
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE GUADALAJARA

Incorporada a la Universidad Nacional Autónoma de México

ESCUELA DE CIENCIAS QUIMICAS



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESTUDIO DEL FLUJO EN UN REACTOR TUBULAR
EN ESPIRAL MEDIANTE UNA REACCION DE
PSEUDO PRIMER ORDEN.

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A
L I N D A M E N D E Z P I N O

Asesor: I. Q. Zeferino Ismael Ramírez Becerra
GUADALAJARA, JALISCO 1988



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 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.

I N D I C E

	Página
INTRODUCCION	I
SIMBOLOGIA	III
CAPITULO I	
FUNDAMENTOS TEORICOS	1
CAPITULO II	
DESCRIPCION DEL EQUIPO EMPLEADO	9
CAPITULO III	
DESARROLLO EXPERIMENTAL	12
CAPITULO IV	
RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS	14
CAPITULO V	
COMPARACION CON LOS MODELOS IDEALES	24
DISCUSION DE RESULTADOS	33
RESUMEN	34
CONCLUSIONES	35
BIBLIOGRAFIA	37
APENDICE I	
DESCRIPCION DEL EQUIPO EMPLEADO	39
APENDICE II	
DESARROLLO EXPERIMENTAL	41

APENDICE III

APLICACION DEL METODO DE MINIMOS CUADRADOS 47

APENDICE IV

CALIBRACION DE LOS MEDIDORES DE FLUJO

A).- CALIBRACION DEL MANOMETRO DIFERENCIAL 51

B).- CALIBRACION DEL ROTAMETRO 54

APENDICE V

TABLAS PARA INTEGRALES EXPONENCIALES 57

INTRODUCCION

El principal objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento de un reactor tubular en forma de espiral mediante una Reacción de Pseudo-primer Orden.

Los reactivos utilizados para dicha reacción son violeta cristal e hidróxido de sodio, estando en exceso este último para asegurar una cinética de reacción de pseudo-primer orden.

El violeta cristal es un reactivo muy coloreado, que al reaccionar con el NaOH, el producto de la reacción tiene una menor intensidad de color; por lo que en el espectrofotómetro se le midió la absorbancia antes y después de la reacción, y por medio de una relación previamente de absorbancia de violeta cristal a diferentes concentraciones, se pudo conocer el grado de reacción.

De esta manera, se obtuvieron datos de conversión a diferentes flujos, efectuándose cada corrida con relaciones de reactantes, presión y temperatura constantes.

Luego, se hizo una gráfica utilizando el Método Integral de análisis de datos experimentales para comprobar la ecuación cinética que se había supuesto; en esta gráfica los datos se deben distribuir sobre una recta que parte del origen.

Se utilizó el Método de Mínimos Cuadrados para conocer el valor del coeficiente cinético y el Coeficiente de Correlación Lineal para calcular el grado de dispersión de los puntos.

Después se hizo un estudio comparativo de las con-

versiones experimentales con las predichas por los modelos teóricos de flujo de pistón ideal y flujo laminar.

Estudios previos a éste, fueron realizados por Cayrol y Hudgins (2), María de los Angeles Vázquez Olvera (14) y Thelma Patricia Coollo Alvarez (3); quienes analizaron el comportamiento de un reactor tubular helicoidal.

Paralelamente a éste estudio se realizó otro en el cual se analizó el comportamiento de un reactor tubular longitudinal (10).

SIMBOLOGIA

- a : Constante de orificio en el manómetro diferencial
- b : Constante de orificio en el manómetro diferencial
- C_A : Concentración de violeta cristal, mol/ l
- C_{AE} : Concentración de violeta cristal en la entrada - del reactor, mol/ l
- C_{AS} : Concentración de violeta cristal en la salida -- del reactor, mol/ l
- C_B : Concentración de NaOH, mol/.l
- E : Error en el Método de Mínimos Cuadrados
- $E_3(v)$: Integral exponencial en el Modelo de Flujo Laminar
- k' : Constante de pseudo-primor orden, min^{-1}
- L : Longitud del reactor, m
- LA : Lectura de absorbancia, nm
- LAE : Lectura de absorbancia medida en la entrada del reactor, nm
- LAS : Lectura de absorbancia medida en la salida del -- reactor, nm
- LFTR : Iniciales de Reactor Tubular de Flujo Laminar
- $\ln R$: Logaritmo de la Relación de Concentraciones'
- m : Pendiente en el Método de Mínimos Cuadrados
- n : Número de corridas
- r : Coeficiente de Correlación Lineal
- R : ,Relación de Concentraciones
- r_A : Velocidad de reacción, mol/ l-min
- R_T : Radio del reactor tubular, m
- V : Volumen del reactor, ml

- v_A : Flujo de violeta cristal, ml/min
 v_B : Flujo de NaOH, ml/min
 v_O : Gasto volumétrico, ml/min
 v_T : Flujo Total, ml/min
 \bar{X} : Conversión promedio en el Modelo de Flujo Laminar
 X_A : Fracción de violeta cristal, convertida en producto.
 x_i : Variable experimental
 y : Unidades en la escala del rotámetro
 y_i : Variable experimental
 Y_i : Valor calculado
 z : Variable en el Modelo de Flujo Laminar
 Δh : Diferencia de presión manométrica
 ζ : Tiempo Espacial, min^{-1}
 Z_o : Tiempo Espacial en el Modelo de Flujo Laminar.

C A P I T U L O I

FUNDAMENTOS TEORICOS

1.A) REACTORES TUBULARES (9, 11, 15)

Hay 3 tipos de reactores ideales para reacciones homogéneas con un solo fluido reaccionante; éstos son: el reactor discontinuo, el reactor de flujo tubular ideal y el reactor de mezcla completa.

El tema que nos interesa que es del cual se va a tratar al presente estudio es el reactor tubular ideal, el cual es conocido con distintos nombres como son: reactor de flujo en tapón, de flujo en pistón y de flujo uniforme.

El reactor tubular se denomina así porque generalmente se construye en forma de un tubo cilíndrico y en ocasiones de varios tubos en paralelo; en este tipo de reactor la corriente de alimentación entra por un extremo y la corriente de producto sale por el otro, no existiendo mezclado en la dirección del flujo. Este tipo de operación generalmente se lleva a cabo en estado estable (excepto al inicio y al final) por lo que las propiedades son constantes con respecto al tiempo.

El Ingeniero Químico al trabajar con reacciones químicas, tiene que seleccionar el tipo de reactor entre muchas alternativas de diseño; las cualidades por las que en muchas ocasiones elige el reactor tubular con las siguientes: facilidad de control, economía en la mano de obra, sencillez mecánica, adaptabilidad a la transmisión de calor y altas presiones, calidad invariable del producto y elevada capacidad.

En el laboratorio, se utilizan mucho los reactores tubulares, principalmente en el estudio de reacciones rá-

pidas, debido a que una vez que se han alcanzado las condiciones estacionarias en una experiencia, puede conocerse frecuentemente el grado de conversión por medios físicos sin perturbar el curso de la reacción. Por otra parte, el grado de conversión se regula por la longitud del reactor o por la velocidad de carga.

El comportamiento del fluido dentro de los reactores nunca se ajusta exactamente al de los modelos ideales, pero en muchas ocasiones se aproxima tanto que se puede admitir este comportamiento ideal sin incurrir en un error apreciable, pero en otros casos las desviaciones del fluido son bastante grandes que no se puede tomar el comportamiento ideal sin incurrir en un grave error.

Hay 2 modelos de flujo ideales que tratan de describir el comportamiento del fluido dentro del reactor turbular, el cual es importante conocerlo ya que de este comportamiento depende el grado de conversión que se pueda obtener de las reacciones. Estos modelos son: el Modelo de Flujo de Pistón Ideal y el Modelo de Flujo Laminar.

I.B) MODELO DE FLUJO DE PISTON (2, 13)

En el Modelo de Flujo de Pistón Ideal, se hacen - las siguientes suposiciones:

- 1) No hay mezclado en la dirección axial (la dirección del flujo).
- 2) El mezclado es completo en la dirección radial.
- 3) Existe una velocidad uniforme a lo largo del radio.

Como resultado de estas suposiciones los perfiles de velocidad, temperatura y composición son planos en cualquier área transversal perpendicular al flujo, pero la composición varía a lo largo de la trayectoria del flujo.

Para un Modelo de Flujo de Pistón y reacción de primer orden, Levenspiel (9) ha desarrollado la siguiente relación:

(1-1)

$$\tau = \frac{V}{v_T} = \frac{1}{k'} \ln C_{AE} / C_{AS} = - \frac{1}{k'} \ln (1 - X_A)$$

I.C) MODELO DE FLUJO LAMINAR (5, 15)

El flujo laminar existe cuando hay gradientes de velocidad normales a la dirección del flujo de fluido, o sea que en las proximidades de las paredes del reactor tubular, la velocidad del fluido es menor que en el centro del reactor; el flujo de este sistema se puede imaginar como un número infinito de anillos coaxiales del fluido en movimiento teniendo un perfil de velocidades de forma parabólica, con un máximo en el centro igual al doble del valor medio, que disminuye gradualmente hasta anularse en las paredes.

El mayor tiempo de permanencia de las moléculas en las cercanías de las paredes del reactor, no siempre compensa el menor tiempo que permanecen otras, por lo que afecta el grado de conversión de una reacción.

Para un Modelo de Flujo Laminar y reacción de primer orden, la conversión promedio fue desarrollada por Cloland y Wilhelm (2):

$$(1-2) \quad \bar{X} = 1 - 2 \int_0^{\infty} \frac{e^{-vz}}{z^3} dz$$

$$(1-3) \quad \bar{X} = 1 - v^2 E_3(v) + e^{-v} (v - 1)$$

Donde:

$$(1-4) \quad v = k \bar{C}_0$$

$$(1-5) \quad z = t / \zeta_0$$

$$(1-6) \quad \zeta_0 = L \pi R_T^2 / 2 v_T$$

$E_3(v)$: Es una integral exponencial facilitada en manuales matemáticos (Apéndice V).

I.D) CINÉTICA DE LA REACCIÓN (2)

Los reactivos utilizados son violeta cristal e hidróxido de sodio; la reacción tiene una cinética de reacción de segundo orden pero utilizando un gran exceso en la concentración de la base, de tal manera que al reaccionar con el violeta cristal, la concentración de hidróxido varía tan poco que prácticamente se puede tomar como constante, entonces la cinética de reacción se convierte en pseudo-primer orden.

$$(1-7) \quad -r_A = k C_A C_B$$

C_B : En exceso; por lo tanto: $k' = k C_B$

$$(1-8) \quad -r_A = k' C_A$$

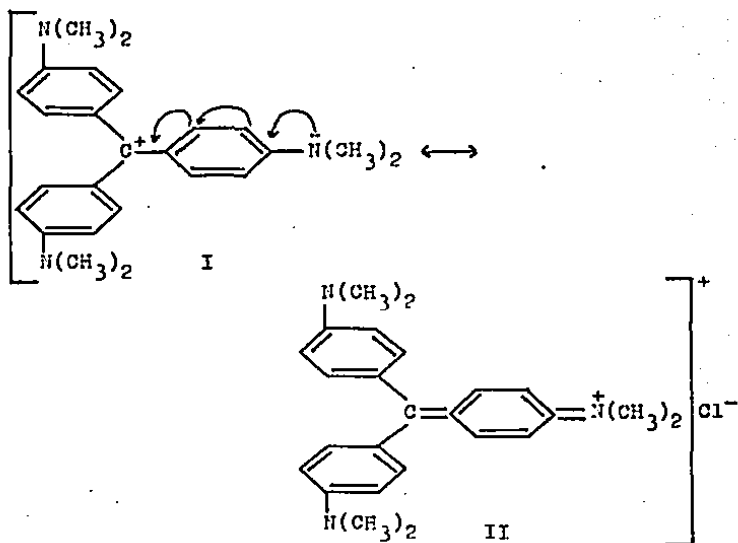
k' : constante de pseudo-primer orden

La reacción transcurre isotérmicamente, así que el sistema no experimenta cambios de temperatura durante el transcurso de la misma.

