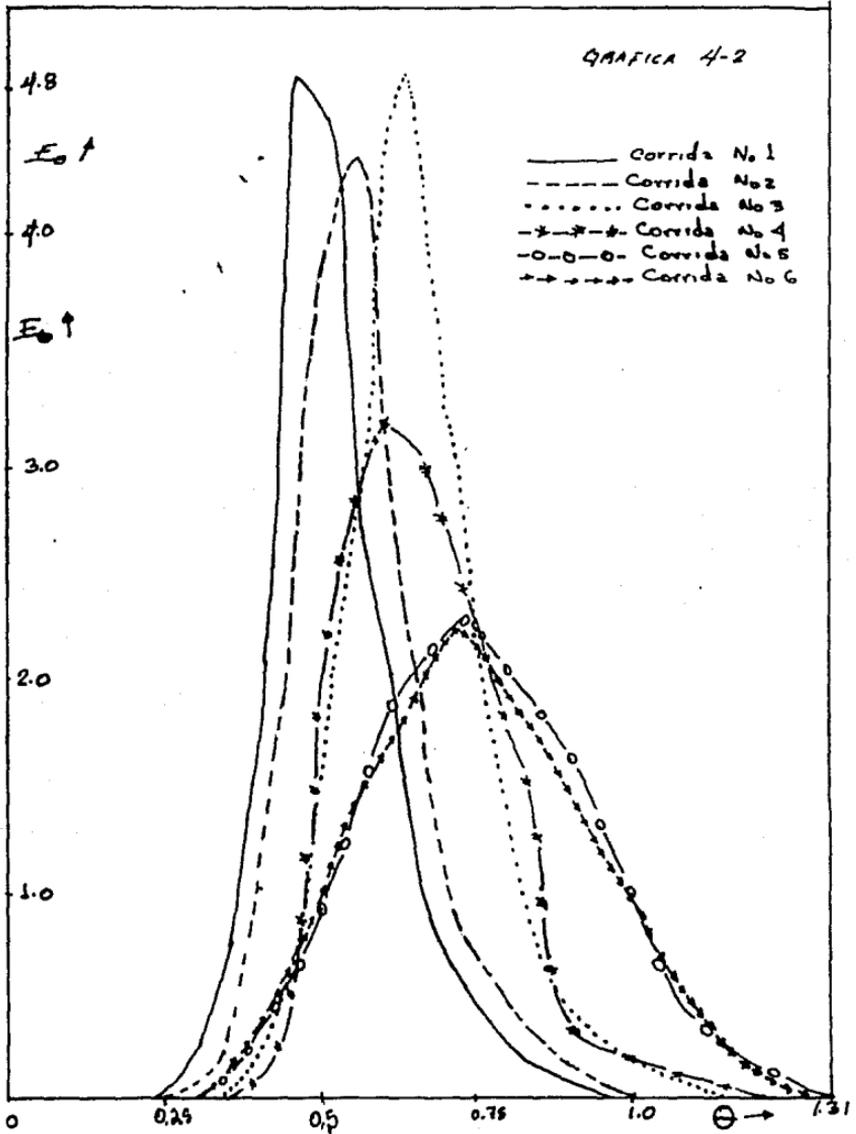
CORRIDA No 6

 $\Delta p \text{ (H}_2\text{O)} = 13 \text{ cm.}$  $V_0 \text{ (H}_2\text{O)} = 9.3011 \text{ l/hora}$  $\tau = 33.6734 \text{ seg.}$ 

No.	TETA	LAP	ET-EP	FA-EP
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0594	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.1188	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.1782	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.2376	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.2970	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.3564	0.0195	0.1336	0.0079
8	0.4168	0.0735	0.5034	0.0378
9	0.4752	0.1175	0.8048	0.0857
10	0.5345	0.1875	1.2842	0.1620
11	0.5939	0.2325	1.5924	0.2565
12	0.6533	0.2675	1.8322	0.3653
13	0.7127	0.3275	2.2431	0.4986
14	0.7721	0.2950	2.0205	0.6185
15	0.8315	0.2565	1.7569	0.7230
16	0.8909	0.2075	1.4213	0.8074
17	0.9503	0.1650	1.1301	0.8745
18	1.0097	0.1250	0.8561	0.9254
19	1.0691	0.0775	0.5308	0.9569
20	1.1285	0.0390	0.2671	0.9728
21	1.1879	0.0225	0.1541	0.9819
22	1.2473	0.0110	0.0753	0.9864
23	1.3067	0.0000	0.0000	0.9864

Como se explicó en el capítulo anterior, los datos obtenidos representan marcos de clase, de manera que las curvas deben ser escalonadas. La gráfica 4-1 representa la corrida 4-1, en forma escalonada. La gráfica 4-2 representa las corridas -- 4-1, a 4-6 en conjunto.





A estos datos se les probó estadísticamente su consistencia entre 2 réplicas de cada corrida, de manera que, los datos obtenidos fueron de eventos repetitivos, bajo las mismas condiciones.

Se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov para 2 réplicas, que presentan las siguientes características:

$\alpha$  = nivel de significancia.

$n$  = número de pruebas de la réplica 1

$m$  = número de pruebas de la réplica 2

$N = n + m$ .

$B\bar{K}_{max}$ . = medida de desviación máxima entre la población, representadas por los promedios de una muestra  $(\bar{F}(x)_p)$  y la población que representa una sola réplica de una muestra  $(\bar{F}(x))$ .

$CX^\circ$  = valor máximo permisible de la prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Para detalles de cálculos ver apéndices VI y VII.

A continuación se presenta la siguiente tabla que prueba la consistencia de datos.

TABLA 4-7

## TABLA DE VALORES

## PRUEBA ESTADÍSTICA PARA CONSISTENCIA DE DATOS

$$\alpha = .05 \quad (2 \text{ réplicas})$$

CORRIDA	B1 max.	C °	n	m	N=m+n
1	0.0064	0.4301	20	20	40
2	0.0921	0.4301	20	20	40
3	0.0137	0.4197	21	21	42
4	0.0137	0.4197	21	21	42
5	0.0029	0.4010	23	23	46
6	0.0348	0.4010	23	23	46

Hipótesis nula: las dos curvas son iguales.

$B1 \text{ max.} \leq Cx^\circ$ , no se rechaza la hipótesis.

$B1 \text{ max.} > Cx^\circ$ , se rechaza la hipótesis.

Ver apéndice VI, VII.

Puede verse que los datos son consistentes en todas las corridas.

CAPITULO V

COMPARACION CON MODELOS MATEMATICOS TEORICOS.

Las curvas experimentales se compararon con dos modelos teóricos, los cuales parecían ser de mayor similitud después de un estudio minucioso de varios modelos, y sugeridos por las formas que tomaron las curvas experimentales y por el dato de volumen muerto que se registró en el experimento.

Dichos modelos son:

Modelo A: Modelo de dispersión (chica) con volumen muerto.

Modelo B: Modelo de flujo laminar con volumen muerto.

Para la definición de estos modelos ver capítulo I.

A continuación se presenta una tabla de los modelos con los parámetros correspondientes a cada corrida. Tabla 5-B

Para detalles de cálculo de esta tabla ver apéndices VI y VII.

TABLA 5-8

TABLA DE VALORES DE PARAMETROS DE LOS MODELOS TEORICOS.

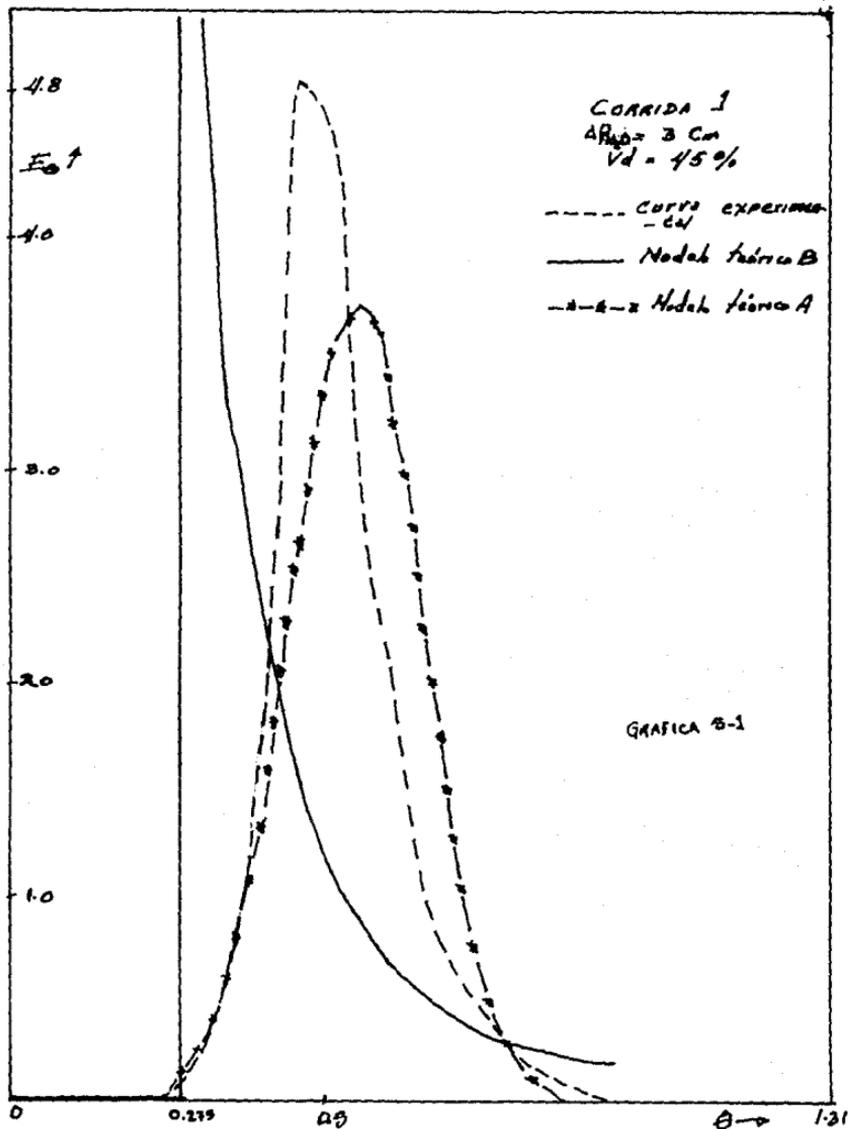
CORRIDA	$\gamma$ (seg)	$\bar{x}$ (seg)	Vd%	$\frac{V1+Vd}{V1}$	$\sigma^2$	D/UL	MODELO	A	MODELO	B
1	78.1330	42.7495	45.00	1.8182	66.5039	0.0182	$E_{\theta} = 3.8019 \exp \left[ - \frac{(1-1.8182\theta)^2}{0.0728} \right]$	$E_{\theta} = \frac{0.1513}{\theta^3}$	$\theta \geq 0.275$	
2	58.2752	34.8182	40.25	1.6736	44.2118	0.0183	$E_{\theta} = 3.4995 \exp \left[ - \frac{(1-1.6736\theta)^2}{0.0728} \right]$	$E_{\theta} = \frac{0.1800}{\theta^3}$	$\theta \geq 0.300$	
3	48.0405	32.8759	31.57	1.4622	31.9779	0.0148	$E_{\theta} = 3.3906 \exp \left[ - \frac{(1-1.4622\theta)^2}{0.0592} \right]$	$E_{\theta} = \frac{0.2341}{\theta^3}$	$\theta \geq 0.3420$	
4	41.5870	29.2912	29.57	1.4198	28.8645	0.0168	$E_{\theta} = 3.30901 \exp \left[ - \frac{(1-1.4198\theta)^2}{0.0672} \right]$	$E_{\theta} = \frac{0.2482}{\theta^3}$	$\theta \geq 0.3523$	
5	37.0625	29.1343	21.39	1.2721	43.6350	0.0257	$E_{\theta} = 2.2385 \exp \left[ - \frac{(1-1.2721\theta)^2}{0.1028} \right]$	$E_{\theta} = \frac{0.3090}{\theta^3}$	$\theta \geq 0.3931$	
6	33.6734	26.2233	22.12	1.2832	36.9278	0.0269	$E_{\theta} = 2.2071 \exp \left[ - \frac{(1-1.2832\theta)^2}{0.1076} \right]$	$E_{\theta} = \frac{0.3033}{\theta^3}$	$\theta \geq 0.3894$	

