

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE GUADALAJARA

INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA DE CIENCIAS QUIMICAS



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Analisis del Comportamiento de un Reactor Tubular Longitudinal Mediante una Reacción de Pseudo-primer Orden

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :

ELSA FABIOLA PARRA URREA

Asesor: MA. DEL CONSUELO LOPEZ L.

GUADALAJARA, JAL., 1985



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

	PAG.
INTRODUCCION.....	1
SIMBOLOGIA	3
CAPITULO 1	
TEORIA	5
CAPITULO 2	
DESCRIPCION DEL EQUIPO EMPLEADO.....	14
CAPITULO 3	
DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	16
CAPITULO 4	
RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS.....	20
CAPITULO 5	
COMPARACION CON LOS MODELOS IDEALES.....	31
CAPITULO 6	
DISCUSION DE LOS RESULTADOS.....	40
CONCLUSIONES	41
BIBLIOGRAFIA	42
APENDICE I	
DESCRIPCION DEL EQUIPO EMPLEADO	44
APENDICE II	
DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	46
APENDICE III	
APLICACION DEL METODO DE MINIMOS CUADRADOS.....	54

	PAG.
APENDICE IV.	
CALIBRACION DE LOS MEDIDORES DE FLUJO.	
A).- CALIBRACION DEL ROTAMETRO.....	58
B).- CALIBRACION DEL MANOMETRO DIFERENCIAL.....	61
APENDICE V.	
TABLAS PARA INTEGRALES EXPONENCIALES.....	65

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

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

En la práctica industrial, es muy común encontrar -- procesos en los cuales se involucra la transformación de dis tintas materias primas en productos elaborados, llevada a ca bo mediante reacciones químicas.

El Ingeniero Químico es el encargado de este proceso con todas sus consecuencias, como son:

La selección del tipo de reactor, determinación del tamaño necesario del mismo y especificación de las condiciones de operación, entre otras. La selección de estos parámetros no es caprichosa, ni al azar, se requiere hacer un sofisticado estudio sobre la velocidad de la reacción química, la conversión máxima que puede obtenerse, los fenómenos físicos que intervienen, etc.

Sin embargo, hacer un estudio tan complejo, requiere de una gran inversión de tiempo y dinero, lo que hace muy valiosa la información que se encuentra en publicaciones científicas, relacionada con el tema.

El objetivo de esta tesis es proporcionar información relativa al comportamiento de un reactor tubular longitudinal, operable a temperatura ambiente, mediante una reacción de pseudo-primer orden, llamada así, debido a que se -- utiliza una concentración de hidróxido de sodio mucho mayor que la concentración de violeta cristal y, por lo tanto, resulta una cinética de reacción de pseudo-primer orden. Esta cinética de reacción se comprobó utilizando el método integral de análisis de datos experimentales, por medio del cual se construyó una gráfica donde los datos se deben distribuir sobre una línea recta, cuya intersección debe ser igual a ce ro.

Los reactivos utilizados para dicha reacción son: violeta cristal e hidróxido de sodio en exceso.

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.

Para completar este estudio, se compararon gráficamente las conversiones experimentales con las predichas -- por los modelos idealizados de flujo de pistón y flujo laminar.

Estudios previos a éste, fueron realizados por -- Hudgins y Cayrol (5), Marfa de los Angeles Vázquez Olvera -- (14) y Patricia Coello Alvarez (2); quienes analizaron el -- comportamiento de un reactor tubular helicoidal.

Paralelamente a este estudio se realizó otro en -- el cual, se analizó el comportamiento de un reactor tubular -- en forma de espiral (7).

S I M B O L O G I A

S I M B O L O G I A

ABS	: Absorbancia, nm
b	: Pendiente en el Método de Mínimos Cuadrados.
C	: Concentración, mol/m ³
C _{Ai}	: Concentración de violeta cristal en la entrada del reactor, mol/m ³ .
C _{Af}	: Concentración de violeta cristal en la salida del reactor, mol/m ³
E	: Error en el Método de Mínimos Cuadrados.
K	: Constante de velocidad
K'	: Constante de Pseudo-primer orden, s ⁻¹
L	: Longitud del reactor, m
LABS	: Lectura de absorbancia, nm
LABS _i	: Lectura de absorbancia medida en la entrada del reactor, nm
LABS _f	: Lectura de absorbancia medida en la salida del reactor, nm
n	: Número de corridas
r	: Coeficiente de Correlación Lineal
R	: Radio del Reactor tubular
V	: Volumen del reactor, m ³
V _o	: Caudal de alimentación, m ³ /s
V _{oA}	: Flujo de violeta cristal, m ³ /s
V _{oB}	: Flujo de hidróxido de sodio, m ³ /s
V _{oT}	: Flujo total, m ³ /s
\bar{X}	: Conversión promedio en el Modelo de Flujo Laminar.
X _A	: Fracción de violeta cristal, convertida en producto
X _i	: Variable experimental
Y _i	: Variable experimental
Z	: Variable en el Modelo de Flujo Laminar
ΔHR	: Unidades marcadas en la escala del rotámetro
ΔH	: Unidades de la escala marcada en el tubo en "U" (Manómetro), m

(CONTINUACION SIMBOLOGIA)

λ	:	Longitud de onda
τ	:	Tiempo espacial, s
M_{d}	:	Tiempo espacial en el Modelo de Flujo Laminar
M	:	Constante de Euler
Σ	:	Sumatoria restringida

SUBINDICES

i	:	inicial
f	:	final
A	:	violeta cristal
B	:	hidróxido de sodio
Ao	:	inicial de violeta cristal
Bo	:	inicial de hidróxido de sodio

CAPITULO I
T E O R I A

T E O R I A

1.A) REACTORES TUBULARES (6,15)

Un reactor es un dispositivo en el cual se efectúa la transformación química de una materia prima en un producto determinado.

Existe una gran cantidad de tipos de reactores y, generalmente, se clasifican por el método de operación (continuos, por lotes y semicontinuos).

En esta tesis se tratará sobre un reactor continuo, el reactor tubular ideal, el cual es conocido con distintos nombres como son: reactor de flujo en pistón, de flujo en tapón y de flujo uniforme. En este reactor el alimento entra por un extremo del tubo (generalmente se usa un tubo cilíndrico) y la corriente del producto sale por el otro.

La principal característica del reactor tubular ideal es que el flujo del fluido a su través es ordenado, sin que ningún elemento del mismo sobrepase o se mezcle con cualquier otro elemento situado antes o después de un punto, medido longitudinalmente. Además, no hay variación de la composición del fluido en la dirección radial.

Este tipo de reactor es utilizado cuando se desea evitar el retromezclado del fluido o trabajar con una alta concentración de reactivo el mayor tiempo posible.

Las cualidades más importantes de los reactores tubulares de flujo son: facilidad de control, economía en la mano de obra, sencillez mecánica, adaptabilidad a la transmisión del calor y altas presiones, calidad invariable del producto

y elevada capacidad.

Uno de los parámetros principales involucrados al evaluar el comportamiento de un reactor es el orden de la reacción y la conversión fraccional del reactivo en producto.

En el laboratorio, las reacciones en sistema fluyente están especialmente indicadas para el estudio de reacciones rápidas; 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. En el estado estacionario se logra mayor precisión de medida que en las reacciones discontinuas, ya que en éstas se producen variaciones de estado rápidas; por otra parte, el grado de conversión se regula por la longitud del reactor o por la velocidad de carga.

1.B) MODELO DE FLUJO DE PISTÓN (6, 13)

En el modelo de flujo de pistón ideal, se hacen las siguientes suposiciones específicas sobre el grado de mezclado:

No hay mezclado en la dirección axial (la dirección del flujo).

El mezclado es completo en la dirección radial.

Existe una velocidad uniforme a lo largo del radio.

La ausencia de un mezclado longitudinal, es la característica especial de este tipo de reactores, pero la composición del fluido varía a lo largo de la trayectoria del flujo.

La siguiente relación, ha sido dada por Levenspiel -- (6), para un modelo de flujo de pistón y reacción irreversible de primer orden.

$$\tau = \frac{V}{V_0} = \frac{1}{K'} \ln C_A / C_{A0} = \frac{-1}{K'} \ln (1 - X_A) \quad (1-1)$$

$$X_A = 1 - e^{-K' \tau} \quad (1-2)$$

1.C) MODELO DE FLUJO LAMINAR (4, 15)

En el flujo laminar, las partículas del fluido en el reactor, se desplazan suave y paralelamente unas a otras en forma de láminas, describiendo un perfil de velocidad de forma parabólica.

La velocidad máxima se tiene en el centro, y es igual al doble de la velocidad promedio, que disminuye gradualmente hasta llegar a la pared del tubo, donde la velocidad es cero.

Aunque ha demostrado Bosworth (4) que el tiempo medio de reacción en flujo laminar es el mismo que en flujo uniforme, la conversión no es la misma; el mayor tiempo de permanencia de algunas moléculas en el reactor no siempre compensa el menor tiempo que permanecen otras.

Para un modelo de flujo laminar y reacción de primer orden, la conversión promedio fue desarrollada por Cleland y Wilhelm (5):

$$\bar{X} = 1 - 2 \int_1^{\infty} \frac{e^{-zy}}{y^3} dy \quad (1-3)$$

donde

$$y = t/\tau_0 \quad (1-4)$$

$$\tau_0 = L \pi R^2 / 2 v_{0T} \quad (1-5)$$

$$z = K' \tau_0 \quad (1-6)$$

La integral $\int_1^{\infty} \frac{e^{-zy}}{y^3} dy$ es indeterminada y se evalúa mediante la tabla de integrales exponenciales incluida en el apéndice V.

O mediante la ecuación:

$$E_n(z) = \int_1^{\infty} \frac{e^{-zy}}{y^n} dy =$$

$$\frac{(-z)^{n-1}}{(n-1)!} \left[-\ln z + \Psi(n) \right] - \sum_{\substack{m=0 \\ m \neq n-1}}^{\infty} \frac{(-z)^m}{(m-n+1)m!}$$

$$\delta = 0.57721 56649 \dots$$

donde $n = 3$ (para este caso particular) (1)

$$\Psi_{(1)} = -\delta, \quad \Psi_{(n)} = -\delta + \sum_{m=1}^{n-1} 1/m$$

1.D) REACCION DE PSEUDO-PRIMER ORDEN (12)

Las reacciones químicas elementales de la forma



(en nuestro caso violeta cristal e hidróxido de sodio) de segundo orden, tienen una velocidad de reacción dada por:

$$\frac{dC_A}{dt} = -KC_A C_B \quad \text{siendo} \quad C_B = C_{B0} - C_{A0} + C_A$$

Si la concentración inicial de B es mucho mayor que la concentración inicial de A, la concentración de B no variará considerablemente durante el tiempo de reacción, por lo cual, la concentración de B se podrá considerar constante a través del tiempo, e igual a C_{B0} .

La Ecuación diferencial quedará como:

$$\frac{dC_A}{dt} = -KC_{B0}C_A = -K'C_A$$

donde $K' = KC_{B0}$, es conocida como la constante de Pseudo-primer orden y tiene unidades de tiempo inverso, es decir s^{-1} , en sistema internacional.

La ecuación diferencial puede ser integrada quedando:

$$\ln C_A/C_{A0} = -K' \tau = \ln(1 - X_A)$$

donde τ es el tiempo espacial.

Al realizar una gráfica de $\ln(1 - X_A)$ contra τ resultará una línea recta con pendiente igual a $-K'$ e intersección en cero.

Sin embargo, esta ecuación sólo puede ser utilizada para predecir el comportamiento de un reactor tubular-ideal, en el cual se tiene un flujo de pistón.