En la referencia bibliográfica (2), nos proporcionan la información del valor de la constante de pseudo-primer orden $k' = 1.35 \text{ min}^{-1}$ para una concentración de hidróxido de sodio igual a 0.1 M; a partir de esta información se calculó dicha constante para una concentración de 0.0909 M de NaOH en la entrada del reactor; ya que se trabajó con una relación de flujos de 1:10 (ver tabla 3-1), encontrándose un valor de $k' = 1.23 \text{ min}^{-1}$.

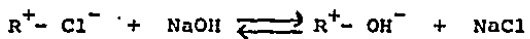
I.E) ESTRUCTURA Y REACCION QUIMICA DEL VIOLETA CRISTAL (4)

La fórmula condensada del violeta cristal es $C_{25}H_{30}ClN_3$, con peso molecular de 408.00 y tiene la siguiente estructura de híbrido de resonancia:



El violeta cristal presenta resonancia y se puede representar su estructura por las fórmulas límite I y II, el par de electrones libres del nitrógeno entra en resonancia con los electrones π del anillo bencénico tratando de compensar la deficiencia electrónica del carbono; es debido a esta deficiencia que el carbono puede sufrir un ataque por parte de reactivos nucleofílicos (reactivos ricos en electrones). Al reaccionar el violeta

crystal con un i6n hidr6xilo (OH^-) se forma un carbinol -
menos coloreado.



C A P I T U L O I I

DESCRIPCION DEL EQUIPO EMPLEADO

El equipo utilizado en este estudio, consta principalmente de un reactor tubular en forma de espiral, además: tanques de almacenamiento de reactivos, medidores de flujo, válvulas de paso, tubería de transporte de manguera látex, espectrofotómetro y tubos de ensayo - Baush & Lomb. Dicho equipo se muestra en la Fig. 2-1.

Para mayores detalles ver el apéndice 1.

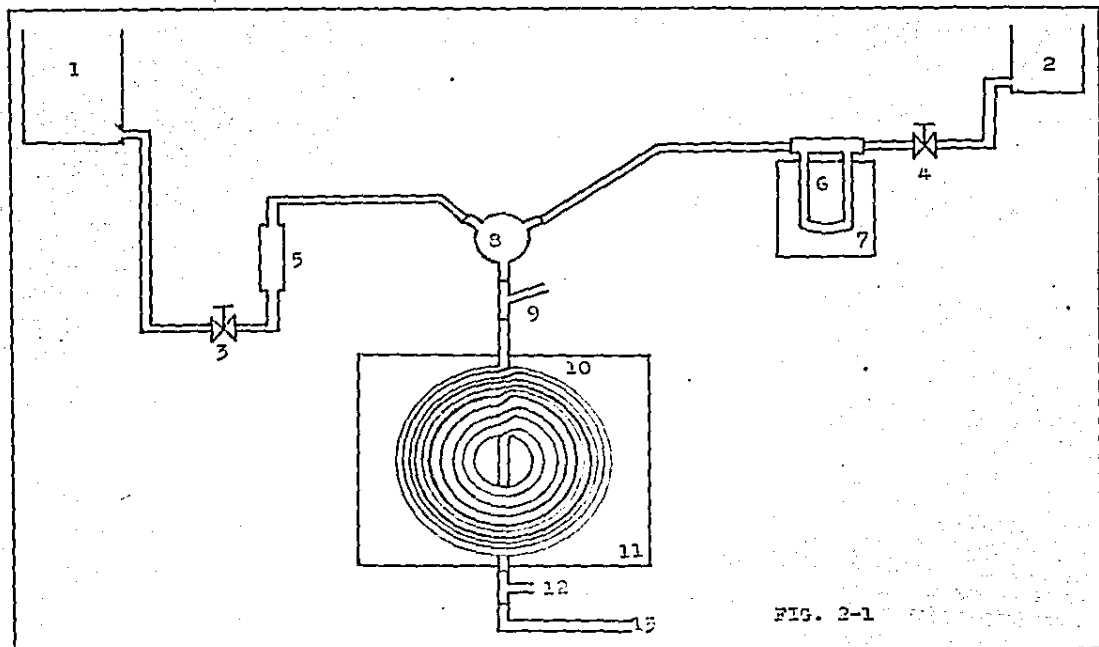


FIG. 2-1

DESCRIPCION DE LA FIGURA 2-1

- 1) Tanque de almacenamiento de 200 litros
- 2) Tanque de almacenamiento de 20 litros
- 3) Válvula de paso de 4 mm de diámetro
- 4) Válvula de paso de 3 mm de diámetro
- 5) Rotámetro
- 6) Manómetro Diferencial
- 7) Papel Milimétrico
- 8) Mezclador
- 9) Conexión Y
- 10) Reactor Tubular en Espiral
- 11) Tabla para sujetar el reactor
- 12) Conexión T
- 13) Tubería hacia el drenaje.

C A P I T U L O I I I

DESAROLLO

EXPERIMENTAL

Se realizaron 11 corridas a diferentes flujos; la relación de ellos fue de 1:10, estando en exceso la solución de NaOH para asegurar que la reacción transcurriera en pseudo-primer orden.

En todas las corridas se mantuvieron constantes la concentración de los reactivos, siendo de 0.1 Molar para la solución de hidróxido de sodio y de 0.9×10^{-5} Molar para la solución de violeta cristal.

En la siguiente hoja (tabla 3-1), se muestra una relación de los flujos utilizados y el tiempo espacial (\bar{t}) de cada uno de ellos.

Para mayor información ver el apéndice II.

TABLA 3-1
RELACION DE FLUJOS

No. de corrida	y	V_B (ml/min)	Δh (mm)	V_A (ml/min)	V_T (ml/min)	G (min)
1	44	849.73	44	85.45	935.18	3.10
2	49	959.91	54	96.38	1056.29	2.75
3	54	1070.09	65	107.47	1177.56	2.46
4	59	1180.27	76	117.81	1298.08	2.23
5	64	1290.45	89	129.27	1419.72	2.04
6	69	1400.63	102	140.05	1540.68	1.88
7	74	1510.81	116	151.05	1661.86	1.75
8	79	1620.99	131	162.23	1783.22	1.63
9	84	1731.17	146	172.90	1904.07	1.52
10	89	1841.35	163	184.47	2025.82	1.43
11	94	1951.54	180	195.54	2147.08	1.35

C A P I T U L O I V

RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

Los resultados experimentales obtenidos se resumen en la Tabla 4-1 y en ella se muestran los siguientes valores:

LAE: Lectura de absorbancia en la entrada del reactor

LAS: Lectura de absorbancia en la salida del reactor

C_{AE} : Concentración de violeta cristal correspondiente a LAE

C_{AS} : Concentración de violeta cristal correspondiente a LAS

$R = (C_{AE} / C_{AS})$: Relación de concentraciones

$\ln R = \ln (C_{AE} / C_{AS})$: Logaritmo de la relación de concentraciones.

La Fig. 4-1 es la representación de los valores promediados de $\ln (C_{AE} / C_{AS})$ de cada corrida frente al tiempo espacial.

Las conversiones obtenidas en este estudio del reactor tubular en espiral se encuentran en la Tabla 4-2 y en la Fig. 4-2.

TABLA 4-1

RESULTADOS EXPERIMENTALES

CORRIDA	LAE	LAS	C _{AE}	C _{AS}	R	lnR
1	0.070	0.012	0.089798	0.024750	3.6282	1.2887
	0.070	0.011	0.089798	0.023204	3.8699	1.3532
	0.068	0.012	0.087757	0.024750	3.5458	1.2658
	0.070	0.012	0.089798	0.024750	3.6282	1.2887
	0.070	0.012	0.089798	0.024750	3.6282	1.2887
2	0.068	0.014	0.087757	0.027744	3.1631	1.1516
	0.069	0.015	0.088778	0.029199	3.0404	1.1120
	0.068	0.015	0.087757	0.029199	3.0055	1.1004
	0.068	0.013	0.087757	0.026262	3.3416	1.2064
	0.069	0.015	0.088777	0.029199	3.0404	1.1120
3	0.060	0.012	0.079594	0.024750	3.2159	1.1681
	0.062	0.013	0.081635	0.026262	3.1085	1.1341
	0.061	0.013	0.080614	0.026262	3.0696	1.1215
	0.060	0.013	0.079594	0.026262	3.0308	1.1088
	0.060	0.013	0.079594	0.026262	3.0308	1.1088
4	0.062	0.015	0.081635	0.029199	2.7958	1.0281
	0.063	0.015	0.082655	0.029199	2.8307	1.0405
	0.062	0.015	0.081635	0.029199	2.7958	1.0281
	0.063	0.015	0.082655	0.029199	2.8307	1.0405
	0.064	0.016	0.083676	0.030629	2.7319	1.0050

TABLA 4-1
(CONTINUACION)

CORRIDA	LAE	LAS	C _{AE}	C _{AS}	R	ln R
5	0.060	0.018	0.079594	0.033422	2.3815	0.8677
	0.059	0.015	0.078574	0.029199	2.6910	0.9899
	0.060	0.020	0.079594	0.036136	2.2026	0.7896
	0.060	0.015	0.079594	0.029199	2.7259	1.0028
	0.059	0.015	0.078574	0.029199	2.6910	0.9899
6	0.052	0.018	0.071431	0.033422	2.1372	0.7595
	0.055	0.018	0.074492	0.033422	2.2288	0.8015
	0.053	0.015	0.072451	0.029199	2.4813	0.9088
	0.055	0.016	0.074492	0.030629	2.4321	0.8887
	0.055	0.018	0.074492	0.033422	2.2288	0.8015
7	0.063	0.020	0.082655	0.036136	2.2873	0.8274
	0.065	0.020	0.084696	0.036136	2.3438	0.8518
	0.064	0.023	0.083676	0.040078	2.0878	0.7361
	0.065	0.023	0.084696	0.040078	2.1133	0.7482
	0.065	0.022	0.084696	0.038780	2.1840	0.7812
8	0.055	0.019	0.074492	0.034788	2.1413	0.7614
	0.053	0.019	0.072451	0.034788	2.0826	0.7336
	0.053	0.018	0.072451	0.033422	2.1678	0.7737
	0.055	0.020	0.074492	0.036136	2.0614	0.7234
	0.055	0.019	0.074492	0.034788	2.1413	0.7614