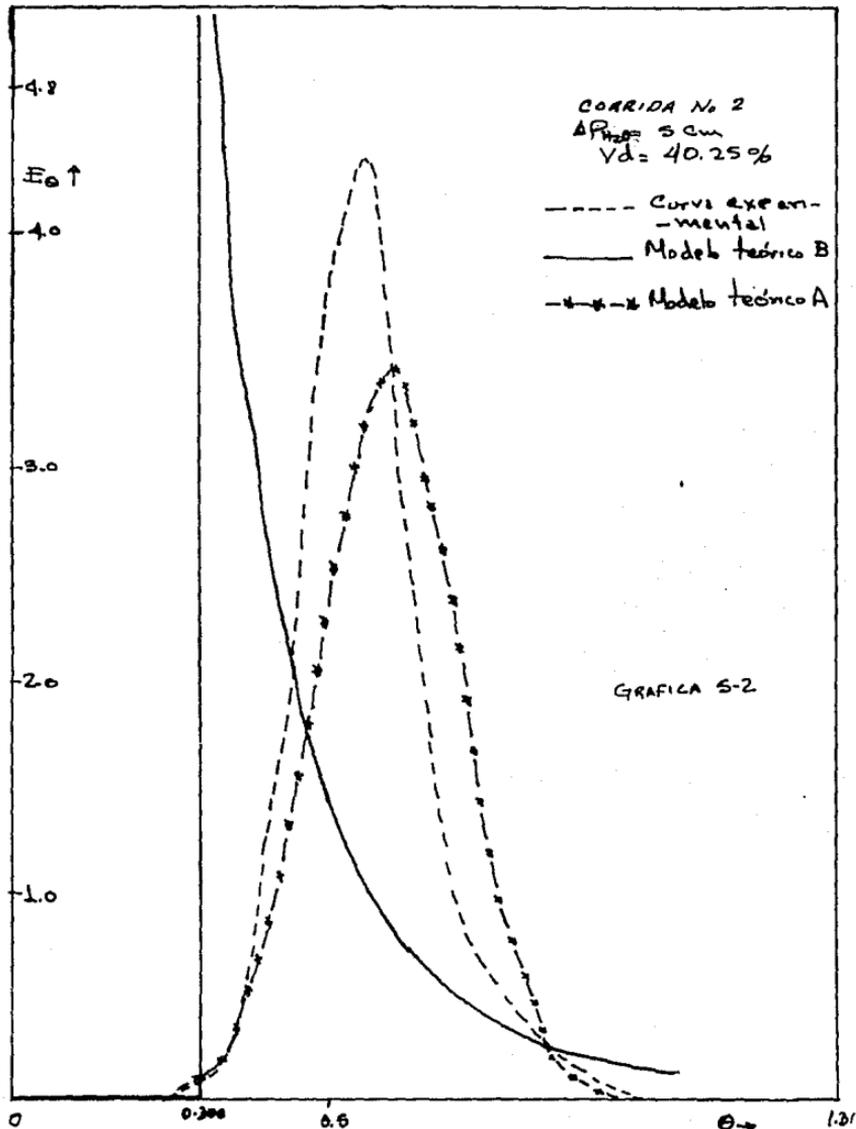
## COMPARACION GRAFICA

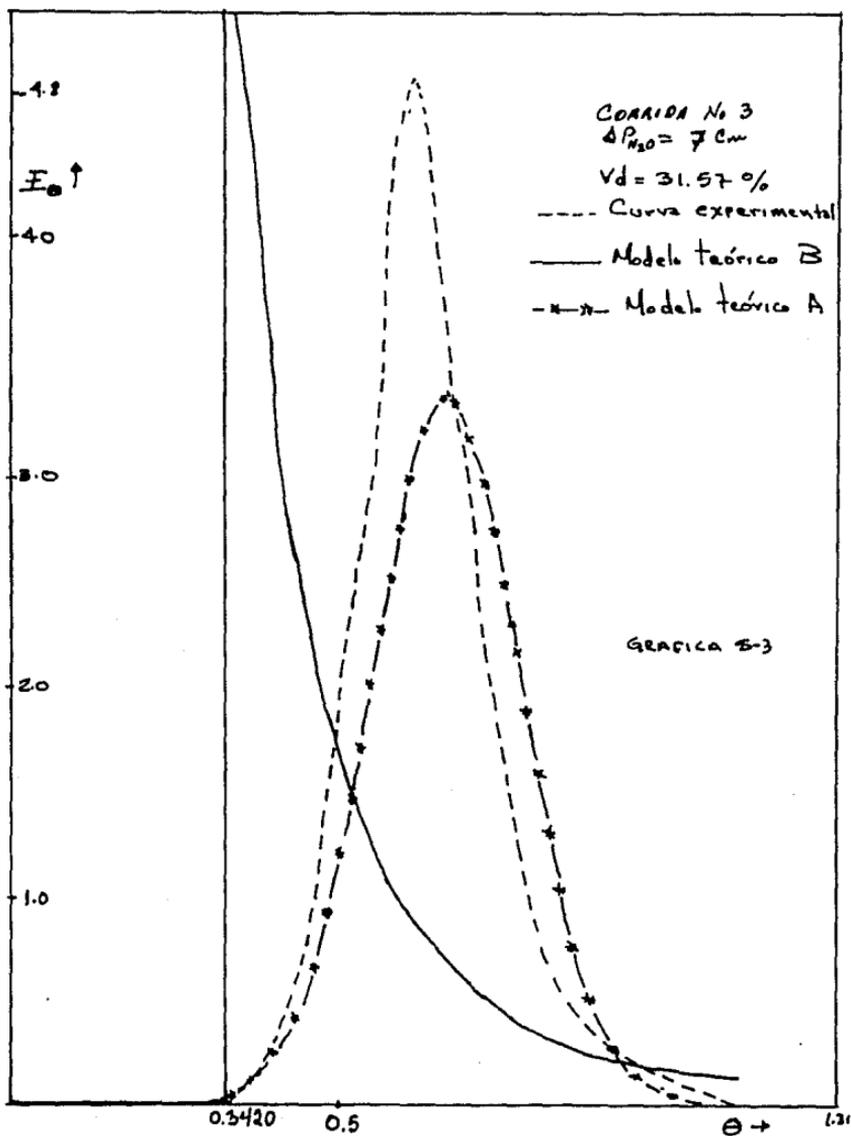
A continuación se presentan gráficas que comparan las -- curvas experimentales con las curvas de los modelos teóricos, correspondientes a cada corrida.

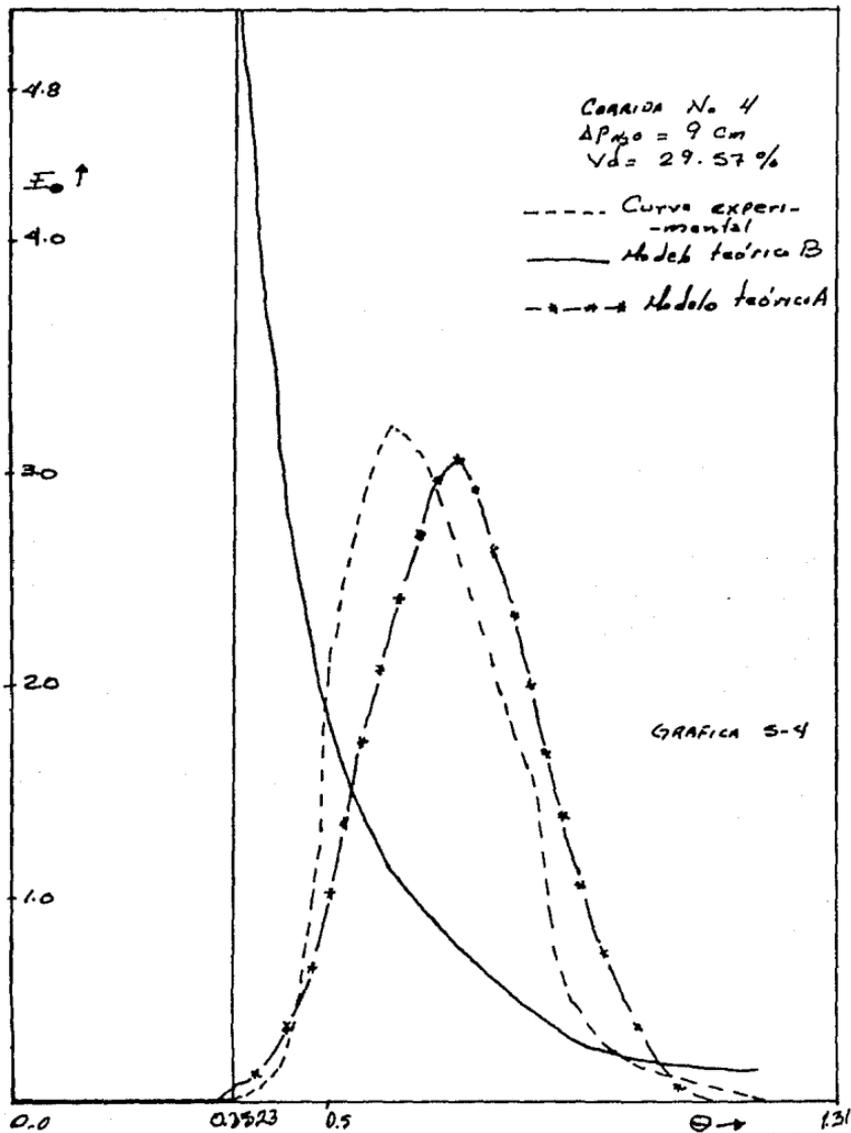
Los valores de las curvas experimentales se encuentran - en las tablas 4-1 a 4-6 del capítulo 4 y los de las curvas teóricas se encuentran en las tablas 5-1 a 5-6 del apéndice 5.

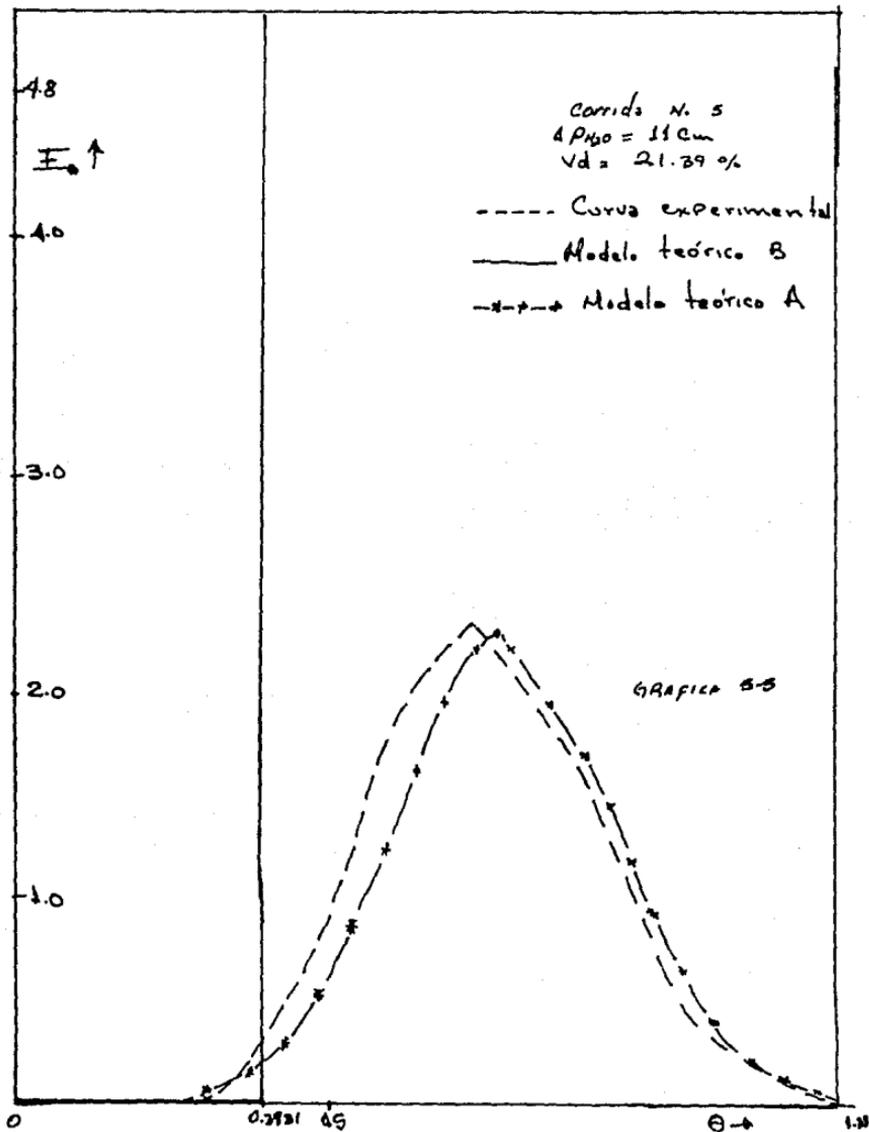
El número de gráfica corresponde el número de la corrida y el número de la tabla donde se encuentran sus valores.