A partir de la referencia bibliográfica (5), se encontró que cuando se tiene una concentración de hidróxido de sodio en la entrada del reactor igual a 0.1 M, la constante de pseudo-primer orden tiene un valor de 0.0225 s^{-1} (1.35 min^{-1}).

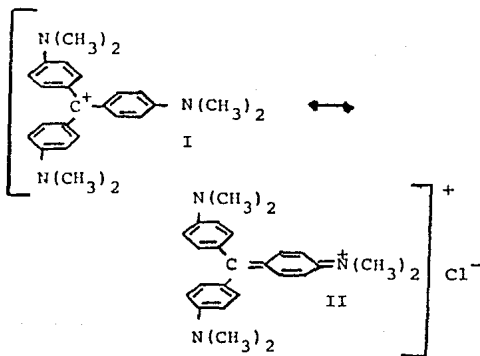
Partiendo de la información anterior, se obtuvo la constante de pseudo-primer orden para este estudio, cuyo valor es 0.0205 s^{-1} (1.23 min^{-1}) ya que se trabajó con una relación de flujos de 1:10 y la concentración de hidróxido de sodio en la entrada del reactor es 0.0909 M.

1.E) ESTRUCTURA DEL VIOLETA CRISTAL (3)

Violeta Cristal.- Su nombre lo toma del color y de la gran capacidad de cristalización que posee.

Su peso molecular es igual a 408 y tiene la siguiente fórmula condensada: $C_{25}H_{30}ClN_3$.

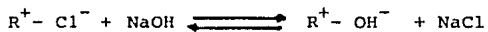
SU ESTRUCTURA ES LA SIGUIENTE:



El Violeta Cristal se puede representar por las estructuras I y II.

La contribución de la estructura I a la resonancia debido a la hibridación, indica la deficiencia electrónica en el carbono terciario, creando una zona propi-

cia para que el ión hidroxilo ataque, para dar lugar a un derivado carbinol, el cual tiene la particularidad de no tener color.



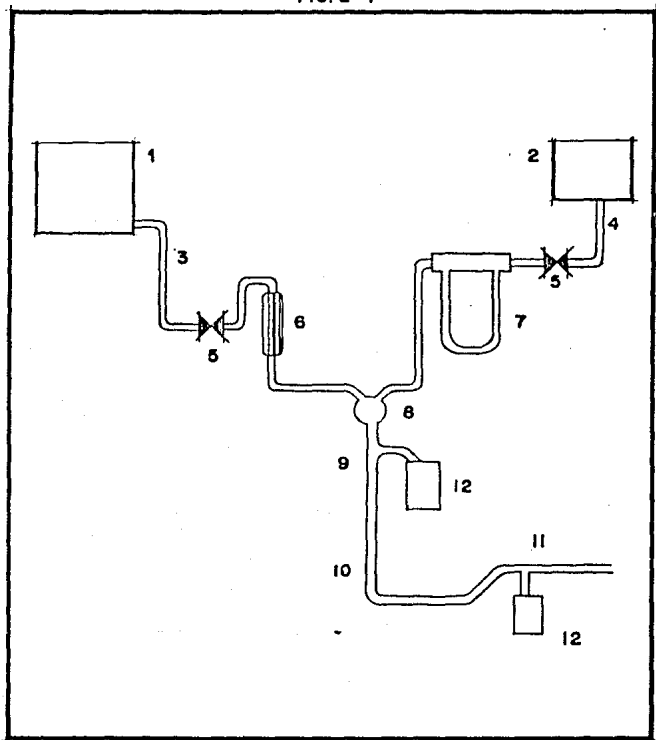
CAPITULO 2
DESCRIPCION DEL EQUIPO EMPLEADO

DESCRIPCION DEL EQUIPO EMPLEADO.

Un esquema de los aparatos requeridos para la realización de este estudio se muestra en la figura (2-1). Dicha figura se describe a continuación:

- 1.- Tanque de 0.20 m^3 (200 l), para la solución de hidróxido de sodio $0.1 \times 10^{-2} \text{ mol/m}^3$ (0.1 M).
- 2.- Tanque de 0.02 m^3 (20 l), para la solución de violeta cristal $0.9 \times 10^{-2} \text{ mol/m}^3$ ($0.9 \times 10^{-5} \text{ M}$).
- 3.- Corriente de salida del tanque 1.
- 4.- Corriente de salida del tanque 2.
- 5.- Llaves de paso.
- 6.- Rotámetro.
- 7.- Manómetro Diferencial.
- 8.- Mezclador.
- 9.- Conexión "Y".
- 10.- Reactor Tubular en forma Longitudinal, tiene 40 m. de longitud y 0.9525 cm de diámetro nominal.
- 11.- Conexión "T"
- 12.- Celdas de muestreo.

FIG. 2 - I



ESQUEMA DEL EQUIPO EMPLEADO

CAPITULO 3
DESARROLLO EXPERIMENTAL

DESARROLLO EXPERIMENTAL.

PROCEDIMIENTO.

Primeramente se preparan las soluciones de NaOH - 0.1×10^{-2} mol/m³ (0.1 M) y violeta cristal 0.9×10^{-2} mol/m³ (0.9×10^{-5} M). Estas concentraciones se mantienen constantes en todas las corridas. (Se realizaron 10 corridas a diferentes flujos).

Enseguida se procede a obtener el estado de condiciones estables del sistema para lo cual, se abren las -- llaves de paso y se establecen los flujos deseados para -- cada solución.

El flujo de la solución de Hidróxido de sodio es -- medido por el rotámetro, y el flujo de solución de violeta cristal, por el manómetro diferencial.

Después de obtener el estado estacionario se retira una muestra a la entrada del reactor y otra a la salida y se mide su concentración.

Se deja transcurrir un tiempo de 600 s (10 min) y se vuelven a tomar muestras a la entrada y a la salida -- del reactor y se mide su concentración, repitiéndose ésto 5 veces para cada corrida.

Se calcula la conversión para cada par de lectu-- ras, (ver tabla 4-1) y enseguida el promedio de las 5 conversiones, que se utiliza como valor de la conversión para esa corrida.

La variable utilizada en este estudio fué el cambio de los flujos, en cada una de las 10 corridas. (Ver - tabla 3-1).

Para mayor información ver el apéndice II.

CALCULO DE FLUJOS.

El cálculo de los flujos se obtuvo mediante las siguientes ecuaciones obtenidas de la calibración de los medidores de flujo: (ver el apéndice IV).

Ecuación del Rotámetro:

$$Vo_B = -1.9838 \times 10^{-6} + 0.3670 \times 10^{-6} (\Delta HR)$$

Ecuación del Manómetro Diferencial:

$$Vo_A = 0.1541 \times 10^{-6} (\Delta H \times 10^3)^{0.5876}$$

En la tabla 3-1 se muestran los valores obtenidos de los flujos empleados en cada corrida y su tiempo espacial (τ) correspondiente. En ella encontramos las siguientes columnas:

ΔHR : Unidades marcadas en la escala del rotámetro.

$Vo_B \times 10^6$: Flujo de hidróxido de sodio.

$\Delta H \times 10^3$: Unidades de la escala marcada en el tubo en "U" (Manómetro diferencial).

$Vo_A \times 10^6$: Flujo de violeta cristal.

$Vo_T \times 10^6$: Flujo Total.

τ : Tiempo espacial = V/Vo_T

donde

V = Volumen del reactor tubular longitudinal.

$v = 2900 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ (2900 ml).

TABLA 3-1
 VALORES DE LOS FLUJOS EMPLEADOS EN CADA CORRIDA
 Y SU TIEMPO ESPACIAL CORRESPONDIENTE

No.de corrida	ΔHR	$V_{O_B} \times 10^6$ (m^3/s)	$\Delta HX \times 10^3$ (m)	$V_{O_A} \times 10^6$ (m^3/s)	$V_{O_T} \times 10^6$ (m^3/s)	τ (s)
1	44	14.16	44	1.424	15.58	186.1
2	49	16.00	54	1.606	17.61	164.7
3	54	17.83	65	1.791	19.62	147.8
4	59	19.67	76	1.963	21.63	134.1
5	64	21.50	89	2.154	23.65	122.6
6	69	23.34	102	2.334	25.67	113.0
7	74	25.17	116	2.517	27.69	104.7
8	79	27.01	131	2.703	29.71	97.6
9	84	28.84	146	2.881	31.72	91.4
10	89	30.68	163	3.074	33.75	85.9

CAPITULO 4
RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS.

En la tabla 4-1 se dan los resultados experimentales obtenidos y en ella se muestran las siguientes columnas:

$LABS_i$: Lectura de absorbancia en la entrada del reactor.

$LABS_f$: Lectura de absorbancia en la salida del reactor.

$C_{Ai} \times 10^2$: Concentración de violeta cristal correspondiente a $LABS_i$.

$C_{Af} \times 10^2$: Concentración de violeta cristal correspondiente a $LABS_f$.

$-\ln(I-X_A) = \ln(C_{Ai}/C_{Af})$: Logaritmo de la relación de --
concentraciones.

$X_A = 1 - C_{Af}/C_{Ai}$: Fracción de violeta cristal convertida--
en producto.

TABLA 4-1
 RESULTADOS EXPERIMENTALES

No.de corrida	LABS _i	LABS _f	C _{Ai} X10 ²	C _{Af} X10 ²	-ln(I-X _A)	X _A
1	0.053	0.009	0.0725	0.0200	1.2872	0.7240
	0.060	0.005	0.0796	0.0129	1.8168	0.8374
	0.059	0.010	0.0786	0.0216	1.2903	0.7248
	0.055	0.010	0.0745	0.0216	1.2370	0.7097
	0.060	0.005	0.0796	0.0129	1.8168	0.8374
2	0.060	0.008	0.0796	0.0183	1.4685	0.7697
	0.058	0.010	0.0776	0.0216	1.2772	0.7212
	0.050	0.009	0.0694	0.0200	1.2441	0.7118
	0.058	0.010	0.0776	0.0216	1.2772	0.7212
	0.060	0.008	0.0796	0.0183	1.4685	0.7697
3	0.060	0.010	0.0796	0.0216	1.3032	0.7283
	0.060	0.010	0.0796	0.0216	1.3032	0.7283
	0.060	0.020	0.0796	0.0361	0.7897	0.5460
	0.061	0.015	0.0806	0.0292	1.0155	0.6378
	0.060	0.012	0.0796	0.0247	1.1681	0.6891
4	0.058	0.015	0.0776	0.0292	0.9774	0.6237
	0.061	0.017	0.0806	0.0320	0.9228	0.6026
	0.060	0.015	0.0796	0.0292	1.0029	0.6332
	0.060	0.015	0.0796	0.0292	1.0029	0.6332
	0.065	0.020	0.0847	0.0361	0.8518	0.5733

TABLA 4-1
(CONTINUACION)

No.de Corrida	LABS _i	LABS _f	C _{Ai} X10 ²	C _{Af} X10 ²	-ln(1-X _A)	X _A
5	0.065	0.016	0.0847	0.0306	1.0171	0.6384
	0.065	0.017	0.0847	0.0320	0.9722	0.6217
	0.065	0.019	0.0847	0.0348	0.8898	0.5893
	0.065	0.018	0.0847	0.0334	0.9298	0.6054
	0.063	0.018	0.0827	0.0334	0.9055	0.5956
6	0.060	0.015	0.0796	0.0292	1.0028	0.6331
	0.060	0.017	0.0796	0.0320	0.9101	0.5975
	0.060	0.017	0.0796	0.0320	0.9101	0.5975
	0.065	0.018	0.0847	0.0334	0.9298	0.6054
	0.062	0.017	0.0816	0.0320	0.9354	0.6076
7	0.060	0.018	0.0796	0.0334	0.8685	0.5804
	0.060	0.018	0.0796	0.0334	0.8685	0.5804
	0.060	0.019	0.0796	0.0348	0.8274	0.5628
	0.060	0.020	0.0796	0.0361	0.7907	0.5465
	0.055	0.020	0.0745	0.0361	0.7245	0.5154
8	0.050	0.019	0.0694	0.0348	0.6905	0.4987
	0.050	0.017	0.0694	0.0320	0.7729	0.5383
	0.052	0.018	0.0714	0.0334	0.7595	0.5321
	0.050	0.015	0.0694	0.0292	0.8656	0.5792
	0.052	0.019	0.0714	0.0348	0.7194	0.5130

TABLA 4-1
(CONTINUACION)

No. de corrida.	LABS _i	LABS _f	C _{Ai} X10 ²	C _{Af} X10 ²	-ln(I-X _A)	X _A
9	0.050	0.020	0.0694	0.0361	0.6525	0.4792
	0.052	0.019	0.0714	0.0348	0.7194	0.5130
	0.052	0.018	0.0714	0.0334	0.7595	0.5321
	0.050	0.020	0.0694	0.0361	0.6525	0.4792
	0.052	0.019	0.0714	0.0348	0.7194	0.5130
10	0.050	0.020	0.0694	0.0361	0.6525	0.4792
	0.052	0.021	0.0714	0.0375	0.6453	0.4785
	0.045	0.015	0.0643	0.0292	0.7892	0.5458
	0.050	0.020	0.0694	0.0361	0.6525	0.4792
	0.050	0.020	0.0694	0.0361	0.6525	0.4792

En la tabla 4-2 se dan los valores promediados de las conversiones experimentales y logaritmo de la relación de concentraciones de violeta cristal obtenidas en cada corrida, así como el tiempo espacial correspondiente.