TABLA 4-1
 (CONTINUACION)

CORRIDA	LAE	LAS	C _{AE}	C _{AS}	R	ln R
9	0.050	0.020	0.069390	0.036136	1.9202	0.6525
	0.055	0.022	0.074492	0.038780	1.9209	0.6528
	0.055	0.020	0.074492	0.036136	2.0614	0.7234
	0.052	0.028	0.071431	0.036136	1.9767	0.6814
	0.052	0.018	0.071431	0.033422	2.1372	0.7595
10	0.052	0.020	0.071431	0.036136	1.9767	0.6814
	0.055	0.020	0.074492	0.036136	2.0614	0.7234
	0.050	0.020	0.069390	0.036136	1.9202	0.6525
	0.050	0.020	0.069390	0.036136	1.9202	0.6525
	0.052	0.020	0.071431	0.036136	1.9767	0.6814
11	0.058	0.024	0.077553	0.041362	1.8750	0.6286
	0.060	0.025	0.079594	0.042632	1.8670	0.6243
	0.059	0.025	0.078574	0.042632	1.8431	0.6114
	0.059	0.024	0.078574	0.041362	1.8997	0.6417
	0.060	0.024	0.077553	0.040078	1.9351	0.6614

TABLA 4-2

CONVERSION EXPERIMENTAL DEL VIOLETA CRISTAL

No. DE CORRIDA	\bar{G}	$-\ln(1-X_A)$	X_A
1	3.10	1.2970	0.7266
2	2.75	1.1365	0.6791
3	2.46	1.1283	0.6764
4	2.23	1.0284	0.6424
5	2.04	0.9280	0.6047
6	1.88	0.8320	0.5648
7	1.75	0.7889	0.5457
8	1.63	0.7507	0.5280
9	1.52	0.6939	0.5004
10	1.43	0.6782	0.4925
11	1.35	0.6335	0.4693

GRAFICA DE $-\ln(1-X_A)$ vs z

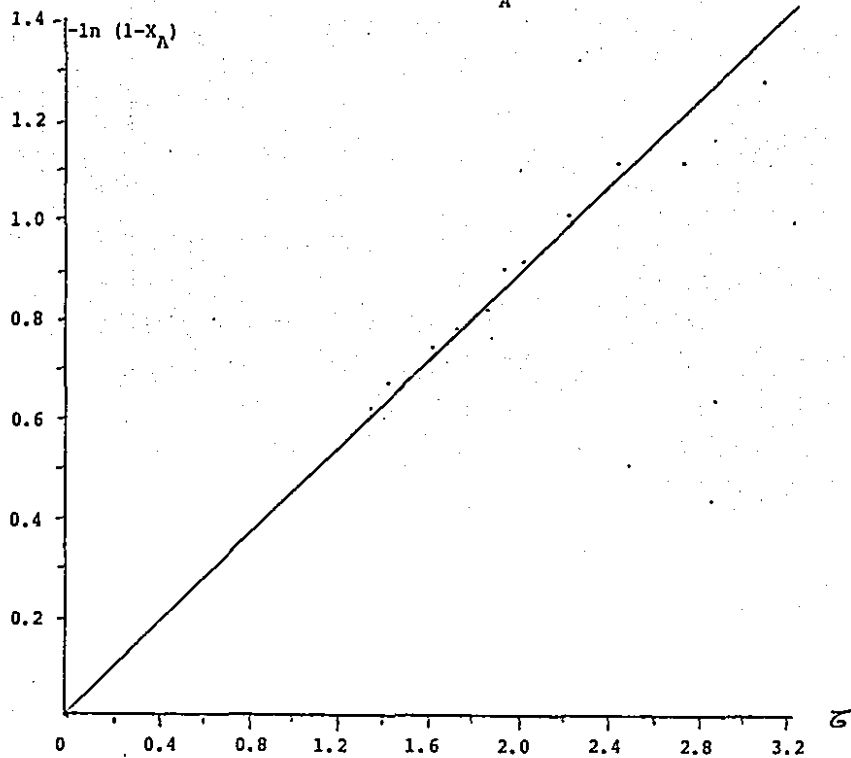


FIG. 4-1

Para obtener la gráfica de la figura 4-2 se correlacionaron los datos experimentales de conversión - - (Tabla 4-2) a una ecuación del tipo:

$$X_A = a (\tau)^b \quad (4-1)$$

Y para linealizarla se aplican logaritmos obteniéndose - la siguiente ecuación:

$$\ln X_A = \ln a + b \ln \tau \quad (4-2)$$

Los valores encontrados son: $a = 0.4052$ y $b = 0.5361$, - por lo que la ecuación de la X_A correlacionada queda representada de la siguiente forma:

$$X_A = 0.4052 (\tau)^{0.5361} \quad (4-3)$$

En la tabla 4-3 se muestran los resultados obtenidos aplicando la ecuación (4-3) de la conversión correlacionada, así como también los valores promedios de las - conversiones experimentales.

TABLA 4-3

CONVERSION EXPERIMENTAL DE VIOLETA CRISTAL

No. DE CORRIDA	τ	X_A REAL	X_A CORRELACIONADA
1	3.10	0.7266	0.7432
2	2.75	0.6791	0.6969
3	2.46	0.6764	0.6565
4	2.23	0.6424	0.6229
5	2.04	0.6047	0.5938
6	1.88	0.5648	0.5684
7	1.75	0.5457	0.5470
8	1.63	0.5280	0.5265
9	1.52	0.5004	0.5072
10	1.43	0.4925	0.4908
11	1.35	0.4693	0.4759

CONVERSION EXPERIMENTAL DEL VIOLETA CRISTAL

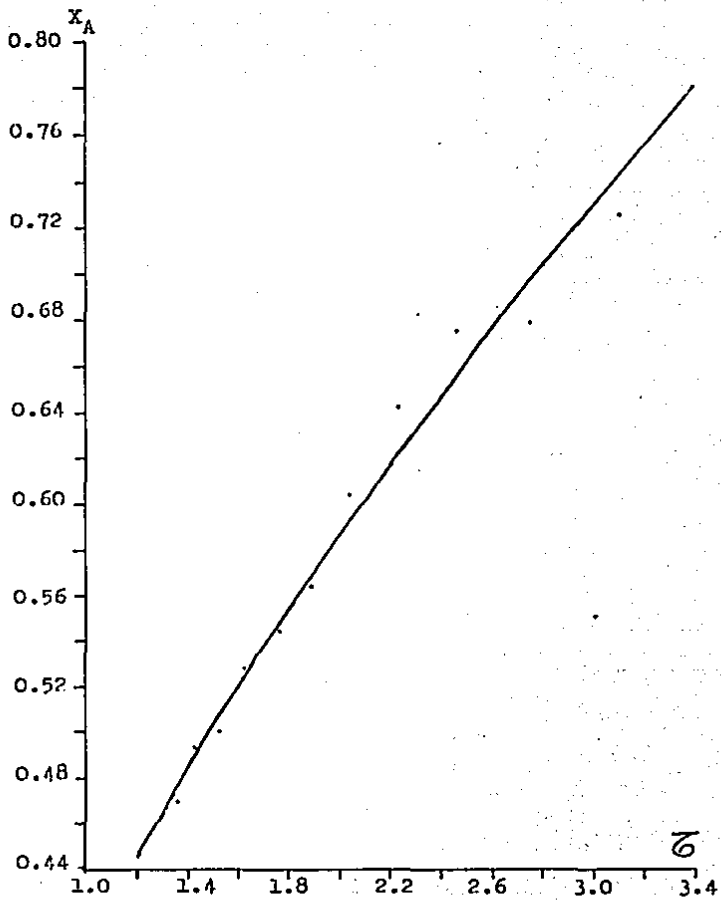


FIG. 4-2

TABLA 4-4
 APLICACION DEL METODO DE MINIMOS CUADRADOS

NO. DE CORRIDA	X _i	Y _i	X _i Y _i	X _i ²	Y _i ²
1	3.10	1.2970	4.0207	9.6100	1.6822
2	2.75	1.1365	3.1254	7.5625	1.2916
3	2.46	1.1283	2.7756	6.0516	1.2731
4	2.23	1.0284	2.2933	4.9729	1.0576
5	2.04	0.9280	1.8931	4.1616	0.8612
6	1.88	0.8320	1.5642	3.5344	0.6922
7	1.75	0.7889	1.3806	3.0625	0.6224
8	1.63	0.7507	1.2236	2.6169	0.5636
9	1.52	0.6939	1.0547	2.3104	0.4815
10	1.43	0.6782	0.9698	2.0449	0.4600
11	1.35	0.6335	0.8548	1.8225	0.4009
	22.14	9.8951	21.1558	47.7502	9.3863

Los datos que se encuentran en la tabla 4-2 son - la aplicación del Método de Mínimos Cuadrados (Apéndice III), para obtener la mejor recta posible que se ajusto a los datos y que paso por el origen (ver figura 4-1); - los valores que a continuación se presentan se obtuvieron aplicando las ecuaciones IV-1 y VI-2.

Constante de pseudo-primer orden: $k' = 0.4430 \text{ min}^{-1}$

Correlación: $r = 0.9967$

C A P I T U L O V

COMPARACION CON LOS MODELOS IDEALES

Para comparar los resultados experimentales obtenidos con los modelos ideales de flujo de pistón y laminar, se realizaron cálculos de conversión utilizando la constante de pseudo-primer orden encontrada experimentalmente y la de la referencia bibliográfica.

A continuación se describe cada una de las tablas presentadas en este capítulo:

En la tabla 5-1 se muestran los valores de tiempo espacial empleados y las conversiones del modelo de flujo de pistón; para calcular dichas conversiones se utilizaron la constante de pseudo-primer orden $k' = 0.443 \text{ min}^{-1}$ obtenida experimentalmente, y la ecuación (1-1) en la cual se despejó la X_A .

En la tabla 5-2 se presentan también los valores de los tiempos espaciales empleados en este estudio y los resultados de las conversiones del modelo de flujo de Pistón, empleando para calcularlas la constante de pseudo-primer orden obtenida de la referencia bibliográfica (2) $k' = 1.23. \text{min}^{-1}$ y aplicando la ecuación (1-1).

Posteriormente se encuentra la tabla 5-3, que muestra los valores de tiempo espacial para un flujo laminar, también nos muestra los valores de la integral exponencial, calculada utilizando las tablas de integrales exponenciales (apéndice V) y los valores de las conversiones del modelo de flujo laminar, los cuales fueron calculados utilizando las ecuaciones (1-2) a (1-6) y la constante cinética experimental $k' = 0.433 \text{ min}^{-1}$.

Después se encuentra la tabla 5-4 que se diferen-

cía de la tabla anterior en que los valores de las conversiones fueron calculados utilizando la constante cinética de la referencia bibliográfica $k' = 1.23 \text{ min}^{-1}$.