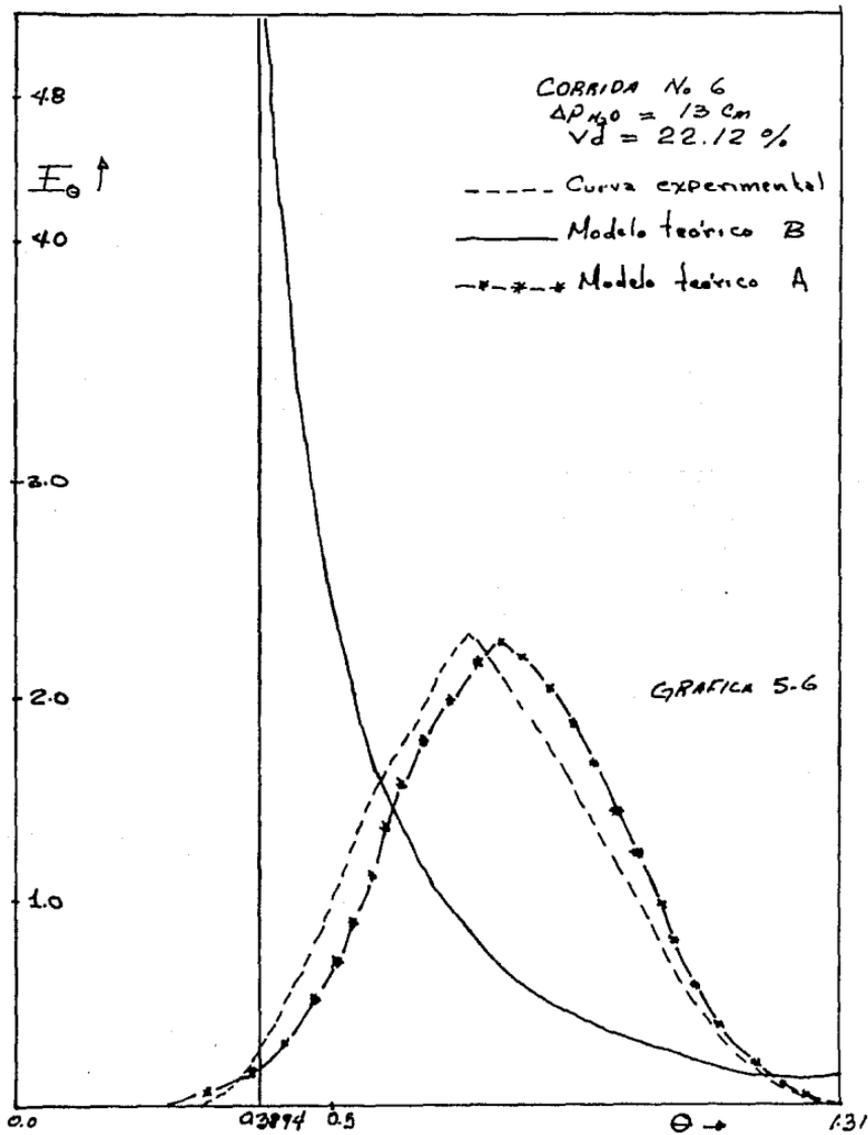












COMPARACION DE LAS CURVAS EXPERIMENTALES CON  
CURVAS DE MODELOS TEORICOS POR METODO ESTADIS  
TICO.

Para esta prueba estadísticas se usó la prueba de Kolmogorov-Smirnov, para funciones de distribución de frecuencia -- (bondad de ajuste).

En esta prueba se tomó en consideración de que los tiempos de muestra fueron pequeños y continuos (las muestras se tomaron una tras otra en forma continua), debido a la complejidad del sistema. Por lo tanto, cada muestra que se tomaba representaba un promedio de concentración y se tomaron como marca de -- clase. De tal manera que las gráficas experimentales son una -- representación de gráficas escalonadas.

A continuación se presenta una tabla de valores para la prueba estadística, que compara los modelos teóricos con el experimental.

TABLA 5-A  
 TABLA DE VALORES PARA PRUEBA ESTADISTICA  
 QUE COMPARA EL PROMEDIO EXPERIMENTAL DE  
 DOS REPLICAS COMO MODELOS TEORICOS.

CORRIDA	MODELO A A Max.	MODELO B A Max.	VALOR $\alpha = 5\%$	PERMISIBLE $\alpha = 2\%$	(cx) $\alpha = 1\%$
1	0.3877	0.3746	0.2100	0.2350	0.2520
2	0.3687	0.4906	0.2100	0.2350	0.2520
3	0.3995	0.6198	0.2052	0.2298	0.2460
4	0.3147	0.5756	0.2052	0.2298	0.2460
5	0.2279	0.3581	0.1960	0.2198	0.2356
6	0.2023	0.3642	0.1960	0.2198	0.2356

Hipótesis nula: las dos curvas son iguales.

A max.  $\leq$  CX, no se rechaza

A max.  $>$  CX, se rechaza

Ver apéndice VI, VII

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS ESTADÍSTICOS

Observando la tabla 5-A de este capítulo se concluye:

## MODELO A

Para  $\alpha = 5\%$  se rechazan todas las corridas

Para  $\alpha = 2\%$  se acepta la corrida 6 y se rechazan las corridas de 1 a 5.

Para  $\alpha = 1\%$  se aceptan las corridas 5, 6 y se rechazan las corridas de 1 a 4.

Para el modelo B, se observa que se rechazan todas las corridas, para todas las  $\alpha$  consideradas.

Estos resultados son congruentes con las gráficas 5-1 a 5-6 de este capítulo donde se ve claramente que las curvas de las corridas 5, 6 tienen gran similitud con las curvas del modelo teórico A. Y también se muestra que las corridas 1 a 4 presentan un comportamiento intermedio entre las curvas de los dos modelos teóricos.

**CAPITULO VI.**

**ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS OBTENIDOS  
POR LOS METODOS DE TRAZADORES Y ABSORCION DE GAS  
EN UN SISTEMA SIMILAR Y EN LAS MISMAS CONDICIONES**

## ESTUDIO PREVIO

Consiste en:

La determinación del comportamiento del coeficiente de absorción (KL) de  $\text{CO}_2$ , en función del flujo de  $\text{H}_2\text{O}$  en contracorriente con el flujo de  $\text{CO}_2$ .

Estudio realizado por Hugo Segura Alcalá (9), en un sistema similar al de nuestro estudio y bajo las mismas condiciones de trabajo. Se determinó la concentración de  $\text{CO}_2$  en el  $\text{H}_2\text{O}$ , adquirida con un determinado flujo de  $\text{H}_2\text{O}$ , para obtener el coeficiente de absorción (KL).

Los resultados obtenidos en el mencionado estudio son los siguientes:

$\Delta P$	$V_0(\text{H}_2\text{O})$	Re	$KL \times 10^4$
3	4.0080	2.6495	7.6144
4	4.7284	3.1257	10.0268
5	5.3745	3.5528	11.9934
6	5.9675	3.9448	13.9806
7	6.5195	4.3097	13.1035
8	7.0389	4.6350	13.3703
9	7.5312	4.9785	13.4762
10	8.0008	5.2889	13.4378
11	8.4503	5.5863	13.2678
12	8.8835	5.8724	13.9768
13	9.3001	6.1485	13.0799

Donde:

$\Delta P$  = Lectura del manómetro medidor del flujo de  $H_2O$ , en

$Vo(H_2O) = \frac{cm.}{Flujo\ de\ H_2O, \text{ en } l/hora.}$

$Re$  = Número de Reynolds, adimensional, definido en el capítulo I.

$K_L$  = Coeficiente de absorción en la fase líquida, en m/hora  
La gráfica 6-1(a) representa los valores de  $P(H_2O)$  vs  $-K_L \times 10^4$ .

Nuestro estudio presenta además de los resultados presentados en el capítulo IV, un análisis de estos, de forma que, puedan ser comparados con los resultados presentados en el estudio previo antes citado, en la tabla siguiente:

$\Delta P$	$Vo(H_2O)$	$Re$	$\sigma^2$
3	4.0080	2.6495	66.5039
5	5.3745	3.5528	44.2118
7	6.5195	4.3097	31.9779
9	7.5312	4.9785	28.8645
11	8.4506	5.5863	43.6350
13	9.3011	6.1485	36.9278

Donde:

$\Delta P$  = Lectura del manómetro medidor de flujo de agua, en cm.

$V_0(H_2O)$  = Flujo de agua, en L/hora.

Re = Número de Reynolds, definido en el capítulo 1.

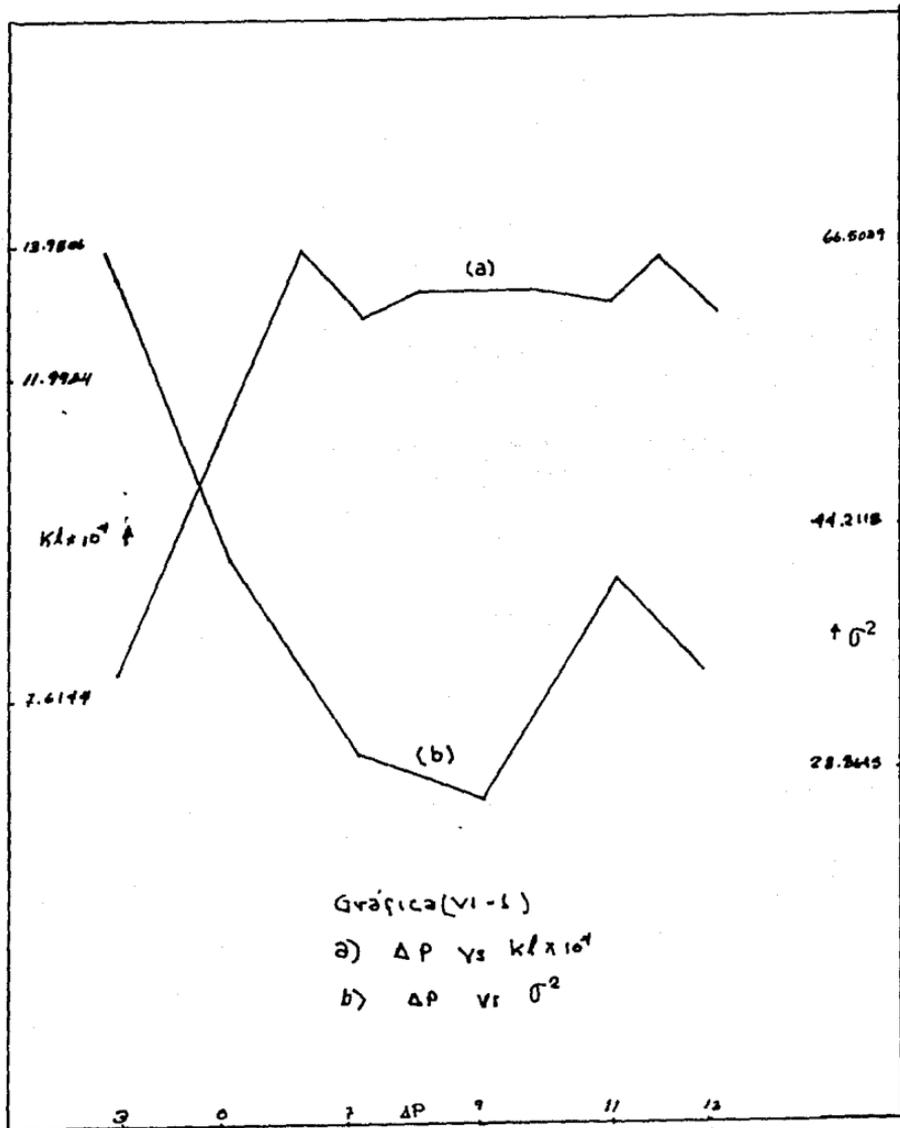
$\sigma^2$  = Varianza estadística basada en la distribución de tiempos de residencia y con referencia al tiempo medio estadístico, ambos definidos en capítulo 1.