En la figura 4-1 se presenta la gráfica de los valores promediados de $-\ln(1 - X_A)$ de cada corrida, y el tiempo espacial correspondiente.

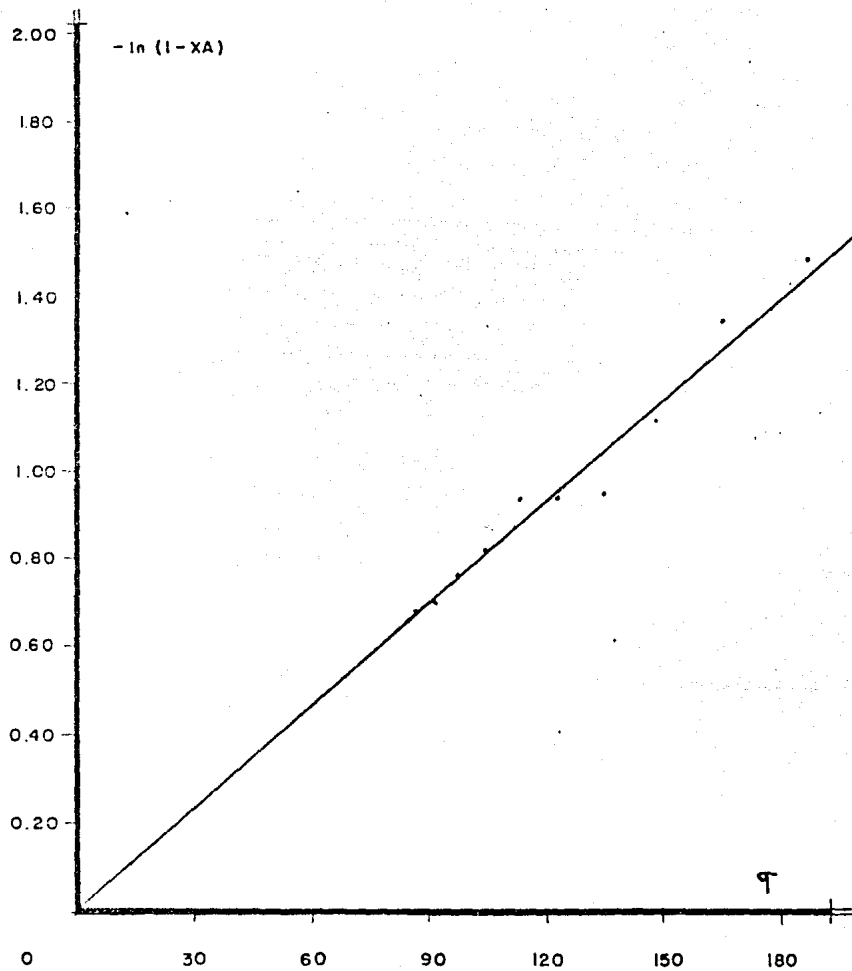
En esta figura se observa que los datos se distribuyen sobre una línea recta que parte del origen y cuya pendiente es la constante de pseudo-primer orden K' , obtenida por el Método de Mínimos Cuadrados.

TABLA 4-2

TABLA DE RESULTADOS DEL PROMEDIO DE LAS CONVERSIONES EXPERIMENTALES Y LOGARITMO DE LA RELACION DE CONCENTRACIONES DE VIOLETA CRISTAL.

No. DE CORRIDA	τ	$-\ln(I-X_A)$	X_A
1	186.1	1.4896	0.7667
2	164.7	1.3471	0.7387
3	147.8	1.1159	0.6659
4	134.1	0.9516	0.6132
5	122.6	0.9429	0.6101
6	113.0	0.9376	0.6082
7	104.7	0.8159	0.5571
8	97.6	0.7616	0.5323
9	91.4	0.7007	0.5033
10	85.9	0.6784	0.4918

FIG. 4-1



Para obtener la mejor recta posible que se ajusta a -- los datos experimentales de la figura 4-1, se aplicó el Método de Mínimos Cuadrados (ver apéndice III), cuyos datos se muestran en la tabla 4-3.

TABLA 4-3
 APLICACION DEL METODO DE MINIMOS CUADRADOS.

No. de Corrida	X_i	Y_i	$X_i Y_i$	X_i^2	Y_i^2
1	186.1	1.4896	277.2146	34,633.21	2.2189
2	164.7	1.3471	221.8674	27,126.09	1.8147
3	147.8	1.1159	164.9300	21,844.84	1.2452
4	134.1	0.9516	127.6096	17,982.81	0.9055
5	122.6	0.9429	115.5995	15,030.76	0.8891
6	113.0	0.9376	105.9488	12,769.00	0.8791
7	104.7	0.8159	85.4247	10,962.09	0.6657
8	97.6	0.7616	74.3322	9,525.76	0.5800
9	91.4	0.7007	64.0440	8,353.96	0.4910
10	85.9	0.6784	58.2746	7,378.81	0.4602

Los valores de la constante cinética que se dan a continuación, se obtuvieron aplicando las ecuaciones III-1 y -- III-2.

$$k' = 0.0078 \text{ s}^{-1} = 0.4680 \text{ min}^{-1}$$

Esto corresponde a una ecuación de recta:

$Y = bX$, la cual indica que, para $X = 0$, $Y = 0$.

Se obtuvo una correlación $r = 0.9859$.

Para graficar la curva X_A contra τ (fig. 4-2), se correlacionaron los datos experimentales a una ecuación del tipo:

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

Aplicando logaritmos a la ecuación anterior, obtenemos:

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

que es la ecuación de una recta.

El valor obtenido para $a = 0.0378$

El valor obtenido para $b = 0.5775$

La X_A correlacionada contra τ representada en la Fig. 4-2, se trazó mediante la ecuación:

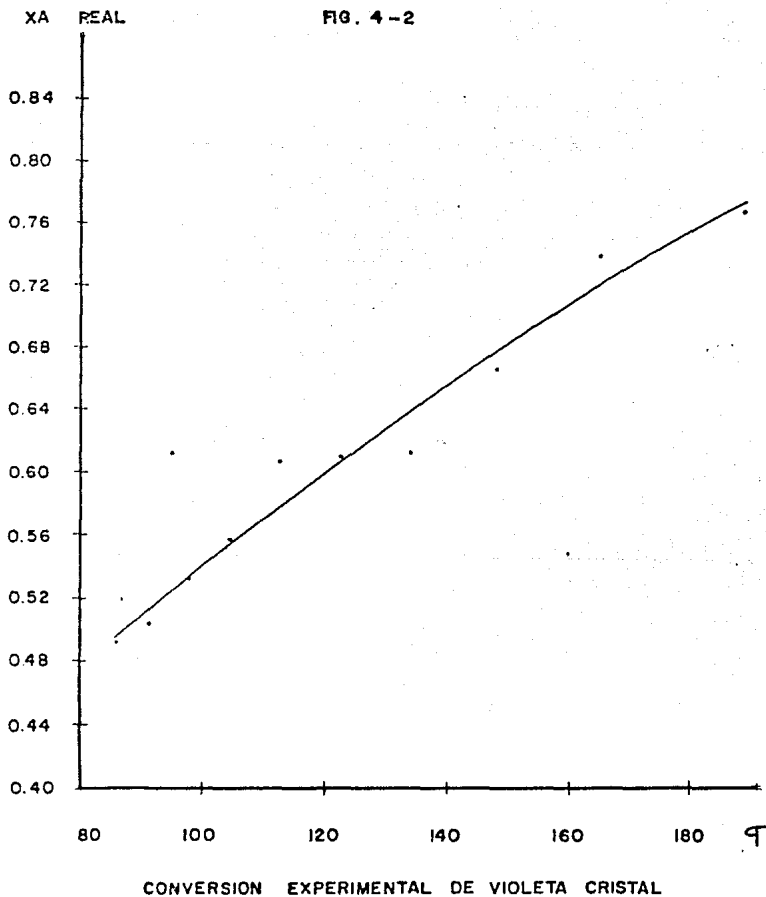
$$X_A \text{ correlacionada} = 0.0378 (\tau)^{0.5775} \quad (4-3)$$

Los resultados obtenidos a partir de la ecuación 4-3 se muestran en la tabla 4-4, donde además encontramos los valores promediados de las conversiones experimentales obtenidas en el reactor tubular longitudinal y los tiempos espaciales correspondientes para cada corrida.

TABLA 4-4
CONVERSION EXPERIMENTAL DE VIOLETA CRISTAL.

No. de Corrida	τ	X_A REAL	X_A CORRELACIONADA
1	186.1	0.7667	0.7732
2	164.7	0.7387	0.7205
3	147.8	0.6659	0.6768
4	134.1	0.6132	0.6399
5	122.6	0.6101	0.6076
6	113.0	0.6082	0.5796
7	104.7	0.5571	0.5546
8	97.6	0.5323	0.5326
9	91.4	0.5033	0.5128
10	85.9	0.4918	0.4947

FIG. 4-2



CAPITULO 5
COMPARACION CON LOS MODELOS
IDEALES

COMPARACION CON LOS MODELOS IDEALES.

En la tabla 5-1, se muestran las conversiones de el Modelo de Flujo de Pistón correspondientes a los tiempos espaciales experimentales. Estas conversiones se obtuvieron por medio de la ecuación (1-2); en ella se sustituyeron los valores de tiempo espacial utilizado en este estudio y la constante de pseudo-primer orden, obtenida de nuestros datos experimentales por el Método de Mínimos Cuadrados, cuyo valor es 0.0078 s^{-1} (0.4680 min^{-1}) a la temperatura ambiente (aproximadamente 20°C) y con una concentración de NaOH en la entrada del reactor igual a 0.0909 M , ya que la relación de flujos empleada es 1:10 (ver tabla 3-1).

Secuidamente en la tabla 5-1A, se dan los valores de las conversiones del Modelo de Flujo de Pistón, calculadas utilizando la constante de pseudo-primer orden obtenida a partir de la referencia bibliográfica (5), cuyo valor es 0.0205 s^{-1} (1.23 min^{-1}).