Por último se encuentran las tablas 5-5 y 5-6 en las cuales podemos comparar la conversión experimental -- obtenida de violeta cristal con las predichas por los -- modelos teóricos de flujo de Pistón y Laminar; esta comparación se puede observar también en la gráfica de la Fig. 5-1.

TABLA 5-1

RESULTADOS DE LAS CONVERSIONES DEL MODELO DE FLUJO DE PISTON, UTILIZANDO $k' = 0.433 \text{ min}^{-1}$.

No. DE CORRIDA	\bar{C}_0 (min)	X_A
1	3.10	0.7467
2	2.75	0.7043
3	2.46	0.6637
4	2.23	0.6276
5	2.04	0.5949
6	1.88	0.5652
7	1.75	0.5394
8	1.63	0.5143
9	1.52	0.4900
10	1.43	0.4693
11	1.35	0.4501

TABLA 5-2

RESULTADOS DE LAS CONVERSIONES DEL MODELO DE FLUJO DE -
PISTON, UTILIZANDO $k' = 1.230 \text{ min}^{-1}$.

No. DE CORRIDA	τ (min)	x_A
1	3.10	0.9779
2	2.75	0.9660
3	2.46	0.9515
4	2.23	0.9356
5	2.04	0.9187
6	1.88	0.9010
7	1.75	0.8838
8	1.63	0.8653
9	1.52	0.8458
10	1.43	0.8278
11	1.35	0.8100

TABLA 5-3

RESULTADOS DE LAS CONVERSIONES DEL MODELO DE FLUJO LAMINAR, UTILIZANDO $k' = 0.443 \text{ min}^{-1}$.

No. DE CORRIDA	ζ_0	v	$E_3 (v)$	\bar{x}
1	1.5239	0.6751	0.1720	0.6559
2	1.3492	0.5977	0.1922	0.6156
3	1.2102	0.5361	0.2102	0.5797
4	1.0979	0.4864	0.2261	0.5478
5	1.0038	0.4447	0.2406	0.5189
6	0.9250	0.4098	0.2535	0.4930
7	0.8575	0.3799	0.2653	0.4695
8	0.7992	0.3540	0.2760	0.4480
9	0.7484	0.3315	0.2857	0.4286
10	0.7035	0.3317	0.2946	0.4108
11	0.6637	0.2940	0.3029	0.3942

TABLA 5-4

RESULTADOS DE LAS CONVERSIONES DEL MODELO DE FLUJO LAMINAR, UTILIZANDO $k' = 1.23 \text{ min}^{-1}$.

No. DE CORRIDA	Z_0	V	$E_3 (v)$	\bar{x}
1	1.5239	1.8744	0.0353	0.9295
2	1.3492	1.6595	0.0463	0.9075
3	1.2102	1.4885	0.0575	0.8850
4	1.0979	1.3504	0.0689	0.8622
5	1.0038	1.2347	0.0802	0.8397
6	0.9250	1.1378	0.0912	0.8177
7	0.8575	1.0547	0.1019	0.7962
8	0.7992	0.9830	0.1123	0.7755
9	0.7484	0.9205	0.1222	0.7556
10	0.7035	0.8653	0.1318	0.7363
11	0.6637	0.8164	0.1411	0.7179

TABLA 5-5

COMPARACION DE LAS CONVERSIONES EXPERIMENTALES CON LAS PREDICHAS POR LOS MODELOS IDEALIZADOS DE FLUJO DE PISTON Y FLUJO LAMINAR, UTILIZANDO $k' = 0.443 \text{ min}^{-1}$.

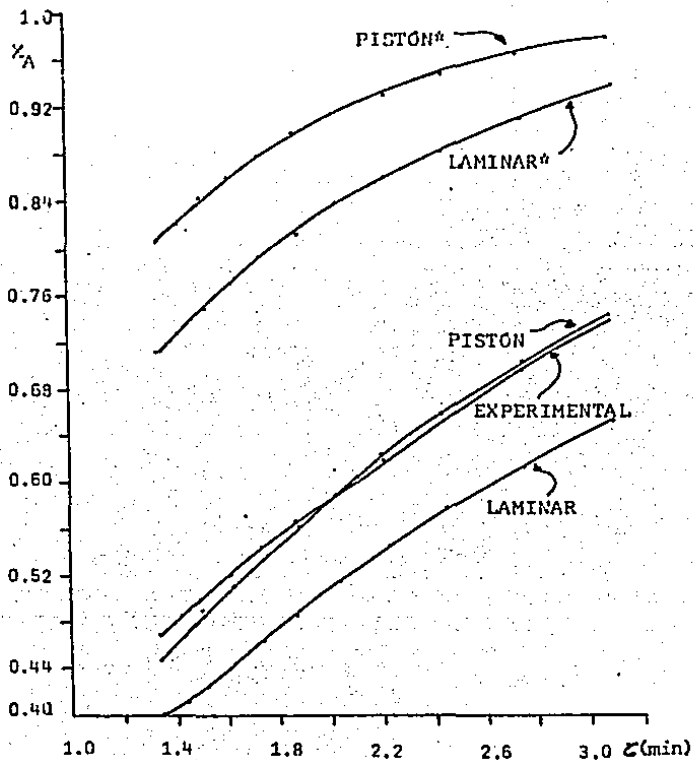
No. DE CORRIDA	τ	X_A EXPERIMENTAL	X_A PISTON	X_A LAMINAR
1	3.10	0.7432	0.4767	0.6559
2	2.75	0.6969	0.7043	0.6156
3	2.46	0.6565	0.6637	0.5797
4	2.23	0.6229	0.6276	0.5478
5	2.04	0.5938	0.5949	0.5189
6	1.88	0.5684	0.5652	0.4930
7	1.75	0.5470	0.5394	0.4695
8	1.63	0.5265	0.5143	0.4480
9	1.52	0.5072	0.4900	0.4286
10	1.43	0.4908	0.4693	0.4108
11	1.35	0.4759	0.4501	0.3942

TABLA 5-6

COMPARACION DE LAS CONVERSIONES EXPERIMENTALES CON LAS -
 PREDICHAS POR LOS MODELOS IDEALIZADOS DE FLUJO DE PISTON
 Y FLUJO LAMINAR, UTILIZANDO $k' = 1.230 \text{ min}^{-1}$.

No. DE CORRIDA	\bar{z}	x_A	x_A	x_A
		EXPERIMENTAL	PISTON *	LAMINAR *
1	3.10	0.7432	0.9779	0.9295
2	2.75	0.6969	0.9660	0.9075
3	2.46	0.6565	0.9515	0.8850
4	2.23	0.6229	0.9356	0.8622
5	2.04	0.5938	0.9187	0.8397
6	1.88	0.5684	0.9010	0.8177
7	1.75	0.5470	0.8838	0.7962
8	1.63	0.5265	0.8653	0.7755
9	1.52	0.5072	0.8458	0.7556
10	1.43	0.4908	0.8278	0.7363
11	1.35	0.4759	0.8100	0.7179

FIG. 5-1
COMPARACIÓN DE LAS CONVERSIONES EXPERIMENTALES CON LOS MODELOS IDEALIZADOS DE FLUJO DE PISTÓN Y FLUJO LAMINAR



DISCUSION
DE
RESULTADOS

Al hacer un análisis de resultados se puede decir lo siguiente:

1) Que la reacción cinética que se había supuesto, es la correcta, ya que al aplicar el Método Integral de datos experimentales, éstos se distribuyen sobre una recta que parte del origen.

2) Al aplicar el Método de Mínimos Cuadrados se encontró el valor de la constante de pseudo-primer orden, la cual tuvo un valor diferente a la reportada por Cayrol y Hudgins en Toronto, Canadá (2); un factor que se considera que pudo haber influido, es el de la temperatura, ya que ellos no dan el dato exacto de la misma, solamente informan que el experimento se realizó a temperatura ambiente.

3) Al comparar los datos experimentales obtenidos con los modelos Ideales de flujo de Pistón y Laminar, se observó que el comportamiento del fluido dentro del reactor, es similar al del Modelo de Flujo de Pistón.

4) Al comparar este estudio con que realizó en forma paralela Elsa Fabiola Parra Urrea (10), en el cual el reactor tubular estaba colocado en forma longitudinal, se observó que los dos siguieron el mismo comportamiento, es decir: el Método de Flujo de Pistón.

R E S U M E N

Para poder cumplir el objetivo de este estudio - que era analizar el comportamiento del flujo en un reactor tubular en espiral mediante una reacción de pseudo-primer orden, se realizaron 11 corridas experimentales, y de esta manera se pudo conocer el grado de conversión de violeta cristal a diferentes tiempos espaciales.

Se comprobó por medio del Método Integral de datos experimentales, que la reacción que se lleva a cabo entre violeta cristal o hidróxido de sodio (en exceso), tiene una ecuación cinética de pseudo-primer orden, porque al graficar los datos experimentales, éstos se distribuyeron sobre una recta, y utilizando el Método de Mínimos Cuadrados se encontró el valor de la constante de pseudo-primer orden.

Posteriormente, se hicieron cálculos para conocer cuál hubiera sido el grado de conversión del reactivo, si el flujo dentro del reactor hubiera tenido un comportamiento como los Modelos de Flujo de Pistón y de Flujo Laminar; primero utilizando la constante cinética experimental y luego con la constante cinética reportada en la bibliografía (2).

Después, se hizo una comparación de los datos experimentales con los modelos Ideales para saber a cuál de ellos se ajustaba más el comportamiento del flujo en nuestro reactor.

CONCLUSIONES

En este estudio se alcanzó el objetivo fijado: - Analizar el comportamiento de un reactor tubular en espiral, en el cual transcurrió una reacción de pseudo-primer orden.

Observando los resultados obtenidos se concluye - lo siguiente:

- 1.- La reacción entre violeta cristal e hidróxido de sodio, en estas condiciones de operación, tiene una -- ocupación cinética de pseudo-primer orden.
- 2.- Con el Método de Mínimos Cuadrados, se calculó la -- constante de pseudo-primer orden para los datos experimentales, obteniéndose un valor de $k' = 0.443 \text{ min}^{-1}$, utilizando una concentración de NaOH de 0.0909 M y -- trabajando a la temperatura ambiente (aproximadamente 20°C). La constante cinética reportada en la bibliografía (2) tiene un valor de $k' = 1.23 \text{ min}^{-1}$; -- esta diferencia tal vez se debe a que la temperatura de operación no fue la misma a la utilizada por -- Cayrol y Hudgins (2).
- 3.- Las conversiones experimentales obtenidas en este -- reactor tubular en forma de espiral se pueden considerar prácticamente como las del modelo teórico de -- Flujo de Pistón.