La gráfica 6-1(b) presenta los valores de AP vs  $\sigma^2$  en forma comparativa con la gráfica 6-1(a).

Para cálculos del Re ver apéndice 1.

Para cálculos de variancia estadística ver el apéndice -

VI.



## ANALISIS DEL CAPITULO

Observando los resultados de los dos estudios presentados en este capítulo, se puede decir que:

En los dos estudios el sistema presenta una variación en su comportamiento, pasando ambos por una zona de transición que se registra en  $3.9448 < Re < 4.9785$ .

Para el primer estudio donde se determina el comportamiento del coeficiente de transferencia de masa en la fase líquida en función del flujo de  $H_2O$  ( $\Delta P$  vs  $K_L$ ), fig. VI-1a. Este presenta un comportamiento uniforme en forma recta, para  $Re$  menores de 3.9448, aquí entra en una zona de transición para  $3.9448 < Re < 4.3097$ , y sufre un cambio en su comportamiento a una forma horizontal poco uniforme para  $Re$  mayores de 4.3097.

Para nuestro estudio se presenta el comportamiento de la variancia estadística basada en la D.T.R en función del flujo de agua ( $\sigma^2$  vs  $\Delta P$ ), fig. VI-1b, ésta presenta en forma similar un comportamiento lineal uniforme para  $Re$  menores de 4.6350 pasa por una zona de transición en  $4.6350 < Re < 4.9785$  y su comportamiento sufre un cambio brusco para  $Re$  mayores de 4.9785.

## CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES

Con este trabajo se alcanzó el objetivo fijado: Se analizó el comportamiento de un tubo empacado, en el cual había un flujo de agua y en contracorriente un flujo de  $\text{CO}_2$ , por medio de la D.T.R. de un trazador.

Al observar los datos obtenidos se concluye que:

- 1.- Estadísticamente las dos réplicas de cada corrida son consistentes, por lo tanto cada prueba forma un evento repetitivo, siempre que se realice bajo las mismas condiciones.
- 2.- Cada concentración obtenida en un tiempo  $t$ , representa un promedio de concentraciones para un rango de  $t$ . Por lo tanto las gráficas experimentales son representaciones gráficas escalonadas.
- 3.- El sistema presenta volúmenes muertos que pueden ser consecuencia de canalizaciones del flujo, en el cual el trazador recorre el sistema por ciertos caminos, sin mezclarse con el demás fluido contenido en el recipiente, y se observó que: A medida que aumenta el flujo de  $\text{H}_2\text{O}$  el porcentaje de volumen muerto disminuye.

- 4.- En la comparación de las curvas experimentales con curvas de modelos teóricos se observó que:

El modelo de flujo del sistema se encuentra fuera de un modelo ideal. Siendo las pruebas de las corridas 5,6 representadas por el modelo de dispersión en grado pequeño afectado por el volumen muerto (modelo A) para un nivel de significancia de 2%, 1% y las corridas 1 a 4 se pueden representar por un modelo que puede ser el resultado de la combinación de los modelos A y B, según se observa en las curvas experimentales comparadas con las curvas teóricas.

- 5.- Tanto en nuestros resultados como en el estudio previo presentado aquí, vemos que:

El sistema presenta dos comportamientos diferentes pasando por una zona de transición en  $3.9448 < Re < 4.3097$

Para el estudio del comportamiento del coeficiente de transferencia de masa en la fase líquida ( $K_L$ ) en función del flujo de líquido ( $H_2O$ ), este está determinado por dos ecuaciones diferentes dependiendo del número de Reynolds ( $Re$ ). Para nuestro estudio se puede decir que el sistema está determinado por dos modelos de flujo diferentes.

Se sugiere hacer estudios similares en equipos de mayor dimensiones y técnicamente mejor controlados, ya que el rudimentario del equipo hace que se pierda mucha información.

B I B L I O G R A F I A

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- DENBIGH, Kennet, Teoría del Reactor Químico.  
1a Edición. ALHAMBRA, Madrid, 1968.
- 2.- HARTER, H. L. AND OWEN, D. B. Tables Mathematical Statistics  
2a Ed., MARKHAM PUBLISHING COMPANY, USA. 1970.
- 3.- KREYSZING, Erwin, Introducción a la Estadística Matemática  
1a. Ed., LIMUSA, México, 1981.
- 4.- LEVESPIEL, Octave, Ingeniería de las Reacciones Químicas.  
2a. Ed., REVERTE, España, 1979.
- 5.- PERLAMUTER, Daniel D. Stability of Chemical Reactors  
1a. Ed., PRENTICE HALL, USA, 1972.
- 6.- PERRY, Robert /CHILTON Cecil H., Manual del Ingeniero Químico.  
2a. Ed., MC GRAW HILL, México, 1982.
- 7.- RONALD, Giles V., Mecánica de los Fluidos e Hidráulica.  
2a. Ed., MC GRAW HILL, México, 1974.
- 8.- RAMIREZ, BECERRA, Zeferino Ismael, Influencia de la Posición del Agitador en la Distribución de Tiempo de Residencia. Parte I: Alimentación del Tanque cercana a la mitad del nivel del líquido. (Tesis),  
U.A.G. 1981.
- 9.- SEGURA, ALCALA Hugo, Tesis Inédita 1984.
- 10.- SMITH J.H., Ingeniería Cinética Química.  
2a Ed., CECSA, México, 1981.

- 11.- TREYBAL, Robert, E., Operaciones de Transferencia de Masa  
2a Ed., MC GRAW HILL, México, 1981.
- 12.- WALAS Stanley M., Cinética de Reacciones Químicas.

## APENDICE 1

### OBTENCION DE ECUACIONES

## OBTENCION DE ECUACIONES

PARA MODELO A: MODELO DE DISPERSION GRADO PEQUEÑO CON VOLUMEN MUERTO.

La ecuación del modelo A se obtiene a partir de un análisis matemático y la aplicación de las propiedades de la D.T.R. de la ecuación del modelo de dispersión (1-10), del capítulo 1.

$$E_0 = \frac{1}{2 \tau \tau (D/UL)} \exp \left[ - \frac{(1-\theta)^2}{4 (D/UL)} \right]$$

Propiedades de la D.T.R. para flujos sin volumen muerto.

$$\tau = \frac{V}{V_0}$$

$$\theta = \frac{t}{\tau} = \frac{tV_0}{V}$$

$$E_0 = E\tau$$

Con la aplicación de estas propiedades se obtiene la ecuación de E en función de t.

$$(1-1) \quad E = \frac{1}{2 \left( \frac{V}{V_0} \right) \sqrt{\tau \tau (D/UL)}} \exp \left[ - \frac{\left( 1 - \frac{tV_0}{V} \right)^2}{4 (D/UL)} \right]$$

Propiedades análogas de la D.T.R. para un flujo afectado por el volumen muerto son:  $\tau = \left( \frac{V_1 + V_d}{V_0} \right)$ , donde:  $V = V_1 + V_d$

$$\theta = \frac{t}{\tau} = \frac{tV_0}{V_1 + V_d}$$

$$E_\theta = E\tau$$

Aplicando estas propiedades a la ecuación (1-1) de  $E = f(t)$ , se obtiene la ecuación del modelo A en función de  $\theta$  igual a:

$$E_\theta = \frac{\left( \frac{V_1 + V_d}{V_1} \right)}{2 \sqrt{\pi} (D/UL)} \exp \left[ - \frac{\left[ 1 - \left( \frac{V_1 + V_d}{V_1} \right) \theta \right]^2}{4 (D/UL)} \right]$$

Que es la ecuación (I-13) del capítulo I.

## OBTENCION DE ECUACIONES.

PARA MODELO B: MODELO DE FLUJO LAMINAR CON VOLUMEN MUERTO.

La ecuación del modelo B se obtiene a partir de un análisis matemático y la aplicación de las propiedades de la D.T.R. de la ecuación (I-11) del capítulo I, que es:

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3}, \text{ para } 1/2 \leq \theta < \infty$$

Aplicando las mismas propiedades de la D.T.R. para flujo sin volumen muerto, de la sección anterior, se obtiene la ecuación de  $E=f(t)$ , de la forma:

$$(I-2) \quad E = \frac{1}{2t^3} \left( \frac{V}{V_0} \right)^2, \text{ para } t \geq .5 \left( \frac{V}{V_0} \right)$$

Del mismo modo aplicando las propiedades de la D.T.R. para el flujo afectado por un volumen muerto, se obtiene la ecuación del modelo B en función de  $\theta$ :

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3 \left( \frac{V1+Vd}{V1} \right)^2}, \text{ para } \theta \geq .5 \left( \frac{V1}{V1+Vd} \right)$$

donde:  $V = V1+Vd$

Que es la ecuación (I-14) del capítulo I.

**APENDICE II**

**DESCRIPCION DEL EQUIPO EMPLEADO**

## DESCRIPCION DEL EQUIPO EMPLEADO.

El trabajo experimental para este estudio, se realizó en un tubo formado por:

Un tubo de vidrio (como unidad fundamental de estudio) y una serie de accesorios como son: tuberías, llaves de paso, manómetros, controladores de volumen, alimentadores de agua,  $CO_2$ , etc, [Fig. 2-1].

El tubo de vidrio está diseñado de tal manera, que pueden circular 2 flujos en contracorriente y está formado por dos secciones en serie:

Primera sección: es un tubo de vidrio de 2.54 cm. de diámetro por 60.0 cm de longitud, empacado con 4915 perlas de ebullición de 0.4 cm de diámetro, que ocupan 46.5 cm de longitud y son sostenidas por un soporte de p.v.c. fijo en la parte inferior, a 54.5 cm de distancia con respecto a la parte superior del tubo.

Está provisto, en su parte superior, de 2 orificios, uno central que da al  $H_2O$  y trazador y el otro lateral, que es la salida del  $CO_2$ .

Posee otro orificio lateral en la parte inferior, a 54.0

cm respecto a la parte superior, o sea por encima del soporte - de p.v.c. y es la entrada de  $\text{CO}_2$  al sistema.

Segunda sección: es un tubo en U conectado en serie por abajo del primer tubo. Es de 30.0 cm de longitud y 1.0 cm de diámetro, cuya función es formar un tapón hidráulico, para así lograr que el  $\text{CO}_2$  fluya hacia arriba pasando por la parte empaçada.

Al extremo de esta sección se encuentra la salida de  $\text{H}_2\text{O}$  y la toma de muestra de trazador.

El volumen real hueco de esta unidad de estudio es de -- 87.0 ml.

Para la alimentación de  $\text{H}_2\text{O}$  al sistema se utilizaron 2 - controladores de caudal, el primero situado a 3.20 m de altura, formado por una cubeta de 40.0 cm de longitud por 30.0 cm de -- diámetro, el segundo es un recipiente de vidrio situado a 30.0 cm de altura del sistema, de 25.0 cm de longitud por 7.0 cm de diámetro, ambos provistos por rebosaderos para el control de ni vel y así mantener una presión hidrostática constante en el sis tema. La corriente de alimentación pasa por una llave de bronce, llega a un manómetro de vidrio tipo tobera para medir los - flujos de  $\text{H}_2\text{O}$ , de aquí pasa por otra llave de bronce y llega al sistema por la parte superior.

La corriente alimentadora de  $H_2O$  es conducida por mangueras de hule.

La corriente alimentadora de  $CO_2$  proviene de un tanque - de almacenamiento y conducida por tubería de vidrio. Pasando - por una llave de vidrio llega a un homogenizador de gas; luego - pasa por un manómetro de vidrio tipo tobera (para medir su flujo), se conduce por mangueras de hule y llega al sistema por la parte inferior lateral del primer tubo, ya en la parte empacada.