En la tabla 5-2 se muestran los valores del tiempo espacial para flujo laminar, la integral exponencial, la cual se evalúa mediante la tabla de integrales exponenciales incluida en el apéndice V, obtenida del Manual de Funciones Matemáticas (1), y la conversión fraccional de el Modelo de Flujo Laminar, obtenida utilizando las ecuaciones (1-3) a (1-6) y la constante de pseudo-primer orden cuyo valor es 0.0078 s^{-1} (0.4680 min^{-1}).

En la tabla 5-2A se muestran los valores de la conversión fraccional de el Modelo de Flujo Laminar cuyo valor fué obtenido utilizando la constante de pseudo-primer orden obtenida a partir de la referencia bibliográfica (5) cuyo valor es 0.0205 s^{-1} (1.23 min^{-1}).

En las tablas 5-3 y 5-3A, se presenta la comparación - de las conversiones experimentales con las predichas por los modelos idealizados de flujo de pistón y flujo laminar; esta comparación se representa en la Fig. 5-1.

TABLA 5-1

RESULTADOS DE LAS CONVERSIONES FRACCIONALES DEL MODELO DE --
FLUJO DE PISTON, UTILIZANDO $K' = 0.0078 \text{ s}^{-1}$.

No. DE CORRIDA	τ	X_A
1	186.1	0.7658
2	164.7	0.7233
3	147.8	0.6843
4	134.1	0.6487
5	122.6	0.6157
6	113.0	0.5858
7	104.7	0.5581
8	97.6	0.5329
9	91.4	0.5098
10	85.9	0.4883

TABLA 5-1A

RESULTADOS DE LAS CONVERSIONES FRACCIONALES DEL MODELO DE --
FLUJO DE PISTON, UTILIZANDO $K' = 0.0205 \text{ s}^{-1}$.

No. DE CORRIDA	τ	X_A
1	186.1	0.9780
2	164.7	0.9658
3	147.8	0.9517
4	134.1	0.9360
5	122.6	0.9190
6	113.0	0.9014
7	104.7	0.8831
8	97.6	0.8648
9	91.4	0.8465
10	85.9	0.8281

TABLA 5-2

RESULTADOS DE LAS CONVERSIONES FRACCIONALES DEL MODELO DE --
 FLUJO LAMINAR, UTILIZANDO $K' = 0.0078 \text{ s}^{-1}$.

No. DE CORRIDA	τ_0	Z	$E_3(Z)$	X_A
1	93.05	0.7258	0.1601	0.6798
2	82.35	0.6423	0.1803	0.6394
3	73.90	0.5764	0.1982	0.6036
4	67.05	0.5230	0.2142	0.5716
5	61.30	0.4781	0.2289	0.5422
6	56.50	0.4407	0.2420	0.5160
7	52.35	0.4083	0.2541	0.4918
8	48.80	0.3806	0.2650	0.4700
9	45.70	0.3565	0.2749	0.4502
10	42.95	0.3350	0.2842	0.4316

TABLA 5-2A

RESULTADOS DE LAS CONVERSIONES FRACCIONALES DEL MODELO DE FLUJO LAMINAR, UTILIZANDO $K' = 0.0205 \text{ s}^{-1}$.

No. DE CORRIDA	φ_0	Z	$E_3(Z)$	X_A
1	93.05	1.9075	0.0338	0.9324
2	82.35	1.6882	0.0446	0.9108
3	73.90	1.5150	0.0557	0.8886
4	67.05	1.3745	0.0668	0.8664
5	61.30	1.2567	0.0779	0.8442
6	56.50	1.1583	0.0887	0.8226
7	52.35	1.0732	0.0994	0.8012
8	48.80	1.0004	0.1096	0.7808
9	45.70	0.9369	0.1195	0.7610
10	42.95	0.8805	0.1291	0.7418

TABLA 5-3

COMPARACION DE LAS CONVERSIONES EXPERIMENTALES CON LAS PREDI
CHAS POR LOS MODELOS IDEALIZADOS DE FLUJO DE PISTON Y FLUJO-
LAMINAR, UTILIZANDO $K' = 0.0078 \text{ s}^{-1}$.

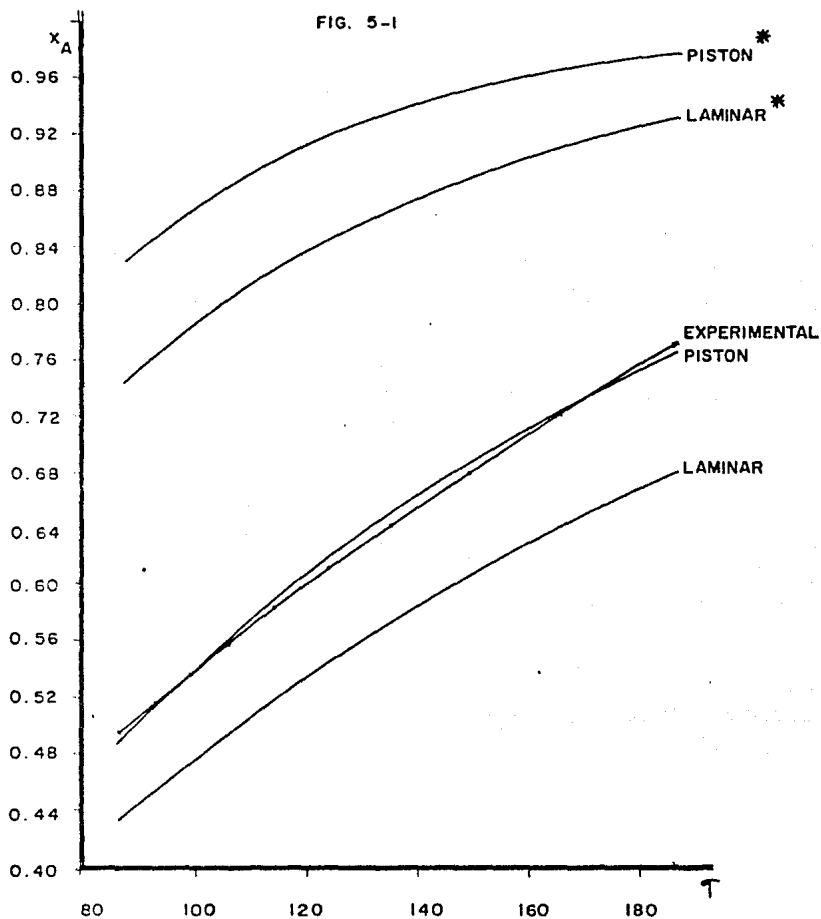
NO. DE CORRIDA	τ	X_A EXPERIMENTAL	X_A PISTON	X_A LAMINAR
1	186.1	0.7732	0.7658	0.6798
2	164.7	0.7205	0.7233	0.6394
3	147.8	0.6768	0.6843	0.6036
4	134.1	0.6399	0.6487	0.5716
5	122.6	0.6076	0.6157	0.5422
6	113.0	0.5796	0.5858	0.5160
7	104.7	0.5546	0.5581	0.4918
8	97.6	0.5326	0.5329	0.4700
9	91.4	0.5128	0.5098	0.4502
10	85.9	0.4947	0.4883	0.4316

TABLA 5-3A

COMPARACION DE LAS CONVERSIONES EXPERIMENTALES CON LAS PRE--
 DICHAS POR LOS MODELOS IDEALIZADOS DE FLUJO DE PISTON Y FLU-
 JO LAMINAR, UTILIZANDO $K' = 0.0205 \text{ s}^{-1}$.

No. DE CORRIDA	τ	X_A EXPERIMENTAL	X_A PISTON *	X_A LAMINAR *
1	186.1	0.7732	0.9780	0.9324
2	164.7	0.7205	0.9658	0.9108
3	147.8	0.6768	0.9517	0.8886
4	134.1	0.6399	0.9360	0.8664
5	122.6	0.6076	0.9190	0.8442
6	113.0	0.5796	0.9014	0.8226
7	104.7	0.5546	0.8831	0.8012
8	97.6	0.5326	0.8648	0.7808
9	91.4	0.5128	0.8465	0.7610
10	85.9	0.4947	0.8281	0.7418

FIG. 5-1



COMPARACION DE LAS CONVERSIONES EXPERIMENTALES CON LAS PREDICHAS POR LOS MODELOS IDEALIZADOS DE FLUJO DE PISTON Y FLUJO LAMINAR.

CAPITULO 6
DISCUSION DE LOS RESULTADOS.

DISCUSION DE RESULTADOS

Mediante las ecuaciones idealizadas que relacionan la conversión fraccional y el tiempo de residencia para un reactor tubular, se puede conocer a ciencia cierta el comportamiento de éste.

En la Fig. 5-1 se observa, que la curva de conversiones experimentales está muy cercana a la curva de conversiones del modelo de flujo de pistón; por lo que, prácticamente, nuestro reactor tubular longitudinal tiene un comportamiento igual al del modelo de flujo de pistón.

En el laboratorio, las pruebas fueron realizadas a temperatura ambiente (aproximadamente 20°C), lo que pudo haber afectado las conversiones obtenidas en nuestro reactor, por lo que éstas no fueron repetitivas con las reportadas anteriormente por Hudvins y Cavrol (5) (indicadas con un asterisco en la Fig. 5-1), quienes señalan haber trabajado a temperatura ambiente, pero no dan el grado exacto de la misma.

Se sugiere entonces que se realicen pruebas posteriores en las cuales se haga una medición exacta de la temperatura a la que se está trabajando.

Este estudio podría ampliarse, haciendo una variación en el reacondo geométrico del reactor.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Al finalizar este estudio se puede decir que se alcanzó el objetivo fijado, es decir; analizar el comportamiento de un reactor tubular longitudinal, mediante una reacción de Pseudo-primer orden.

Al observar los resultados obtenidos se concluye:

- 1.- La reacción entre el violeta cristal e hidróxido de sodio en exceso; tiene una ecuación cinética de Pseudo-primer orden.
- 2.- La constante de Pseudo-Primer orden se obtuvo utilizando el Método de Mínimos Cuadrados. El valor obtenido fué: $K' = 0.0078 \text{ s}^{-1}$ (0.4680 min^{-1}), con una concentración de NaOH igual a 0.0909 M a la temperatura ambiente (aproximadamente 20°C). Tal vez debido a que se trabajó a diferentes temperaturas, es que esta K' es pequeña comparada con la reportada por Hudqins y Cayrol cuyo valor es 0.0205 s^{-1} (1.23 min^{-1}).
- 3.- Nuestro reactor tubular longitudinal, tiene prácticamente el mismo comportamiento que el del modelo idealizado de flujo de pistón.

Se sugiere se realicen estudios similares a éste, variando el reacomodo geométrico del reactor, y medir la temperatura a la que se están realizando las pruebas experimentales, a la entrada y a la salida del reactor.

BIBLIOGRAFIA

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

- 1.- ABRAMOWITZ Milton and STUGAN Irene A. Handbook of Mathematical Functions. Formulas, Graphs, and Mathematical tables.
U.S. Department of Commerce. National Bureau - Standards applied Mathematics series. 55
Third printing, Marzo (1965), with corrections.
- 2.- COELLO A. Thelma Patricia. Construcción y Análisis de un reactor tubular.
(Tesis inédita); U.A.G.; (1983).
- 3.- CORSARO Gerald. A colorimetric Chemical Kinetics Experiment.
Journal of Chemical Education.
- 4.- DENBIGH Kennet. Teoría del Reactor Químico.
1a. ed., Alhambra, Madrid (España), (1968).
- 5.- HUDGINS Robert and CAYROL Bertrand. A Simple Tubular - - Reactor Experiment.
Chemical Engineering Education, Winter (1981).
- 6.- LEVENSPIEL Octave. Ingeniería de las Reacciones Químicas.
2a. ed., Reverté (1981).
- 7.- MENDEZ PINO Linda. Estudio de una reacción de Pseudo-Primer orden en un Reactor Tubular en Espiral. (Tesis Inédita); U.A.G.; (1984).
- 8.- MILLER Irwin y FREUND John E. Probabilidad y Estadística para Ingenieros.
4a. ed., Reverté, México, (1980).