Se sugiere que se realicen estudios similares -- para observar si influye y en qué medida el -- reacomodo geométrico del reactor y también se podría efectuar un estudio de Determinación de Tiempos de Residencia (DTR), utilizando un componente -

no reactivo (trazador) en el sistema utilizado -
en este estudio, para extender la información - -
sobre el comportamiento del reactor.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- ABRANOWITZ Milton and STUGAN Ireno A. Handbook of -
Mathematical Functions. Formulas, Graphs y
Mathematical tables.
U.S. Departamont of Commerce. National --
Bureau Standards applied Mathematics - -
series 55 third printing, Marzo (1965), -
with corrections.
- 2.- CAYROL Bertrand and HUDGINS R. Robert. A Simple Tu--
bular Reactor Experiment.
Chemical Engineering Education, winter -
1981.
- 3.- COELLO A. Thelma Patricia. Construcción y Análisis -
de un Reactor Tubular.
(Tesis inédita); U.A.G.; 1983.
- 4.- CORSARO Gerald. A Colorimetric Chemical Kinetics -
Experiment.
Journal of Chemical Education, volume 41,
number 1, January 1964.
- 5.- DENBIGH Kennet. Teoría del Reactor Químico.
Alhambra, Madrid (España), 1a. Edición, -
1968.
- 6.- FREUND John E / MILLER Irwing. Probabilidad y Esta--
dística para Ingenieros.
Revertó, México. 4a. ed., 1980
- 7.- KREYSZIG Erwin. Introducción a la Estadística Matemá--
tica.
Revertó, Barcelona. 5a. ed., 1981.

- 8.- LAIDLER J. Keith. Cinética de Reacciones
Alhambra, Madrid (España). 2a. ed., 1971
- 9.- LEVENSPIEL Octave. Ingeniería de las Reacciones Químicas
Reverté, Barcelona. 4a. ed., 1979.
- 10.- PARRA URREA Elsa Fabiola. Análisis del Comportamiento de un reactor tubular Longitudinal Mediante una reacción de pseudo-primer orden
(TESIS), U.A.G. 1985
- 11.- PERRY Robert / CHILTON Cecil. Manual del Ingeniero Químico
UTEHA, México. 3a. ed., 1966
- 12.- RAMIREZ BECERRA Zeforino Ismael. Influencia de la posición del agitador en la Distribución del Tiempo de Residencia. Parte I: Alimentación del Tanque cercana a la mitad del nivel del líquido.
(TESIS), U.A.G. 1981
- 13.- SMITH J.M. Ingeniería de la Cinética Química
CECSA, México. 2a. ed., 1982
- 14.- VAZQUEZ OLVERA M.A. Análisis de un Reactor tubular IV. Seminario de Ingeniería Química
Celaya, Guanajuato (1983)
- 15.- WALLAS Stanley. Cinética de Reacciones Químicas
Mc.Graw-Hill, Madrid (España). 1a. Ed., 1965.

A P E N D I C E I

DESCRIPCION DEL EQUIPO EMPLEADO

Se utilizaron 2 tanques de alimentación de los reactivos, uno con capacidad de 200 litros para la solución de hidróxido de sodio, colocado a una altura de 3.15 metros; hecho de lámina de fierro y recubierto en su interior con pintura acrílica; el otro tanque utilizado con capacidad de 20 litros para la solución de violeta cristal, era de polietileno y estaba colocado a una altura de 4.10 metros.

Los reactivos fluyeron por medio de la fuerza de gravedad. La alimentación de la solución de NaOH al mezclador se controló por medio de una llave de paso de 4 mm de diámetro y por un rotámetro previamente calibrado (ver apéndice IV).

Para regular el flujo de la solución de violeta cristal se utilizó una válvula de paso de 3 mm de diámetro y un manómetro diferencial (los detalles de su calibración se encuentran en el apéndice IV). Para medir la diferencia de presión se utilizó tetracloruro de carbono que es más denso que la solución de violeta cristal e inmisible en ella.

Las dos soluciones se hicieron pasar a través de un mezclador con capacidad de 100 ml. Justo antes de entrar al reactor estaba una conexión "Y" de vidrio de donde se tomaron las muestras iniciales, y a la salida del mismo se encontraba una conexión "T" de donde se tomaron las muestras finales.

Las muestras se recogían en los tubos de ensayo Baush & Lomb y se les medía la absorbancia en el espectrofotómetro.

El reactor es tubular de 40 metros de longitud, -
enrollado en forma de espiral con 24 vueltas y -
de 0.0095 m (3/8 in) de diámetro nominal, (diáme-
tro interno 0.0092 m) y estaba colocado sobre una
tabla de 1.22 x 1.30 metros.

A P E N D I C E I I

DESARROLLO EXPERIMENTAL

I.- PASOS PRELIMINARES

- 1) Se obtuvo un espectro de ultravioleta para conocer la zona de máxima longitud de onda a la que absorbe el violeta cristal. Se calibró el espectrofotómetro Baush & Lomb, primeramente con la celda vacía hasta que indicara 0 de absorbancia, después se llenó con agua un tubo de ensaye B & L y se ajustó hasta que indicara 1 de absorbancia.
- 2) Se tomaron varias lecturas de absorbancia de la solución de violeta cristal a diferentes longitudes de onda y en cada ocasión se calibraba el espectrofotómetro. Así se encontró que la máxima absorbancia está en la longitud de onda de 590 nm.
- 3) Se preparó una solución patrón de violeta cristal de concentración 1×10^{-5} Molar, que es la máxima concentración que se podía detectar en el rango de absorbancia del aparato; de esta solución se prepararon estándares de 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 ml, los cuales se aforaron a 100 ml y se les midió la absorbancia a cada uno de ellos.
- 4) Se procedió a hacer una gráfica y por medio de ella se comprobó la linealidad de la absorbancia con respecto a la concentración (ver la figura II-1).
- 5) Se determinó el volumen del reactor llenándolo con agua y midiendo directamente el volumen empleado, que fue de 2900 ml, el cual

se utilizó en los cálculos de tiempo espacial.

- 6) Se calibraron el manómetro diferencial y el rotámetro. (Para mayores detalles ver el apéndice IV).

II.- RUTINA DE TRABAJO

- 1) Se preparaban 160 litros de solución NaOH 0.1 Molar, utilizando para valorarla una solución de HCl 0.1 Normal y fenolftaleína como indicador.
- 2) A partir de una solución concentrada de violeta cristal (0.5 g / l de agua) se preparaban 20 l de solución de violeta cristal con absorbancia de 0.85, que corresponde a una concentración de 0.9×10^{-5} Molar.
- 3) Una vez preparados los reactivos, se procedía a abrir las válvulas de paso y según la corrida de que se tratara se regulaba el caudal requerido, observando las escalas del rotámetro y del manómetro diferencial.
- 4) Se esperaba un lapso de tiempo para comenzar a tomar las muestras con el fin de obtener un estado constante, se tomaban 5 muestras iniciales y 5 muestras finales, cada 10 minutos para comprobar el estado estacionario.
- 5) A las muestras obtenidas se les tomaba inmediatamente la lectura de absorbancia en el espectrofotómetro porque la reacción seguía transcurriendo.

Con los datos de la tabla II-1, se preparó la gráfica de la Figura II-1, pero debido a la dificultad de estar leyendo cada dato de absorbancia de las pruebas

realizadas, se hizo una correlación de datos y se encontró que los dos primeros datos se ajustan a una ecuación exponencial ($y = a x^b$) que es la siguiente:

$$(II-1) \quad C_A \times 10^5 = 0.6557 (LA)^{0.7409}$$

para valores de absorbancia ≤ 0.031

El resto de los datos se ajusta a una recta:

$$C_A \times 10^5 = 0.01837 + 1.0204 (LA)$$

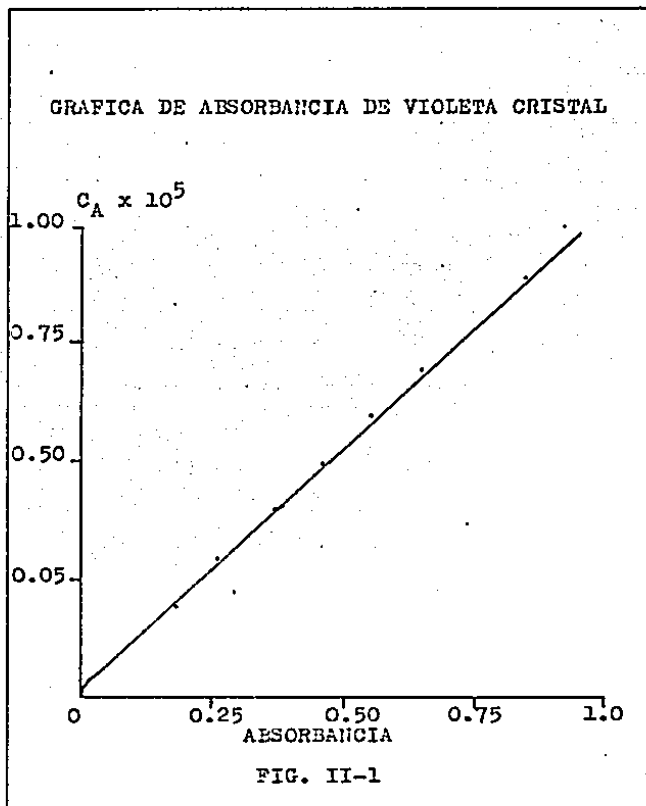
para valores de absorbancia > 0.031

Así, al leer un valor de absorbancia en el espectrofotómetro, se pueden aplicar estas ecuaciones para conocer la concentración de violeta cristal; de esta forma se reduce el error de estar leyendo en la gráfica.

TABLA II-1

DATOS DE ABSORBANCIA A DIFERENTES CONCENTRACIONES
DE VIOLETA CRISTAL

$C_A \times 10^5$ Molar	Absorbancia
0.02	0.009
0.05	0.031
0.10	0.080
0.20	0.178
0.30	0.260
0.40	0.370
0.50	0.460
0.60	0.550
0.70	0.650
0.80	0.760
0.90	0.850



A P E N D I C E I I I

APLICACION DEL METODO DE MINIMOS CUADRADOS

APLICACION DEL METODO DE MINIMOS CUADRADOS (6, 7)

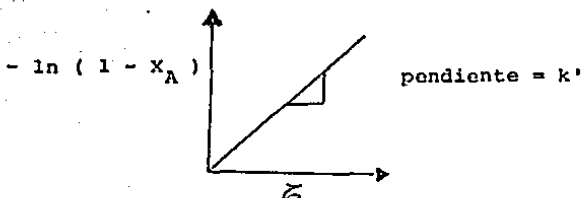
La relación entre el tiempo de residencia y el grado de conversión para una reacción de pseudo-primer orden está dada por la siguiente ecuación:

$$\tau = -\frac{1}{k'} \ln (1 - X_A)$$

$$\tau k' = - \ln (1 - X_A)$$

Para calcular el valor de k' se realizó una experimentación en el laboratorio, midiendo el grado de conversión para una serie de valores de tiempos de residencia.

Si se grafica $-\ln (1 - X_A)$ vs. τ se obtiene una recta que parte del origen en $\tau = 0$ y $-\ln (1 - X_A) = 0$, cuya pendiente será k' .