Para medir las diferencias de presión, en los medidores - de flujo, se usó tetracloruro de carbono ( $CCl_4$ ), por su mayor - densidad respecto al  $H_2O$  y al  $CO_2$  y además, por ser inmisible - con éstos. Al tetracloruro de carbono se le agregó yodo para - colorearlo y así visualizar mejor el menisco.

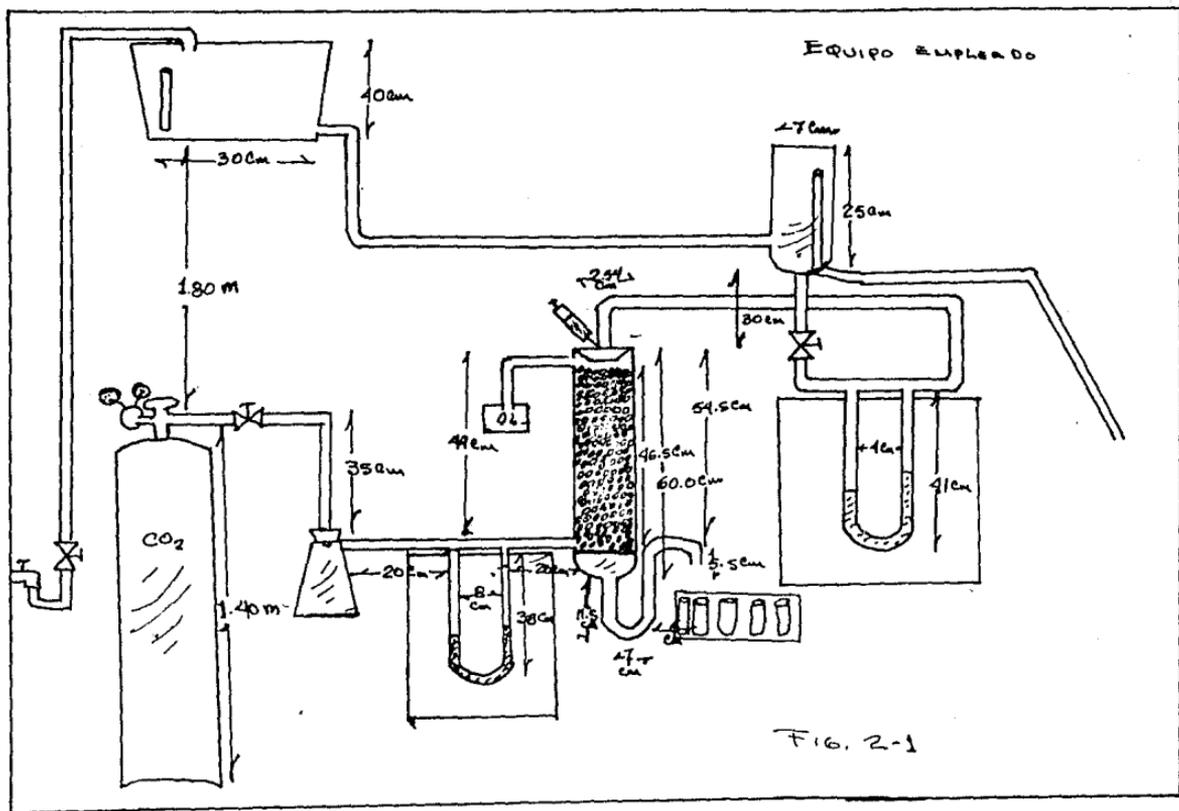
La salida de  $CO_2$  por la parte superior lateral del siste - ma de estudio, descarga en un burbujeador (recipiente con agua - y jabón), para verificar a simple vista, que el  $CO_2$  fluya en -- contracorriente con el  $H_2O$ .

Para inyectar el trazador se utilizó una jeringa de 10 - ml, con aguja No. 20; trazador usado: rojo de uva.

Para recolección de muestras se utilizaron tubos de en - sayo de 10 cm x 1.5 cm, montados en una gradilla de madera, los

cuales primero se calibraron. De aquí las muestras se llevaban al espectrofotómetro marca SPECTRONIC 20, donde se determinaban sus absorbancias.

Fig. 2-1 de este apéndice muestra el sistema con más detalles.



APENDICE III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

## CALCULOS PRELIMINARES.

- 1.- Se encontró la zona de longitud de onda de absorbancia máxima ( $\lambda$ ) del colorante (rojo de uva), por medio de un espectrógrafo infrarrojo. Después, con el mismo espectrofotómetro que usamos en las pruebas, se hizo una gráfica de longitud de onda contra absorbancia. Así se encontró que la máxima absorbancia está en la longitud de onda de 515  $\text{A}^\circ$ .
  
- 2.- Se calculó la concentración y cantidad de trazador óptima a utilizar, con el fin de que las muestras tomadas estuvieran en el rango de lectura del espectrofotómetro. Esta -- concentración y cantidad óptima se buscó por prueba y - - error, o sea: se inyectaba cierta cantidad de trazador de determinada concentración, se hacía la corrida de prueba, se tomaban muestras y probaban si sus lecturas de absorbancia se encontraban dentro del rango de lectura del espectrofotómetro.

La concentración óptima que se encontró fue de 1 gramo de colorante diluido a un litro de agua. De aquí se tomaron 5 ml de la solución, que se utilizaron como trazador en cada corrida.

Se encontró que el colorante envejecía de un día a otro por lo cual se preparaba solución cada día.

- 3.- Se hizo una curva de calibración del espectrofotómetro de absorbancia contra concentración, de la siguiente forma:  
Se preparó una solución patrón de 1 gramo de colorante diluido a 1 litro de agua, de aquí se tomaron muestras de 5, 7, 10, 20, 25, 30 ml y se diluyeron hasta 250 ml. con agua. Se tomaron las lecturas de absorbancia, se hizo la curva y así se comprobó la linealidad de absorbancia contra concentración.
- 4.- Se hicieron gráficas de calibración de los manómetros (medidores de flujo), ver apéndice IV.
- 5.- Se determinó el volumen del sistema llenándolo de agua y después midiendo directamente el volumen empleado. El volumen determinado fue de 87 ml.
- 6.- Se hizo la calibración de los tubos de ensayo, marcándolos hasta el volumen requerido para cada muestra.

#### PLAN DE TRABAJO

Los datos a obtener del experimento son absorbancia en -

función del tiempo, Estas son proporcionales a las concentraciones de trazador. Por medio de dichos datos, se obtuvieron las curvas experimentales  $E_{\theta}$  vs  $\theta$ , y estas curvas se compararon -- con curvas  $E_{\theta}$  vs  $\theta$  teóricas por métodos estadísticos, como se explicó anteriormente.

#### TRABAJO RUTINARIO.

- 1.- Montaje del aparato.
- 2.- Establecimiento del AP constante de flujo gaseoso para todas las corridas, el cual fue de 1.5 cm. en el manómetro, - que corresponde a un flujo gaseoso de 28.1242 litros/hora, de  $CO_2$ .
- 3.- Establecimiento del AP de flujo de  $H_2O$  en el manómetro. En cada corrida se variará el flujo de  $H_2O$ , permaneciendo el flujo de  $CO_2$  constante. El rango de variación del flujo de  $H_2O$  será de: 4.008 litros/hora hasta 9.3011 litros/hora.
- 4.- Preparación de los tubos de ensayo.
- 5.- Establecimiento del estado estacionario.
- 6.- Inyección de la cantidad óptima de trazador.
- 7.- Tomar muestras de trazador a la salida del equipo, una -- tras otra, y medir la absorbancia de cada una de ellas en el espectrofotómetro.
- 8.- Obtener la absorbancia promedio para cada corrida.
- 9.- Calcular los valores experimentales de  $E_{\theta}$  y  $\theta$  y graficarlos.

- 10.- Tratamiento estadístico de los datos experimentales.
- 11.- Comparación de curvas experimentales, contra curvas de modelos teóricos, estadísticamente.

## CONDICIONES DE OPERACION

- 1.- Volumen del sistema igual a 87 ml.
- 2.- Flujo de  $\text{CO}_2$  igual a:  
 $V_0 (\text{CO}_2) = 28.1242$  litros de  $\text{CO}_2$ /hora.  
 Que corresponde a una lectura del manómetro de:  
 $P = 1.5$  cm.  
 Y es constante para todas las corridas.
- 3.- Flujo de  $\text{H}_2\text{O}$ , diferente para cada corrida de la forma:

TABLA (3-1)

CORRIDA	$V_0 (\text{H}_2\text{O})$	$\Delta P (\text{H}_2\text{O})$
1	4.0080 l/hora	3 cms.
2	5.3745 "	5 "
3	6.5195 "	7 "
4	7.5312 "	9 "
5	8.4506 "	11 "
6	9.3011 "	13 "

Donde:  $V_0 (\text{H}_2\text{O}) =$  flujo de agua

$\Delta P (\text{H}_2\text{O}) =$  lectura del manómetro medidor de flujo de -  
 agua.

- 4.- Cantidad de trazador:  
 5 ml. de colorante en solución, formada por 1 gramo de colorante en un litro de agua.

APENDICE IV

CALIBRACION DE MANOMETROS MEDIDORES DE  
FLUJO Y CALCULO DE NUMERO DE REYNOLDS ( $Re$ ).

## CALIBRACION DE MANOMETROS

## MEDIDORES DE FLUJO (4,7)

Los manómetros medidores de flujo consisten en:

Un medidor de orificio tipo tobera, donde se registra -- una caída de presión (que depende del caudal que fluye a través de él), unido a un tubo en U donde se registra dicha caída de presión, para ello en el tubo en U se coloca una sustancia de mayor densidad que la que fluye.

La calibración de los manómetros medidores de flujo, consiste en relacionar las diferencias de presión (lecturas en el manómetro), con el caudal que fluye a través de éstos.

Dicha relación puede ser expresada por una ecuación y -- gráfica, que representa dicho comportamiento.

Para encontrar la ecuación basta linearizar datos de las lecturas del manómetro ( $\Delta P$ ) y los datos de los caudales registrados de la forma:

$$(4-1) \quad \ln V_o = \ln a + b \ln (\Delta p)$$

Graficando  $\ln (\Delta P)$  vs  $\ln V_o$

Calcular pendiente = b

Calcular intercepción =  $\ln a$

Así se obtiene la ecuación:

$$(4-2) \quad V_o = a (\Delta P)^b$$

Donde:

$V_o$  = flujo a través del manómetro.

$\Delta P$  = lectura del manómetro.

$a$  y  $b$  = constantes del medidor de orificio.

CALIBRACION DEL MANOMETRO  
MEDIDOR DE FLUJO DE H<sub>2</sub>O.

PROCECMIENTO:

- 1.- Se colocó en el medidor de flujo tetracloruro de carbono - (CCl<sub>4</sub>) coloreado, que es una sustancia de mayor densidad - que el agua, para poder visualizar la caída de presión.
- 2.- Se abrió la válvula permitiendo el ~~pas~~o de agua, registrán dose así cierta caída de presión (lectura en el manómetro).
- 3.- Se midió el flujo de agua (l/hora) con su correspondiente caída de presión registrada en el manómetro.  
Nota: El flujo de agua se midió en una probeta, tomando el tiempo en que se llenaba cierto volumen.
- 4.- Se hicieron varias pruebas a diferentes lecturas del manómetro midiendo así sus correspondientes flujos, hasta obtener la suficiente información.
- 5.- Se linearizaron los datos, obteniéndose la ecuación:

$$(4-3) \quad Vo(H_2O) = 2.1337 (\Delta P_{H_2O})^{0.579}$$

Donde:

$Vo(H_2O)$  = caudal de flujo de agua, en l/hora.

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

79

$\Delta P_{H_2O}$  = lectura de calda de presión para el manómetro medidor de flujo de agua, en cm.

CALIBRACION DEL MANOMETRO  
MEDIDOR DE FLUJO DE CO<sub>2</sub>

Para la calibración del medidor de flujo de CO<sub>2</sub> se diseñó un recipiente, calibrador de orificio que consiste en:

Un recipiente cerrado de 20 litros de volumen que se le acoplaron los siguientes aditamentos:

- 1.- Un tubo de plástico transparente para medir el nivel de agua, junto a éste, una reglilla metálica señalando los diferentes volúmenes.
- 2.- en la parte central superior del recipiente, la conexión a la línea de alimentación de gas (CO<sub>2</sub>).
- 3.- Mangueras para descarga de agua.
- 4.- Conexión para alimentación de agua.