- 9.- MURRAY R. Y SPIEGEL. Probabilidad y Estadística. Teoría y 760 Problemas Resueltos.
Editorial Mc Graw Hill. Abril (1980).
- 10.- PERRY Robert y CHILTON Cecil. Manual del Ingeniero Químico.
5ta. ed., (2a. ed. en español), Mc Graw Hill.
- 11.- RAMIREZ B. Zeferino. 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).
- 12.- RUSSELL T.W.F. y DENN M.M. Introducción al análisis en Ingeniería Química.
Ed. Limusa, México (1976).
- 13.- SMITH J.M. Ingeniería de la Cinética Química.
2a. ed., CECSA, México, (1977).
- 14.- VAZQUEZ OLVERA M.A. Análisis de un Reactor Tubular.
IV Seminario de Ingeniería Química, Celaya, Guanajuato. (1983).
- 15.- WALAS Stanley M. Cinética de Reacciones Químicas.
Editorial Aguilar, S.A. de Ediciones, Madrid, España, (1965).

A P E N D I C E I
DESCRIPCION DEL EQUIPO EMPLEADO.

DESCRIPCION DEL EQUIPO EMPLEADO.

Se utilizaron 2 tanques de alimentación: Uno, para la solución de hidróxido de sodio, colocado a una altura de -- 3.15 m. El volumen real de este tanque es de 0.20 M^3 (200 l), pero se trabajó con un volumen de 0.160 m^3 (160 l).

El segundo tanque de 0.02 m^3 (20 l) de capacidad fué -- colocado a una altura de 4.10 m. Este tanque contenía la solución de violeta cristal.

Los reactivos fluyeron por medio de la fuerza de gravedad.

La corriente de salida del tanque que contenía la solución de hidróxido de sodio, pasaba por un rotámetro hacia un mezclador donde se unía con la solución de violeta cristal -- que provenía del segundo tanque; esta solución al salir del tanque, pasaba por un medidor de tipo tobera hecho de vidrio.

Para medir la diferencia de presión en el medidor de -- flujo, se usó tetracloruro de carbono el cual es más denso -- que el agua e inmisible en ella. Al tetracloruro se le mezcló con colorante violeta cristal para poder ver claramente -- el menisco.

Para regular el flujo se utilizaron 2 llaves de paso -- de vidrio, de 4 mm de diámetro, colocadas a la salida de cada uno de los tanques, antes de los medidores de flujo.

El mezclador utilizado para juntar las 2 soluciones -- fué hecho de vidrio, de forma circular, de 0.0001 m^3 (100 ml) de capacidad. Tiene 2 aberturas de 8 mm cada una en la parte superior por la cual llegaban las soluciones, y una abertura

igual en la parte inferior por donde las soluciones pasaban al reactor.

El reactor tubular se utilizó en forma longitudinal. Tiene 40 m de largo y 0.9525 cm de diámetro nominal.

Entre la salida del mezclador y la entrada del reactor se colocó una conexión "Y" de vidrio, utilizada para retirar la muestra de solución a la entrada del reactor y una conexión "T", también de vidrio, fué colocada para retirar la muestra a la salida.

Para determinar la concentración de las muestras obtenidas se utilizó un Spectronic 20 Bausch & Lomb.

La normalidad de la solución de hidróxido de sodio fué conocida por titulación. Para ello se utilizó una bureta graduada de $2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ (25 ml). Como solución tituladora se utilizó HCl 0.1 N y fenoftaleína 1% como indicador.

Se utilizó un cronómetro para la medición de los tiempos de recolecta de muestras y para la calibración de los medidores de flujo.

A P E N D I C E II
DESARROLLO EXPERIMENTAL

DESARROLLO EXPERIMENTAL

PASOS PRELIMINARES:

a).- Se encontró, por medio del espectro ultravioleta, el -- rango de longitud de onda máxima del violeta cristal, -- el cual, más tarde se verificó, haciendo una gráfica -- (Fig. II-1) de absorbancia de la solución de violeta -- cristal, contra longitud de onda, medida en el Spectronic 20 Baush & Lomb. Estos datos se muestran en la tabla II-1. Se observó que la longitud de onda máxima del violeta cristal fué de 590 nm, por lo que las medidas -- de absorbancia de las muestras se leyeron a esta longitud de onda.

b).- Se preparó una solución patrón para determinar la curva de calibración del Spectronic 20 Baush & Lomb. Para esto, se pesaron 0.0041 g de violeta cristal y se aforaron a 0.0010 m^3 (1000 ml), con agua destilada.

De esta solución se prepararon estándares de 1×10^{-6} , -- 2×10^{-6} , 5×10^{-6} , 1×10^{-5} a 9×10^{-5} y $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ (1,2,5,10, 20,30,40,50,60,70,80,90 y 100 ml), los cuales se aforaron a $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ (100 ml).

Se midió su absorbancia en el Spectronic 20 y se realizó la gráfica (Fig. II-2) de absorbancia contra concentración.

Se utilizaron 2 celdas en el Spectronic 20.

Una se utilizaba para tomar la lectura de las muestras y la otra para el agua.

Después de cada lectura de muestras, se ajustaba la celda de agua a cero.

- c).- Se llenó el reactor con agua para medir su capacidad. El volumen obtenido experimentalmente fué de 2900 ml - (0.0029 m³) y, teóricamente, el volumen obtenido fué de 2895 ml (0.002895 m³).
- d).- Se calibraron los medidores de flujo. (Ver el apéndice-IV).

RUTINA DE TRABAJO.

- 1.- Se llena con agua (hasta 160 ml=0.160 m³) el tanque destinado a la solución de NaOH.
- 2.- Se pesan 640 g de NaOH Industrial y se agregan al tanque que contiene los 160 ml (0.160 m³) de agua, para obtener una solución 0.1 M (100 mol/m³), ya que el peso molecular del NaOH es igual a 40.
- 3.- Se toman 10 ml (1X10⁻⁵ m³) de esta solución y se titulan para verificar que la concentración sea de 0.1 M (100 mol/m³).
Como solución tituladora se utiliza HCl 0.1 N en una bureta graduada de 2.5X10⁻⁵ m³ (25 ml). Como indicador se utiliza fenoftaleína.
- 4.- La solución de violeta cristal en el tanque de 0.020 m³ - (20 l) queda preparada, cuando se obtiene una lectura de absorbancia de 0.85 en el Spectronic 20 Baush & Lomb, lo que indica una concentración de 0.9X10⁻² mol/m³ (0.9X10⁻⁵ M) que es la deseada.
- 5.- Se procede a establecer el estado estacionario en el sistema. Para ello es preciso abrir las llaves de paso y regular los flujos previamente establecidos para cada uno de los medidores de flujo. Ver tabla 3-1.

- 6.- Conseguido el estado estacionario, se toma una muestra a la entrada del reactor y se lee su absorbancia en el -- Spectronic 20. Enseguida se toma otra muestra a la salida del reactor e igualmente se le toma su lectura de absorbancia. Estas lecturas deben tomarse inmediatamente -- despues de obtener las muestras porque la reaccion sigue transcurriendo.

En cada corrida, se toman 5 muestras a la entrada del -- reactor y 5 muestras a la salida cada 600 s (10 min), pa ra comprobar el estado estacionario.

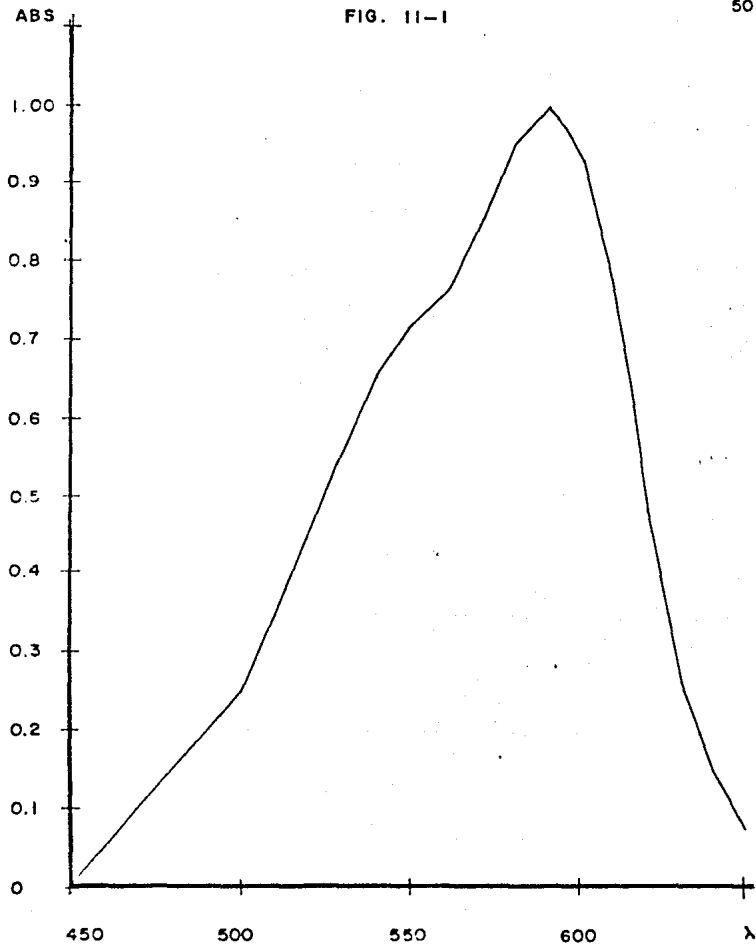
- 7.- Se repetician los pasos anteriores cambiando los flujos ca da vez, hasta hacer un total de 10 corridas.

TABLA II-1

DATOS DE ABSORBANCIA DE LA SOLUCION DE VIOLETA CRISTAL A
DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA.

λ	ABS
500	0.250
510	0.350
520	0.460
530	0.560
540	0.660
550	0.720
560	0.760
570	0.850
580	0.950
590	1.000
595	0.980
600	0.930
610	0.750
620	0.480
630	0.260
640	0.150
650	0.080

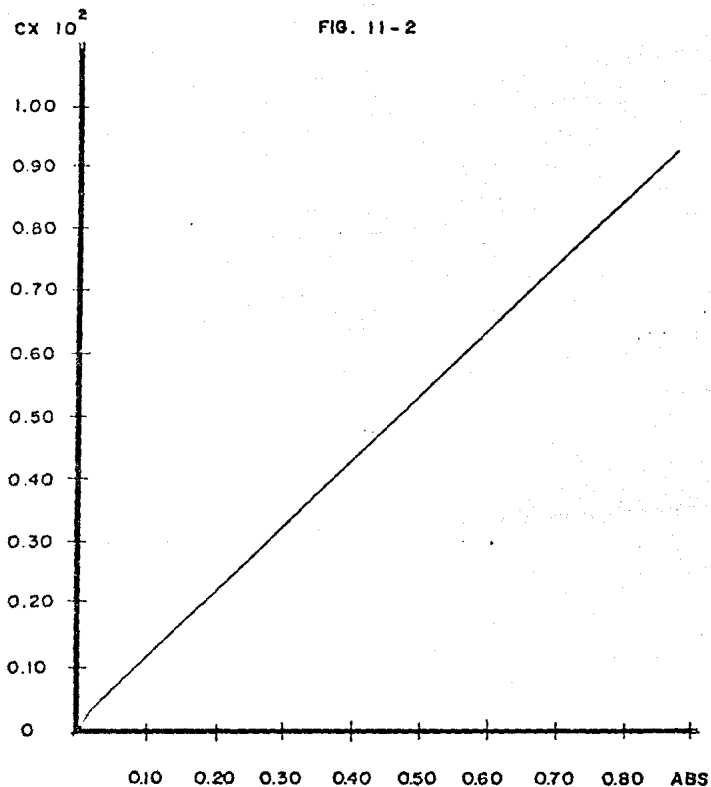
FIG. 11-1



REPRESENTACION DE LA LONGITUD DE ONDA FRENTE A LA MEDIDA DE ABSORBANCIA DE LA SOLUCION DE VIOLETA CRISTAL.