Puede calcularse la pendiente y el grado de dispersión de los puntos por el método de Mínimos Cuadrados; así la ecuación será del tipo:

$$Y = m X$$

$$\begin{aligned} \text{En donde: } X &= \zeta \\ Y &= -\ln(1 - X_A) \\ m &= k' \end{aligned}$$

En todas las mediciones y experimentaciones se tiene un error. A la diferencia entre el valor real y el valor calculado se le llama error (E_i); sin embargo el valor real no se conoce, pero se puede estimar bajo cierto error que se debe minimizar:

$$E_i = Y_i - Y_f$$

En donde:

$$Y_i = \text{valor real}$$

$$Y_f = m X_i = \text{valor calculado}$$

Por lo tanto:

$$E_i = Y_i - m X_i$$

Como no se puede hacer mínimo cada error (E_i) individualmente, se sugiera que el valor de la sumatoria de errores ($\sum_{i=1}^n E_i$) sea tan cercano a cero como sea posible. Sin embargo, los errores positivos y negativos se anulan; por lo que se hará mínima la suma de los cuadrados de cada E_i , de tal forma que:

$$\sum_{i=1}^n E^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - m X_i)^2 = \text{mínimo}$$

El valor de la pendiente debe ser tal que minimize la suma de los cuadrados de las desviaciones y el mínimo se obtiene derivando con respecto a la constante " m ", e igualando a cero.

$$2 \left[\sum (Y_i - m X_i) (-X_i) \right] = \frac{d E^2}{d m} = 0$$

$$\sum -Y_i X_i + m X_i^2 = 0$$

$$(IV-1) \quad m = \frac{\sum X_i Y_i}{\sum X_i^2}$$

COEFICIENTE DE CORRELACION LINEAL (6, 7)

El Coeficiente de Correlación Lineal para dos variables es el siguiente:

$$(IV-2) \quad r = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\sqrt{[n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2] [n \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2]}}$$

En donde:

r = Coeficiente de Correlación Lineal

n = Número de Corridas

X_i, Y_i = Valores Experimentales

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

A P E N D I C E I V

CALIBRACION DE LOS MEDIDORES DE FLUJO

A).- CALIBRACION DEL MANOMETRO DIFERENCIAL (12)

El manómetro diferencial consiste en: un medidor de orificio tipo tobera, unido a un tubo en forma de U - que contiene una sustancia de mayor densidad que la que va a fluir e inmiscible en ella. Al fluir el líquido se detecta una caída de presión (diferencia de alturas en las columnas del manómetro), que depende del caudal que fluye a través del orificio.

La calibración de los manómetros medidores de flujo, consiste en relacionar la diferencia de alturas en las columnas con el caudal del líquido fluyendo.

Esta relación se puede expresar por medio de una gráfica o una ecuación, que es la siguiente:

$$v_o = a (\Delta h)^b$$

$$v_o = \text{flujo a través del manómetro (ml /min)}$$

$$\Delta h = \text{diferencia de alturas en las columnas (mm)}$$

$$a, b = \text{constantes del medidor de orificio}$$

Para encontrar la ecuación basta linearizar los datos de las lecturas del manómetro y los datos de los caudales registrados, de la siguiente forma:

$$\ln v_o = \ln a + b \ln (\Delta h)$$

Si se grafica ($\ln \Delta h$) vs. ($\ln v_o$), se obtiene una recta en la cual " $\ln a$ " es la intersección en el eje de la ordenada y " b " es la pendiente.

El procedimiento que se siguió para la calibración del manómetro fue el siguiente:

- 1) Se abría la válvula permitiendo el paso del agua, originándose una diferencia de alturas de CCl_4 en las columnas.
- 2) Se anotaba esta diferencia de alturas.
- 3) Se esperaba hasta que el flujo fuera constante.
- 4) Se hacían 3 mediciones de líquido colectado en un tiempo fijo. Esta operación se repitió 26 veces hasta obtener una serie de datos de caudal y diferencias de alturas (ver tabla V-1).
- 5) Se procedió a hacer una gráfica de caudal v_o (ml/min) vs. diferencia de alturas Δh (mm) (ver la figura V-2).
- 6) Aplicando logaritmos se linearizaron los datos.
- 7) Se obtuvo una relación que es la ecuación del manómetro.

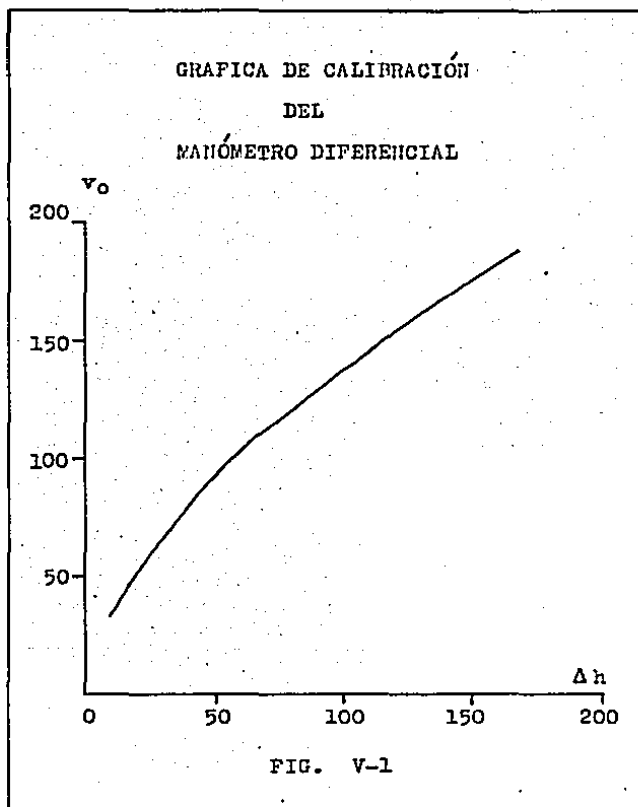
La ecuación del manómetro es la siguiente:

$$v_o = 9.2476 (\Delta h)^{0.5876}$$

Con esta relación, al leer una diferencia de alturas en las columnas del manómetro se puede conocer el caudal de violeta cristal que está fluyendo.

DATOS DE CALIBRACION DEL MANOMETRO

No.	ΔH (mm)	v_o (ml/min)
1	8.0	30.50
2	12.0	39.75
3	17.0	50.22
4	22.0	57.77
5	28.0	66.27
6	33.0	73.83
7	38.0	78.30
8	42.5	83.10
9	48.0	89.00
10	52.0	93.87
11	58.0	99.60
12	62.0	103.20
13	68.0	108.12
14	72.0	114.53
15	77.0	119.33
16	83.0	124.50
17	87.5	128.25
18	92.0	131.58
19	97.0	135.14
20	106.0	143.00
21	115.0	150.75
22	123.0	157.25
23	138.0	167.00
24	144.0	172.00
25	158.0	181.25
26	162.0	184.00



B).- CALIBRACION DEL ROTAMETRO (11)

El rotámetro es un medidor de flujo; el área por la que circula el líquido es en la separación anular entre el flotador y la cámara por la que pasa la corriente. A medida que aumenta el gasto el flotador sube, aumentando así el área de circulación hasta que la diferencia de presiones equilibre exactamente el peso del flotador; éste llega hasta una posición exactamente proporcional al gasto, pero el nivel a que se eleva varía con la viscosidad y tiene que calibrarse para cada fluido en particular.

Para la calibración del rotámetro se procedió de la siguiente manera:

- 1) Se abrió la válvula para permitir el paso del agua.
- 2) El flotador subía hasta un cierto nivel y se anotaba la medición que indicaba la escala -- marcada en el rotámetro.
- 3) Se tomaban muestras de líquido colectado en un tiempo fijo.
- 4) Se repitió esta operación hasta tener mediciones de toda la escala marcada en el rotámetro (ver tabla V-2).

Se procedió a hacer una gráfica de flujo volumétrico vs. unidades en la escala del rotámetro (ver la figura V-2); la relación fue lineal y se obtuvo --

la siguiente ecuación:

$$y = 5.4393 + 0.04538 (v_o)$$

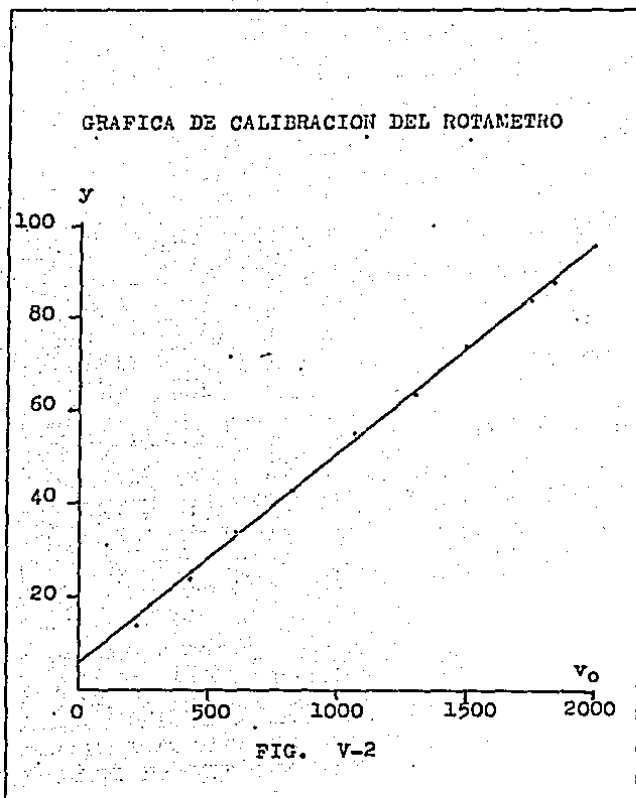
y = unidades en la escala del rotámetro.

v_o = gasto volumétrico (ml / min)

TABLA V-2

DATOS DE CALIBRACION DEL MANOMETRO

y	v_o
14	207.00
24	420.67
34	613.50
44	845.00
54	1045.00
64	1293.00
74	1495.00
84	1750.00
89	1851.33