Ver figura 4-1.

## P R O C E D I M I E N T O

- 1.- Se conectó el manómetro medidor de flujo de  $\text{CO}_2$  al recipiente para calibración de orificio, por la parte central-superior (3) y lleno de agua.
- 2.- Se reguló el flujo de gas ( $\text{CO}_2$ ) para que origine una caída de presión determinada en el manómetro (el gas desplaza el agua, la cual es desalojada a través de la manguera (4) ).
- 3.- Se mantuvo la salida de agua desalojada a una altura constante sobre el nivel del agua, para conservar así mismo invariable el flujo y la presión del gas ( $\text{CO}_2$ ).
- 4.- Se tomó el tiempo necesario para desplazar el nivel entre dos marcas, para así poder calcular el caudal de salida de agua, por desplazamiento, que corresponde a un caudal de  $\text{CO}_2$ .
- 5.- Se repitió el proceso variando la lectura de diferencia de presión en el manómetro y midiendo así el caudal, hasta tener suficiente información.
- 6.- Se linearizaron los datos de caudal de  $\text{CO}_2$  y diferencias de presiones, y se obtuvo la siguiente ecuación:

$$(4-4) \quad V_o(\text{CO}_2) = 20.6063 (\Delta P_{\text{CO}_2})^{0.767}$$

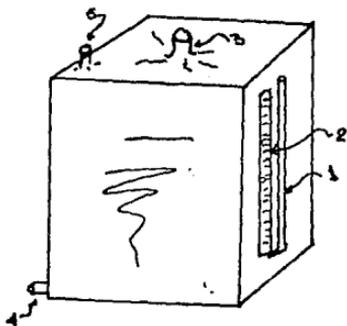
Donde:

$V_o(\text{CO}_2)$  = flujo de  $\text{CO}_2$ , en l/hora.

$\Delta P_{\text{CO}_2}$  = lectura del manómetro medidor  
de flujo de  $\text{CO}_2$ , en cm.

Ver figura 4-1.

FIG. 4-1



- 1.. TUBO DE NIVEL
- 2.. REGULILLA
- 3.. COMBINACION DE ALIMENTACION DE AGUA
- 4.. DECAJES DE AGUA
- 5.. ALIMENTACION DE AGUA

RECIPIENTE DE CALIBRACION  
DE ORIFICIO

## CALCULOS DEL # REYNOLDS

Se calculó de la siguiente forma: Ecuación (I-16) del capítulo I.

$$Re = \frac{L\rho}{a_p\mu}$$

Donde:

$L$  = gasto másico en  $\text{l/hora m}^2$ .

$$(4-5) \quad L = \frac{Vo(H_2O)}{a_t}$$

$Vo(H_2O)$  = flujo de agua en  $\text{l/hora}$ .

$$(4-6) \quad a_t = \frac{\pi D^2}{4}$$

$\pi = 3.1416$

$D$  = diámetro del tubo =  $0.0254 \text{ m}$

$$(4-7) \quad a_p = \frac{6(1-E)}{d_p} \quad (11)$$

$a_t$  = área transversal en  $\text{m}^2$

$$(4-8) \quad E = 1 - \pi/6 = 0.4764$$

$d_p$  = diámetro de la partícula de relleno =  $0.004 \text{ m}$

$a_p$  = área específica de empaque en  $\text{m}^2/\text{m}^3$

$E$  = factor de eficiencia.

$\mu$  = viscosidad del agua igual a

$$1.0559 \times 10^{-3} \text{ kg/m-sec} = 3.8$$

$\text{kg/m-hora}$ .

$\rho_{(H_2O)}$  = densidad del agua =  $1.0 \text{ kg/l}$

$$a_t = \frac{(0.0254)^2}{4} = 5.06 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$a_p = \frac{6(0.5296)}{0.004} = 785.4 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

Aplicando estos valores a la ecuación (1-16), se obtiene la ecuación del # Re de la forma:

$$(4-9) \quad Re = \frac{V_o (H_2O)}{1.5108}$$

APENDICE V

TABLAS DE VALORES PARA MODELOS TEORICOS.

Los valores de las curvas de los modelos teóricos A y B son representados por las gráficas 5-1 a 5-6, en el capítulo V.

Las tablas 5-1 a 5-6 de este apéndice son comparativas - con las tablas 4-1 a 4-6 del capítulo IV y presentan las siguientes columnas:

No	=	número de muestra experimental.
TETA	=	$\theta = t/\tau$ = tiempo adimensional.
ET-TA	=	$E_{\theta}$ teórica del modelo A.
FA-TA	=	frecuencia acumulada teórica del modelo A.
ET-TB	=	$E_{\theta}$ teórica del modelo B.
FA-TB	=	frecuencia acumulada teórica del modelo B.

Sus ecuaciones se presentan en las tablas 5-A del capítulo V.

TABLA 5-1 MODELOS TEÓRICOS CON LOS PARÁMETROS DE  
LA CORRIDA No 1.

No.	TETA	ET-TA	FA-TA	ET-TB	FA-TB
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0512	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.1024	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.1536	0.0013	0.0001	0.0000	0.0000
5	0.2048	0.0170	0.0010	0.0000	0.0000
6	0.2560	0.0751	0.0048	0.0000	0.0000
7	0.3072	0.2615	0.0182	5.2189	0.2672
8	0.3584	0.7179	0.0550	3.2865	0.4355
9	0.4096	1.5134	0.1325	2.2017	0.5482
10	0.4608	2.6491	0.2681	1.5463	0.6274
11	0.5120	3.5607	0.4504	1.1273	0.6851
12	0.5632	3.7719	0.6435	0.8469	0.7285
13	0.6144	3.1492	0.8047	0.6524	0.7619
14	0.6658	2.0744	0.9100	0.5133	0.7889
15	0.7167	1.0763	0.9661	0.4110	0.8092
16	0.7679	0.4401	0.9886	0.3341	0.8263
17	0.8191	0.1418	0.9958	0.2753	0.8404
18	0.8703	0.0360	0.9976	0.2295	0.8521
19	0.9215	0.0072	0.9980	0.1934	0.8620
20	0.9727	0.0011	0.9981	0.1643	0.8620

TABLA 5-2 MODELOS TEORICOS CON LOS PARAMETROS DE LA CORRIDA

No 2

No	TETA	ET-TA	FA-TA	ET-TB	FA-TB
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0558	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.1115	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.1673	0.0028	0.0002	0.0000	0.0000
5	0.2231	0.0159	0.0011	0.0000	0.0000
6	0.2788	0.0703	0.0050	0.0000	0.0000
7	0.3346	0.2449	0.0187	4.8050	0.2681
8	0.3904	0.6718	0.0562	3.0251	0.4369
9	0.4462	1.4502	0.1371	2.0262	0.5500
10	0.5019	2.4618	0.2741	1.4237	0.6294
11	0.5577	3.2924	0.4582	1.0377	0.6873
12	0.6135	3.4653	0.6516	0.7795	0.7308
13	0.6692	2.8717	0.8118	0.6006	0.7643
14	0.7259	1.8726	0.9163	0.4723	0.7907
15	0.7808	0.9609	0.9699	0.3781	0.8118
16	0.8365	0.3888	0.9916	0.3075	0.8290
17	0.8923	0.1236	0.9985	0.2534	0.8391
18	0.9481	0.0309	1.0002	0.2112	0.8509
19	1.0039	0.0061	1.0005	0.1779	0.8609
20	1.0596	0.0009	1.0005	0.1513	0.8609

TABLA 5-3 MODELOS TEORICOS CON LOS PARAMETROS  
DE LA CORRIDA No. 3

No.	TETA	ET-TA	FA-TA	ET-TB	FA-TB
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0572	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.1145	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.1717	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.2290	0.0019	0.0002	0.0000	0.0000
6	0.2862	0.0112	0.0008	0.0000	0.0000
7	0.3435	0.0516	0.0038	5.7759	0.3181
8	0.4007	0.1872	0.0145	3.6387	0.5185
9	0.4589	0.5360	0.0452	2.4385	0.6528
10	0.5152	1.2131	0.1146	1.7119	0.7471
11	0.5724	2.1641	0.2384	1.2483	0.8158
12	0.6297	3.0498	0.4128	0.9378	0.8674
13	0.6869	3.3895	0.6067	0.7223	0.9072
14	0.7442	2.9734	0.7768	0.5680	0.9385
15	0.8014	2.0594	0.8946	0.4548	0.9635
16	0.8587	1.1247	0.9589	0.3697	0.9839
17	0.9159	0.4854	0.9867	0.3047	1.0007
18	0.9731	0.1654	0.9962	0.2541	1.0147
19	1.0304	0.0444	0.9987	0.2140	1.0265
20	1.0876	0.0094	0.9992	0.1820	1.0365
21	1.1449	0.0016	0.9992	0.1560	1.0365

TABLA 5-4 MODELOS TEORICOS CON LOS PARAMETROS  
DE LA CORRIDA No. 4

No	TETA	ET-TA	FA-TA	ET-TB	FA-TB
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0601	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.1203	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.1804	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.2405	0.0049	0.0003	0.0000	0.0000
6	0.3006	0.0233	0.0017	0.0000	0.0000
7	0.3608	0.0897	0.0071	5.2845	0.3181
8	0.4209	0.2776	0.0238	3.3286	0.5185
9	0.4810	0.6922	0.0654	2.2303	0.6528
10	0.5411	1.3896	0.1489	1.5666	0.7471
11	0.6023	2.2475	0.2840	1.1416	0.8158
12	0.6614	2.9238	0.4597	0.8578	0.8674
13	0.7215	3.0629	0.6438	0.6608	0.9072
14	0.7816	2.5833	0.7991	0.5198	0.9385
15	0.8418	1.7529	0.9044	0.4161	0.9635
16	0.9017	0.9604	0.9621	0.3385	0.9859
17	0.9618	0.4230	0.9875	0.2790	1.0007
18	1.0220	0.1497	0.9965	0.2325	1.0147
19	1.0623	0.0425	0.9991	0.1958	1.0265
20	1.1424	0.0098	0.9997	0.1665	1.0365
21	1.2025	0.0018	0.9997	0.1427	1.0365

TABLA 5-5 MODELOS TEORICOS CON LOS PARAMETROS  
DE LA CORRIDA No. 5

No	TETA	ET-TA	FA-TA	ET-TB	FA-TB
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0607	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.1214	0.0021	0.0001	0.0000	0.0000
4	0.1821	0.0072	0.0005	0.0000	0.0000
5	0.2428	0.0215	0.0018	0.0000	0.0000
6	0.3035	0.0572	0.0053	0.0000	0.0000
7	0.3643	0.1360	0.0136	0.0000	0.0000
8	0.4250	0.2874	0.0310	4.0252	0.2443
9	0.4857	0.5408	0.0631	2.6968	0.4080
10	0.5464	0.9061	0.1181	1.8942	0.5230
11	0.6071	1.3518	0.2002	1.3809	0.6068
12	0.6678	1.7979	0.3093	1.0376	0.6698
13	0.7285	2.1246	0.4385	0.7996	0.7183
14	0.7892	2.2382	0.5742	0.6286	0.7565
15	0.8499	2.0996	0.7016	0.5033	0.7870
16	0.9106	1.7539	0.8081	0.4092	0.8119
17	0.9713	1.3046	0.8872	0.3372	0.8323
18	1.0320	0.8641	0.9397	0.2811	0.8494
19	1.0928	0.5092	0.9706	0.2368	0.8638
20	1.1535	0.2674	0.9868	0.2013	0.8760
21	1.2142	0.1250	0.9964	0.1720	0.8865
22	1.2749	0.0521	0.9996	0.1491	0.8955
23	1.2356	0.0193	0.9996	0.1297	0.8955

TABLA 5-6 MODELOS TEORICOS CON LOS PARAMETROS  
DE LA CORRIDA No. 6

No	TETA	ET-TA	FA-TA	ET-TB	FA-TB
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0594	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.1188	0.0028	0.0002	0.0000	0.0000
4	0.1782	0.0088	0.0007	0.0000	0.0000
5	0.2376	0.0248	0.0022	0.0000	0.0000
6	0.2970	0.0628	0.0059	0.0000	0.0000
7	0.3564	0.1430	0.0144	0.0000	0.0000
8	0.4168	0.2955	0.0319	4.1888	0.2488
9	0.4752	0.5361	0.0638	2.8265	0.4167
10	0.5345	0.8795	0.1160	1.9862	0.5347
11	0.5939	1.3043	0.1935	1.4479	0.6207
12	0.6533	1.7310	0.2963	1.0878	0.6853
13	0.7127	2.0653	0.4188	0.8378	0.7351
14	0.7721	2.2053	0.5498	0.6589	0.7742
15	0.8315	2.1170	0.6756	0.5276	0.8055
16	0.8909	1.8241	0.7839	0.4289	0.8310
17	0.9503	1.4109	0.8677	0.3534	0.8520
18	1.0097	0.9796	0.9259	0.2946	0.8695
19	1.0691	0.6105	0.9622	0.2482	0.8842
20	1.1285	0.3415	0.9825	0.2110	0.8967
21	1.1879	0.1715	0.9927	0.1809	0.9074
22	1.2473	0.0773	0.9973	0.1563	0.9167
23	1.3067	0.0303	0.9973	0.1359	0.9167

APENDICE VI

PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV PARA BONDAD DE  
AJUSTE.