TABLA II-2
DATOS DE ABSORBANCIA A DIFERENTES CONCENTRACIONES
DE VIOLETA CRISTAL.

ABS	$C \times 10^2$ (mol/m ³)
0.009	0.02
0.031	0.05
0.080	0.10
0.178	0.20
0.260	0.30
0.370	0.40
0.460	0.50
0.550	0.60
0.650	0.70
0.760	0.80
0.850	0.90



REPRESENTACION DE ABSORBANCIA A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE VIOLETA CRISTAL.

Para obtener con mayor facilidad la concentración de violeta cristal correspondiente a cada lectura de absorbancia de las pruebas realizadas, y evitar el error que se obtendría al leer directamente en la gráfica de la Fig. II-2, se hizo una correlación de datos de la tabla II-2, encontrándose que los datos \leq a 0.031, se ajustan a una ecuación exponencial $Y = a (X)^b$ que es la siguiente:

$$C = 6.557 \times 10^{-3} (\text{LABS})^{0.7409} \quad (\text{II-1})$$

Los datos $>$ a 0.031, se ajustan a una recta

$Y = a + b(X)$, y su ecuación es la siguiente:

$$C = 1.837 \times 10^{-4} + 1.0204 \times 10^{-2} (\text{LABS}) \text{ mol/m}^3 \quad (\text{II-2})$$

A P E N D I C E III
APLICACION DEL METODO DE MINIMOS CUADRADOS

APLICACION DEL METODO DE MINIMOS CUADRADOS (8,9)

Muy a menudo, en la experimentación química, se encuentra que existe una relación entre 2 ó más variables, - - siendo de gran utilidad expresar esta relación en forma matemática mediante una ecuación.

Se ha estudiado ampliamente, la relación existente - entre el grado de conversión y el tiempo espacial, para una relación de pseudo-primer orden. La ecuación matemática que relaciona esta dependencia está dada por:

$$\tau = -\frac{1}{K'} \ln(I - X_A) \quad \text{o} \quad -\ln(I - X_A) = K' \tau$$

Podemos linearizar la ecuación graficando $-\ln(I - X_A)$ contra τ , teniendo entonces:

$$\begin{aligned} X &= \tau \\ Y &= -\ln(I - X_A) \\ b &= K' \end{aligned}$$

Obtendremos la ecuación de la fórmula general:

$$Y = b (X)$$

Este tipo de ecuación indica que para

$$X = 0, Y = 0$$

Una medida de la "Bondad de Ajuste" de nuestra ecuación, se basa en que, si la suma del cuadrado de cada error- ($E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_n^2$) es pequeña, el ajuste es bueno, si - es grande el ajuste es malo.

Por lo cual, se dice que el valor de "b" en la ecuación $Y = b (X)$, debe ser tal, que dé un valor mínimo la sumatoria de los errores al cuadrado. Y, se dice que es la mejor curva de ajuste.

DEDUCCION DE "b".

Se definió el error "E", como la diferencia entre -- "Y" experimental y la "Y" dada por la ecuación $Y = bX$

$$E = Y_i - Y_f$$

donde Y_i = Valor experimental

$Y_f = b (X_i) =$ Valor calculado

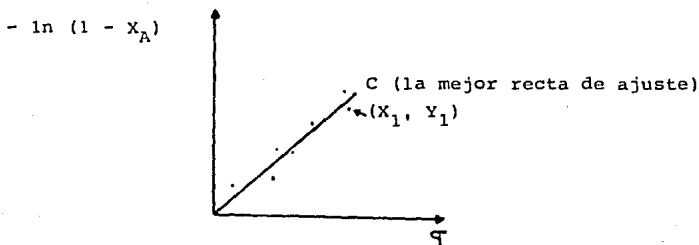
$$\sum_{(i)}^n E^2 = \sum_{(i)}^n (Y_i - b X_i)^2 = \text{mínimo}$$

Como lo que queremos es que $\sum_{(i)}^n E^2$ sea mínimo, se deriva con respecto a "b" y se iguala a cero, de esta ecuación se despeja el valor de "b", en función de los datos experimentales.

Para completar nuestro objetivo, de encontrar la relación entre nuestras variables, necesitamos conocer el valor de b.

Para ésto, primero se realizan pruebas en el laboratorio, midiendo valores de X_A contra su correspondiente Ψ .

Si graficamos Y contra X, se obtendrá un diagrama de dispersión.



Dados los puntos, se observa que la curva C parece -
ajustar al conjunto de datos.

Sin embargo, para un valor dado de X_i , por ejemplo --
 X_1 , habrá una diferencia entre el valor de Y_i y el valor co-
rrespondiente determinado por la curva C.

A esta diferencia se le llama error, éste puede ser-
negativo, positivo o cero.

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

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

$$b = \frac{\sum X_i Y_i}{\sum X_i^2} \quad (\text{III-1})$$

El valor de "b" obtenido, por el Método de Mínimos-
Cuadrados, representa la mejor recta de ajuste.

COEFICIENTE DE CORRELACION LINEAL.

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

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{\left[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 \right] \left[n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 \right]}}$$

donde: (III-2)

r = Coeficiente de Correlación Lineal

n = Número de corridas

X_i, Y_i = Valores experimentales

A P E N D I C E IV
CALIBRACION DE LOS MEDIDORES DE FLUJO

A).- CALIBRACION DEL ROTAMETRO (MEDIDOR DE FLUJO) (10)

El rotámetro que se utilizó para medir el flujo de la solución de NaOH consta, básicamente, de una plomada o "flotador" que se mueve libremente en forma ascendente y descendente, dentro de un tubo vertical que lleva marcado sobre él una escala casi lineal de 10 a 100, en la que la posición del flotador se observa visualmente como indicación del flujo.

El fluido penetra por el extremo inferior del tubo y causa que el flotador se eleve hasta que el área anular comprendida entre el flotador y la pared del tubo es tal, que la caída de presión en esa constricción sea suficiente para sostener el flotador.

Para calibrar el rotámetro; primero se abre la válvula permitiendo el paso del agua hasta obtener el flujo deseado marcado por el flotador en la escala del rotámetro. Segundo, se hace una medición del líquido colectado en un tiempo fijo.

Esta operación se repite variando el flujo cada vez, para obtener una lista de datos de unidades de la escala marcada en el rotámetro y flujos (ver tabla IV-1), con los cuales se construye la gráfica de la Fig. IV-1.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

59

TABLA IV-1

DATOS PARA CALIBRACION DEL ROTAMETRO (MEDIDOR DE FLUJO)

Δ HR	$V_0 \times 10^6$ (m^3/s)
14	3.45
24	7.01
34	10.23
44	14.08
54	17.42
64	21.55
74	24.92
84	29.17
89	30.86

Se trazó la gráfica de la Fig. IV-I mediante la ecuación de la recta ($Y = a + bX$) y es la siguiente:

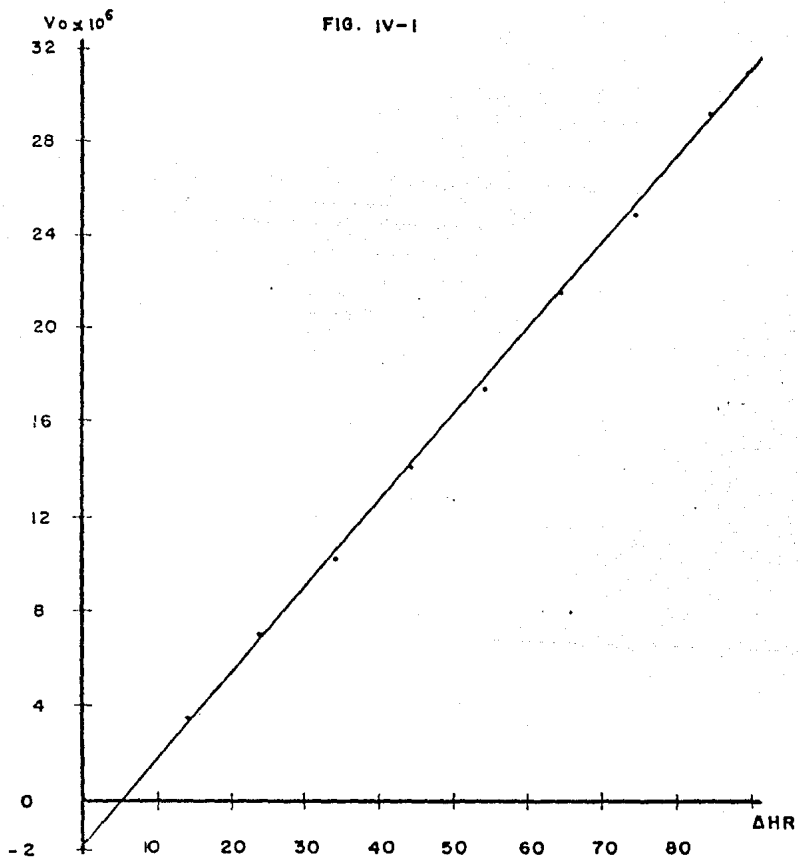
$$V_0 \times 10^6 = -1.9838 + 0.3670 (\Delta \text{HR}) \quad (\text{IV-1})$$

donde:

$$V_0 \times 10^6 = \text{Flujo volumétrico } m^3/s$$

Δ HR = Unidades de la escala marcada en el rotámetro.

FIG. IV-1



GRAFICA DE CALIBRACION DEL ROTAMETRO.

B).- CALIBRACION DEL MANOMETRO DIFERENCIAL (MEDIDOR DE FLUJO)
(II).

El Manómetro Diferencial consiste en un medidor de orificio de tipo tobera, unido a un tubo en "U" donde se coloca un fluido, el cual, puede ser cualquier líquido inmiscible - con el fluido que pasará a través del orificio.

Para presiones bajas y pequeñas diferencias de presión, se acostumbra emplear líquidos de escasa densidad (por ejemplo, agua, alcohol, tetracloruro de carbono).

La altura a la que el fluido se eleva en el tubo en "U", constituye una medida de presión, la cual depende del caudal que fluye a través del orificio.

La calibración del Manómetro Diferencial consiste en relacionar la diferencia de presión en el medidor de flujo, -- con el caudal de líquido fluyendo.

Al obtener esa relación, bastará con leer la diferencia de presión (diferencia de altura en el manómetro) y sustituir ésta en la siguiente ecuación:

$$V_o = a (\Delta H)^b \quad (IV-2)$$

Donde:

V_o = caudal de flujo, m^3/s
 ΔH = diferencia de presión, unidades de la escala marcada en el tubo en U (manómetro).

a, b = constantes del orificio
para conocer el flujo por unidad de tiempo.

Si aplicamos logaritmos a la ecuación IV-2
tendremos:

$$\ln V_0 = \ln a + b \ln \Delta H \quad (IV-3)$$

que representa la ecuación de una recta en la cual, b es la pendiente de la recta y el $\ln a$, es la intersección en el -- eje de la ordenada.