A P E N D I C E V

TABLAS PARA INTEGRALES EXPONENCIALES

EXPONENTIAL INTEGRALS $E_n(x)$

Table 2.1

x	$E_{0.5}(x)$	$E_1(x)$	$E_2(x)$	$E_3(x)$	$E_4(x)$
0.01	1.00000 00	0.56000 00	0.33333 33	0.11111 11	0.05261 16
0.02	0.99572 22	0.49907 66	0.47080 24	0.10786 02	0.05297 90
0.03	0.99134 50	0.44906 33	0.32352 64	0.10063 95	0.05151 21
0.04	0.98696 87	0.41197 77	0.31676 19	0.10742 46	0.05297 11
0.05	0.98259 39	0.46332 39	0.31408 55	0.10622 36	0.05047 59
0.06	0.97821 11	0.45491 63	0.30949 45	0.10503 63	0.04773 60
0.08	0.97209 03	0.44676 07	0.30190 63	0.10406 34	0.04740 49
0.09	0.96779 35	0.43903 27	0.29555 05	0.10270 10	0.04603 33
0.10	0.96301 91	0.43111 97	0.29320 69	0.10155 44	0.04437 02
0.15	0.95795 93	0.42363 96	0.29173 54	0.10032 00	0.04478 02
0.20	0.95230 26	0.41629 15	0.28773 61	0.09729 83	0.04736 00
0.25	0.94755 35	0.40915 57	0.28269 99	0.09810 26	0.04630 27
0.30	0.94220 71	0.40219 27	0.27755 24	0.09709 74	0.04612 10
0.35	0.93676 72	0.39539 77	0.27256 46	0.09609 85	0.04528 43
0.40	0.93127 36	0.38876 07	0.26764 37	0.09493 00	0.04540 27
0.45	0.92560 67	0.38227 61	0.26270 07	0.09357 06	0.04552 62
0.50	0.91979 40	0.37591 09	0.25779 79	0.09203 12	0.04445 47
0.55	0.91387 73	0.36974 03	0.25296 26	0.09179 56	0.04378 67
0.60	0.90791 06	0.36377 95	0.24840 26	0.09071 10	0.04356 66
0.65	0.90187 50	0.35793 91	0.24409 56	0.08975 95	0.04376 90
0.70	0.89579 02	0.35214 53	0.24004 72	0.08885 87	0.04261 77
0.75	0.88961 07	0.34646 30	0.23625 63	0.08776 93	0.04171 07
0.80	0.88337 33	0.34090 05	0.23272 16	0.08679 12	0.04127 62
0.85	0.87709 90	0.33545 13	0.22944 19	0.08592 33	0.04129 21
0.90	0.87079 53	0.32991 42	0.22641 62	0.08516 75	0.04035 63
0.95	0.86447 37	0.32440 41	0.22354 32	0.08392 20	0.04042 85
1.00	0.85815 26	0.31895 95	0.22082 21	0.08270 72	0.04000 43
1.05	0.85183 76	0.31363 33	0.21825 17	0.08160 30	0.03978 45
1.10	0.84551 73	0.30830 05	0.21583 11	0.08114 52	0.03916 73
1.15	0.83920 03	0.30307 87	0.21355 93	0.08024 78	0.03875 04
1.20	0.83289 71	0.29794 13	0.21143 52	0.07935 24	0.03835 10
1.25	0.82659 69	0.29289 56	0.21335 81	0.07846 93	0.03774 95
1.30	0.82030 07	0.28793 74	0.21102 30	0.07799 60	0.03715 15
1.35	0.81385 90	0.28305 52	0.20884 11	0.07693 27	0.03675 70
1.40	0.80745 21	0.27827 65	0.20679 94	0.07587 90	0.03675 70
1.45	0.79915 01	0.27366 93	0.20490 13	0.07503 50	0.03630 22
1.50	0.79066 61	0.26924 16	0.19975 50	0.07420 06	0.03599 05
1.55	0.78209 43	0.26499 13	0.19483 22	0.07337 57	0.03562 31
1.60	0.77344 07	0.26081 65	0.19035 97	0.07255 97	0.03524 95
1.65	0.76470 39	0.25671 55	0.18712 76	0.07175 31	0.03487 93
1.70	0.75598 43	0.25270 64	0.18313 52	0.07095 57	0.03461 40
1.75	0.74729 23	0.24877 76	0.18050 16	0.07016 71	0.03415 21
1.80	0.73862 02	0.24493 73	0.17800 64	0.06939 65	0.03379 37
1.85	0.73193 24	0.24121 41	0.18159 07	0.06858 57	0.03243 36
1.90	0.72370 54	0.23765 63	0.17914 77	0.06785 45	0.03309 07
1.95	0.71555 29	0.23426 25	0.17674 33	0.06710 09	0.03274 20
2.00	0.70724 91	0.23103 13	0.17437 44	0.06635 50	0.03237 07
2.05	0.69896 05	0.22796 12	0.17204 05	0.06561 91	0.03205 90
2.10	0.69073 21	0.22505 08	0.16974 10	0.06487 07	0.03172 27
2.15	0.68164 43	0.22229 90	0.16747 53	0.06417 04	0.03139 03
2.20	0.67261 75	0.21969 44	0.16524 20	0.06345 03	0.03106 12
2.25	$\left[\begin{smallmatrix} (-5)1 \\ 3 \end{smallmatrix} \right]$	$\left[\begin{smallmatrix} (-5)5 \\ 6 \end{smallmatrix} \right]$	$\left[\begin{smallmatrix} (-5)4 \\ 4 \end{smallmatrix} \right]$	$\left[\begin{smallmatrix} (-5)2 \\ 3 \end{smallmatrix} \right]$	$\left[\begin{smallmatrix} (-5)7 \\ 3 \end{smallmatrix} \right]$

See Examples 1-6.

Table 5.1

EXPONENTIAL INTEGRALS $E_n(x)$

x	$E_{1/2}(x)$	$E_{3/2}(x)$	$E_{5/2}(x)$	$E_{7/2}(x)$	$E_{9/2}(x)$
0.50	0.32664 39	0.22160 44	0.16524 28	0.06319 83	0.01106 12
0.51	0.32110 62	0.21836 57	0.16304 39	0.06275 82	0.01073 56
0.52	0.31568 63	0.21518 10	0.16087 53	0.06230 80	0.01041 34
0.53	0.31040 07	0.21205 16	0.15873 92	0.06186 76	0.01009 46
0.54	0.30518 62	0.20897 39	0.15663 41	0.06142 87	0.00977 91
0.55	0.30009 96	0.20591 75	0.15455 96	0.06100 95	0.00946 73
0.56	0.29511 79	0.20297 15	0.15251 50	0.06059 89	0.00915 81
0.57	0.29023 82	0.20004 43	0.15050 00	0.06019 79	0.00885 25
0.58	0.28545 70	0.19716 64	0.14851 37	0.05980 45	0.00855 91
0.59	0.28077 39	0.19433 53	0.14655 65	0.05943 86	0.00825 63
0.60	0.27613 39	0.19155 65	0.14462 71	0.05907 26	0.00795 43
0.61	0.27163 55	0.18881 14	0.14272 53	0.05873 36	0.00766 18
0.62	0.26727 61	0.18611 66	0.14085 07	0.05841 19	0.00737 17
0.63	0.26305 35	0.18345 56	0.13900 20	0.05810 68	0.00708 50
0.64	0.25897 54	0.18085 73	0.13718 13	0.05780 89	0.00680 12
0.65	0.25505 97	0.17829 10	0.13538 55	0.05750 87	0.00652 04
0.66	0.25130 04	0.17576 50	0.13361 53	0.05720 33	0.00624 25
0.67	0.24768 73	0.17329 10	0.13188 01	0.05690 55	0.00596 75
0.68	0.24416 67	0.17083 58	0.13018 95	0.05661 43	0.00569 44
0.69	0.24072 06	0.16842 94	0.12853 33	0.05634 97	0.00543 62
0.70	0.23734 71	0.16605 12	0.12670 03	0.05607 15	0.00515 23
0.71	0.23401 46	0.16373 03	0.12513 17	0.05581 26	0.00487 62
0.72	0.23071 14	0.16143 60	0.12350 61	0.05556 94	0.00461 53
0.73	0.22744 57	0.15917 78	0.12193 71	0.05531 37	0.00435 72
0.74	0.22421 61	0.15695 49	0.12032 24	0.05507 15	0.00410 19
0.75	0.22111 89	0.15476 67	0.11876 38	0.05483 33	0.00385 92
0.76	0.21813 08	0.15261 25	0.11722 70	0.05460 33	0.00361 91
0.77	0.21524 82	0.15049 17	0.11571 15	0.05437 91	0.00337 17
0.78	0.20717 77	0.14840 37	0.11421 70	0.05415 80	0.00312 67
0.79	0.20398 60	0.14634 79	0.11274 33	0.05394 53	0.00288 46
0.80	0.20085 17	0.14432 30	0.11129 00	0.05373 56	0.00264 47
0.81	0.19777 56	0.14233 07	0.10985 67	0.05353 74	0.00240 73
0.82	0.19475 63	0.14036 91	0.10844 33	0.05333 91	0.00217 31
0.83	0.19178 10	0.13843 55	0.10704 73	0.05314 82	0.00194 93
0.84	0.18886 31	0.13653 24	0.10567 44	0.05296 23	0.00171 11
0.85	0.18599 66	0.13465 81	0.10433 85	0.05279 27	0.00148 57
0.86	0.18318 34	0.13281 22	0.10299 12	0.05262 82	0.00125 37
0.87	0.18041 73	0.13099 43	0.10166 22	0.05246 93	0.00102 61
0.88	0.17769 94	0.12920 37	0.10036 12	0.05231 47	0.00079 13
0.89	0.17502 87	0.12744 01	0.09907 60	0.05217 60	0.00055 13
0.90	0.17240 41	0.12570 30	0.09781 23	0.05204 22	0.00031 51
0.91	0.16982 47	0.12397 19	0.09656 37	0.05191 35	0.00008 87
0.92	0.16728 95	0.12223 63	0.09533 24	0.05178 98	0.00005 75
0.93	0.16479 77	0.12054 59	0.09411 77	0.05166 11	0.00002 85
0.94	0.16234 82	0.11891 82	0.09291 94	0.05154 73	0.00001 18
0.95	0.15993 81	0.11737 89	0.09173 74	0.05143 83	0.00000 72
0.96	0.15757 32	0.11581 13	0.09057 13	0.05133 41	0.00000 37
0.97	0.15524 57	0.11424 72	0.08942 11	0.05123 23	0.00000 34
0.98	0.15295 70	0.11270 63	0.08828 63	0.05113 70	0.00000 62
0.99	0.15070 79	0.11118 80	0.08716 67	0.05104 75	0.00000 81
1.00	0.14847 55 $\left[\begin{smallmatrix} (-5) \\ 4 \end{smallmatrix} \right]$	0.10959 20 $\left[\begin{smallmatrix} (-6) \\ 3 \end{smallmatrix} \right]$	0.08604 25 $\left[\begin{smallmatrix} (-6) \\ 3 \end{smallmatrix} \right]$	0.05007 43 $\left[\begin{smallmatrix} (-6) \\ 3 \end{smallmatrix} \right]$	0.01831 60 $\left[\begin{smallmatrix} (-7) \\ 3 \end{smallmatrix} \right]$