PRUEBAS ESTADÍSTICAS PARA CONSISTENCIA DE DATOS  
Y COMPARACION CON MODELOS TEÓRICOS.

CONSISTENCIA DE DATOS. (3)

La consistencia de datos en un experimento, indica que dicho experimento expresará los mismos resultados en cada réplica, convirtiéndose en un evento repetitivo, siempre que se encuentre bajo las mismas condiciones.

Se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov bimestral -- que consiste en: rechazar o no la hipótesis nula de que: la función de distribución de frecuencia acumulada, promedio de dos réplicas ( $\tilde{F}(x)_p$ ), es igual a la función de distribución de frecuencia acumulada de cualesquiera de las dos réplicas ( $\tilde{F}(x)_i$ ):

$$\tilde{F}(x)_p = \tilde{F}(x)_i$$

Donde:

$$(6-1) \quad \tilde{F}_o = \tilde{F}(x)_i = \frac{\theta}{\sigma} (E_o \Delta \theta) \text{ experimental, para cada } \text{réplica}$$

$$(6-2) \quad \tilde{F}_{op} = \tilde{F}(x)_p = \frac{\tilde{F}(x)_1 + \tilde{F}(x)_2}{2} = \frac{\theta}{\sigma} (E_o \Delta \theta) \text{ promedio experimental}$$

Para rechazar o no dicha hipótesis: se busca una medida de desviación entre  $\tilde{F}(x)_p$  y  $\tilde{F}(x)_i$  dada por  $B_1^\circ$  max. de la for-

ma:

$$B_{\text{max.}} = \tilde{F}(x)_p - \tilde{F}(x)_i$$

definida como la diferencia máxima entre  $\tilde{F}(x)_p$  y  $\tilde{F}(x)_i$ .

Se escoge un nivel de significancia  $\alpha$  (5%, 3%, 2%).

Se calcula un valor máxima permisible ( $CX^\circ$ ), para un nivel de significancia escogida ( $\alpha$ ). La ecuación para un valor de  $\alpha = 5\%$  es:

$$(6-3) \quad CX^\circ = 1.36 \sqrt{N/MXN}, \quad (2)$$

Donde:

$n$  = número total de muestras para la réplica 1.

$m$  = número total de muestras para la réplica 2.

$N = n + m$ .

Se compara el valor de  $B_{\text{max.}}$  de manera que:

$B_{\text{max.}} \leq CX$ , no se rechaza la hipótesis.

$B_{\text{max.}} > CX$ , se rechaza la hipótesis.

#### COMPARACION DE DATOS EXPERIMENTALES. CON MODELOS TEORICOS (3)

Se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov para funciones de distribución de frecuencia (bondad de ajuste).

La hipótesis nula es que: cierta función  $F(x)$  es la función de distribución  $\tilde{F}(x)_p$  de una población de la que se tomó una muestra  $x_1, \dots, x_n$  valores, o sea:

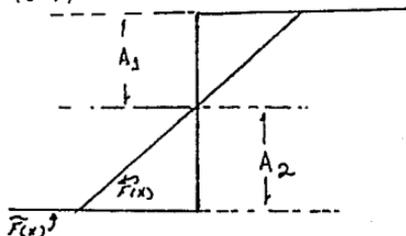
$$\tilde{F}(x)_p = F(x)$$

(6-4) Donde:  $F_\theta = F(x) = \int_0^\theta E_\theta d\theta \approx \sum_{i=0}^{\theta} (E_\theta \Delta\theta)$ , para el modelo teórico.

(6-5)  $\tilde{F}_\theta = \tilde{F}(x)_p = \sum_{i=0}^{\theta} (E_\theta \Delta\theta)$ , usando  $E_\theta$  promedio de las dos réplicas para el modelo experimental.

Para rechazar o no la hipótesis, se tiene que conocer -- qué tanto varía  $\tilde{F}(x)_p$  de  $F(x)$ . Siendo  $\tilde{F}(x)_p$  una función escalonada,  $A_1$  y  $A_2$  son las diferencias en el punto de discontinuidad entre  $\tilde{F}(x)_p$  y  $F(x)$ .

Ver figura (6-1)



Donde  $A_1$  y  $A_2$  se calculan de la forma:

$$(6-6) \quad A_1 = \tilde{F}(x)_p - F(x) (t-1) = F_{\theta p} - F_\theta(\theta-1)$$

$$(6-7) \quad A2 = \tilde{F}(x)_p - F(x) = \tilde{F}_{\theta p} - F_{\theta}$$

El valor máximo de  $A1$ ,  $A2$  se compara con el valor permisible  $CX$  encontrado en tablas estadísticas para la prueba Kolmogorov-Smirnov.

#### PROCEDIMIENTO:

- 1.- Se calculan los valores de la función de distribución  $\tilde{F}(x)_p$  de la muestra, de  $x_1, \dots, x_n$  valores de la forma:

$$\tilde{F}(x)_p = \tilde{F}_{\theta p} = \frac{\theta}{\theta_0} (E_{\theta} \theta),$$
 usando  $E_{\theta}$  promedio de las dos réplicas, para el modelo experimental.

- 2.- Se calculan los valores de la función de distribución del modelo teórico  $F(x)$  de la forma:

$$F(x) = F_{\theta} = \int_0^x (E_{\theta} \Delta \theta)$$

- 3.- Se determina la desviación máxima entre  $\tilde{F}(x)_p$  y  $F(x)$ , correspondiente a  $A1$  o  $A2$ .
- 4.- Se determina el valor máximo permisible  $\{CX\}$  para un tamaño de muestra y un nivel de significancia escogido (5%, 3%, 2%, 1%, etc).
- 5.- Se compara el valor máximo de  $A1$  o  $A2$  con el valor de  $CX$  -

de tal forma que:

$A1$  o  $A2$  max.  $\leq$   $CX$ , no se rechaza la hipótesis.

$A1$  o  $A2$  max.  $>$   $CX$ , se rechaza la hipótesis.

El apéndice VII presenta ejemplos de cálculos de las --  
pruebas estadísticas y de los parámetros de las ecuaciones de --  
los modelos técnicos.

## APENDICE VII

EJEMPLOS DE CALCULOS REALIZADOS:  
OBTENCIÓN DE PARAMETROS DE LAS ECUACIONES  
DE LOS MODELOS TEORICOS Y PRUEBAS ESTADISTICAS.

TRATAMIENTO ESTADISTICO PARA CONSISTENCIA DE DATOS  
Y COMPARACION DE ESTOS CON MODELOS TEORICOS.

SIMBOLOGIA:

- 1.-  $\tau$  = tiempo especial
- 2.- AP = absorbancia promedio de cada corrida.
- 3.-  $\Delta P$  = diferencia de presión en el medidor de flujo.
- 4.- N = número de muestra.
- 5.- t = tiempo de toma de las muestras.
- 6.-  $t_i$  = tiempo intermedio entre dos tiempos de toma de muestras.
- 7.- LA1 = lectura de absorbancia, de la réplica 1.
- 8.- LA2 = lectura de absorbancia de la réplica 2.
- 9.- LAP = lectura de absorbancia promedio de las dos réplicas.
- 10.- ET-E1 =  $E_{\theta}$  experimental de la réplica 1.
- 11.- ET-E2 =  $E_{\theta}$  experimental de la réplica 2.
- 12.- ET-EP =  $E_{\theta}$  experimental, promedio de las dos réplicas.
- 13.- TETA = tiempo adimensional [  $\theta$  ]
- 14.- DTETA = incremento de TETA
- 15.- FA-E1 = frecuencia acumulada experimental de la réplica 1,  
igual a  $\tilde{F}(x)_1$
- 16.- FA-E2 = frecuencia acumulada experimental de la réplica 2,  
igual a  $\tilde{F}(x)_2$
- 17.- FA-EP = frecuencia acumulada experimental promedio de dos  
réplicas, igual a  $\tilde{F}(x)_p$
- 18.-  $B_{\max}$  = diferencia máxima entre  $\tilde{F}(x)_p$  y  $F(x)_2$

- 19.-  $CX^{\circ}$  = valor estadístico máximo permisible para la prueba de consistencia de datos.
- 20.-  $\alpha$  = nivel de significancia.
- 21.- ET-TA =  $E_{\theta}$  teórico del modelo A
- 22.- ET-TB =  $E_{\theta}$  teórico del modelo B
- 23.- FA-TA = frecuencia acumulada teórica del modelo A =  $F(x)$  mod. A.
- 24.- FA-TB = frecuencia acumulada teórica del modelo B =  $F(x)$  mod. B.
- 25.-  $A_1, A_2$  = desviaciones para la prueba estadística.
- 26.- CX = valor estadístico máximo permisible de aceptación para N valores y un valor de escogido.

A continuación se presenta una tabla correspondiente a la corrida No 6, para consistencia de datos. Se calculó según las ecuaciones:

$$(7-1) \quad ET-E1 = \frac{LA1}{\bar{A}P}$$

$$(7-2) \quad ET-E2 = \frac{LA2}{\bar{A}P}$$

$$(7-3) \quad FA-E1 = \tilde{F}(x)1 = \sum_{i=1}^m (E_{\theta} \Delta \theta)$$

$$(7-4) \quad FA-E2 = \tilde{F}(x)2 = \sum_{i=1}^m (E_{\theta} \Delta \theta)$$

$$(7-5) \quad B\bar{L}max. = \tilde{F}(x)_p - \tilde{F}(x)_2, \text{ valor máximo.}$$

$$(6-3) \quad CX^{\circ} = 1.36 \sqrt{N/MXN} = 0.4010$$

$$\text{para } n = 23$$

$$m = 23$$

$$N = 46$$

TABLA 7-1 CALCULO DE LA CURVA E<sub>0</sub> PARA LA  
CORRIDA No. 6

$\Delta P = 13 \text{ cm.}$

$V_0 = 9.3011 \text{ l/hora}$

$\tau = 33.6734 \text{ seg.}$

$AP = 0.146$

No.	$x$	LA1	LA2	LAP	$x_i$	ET-E1	ET-E2	ET-EP
1	0	0.000	0.000	0.0000	1	0.0000	0.0000	0.0000
2	2	0.000	0.000	0.0000	3	0.0000	0.0000	0.0000
3	4	0.000	0.000	0.0000	5	0.0000	0.0000	0.0000
4	6	0.000	0.000	0.0000	7	0.0000	0.0000	0.0000
5	8	0.000	0.000	0.0000	9	0.0000	0.0000	0.0000
6	10	0.000	0.000	0.0000	11	0.0000	0.0000	0.0000
7	12	0.020	0.019	0.0195	13	0.1370	0.1301	0.1336
8	14	0.073	0.074	0.0735	15	0.5000	0.5068	0.5034
9	16	0.115	0.120	0.1175	17	0.7877	0.8219	0.8048
10	18	0.185	0.190	0.1875	19	1.2671	1.3014	1.2842
11	20	0.230	0.235	0.2325	21	1.5753	1.6096	1.5924
12	22	0.265	0.270	0.2675	23	1.8151	1.8493	1.8322
13	24	0.325	0.330	0.3275	25	2.2260	2.2603	2.2431
14	26	0.290	0.300	0.2950	27	1.9863	2.0548	2.0205
15	28	0.253	0.260	0.2565	29	1.7329	1.7808	1.7569
16	30	0.200	0.215	0.2075	31	1.3699	1.4726	1.4213
17	32	0.160	0.170	0.1650	33	1.0959	1.1644	1.1301
18	34	0.100	0.150	0.1250	35	0.6849	1.0274	0.8561
19	36	0.055	0.100	0.0775	37	0.3767	0.6849	0.5308
20	38	0.038	0.040	0.0390	39	0.2603	0.2740	0.2671
21	40	0.020	0.025	0.0225	41	0.1370	0.1712	0.1541
22	42	0.010	0.012	0.0110	43	0.0685	0.0822	0.0753
23	44	0.000	0.000	0.0000	00	0.0000	0.0000	0.0000