El procedimiento que se siguió para la calibración es el siguiente:

- 10.- Se abre la válvula permitiendo el paso del agua, originándose una diferencia de alturas (diferencia de presión) entre las columnas de tetracloruro de carbono (manómetro).
- 20.- Se anota la diferencia de alturas.
- 30.- Se hace una medición del líquido colectado en un tiempo fijo.

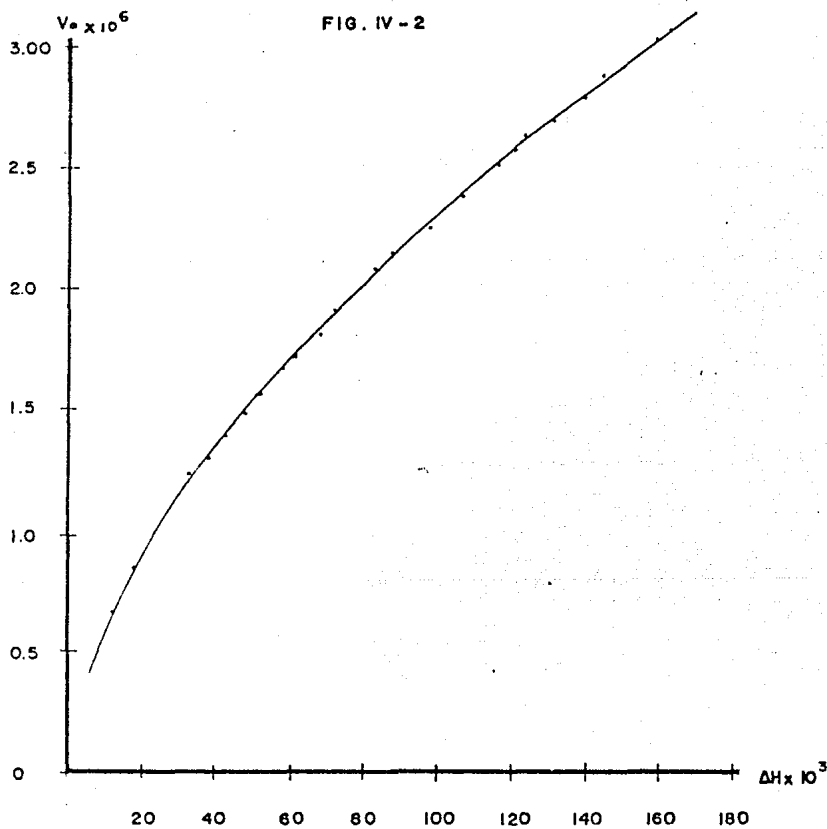
Esta operación se repite varias veces cambiando el -- flujo cada vez, obteniéndose una lista de datos de caudal y diferencia de altura. Se grafican estos datos, y se determinan las constantes a y b de la ecuación IV-2

La ecuación del medidor calibrado es:

$$V_0 \times 10^6 = 0.1541 (\Delta H \times 10^3)^{0.5876} \quad (IV-4)$$

TABLA IV-2
 DATOS PARA CALIBRACION DEL MANOMETRO DIFERENCIAL

No.	$\Delta H X 10^3$ (m)	$V_0 X 10^6$ (m ³ /s)
1	8	0.508
2	12	0.663
3	17	0.837
4	22	0.963
5	28	1.104
6	33	1.230
7	38	1.305
8	42.5	1.385
9	48	1.483
10	52	1.564
11	58	1.660
12	62	1.720
13	68	1.802
14	72	1.909
15	77	1.989
16	83	2.075
17	87.5	2.137
18	92	2.193
19	97	2.252
20	100	2.383
21	115	2.512
22	123	2.621
23	138	2.783
24	144	2.867
25	158	3.021
26	162	3.067



GRAFICA DE CALIBRACION DEL MANOMETRO DIFERENCIAL.

A P E N D I C E V
TABLAS PARA INTEGRALES EXPONENCIALES

INTEGRALES EXPONENCIALES Y FUNCIONES RELATIVAS

INTEGRALES EXPONENCIALES $E_n(x)$

x	$E_0(x) = -x \ln x$	$E_1(x)$	$E_2(x)$	$E_3(x)$	$E_4(x)$	$E_5(x)$	$E_{20}(x)$
0.00	1.00000 00	0.50000 00	0.33333 33	0.11111 11	0.05263 16	0.05207 90	0.05263 16
0.01	0.99572 22	0.49627 66	0.32838 24	0.10986 82	0.05207 90	0.05153 21	0.05207 90
0.02	0.99134 50	0.48294 83	0.32352 64	0.10863 95	0.05153 21	0.05099 11	0.05153 21
0.03	0.98695 87	0.47199 77	0.31876 19	0.10742 46	0.05099 11	0.05045 58	0.05099 11
0.04	0.98259 39	0.46332 39	0.31408 55	0.10622 36	0.05045 58		0.05045 58
0.05	0.97767 11	0.45491 88	0.30949 45	0.10503 63	0.04992 60		0.04992 60
0.06	0.97265 08	0.44676 09	0.30498 63	0.10386 24	0.04940 19		0.04940 19
0.07	0.96755 34	0.43883 27	0.30055 85	0.10270 18	0.04888 33		0.04888 33
0.08	0.96241 94	0.43111 97	0.29620 89	0.10155 44	0.04837 02		0.04837 02
0.09	0.95725 93	0.42360 96	0.29193 54	0.10042 00	0.04786 24		0.04786 24
0.10	0.95200 35	0.41629 15	0.28773 61	0.09929 84	0.04736 00		0.04736 00
0.11	0.94675 26	0.40915 57	0.28360 90	0.09818 96	0.04682 39		0.04682 39
0.12	0.94150 71	0.40219 37	0.27955 24	0.09709 34	0.04637 10		0.04637 10
0.13	0.93626 72	0.39539 77	0.27556 46	0.09600 85	0.04588 43		0.04588 43
0.14	0.93103 36	0.38876 07	0.27164 39	0.09493 80	0.04540 27		0.04540 27
0.15	0.92580 67	0.38227 61	0.26778 89	0.09387 86	0.04492 62		0.04492 62
0.16	0.92059 70	0.37593 80	0.26399 79	0.09283 12	0.04445 47		0.04445 47
0.17	0.91540 48	0.36974 08	0.26026 96	0.09179 56	0.04398 82		0.04398 82
0.18	0.91023 06	0.36376 95	0.25660 76	0.09077 18	0.04352 66		0.04352 66
0.19	0.90507 50	0.35795 91	0.25299 56	0.08975 95	0.04306 98		0.04306 98
0.20	0.89993 82	0.35194 53	0.24944 72	0.08875 87	0.04261 79		0.04261 79
0.21	0.89491 09	0.34626 38	0.24595 63	0.08776 93	0.04217 07		0.04217 07
0.22	0.88994 33	0.34070 05	0.24252 16	0.08679 10	0.04172 82		0.04172 82
0.23	0.88502 60	0.33525 18	0.23914 19	0.08582 38	0.04129 03		0.04129 03
0.24	0.88015 93	0.32991 42	0.23581 62	0.08486 75	0.04085 71		0.04085 71
0.25	0.87530 37	0.32468 41	0.23254 32	0.08392 20	0.04042 85		0.04042 85
0.26	0.87047 97	0.31955 85	0.22932 21	0.08298 72	0.04000 43		0.04000 43
0.27	0.86567 76	0.31453 43	0.22615 17	0.08206 30	0.03958 46		0.03958 46
0.28	0.86089 78	0.30966 86	0.22303 11	0.08114 92	0.03916 93		0.03916 93
0.29	0.85613 08	0.30477 87	0.21995 93	0.08024 57	0.03875 84		0.03875 84
0.30	0.85138 71	0.30004 18	0.21693 52	0.07935 24	0.03835 18		0.03835 18
0.31	0.84665 69	0.29539 56	0.21395 81	0.07846 93	0.03794 95		0.03794 95
0.32	0.84194 07	0.29083 74	0.21102 70	0.07759 60	0.03755 15		0.03755 15
0.33	0.83724 90	0.28636 52	0.20814 11	0.07673 27	0.03715 76		0.03715 76
0.34	0.83257 21	0.28197 65	0.20529 94	0.07587 90	0.03676 76		0.03676 76
0.35	0.82791 04	0.27766 93	0.20250 13	0.07503 50	0.03638 22		0.03638 22
0.36	0.82326 44	0.27344 16	0.19974 58	0.07420 06	0.03600 06		0.03600 06
0.37	0.81863 43	0.26929 13	0.19703 22	0.07337 55	0.03562 31		0.03562 31
0.38	0.81401 07	0.26521 65	0.19435 97	0.07255 97	0.03524 95		0.03524 95
0.39	0.80940 39	0.26121 55	0.19172 76	0.07175 31	0.03487 98		0.03487 98
0.40	0.80481 43	0.25728 64	0.18913 52	0.07095 57	0.03451 40		0.03451 40
0.41	0.80024 23	0.25342 76	0.18658 16	0.07016 71	0.03415 21		0.03415 21
0.42	0.79569 82	0.24963 73	0.18406 64	0.06938 75	0.03379 39		0.03379 39
0.43	0.79117 24	0.24591 41	0.18158 87	0.06861 67	0.03343 96		0.03343 96
0.44	0.78667 54	0.24225 63	0.17914 79	0.06785 45	0.03308 89		0.03308 89
0.45	0.78219 75	0.23866 25	0.17674 33	0.06710 05	0.03274 20		0.03274 20
0.46	0.77774 91	0.23513 13	0.17437 44	0.06635 56	0.03239 87		0.03239 87
0.47	0.77332 05	0.23166 12	0.17204 05	0.06561 91	0.03205 90		0.03205 90
0.48	0.76892 21	0.22825 08	0.16974 16	0.06489 07	0.03172 29		0.03172 29
0.49	0.76454 43	0.22489 90	0.16747 53	0.06417 04	0.03139 03		0.03139 03