Table 3.1		EXPONENTIAL INTEGRALS $E_n(x)$		Table 3.2	
x	$E_0(x)$	$E_1(x)$	$E_2(x)$	x	$E_{-1}(x)$
1.00	0.140125 56	0.107879 23	0.069095 25	0.140125 56	0.018834 60
1.01	0.139711 90	0.107231 39	0.068337 53	0.139711 90	0.018705 73
1.02	0.139304 04	0.106576 54	0.067581 01	0.139304 04	0.018576 84
1.03	0.138902 61	0.105923 42	0.066826 76	0.138902 61	0.018447 92
1.04	0.138503 10	0.105272 38	0.066073 13	0.138503 10	0.018319 98
1.05	0.138107 33	0.104623 37	0.065325 90	0.138107 33	0.018193 57
1.06	0.137714 91	0.103976 43	0.064583 66	0.137714 91	0.018068 33
1.07	0.137324 96	0.103331 49	0.063847 52	0.137324 96	0.017944 83
1.08	0.136936 72	0.102688 43	0.063117 32	0.136936 72	0.017821 91
1.09	0.136550 77	0.102047 31	0.062392 53	0.136550 77	0.017700 31
1.10	0.136166 11	0.101408 07	0.061672 97	0.136166 11	0.017580 37
1.11	0.135783 63	0.100771 34	0.060959 23	0.135783 63	0.017461 93
1.12	0.135402 30	0.100136 39	0.060251 81	0.135402 30	0.017344 89
1.13	0.135022 98	0.099503 49	0.059549 32	0.135022 98	0.017228 97
1.14	0.134644 76	0.098871 93	0.058852 61	0.134644 76	0.017114 33
1.15	0.134268 31	0.098241 52	0.058161 32	0.134268 31	0.017001 76
1.16	0.133893 02	0.097613 03	0.057475 22	0.133893 02	0.016890 33
1.17	0.133519 14	0.096986 02	0.056794 99	0.133519 14	0.016780 31
1.18	0.133146 31	0.096360 03	0.056119 53	0.133146 31	0.016671 80
1.19	0.132774 08	0.095735 37	0.055449 91	0.132774 08	0.016564 28
1.20	0.132402 01	0.095112 47	0.054784 32	0.132402 01	0.016458 37
1.21	0.132031 25	0.094491 15	0.054123 04	0.132031 25	0.016353 91
1.22	0.131661 56	0.093871 39	0.053465 79	0.131661 56	0.016250 99
1.23	0.131292 87	0.093253 12	0.052812 56	0.131292 87	0.016149 32
1.24	0.130924 77	0.092636 36	0.052164 29	0.130924 77	0.016049 26
1.25	0.130557 01	0.092021 23	0.051520 31	0.130557 01	0.015950 35
1.26	0.130190 53	0.091407 47	0.050881 25	0.130190 53	0.015852 37
1.27	0.129824 31	0.090795 16	0.050247 22	0.129824 31	0.015755 37
1.28	0.129458 31	0.090184 26	0.049618 13	0.129458 31	0.015659 52
1.29	0.129092 69	0.089574 36	0.048993 15	0.129092 69	0.015564 21
1.30	0.128727 08	0.088965 47	0.048372 07	0.128727 08	0.015470 36
1.31	0.128362 31	0.088357 86	0.047754 85	0.128362 31	0.015377 32
1.32	0.127997 49	0.087751 42	0.047141 29	0.127997 49	0.015284 97
1.33	0.127632 47	0.087146 29	0.046532 64	0.127632 47	0.015193 31
1.34	0.127267 13	0.086542 46	0.045928 36	0.127267 13	0.015102 94
1.35	0.126902 35	0.085939 91	0.045329 91	0.126902 35	0.015013 37
1.36	0.126537 29	0.085338 60	0.044734 51	0.126537 29	0.014924 93
1.37	0.126172 31	0.084739 53	0.044143 33	0.126172 31	0.014837 17
1.38	0.125807 09	0.084142 40	0.043555 22	0.125807 09	0.014750 37
1.39	0.125441 30	0.083546 31	0.042971 37	0.125441 30	0.014664 31
1.40	0.125075 79	0.082951 55	0.042391 37	0.125075 79	0.014579 50
1.41	0.124710 65	0.082358 24	0.041814 22	0.124710 65	0.014494 93
1.42	0.124345 04	0.081766 97	0.041241 97	0.124345 04	0.014411 52
1.43	0.123979 13	0.081176 01	0.040673 37	0.123979 13	0.014328 37
1.44	0.123613 07	0.080586 11	0.040109 46	0.123613 07	0.014245 99
1.45	0.123247 39	0.080000 27	0.039549 36	0.123247 39	0.014164 91
1.46	0.122881 33	0.079416 52	0.038993 61	0.122881 33	0.014084 76
1.47	0.122515 34	0.078834 82	0.038441 25	0.122515 34	0.014005 31
1.48	0.122149 13	0.078254 17	0.037893 65	0.122149 13	0.013926 97
1.49	0.121783 55	0.077675 55	0.037349 09	0.121783 55	0.013849 32
1.50	0.121417 03	0.077097 95	0.036809 70	0.121417 03	0.013772 60
1.51	0.121050 83	0.076521 35	0.036273 22	0.121050 83	0.013696 97
1.52	0.120684 38	0.075946 73	0.035740 47	0.120684 38	0.013621 95
1.53	0.120317 69	0.075373 08	0.035211 33	0.120317 69	0.013547 37
1.54	0.119950 61	0.074800 39	0.034685 49	0.119950 61	0.013473 27
1.55	0.119583 07	0.074228 54	0.034162 93	0.119583 07	0.013400 93
1.56	0.119215 67	0.073657 03	0.033643 07	0.119215 67	0.013329 15
1.57	0.118847 82	0.073086 32	0.033127 97	0.118847 82	0.013258 97
1.58	0.118479 47	0.072516 92	0.032615 35	0.118479 47	0.013189 79
1.59	0.118110 76	0.071948 81	0.032106 47	0.118110 76	0.013121 24
1.60	0.067071 32	0.049700 57	0.010693 25	0.010263 22	0.009765 56

$$\left[\begin{matrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \right]$$

$$\left[\begin{matrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \right]$$

$$\left[\begin{matrix} 1 \\ -6 \\ 2 \end{matrix} \right]$$

$$\left[\begin{matrix} 1 \\ -7 \\ 6 \end{matrix} \right]$$

$$\left[\begin{matrix} 1 \\ -7 \\ 6 \end{matrix} \right]$$

Table 3.1 EXPONENTIAL INTEGRALS $E_n(x)$

x	$E_0(x)$	$E_1(x)$	$E_2(x)$	$E_3(x)$	$E_4(x)$
1.60	0.0100 52	0.01133 57	0.0100 28	0.01136 42	0.0100 73
1.61	0.0101 63	0.01133 79	0.0101 46	0.01135 61	0.0101 93
1.62	0.0102 73	0.01134 67	0.0101 63	0.01135 96	0.0102 05
1.63	0.0103 78	0.01135 29	0.0101 76	0.01136 53	0.0102 16
1.64	0.0104 81	0.01135 73	0.0101 86	0.01137 43	0.0102 27
1.65	0.0105 83	0.01136 04	0.0101 92	0.01137 79	0.0102 37
1.66	0.0105 84	0.01136 34	0.0101 97	0.01138 17	0.0102 46
1.67	0.0105 85	0.01136 61	0.0101 99	0.01138 56	0.0102 54
1.68	0.0105 85	0.01136 87	0.0101 99	0.01138 95	0.0102 62
1.69	0.0105 85	0.01137 12	0.0101 99	0.01139 34	0.0102 70
1.70	0.0105 85	0.01137 37	0.0101 99	0.01139 73	0.0102 78
1.71	0.0105 85	0.01137 61	0.0101 99	0.01140 12	0.0102 86
1.72	0.0105 85	0.01137 85	0.0101 99	0.01140 51	0.0102 94
1.73	0.0105 85	0.01138 09	0.0101 99	0.01140 90	0.0102 94
1.74	0.0105 85	0.01138 33	0.0101 99	0.01141 29	0.0102 94
1.75	0.0105 85	0.01138 57	0.0101 99	0.01141 68	0.0102 94
1.76	0.0105 85	0.01138 81	0.0101 99	0.01142 07	0.0102 94
1.77	0.0105 85	0.01139 05	0.0101 99	0.01142 46	0.0102 94
1.78	0.0105 85	0.01139 29	0.0101 99	0.01142 85	0.0102 94
1.79	0.0105 85	0.01139 53	0.0101 99	0.01143 24	0.0102 94
1.80	0.0105 85	0.01139 77	0.0101 99	0.01143 63	0.0102 94
1.81	0.0105 85	0.01140 01	0.0101 99	0.01144 02	0.0102 94
1.82	0.0105 85	0.01140 25	0.0101 99	0.01144 41	0.0102 94
1.83	0.0105 85	0.01140 49	0.0101 99	0.01144 80	0.0102 94
1.84	0.0105 85	0.01140 73	0.0101 99	0.01145 19	0.0102 94
1.85	0.0105 85	0.01140 97	0.0101 99	0.01145 58	0.0102 94
1.86	0.0105 85	0.01141 21	0.0101 99	0.01145 97	0.0102 94
1.87	0.0105 85	0.01141 45	0.0101 99	0.01146 36	0.0102 94
1.88	0.0105 85	0.01141 69	0.0101 99	0.01146 75	0.0102 94
1.89	0.0105 85	0.01141 93	0.0101 99	0.01147 14	0.0102 94
1.90	0.0105 85	0.01142 17	0.0101 99	0.01147 53	0.0102 94
1.91	0.0105 85	0.01142 41	0.0101 99	0.01147 92	0.0102 94
1.92	0.0105 85	0.01142 65	0.0101 99	0.01148 31	0.0102 94
1.93	0.0105 85	0.01142 89	0.0101 99	0.01148 70	0.0102 94
1.94	0.0105 85	0.01143 13	0.0101 99	0.01149 09	0.0102 94
1.95	0.0105 85	0.01143 37	0.0101 99	0.01149 48	0.0102 94
1.96	0.0105 85	0.01143 61	0.0101 99	0.01149 87	0.0102 94
1.97	0.0105 85	0.01143 85	0.0101 99	0.01150 26	0.0102 94
1.98	0.0105 85	0.01144 09	0.0101 99	0.01150 65	0.0102 94
1.99	0.0105 85	0.01144 33	0.0101 99	0.01151 04	0.0102 94
2.00	0.0105 85	0.01144 57	0.0101 99	0.01151 43	0.0102 94
	[4 2]	[4 3]	[4 3]	[4 3]	[4 3]

Table 3.3 EXPONENTIAL INTEGRALS $E_n(x)$ FOR LARGE ARGUMENTS

x	$(-2x)^{-1} E_0(-2x)$	$(-2x)^{-2} E_1(-2x)$	$(-2x)^{-3} E_2(-2x)$	$(-2x)^{-4} E_3(-2x)$	$(-2x)^{-5} E_4(-2x)$	n
0.50	1.19737	1.11123	1.10137	1.10717	1.10729	2
0.45	1.09759	1.10075	1.10022	1.10728	1.10179	2
0.40	1.00733	1.09135	1.10136	1.09536	1.10162	3
0.35	1.02202	1.03038	1.09137	1.09137	1.10137	3
0.30	1.05054	1.07003	1.07031	1.09137	1.10137	3
0.25	1.07723	1.09536	1.09536	1.10137	1.10137	4
0.20	1.05272	1.03272	1.09537	1.09137	1.10137	4
0.15	1.07275	1.07275	1.07275	1.07275	1.07275	5
0.10	1.01240	1.01647	1.01919	1.02326	1.02732	7
0.07	1.01045	1.01337	1.01624	1.02132	1.02705	11
0.06	1.01045	1.01337	1.01624	1.02132	1.02705	11
0.05	1.01045	1.01337	1.01624	1.02132	1.02705	11
0.04	1.01045	1.01337	1.01624	1.02132	1.02705	11
0.03	1.01045	1.01337	1.01624	1.02132	1.02705	11
0.02	1.01045	1.01337	1.01624	1.02132	1.02705	11
0.01	1.01045	1.01337	1.01624	1.02132	1.02705	11
0.00	1.01045	1.01337	1.01624	1.02132	1.02705	11
	[4]	[4]	[4]	[4]	[4]	

... rounded integers ...