TABLA 7-2 FRECUENCIAS ACUMULADAS DE LAS REPLICAS DE LA CORRIDA

No 6

No.	TETA	DTETA	FA-E1	FA-E2	FA-EP	BT
1	0.0000	0.0594	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0594	0.0594	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.1188	0.0594	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.1782	0.0594	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.2376	0.0594	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.2970	0.0594	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.3564	0.0594	0.0081	0.0077	0.0079	0.0002
8	0.4168	0.0594	0.0378	0.0378	0.0378	0.0000
9	0.4752	0.0594	0.0846	0.0467	0.0857	0.0011
10	0.5345	0.0593	0.1599	0.1640	0.1620	0.0021
11	0.5939	0.0594	0.2534	0.2596	0.2565	0.0031
12	0.6533	0.0594	0.3612	0.3694	0.3653	0.0041
13	0.7127	0.0594	0.4935	0.5037	0.4986	0.0051
14	0.7721	0.0594	0.6115	0.6257	0.6185	0.0071
15	0.8315	0.0594	0.7144	0.7315	0.7230	0.0086
16	0.8909	0.0594	0.7958	0.8190	0.8074	0.0116
17	0.9503	0.0594	0.8609	0.8881	0.8745	0.0136
18	1.0097	0.0594	0.9015	0.9492	0.9254	0.0238
19	1.0691	0.0594	0.9239	0.9899	0.9569	0.0330
20	1.1285	0.0594	0.9394	1.0061	0.9728	0.0334
21	1.1879	0.0594	0.9475	1.0163	0.9819	0.0344
22	1.2473	0.0594	0.9516	1.0212	0.9864	0.0348 <sup>max.</sup>
23	1.3067	0.0594	0.0516	1.0212	0.9864	0.0348

Observando las tablas 7-1, 7-2

$$B_{\max} = 0.0348$$

Valor de  $CX^0 = 0.4010$  de la ecuación (6-3)

$$0.0348 < 0.4010$$

Por lo tanto se concluye que:

La hipótesis nula: las dos curvas son iguales, no se re  
chaza. Los datos son consistentes.

CALCULO DE PARAMETROS PARA ECUACIONES DE MODELOS  
TEORICOS (CORRIDA 6)

MODELO A

La ecuación general para el modelo A está presentada en el capítulo I, ecuación (I-13):

$$E_{\theta} = \frac{\left(\frac{V1+Vd}{V1}\right)}{2\sqrt{11} (D/UL)} \exp \left[ - \frac{\left[1 - \left(\frac{V1+Vd}{V1}\right)\theta\right]^2}{4 (D/UL)} \right]$$

Donde:  $V1+Vd$  = Volumen total del sistema = 0.087 litros.

$Vd$  = Volumen muerto, se calcula según la ec.

(I-12) del capítulo I:

$$Vd\% = \frac{\tau - \bar{\tau}}{\tau} \times 100$$

$\tau$  = tiempo espacial definido en el Cap. I.

$\bar{\tau}$  = tiempo medio de residencia, representa la media según la ecuación (I-18):

$$\bar{\tau} = \frac{\sum (ti \times LAP)}{\sum LAP}$$

De la tabla 7-1 de este apéndice tenemos:

$$\sum (ti \times LAP) = 63.5785$$

$$\sum LAP = 2.4245$$

Aplicando estos valores a la ecuación de  $\bar{x}$  tenemos:

$$\bar{x} = 26.2233 \text{ seg.}$$

De la tabla V-B del capítulo 5, para la corrida 6 tenemos que:  $\bar{r} = 33.6734 \text{ seg.}$

Por lo tanto:

$$Vd\bar{x} = 22.12 \text{ y así:}$$

$$Vd = (V \text{ total}) (0.2212) = 0.0192 \text{ litros.}$$

$$Vl = (V \text{ total}) (1 - 0.2212) = 0.0678 \text{ litros.}$$

El coeficiente de dispersión longitudinal (D/UL) se define en el capítulo I, ec. (I-10')

$$D/UL = \frac{\sigma^2}{2} = \frac{\sigma^2}{2 \bar{x}^2}$$

Donde:  $\sigma^2$  = variancia estadística definida en cap. I - según la ecuación (I-20):

$$\sigma^2 = \frac{\sum (t_i^2 \times LAP)}{LAP} - \bar{x}^2$$

De la tabla 7-1, 7-3 de este apéndice tenemos:

$$\sum t_i^2 \times LAP = 1756.7725$$

$$\sum LAP = 2.4245$$

Aplicando estos valores a la ecuación de  $\sigma^2$  tenemos:

$$\sigma^2 = 36.9278$$

Por lo tanto:

$$D/UL = 0.0268$$

Aplicando los parámetros obtenidos de  $V1$ ,  $Vd$ ,  $D/UL$ , se obtiene la ecuación para el modelo A para la Corrida 6. Ver tabla 5-B Cap. 5.

#### MODELO B

La ecuación general del modelo B está definida en el Cap. I, ec. (I-14)'

$$E_{\theta} = \frac{1}{2\theta^3 \left( \frac{V1+Vd}{V1} \right)^2}, \text{ para } \theta \geq .5 \left( \frac{V1}{V1+Vd} \right)$$

Aplicando los valores de  $V1$  y  $Vd$  calculados en la sección anterior se obtiene la ecuación del modelo B para la corrida 6:

$$E_{\theta} = \frac{0.3033}{\theta^3}, \text{ para } \theta \geq 0.3894$$

A continuación se presentan las tablas 7-3, 7-4, que continúan las tablas 7-1, 7-2 de este apéndice, las cuales pertenecen a la prueba de bondad de ajuste, que compara las curvas experimentales con las curvas de los modelos teóricos de la corrida No 6 y es obtenida de la forma:

$$(7-6) \quad ET-TA = E_{\theta} \Delta \theta \quad \text{donde:}$$

$E_{\theta} = E_{\theta}$  del modelo A y su ecuación es:  
(De la tabla (V-B) del Cap. V.

$$E_{\theta} = 2.2071 \exp \left[ - \frac{(1-1.2832\theta)^2}{0.1076} \right]$$

$$(7-7) \quad ET-TB = E_{\theta} \Delta \theta \quad \text{donde:}$$

$E_{\theta} = E_{\theta}$  del modelo B y su ecuación es:

$$E_{\theta} = \frac{0.3033}{\theta^3}, \quad \text{donde } \theta \geq 0.3894$$

(De la tabla (V-B) del Cap. V.

$$(7-8) \quad FA-TA = \frac{\theta}{\Delta \theta} (E_{\theta} \Delta \theta) \text{ acumulado} = F(x)A$$

$$(7-9) \quad FA-TB = \frac{\theta}{\Delta \theta} (E_{\theta} \Delta \theta) \text{ acumulado} = F(x)B$$

$$\left. \begin{aligned} (7-10) \quad A1 &= \tilde{F}(x)p - F(x)(x-1) \\ (7-11) \quad A2 &= \tilde{F}(x)p - F(x) \end{aligned} \right\} \quad \text{correspondiente para cada modelo.}$$

El valor de CX se obtuvo de la tabla estadística para la prueba de Kolmogorov-Smirnov ( 3 ), para  $N = 42$  y  $\alpha = 5\%$ ,  $2\%$ ,  $1\%$ , etc.

En la sección siguiente se presentan ejemplos de los cálculos de los parámetros de las ecuaciones de los modelos teóricos.

TABLA 7-3 VALORES CALCULADOS A PARTIR DE LOS DATOS  
DE LA CORRIDA No. 6 Y DE LAS ECUACIONES DEL MODELO A.

No.	$\xi$ x LAP	ET-TA	FA-TA	A2	A1
1	000.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	000.0000	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000
3	000.0000	0.0028	0.0002	0.0002	0.0000
4	000.0000	0.0088	0.0007	0.0007	0.0002
5	000.0000	0.0248	0.0022	0.0022	0.0007
6	000.0000	0.0628	0.0059	0.0059	0.0022
7	003.2955	0.1430	0.0144	0.0065	0.0020
8	016.5375	0.2955	0.0319	0.0059	0.0234
9	033.9575	0.5361	0.0638	0.0219	0.0538
10	067.6875	0.8795	0.1160	0.0460	0.0982
11	102.5325	1.3043	0.1935	0.0630	0.1405
12	141.5075	1.7310	0.2963	0.0690	0.1417
13	204.6875	2.0623	0.4188	0.0798	0.2023-max.
14	215.0550	2.2053	0.5498	0.0687	0.1997
15	215.7165	2.1170	0.6756	0.0474	0.1732
16	199.4075	1.8241	0.7839	0.0235	0.1318
17	179.6850	1.4109	0.8677	0.0068	0.0906
18	153.1250	0.9796	0.9259	0.0005	0.0577
19	106.0975	0.6105	0.9622	0.0053	0.0310
20	059.3190	0.3415	0.9825	0.0067	0.0106
21	037.8225	0.1715	0.9927	0.0108	0.0006
22	020.3390	0.0773	0.9973	0.0109	0.0063
23	000.0000	0.0303	0.9973	0.0109	0.0109

TABLA 7-4 VALORES PARA EL MODELO B Y SU DIFERENCIA  
CON LOS DEL MODELO EXPERIMENTAL.

No.	ET-TB	FA-TB	A2	A1
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0079	0.0079
8	4.1888	0.2488	0.2110	0.0378
9	2.8265	0.4167	0.3310	0.1631
10	1.9862	0.5347	0.3727	0.2547
11	1.4479	0.6207	0.3642	0.2782
12	1.0878	0.6853	0.3200	0.2554
13	0.8378	0.7351	0.2365	0.1867
14	0.6589	0.7742	0.1557	0.1166
15	0.5276	0.8055	0.0825	0.0512
16	0.4289	0.8310	0.0236	0.0019
17	0.3534	0.8520	0.0225	0.0435
18	0.2946	0.8695	0.0559	0.0734
19	0.2482	0.8842	0.0727	0.0874
20	0.2110	0.8967	0.0761	0.0886-max.
21	0.1809	0.9074	0.0745	0.0852
22	0.1563	0.9167	0.0697	0.0790
23	0.1359	0.9167	0.0697	0.0790

De tablas estadísticas para la prueba de Kolmogorov-Smirnov se tomaron los valores de CX:

Para  $N = 46$

$$\alpha = 5\% \quad CX = 0.1960$$

$$\alpha = 2\% \quad CX = 0.2198$$

$$\alpha = 1\% \quad CX = 0.2358$$

De la tabla 7-3

Para el modelo A

A máxima = 0.2023, comparándolo con el valor de CX

$$0.2023 < 0.2198 \text{ y } 0.2358$$

$$0.2023 > 0.1960$$

Por lo tanto:

No se rechaza la hipótesis nula para

$$\alpha = 2\%, 1\% \text{ pero sí rechaza con } \alpha = 5\%$$

De la tabla 7-4

Para el modelo B

A máxima = 0.3727, comparándolo con el valor de CX

$$0.3727 > 0.1960, 0.2198, 0.2358$$

Por lo tanto:

Para el modelo B se rechaza la hipótesis nula para

$$\alpha \text{ hasta de } 1\% \text{ o mayor.}$$