INTEGRALES EXPONENCIALES Y FUNCIONES RELATIVAS

INTEGRALES EXPONENCIALES $E_n(x)$

x	$E_2(x)$	$E_1(x)$	$E_0(x)$	$E_{10}(x)$	$E_{20}(x)$
0.50	0.32664 39	0.22160 44	0.16524 28	0.06345 83	0.03106 12
0.51	0.32110 62	0.21836 57	0.16304 30	0.06275 42	0.03073 56
0.52	0.31568 63	0.21518 18	0.16087 53	0.06205 80	0.03041 34
0.53	0.31038 07	0.21205 16	0.15873 92	0.06136 96	0.03009 46
0.54	0.30518 62	0.20897 39	0.15663 41	0.06068 89	0.02977 91
0.55	0.30009 96	0.20594 75	0.15455 96	0.06001 59	0.02946 70
0.56	0.29511 79	0.20297 15	0.15251 50	0.05935 05	0.02915 81
0.57	0.29023 82	0.20004 48	0.15050 00	0.05869 25	0.02885 25
0.58	0.28545 78	0.19716 64	0.14851 39	0.05804 19	0.02855 01
0.59	0.28077 39	0.19433 53	0.14655 65	0.05739 86	0.02825 08
0.60	0.27618 39	0.19155 06	0.14462 71	0.05676 26	0.02795 48
0.61	0.27168 55	0.18881 14	0.14272 53	0.05613 36	0.02766 18
0.62	0.26727 61	0.18611 66	0.14085 07	0.05551 18	0.02737 19
0.63	0.26295 35	0.18346 56	0.13900 28	0.05489 69	0.02708 50
0.64	0.25871 54	0.18085 73	0.13718 13	0.05428 89	0.02680 12
0.65	0.25455 97	0.17829 10	0.13538 55	0.05368 77	0.02652 04
0.66	0.25043 44	0.17576 58	0.13361 53	0.05309 33	0.02624 25
0.67	0.24648 74	0.17328 10	0.13187 01	0.05250 65	0.02596 75
0.68	0.24256 67	0.17083 58	0.13014 95	0.05192 43	0.02569 54
0.69	0.23872 06	0.16842 94	0.12845 33	0.05134 97	0.02542 62
0.70	0.23494 71	0.16606 12	0.12678 08	0.05078 15	0.02515 98
0.71	0.23124 46	0.16373 03	0.12513 19	0.05021 96	0.02489 62
0.72	0.22761 14	0.16145 60	0.12350 61	0.04964 40	0.02463 53
0.73	0.22404 57	0.15917 78	0.12190 31	0.04911 47	0.02437 72
0.74	0.22054 61	0.15695 49	0.12032 24	0.04857 15	0.02412 19
0.75	0.21711 07	0.15476 67	0.11876 38	0.04803 44	0.02386 92
0.76	0.21373 88	0.15261 25	0.11722 70	0.04750 33	0.02361 91
0.77	0.21042 82	0.15049 17	0.11571 15	0.04697 81	0.02337 37
0.78	0.20717 77	0.14840 37	0.11421 70	0.04645 88	0.02312 69
0.79	0.20398 60	0.14634 79	0.11274 33	0.04594 53	0.02288 46
0.80	0.20085 17	0.14432 38	0.11129 00	0.04543 76	0.02264 49
0.81	0.19777 36	0.14233 07	0.10985 67	0.04493 56	0.02240 78
0.82	0.19475 04	0.14036 81	0.10844 33	0.04443 91	0.02217 31
0.83	0.19178 10	0.13843 55	0.10704 93	0.04394 82	0.02194 08
0.84	0.18886 41	0.13653 24	0.10567 44	0.04346 28	0.02171 11
0.85	0.18599 86	0.13465 81	0.10431 85	0.04298 29	0.02148 37
0.86	0.18318 33	0.13281 22	0.10298 12	0.04250 82	0.02125 87
0.87	0.18041 73	0.13099 43	0.10166 22	0.04203 89	0.02103 61
0.88	0.17769 94	0.12920 37	0.10036 12	0.04157 49	0.02081 58
0.89	0.17502 87	0.12744 01	0.09907 80	0.04111 60	0.02059 78
0.90	0.17240 41	0.12570 30	0.09781 23	0.04066 22	0.02038 21
0.91	0.16982 47	0.12399 19	0.09656 39	0.04021 35	0.02016 87
0.92	0.16728 95	0.12230 63	0.09533 24	0.03976 98	0.01995 75
0.93	0.16479 77	0.12064 59	0.09411 77	0.03933 11	0.01974 86
0.94	0.16234 82	0.11901 02	0.09291 94	0.03889 73	0.01954 12
0.95	0.15994 04	0.11739 88	0.09173 74	0.03846 83	0.01933 72
0.96	0.15757 32	0.11581 13	0.09057 13	0.03804 41	0.01913 47
0.97	0.15524 59	0.11424 72	0.08942 11	0.03762 46	0.01893 44
0.98	0.15295 78	0.11270 63	0.08828 63	0.03720 98	0.01873 62
0.99	0.15070 79	0.11118 80	0.08716 69	0.03679 96	0.01854 01

INTEGRALES EXPONENCIALES Y FUNCIONES RELATIVAS

INTEGRALES EXPONENCIALES $E_n(x)$

x	$E_0(x)$	$E_1(x)$	$E_2(x)$	$E_3(x)$	$E_4(x)$
1.00	0.34849 55	0.10665 20	0.08406 25	0.03139 40	0.01834 60
1.01	0.34831 99	0.10621 79	0.08497 30	0.03595 29	0.01815 39
1.02	0.34818 04	0.10676 54	0.08389 81	0.03559 63	0.01796 39
1.03	0.34767 63	0.10533 42	0.08283 76	0.03520 41	0.01777 59
1.04	0.34750 69	0.10392 38	0.08179 13	0.03481 63	0.01758 98
1.05	0.33797 13	0.10253 39	0.08075 90	0.03443 78	0.01740 57
1.06	0.33746 93	0.10116 43	0.07974 06	0.03405 35	0.01722 35
1.07	0.33699 94	0.09981 45	0.07873 57	0.03367 85	0.01704 33
1.08	0.33654 22	0.09848 42	0.07774 42	0.03330 77	0.01686 49
1.09	0.33615 67	0.09717 31	0.07676 59	0.03294 10	0.01668 84
1.10	0.33578 11	0.09588 09	0.07580 07	0.03257 84	0.01651 37
1.11	0.33543 62	0.09460 74	0.07484 83	0.03221 98	0.01634 09
1.12	0.33510 17	0.09335 21	0.07390 85	0.03185 52	0.01616 99
1.13	0.33478 60	0.09211 49	0.07298 12	0.03151 45	0.01599 07
1.14	0.33447 75	0.09089 53	0.07206 61	0.03116 78	0.01583 33
1.15	0.33418 81	0.08969 32	0.07116 32	0.03082 49	0.01566 76
1.16	0.33391 61	0.08850 83	0.07027 22	0.03048 58	0.01550 37
1.17	0.33367 14	0.08734 02	0.06939 30	0.03015 05	0.01534 14
1.18	0.33343 31	0.08618 88	0.06852 53	0.02981 84	0.01518 09
1.19	0.33320 68	0.08505 37	0.06766 91	0.02949 10	0.01502 21
1.20	0.33310 41	0.08393 47	0.06682 42	0.02916 68	0.01486 49
1.21	0.33303 25	0.08283 15	0.06595 04	0.02884 61	0.01470 94
1.22	0.33298 55	0.08174 39	0.06516 75	0.02852 90	0.01455 55
1.23	0.33294 27	0.08067 17	0.06435 55	0.02821 55	0.01440 32
1.24	0.33291 37	0.07961 46	0.06355 40	0.02790 54	0.01425 76
1.25	0.33288 81	0.07857 23	0.06276 31	0.02759 88	0.01410 35
1.26	0.33287 53	0.07754 47	0.06198 25	0.02729 55	0.01395 59
1.27	0.33287 51	0.07653 14	0.06121 22	0.02699 57	0.01381 00
1.28	0.33288 19	0.07553 26	0.06045 14	0.02669 91	0.01366 55
1.29	0.33289 66	0.07454 76	0.05970 15	0.02640 59	0.01352 76
1.30	0.33291 44 55	0.07357 63	0.05896 08	0.02611 59	0.01338 11
1.31	0.33293 15 15	0.07261 85	0.05822 99	0.02582 91	0.01324 12
1.32	0.33294 80 20	0.07167 67	0.05750 85	0.02554 55	0.01310 27
1.33	0.33296 47 47	0.07074 29	0.05679 64	0.02526 51	0.01296 57
1.34	0.33298 13 13	0.06982 46	0.05609 36	0.02498 61	0.01283 01
1.35	0.33299 72 72	0.06891 91	0.05539 90	0.02471 35	0.01269 55
1.36	0.33301 29 29	0.06802 60	0.05471 51	0.02444 23	0.01256 31
1.37	0.33302 71 71	0.06714 53	0.05402 93	0.02417 41	0.01243 17
1.38	0.33304 95 95	0.06627 66	0.05337 27	0.02390 88	0.01230 17
1.39	0.33307 10 10	0.06542 03	0.05271 37	0.02364 65	0.01217 31
1.40	0.33308 99 99	0.06457 55	0.05204 37	0.02338 72	0.01204 58
1.41	0.33310 33 33	0.06374 24	0.05137 22	0.02313 06	0.01191 98
1.42	0.33311 64 64	0.06292 07	0.05076 89	0.02287 70	0.01179 57
1.43	0.33312 85 85	0.06211 04	0.05016 36	0.02262 61	0.01167 19
1.44	0.33313 89 89	0.06131 11	0.04954 66	0.02237 80	0.01154 99
1.45	0.33314 30 30	0.06052 27	0.04893 74	0.02213 27	0.01142 91
1.46	0.33314 33 33	0.05974 57	0.04833 61	0.02189 03	0.01130 96
1.47	0.33314 94 94	0.05897 87	0.04774 25	0.02165 01	0.01119 14
1.48	0.33315 13 13	0.05822 17	0.04715 65	0.02141 26	0.01107 44
1.49	0.33315 85 85	0.05747 55	0.04657 80	0.02117 82	0.01095 86
1.50	0.33316 06 06	0.05673 95	0.04600 70	0.02094 61	0.01084 40
1.51	0.33316 80 80	0.05601 35	0.04544 32	0.02071 67	0.01073 07
1.52	0.33317 96 96	0.05529 73	0.04488 67	0.02048 92	0.01061 85
1.53	0.33318 40 40	0.05459 08	0.04433 77	0.02026 53	0.01050 75
1.54	0.33319 21 21	0.05389 39	0.04378 48	0.02004 33	0.01039 77
1.55	0.33319 67 67	0.05320 44	0.04325 93	0.01982 36	0.01028 90
1.56	0.33320 87 87	0.05252 82	0.04273 07	0.01960 67	0.01018 15
1.57	0.33321 62 62	0.05185 92	0.04220 87	0.01939 71	0.01007 50
1.58	0.33322 45 45	0.05119 45	0.04169 35	0.01919 92	0.00996 97
1.59	0.33323 21 21	0.05054 61	0.04118 47	0.01898 98	0.00986 56

INTEGRALES EXPONENCIALES Y FUNCIONES RELATIVAS

INTEGRALES EXPONENCIALES $E_n(x)$

x	$E_0(x)$	$E_1(x)$	$E_2(x)$	$E_{10}(x)$	$E_{10}(x)$
1.65	0.04862 37	0.04990 37	0.04068 25	0.01876 22	0.00976 24
1.61	0.04794 64	0.04921 70	0.04018 66	0.01855 68	0.00945 04
1.62	0.04710 20	0.04854 67	0.03969 70	0.01825 38	0.00955 95
1.63	0.04625 96	0.04802 99	0.03921 36	0.01815 30	0.00945 96
1.64	0.04544 97	0.04742 13	0.03873 64	0.01795 43	0.00935 07
1.65	0.04464 13	0.04682 09	0.03826 52	0.01775 79	0.00926 29
1.60	0.04384 46	0.04622 84	0.03779 99	0.01756 37	0.00916 61
1.67	0.04305 94	0.04564 99	0.03734 06	0.01737 16	0.00907 03
1.68	0.04228 54	0.04506 72	0.03686 70	0.01718 16	0.00897 56
1.69	0.04157 76	0.04449 87	0.03643 92	0.01699 37	0.00888 18
1.70	0.04087 06	0.04393 67	0.03599 70	0.01680 79	0.00878 90
1.71	0.04017 94	0.04336 27	0.03556 04	0.01662 42	0.00869 72
1.72	0.03949 68	0.04283 61	0.03512 93	0.01644 24	0.00860 63
1.73	0.03881 86	0.04229 67	0.03470 33	0.01626 27	0.00851 64
1.74	0.03816 86	0.04176 45	0.03428 34	0.01608 50	0.00842 74
1.75	0.03754 87	0.04123 93	0.03386 84	0.01590 92	0.00833 94
1.76	0.03697 68	0.04072 11	0.03345 86	0.01573 54	0.00825 22
1.77	0.03643 86	0.04020 97	0.03305 39	0.01556 34	0.00816 60
1.78	0.03591 81	0.03970 51	0.03265 44	0.01539 34	0.00808 07
1.79	0.03540 70	0.03920 71	0.03225 98	0.01522 53	0.00799 63
1.80	0.03486 53	0.03871 57	0.03187 02	0.01505 90	0.00791 28
1.81	0.03431 27	0.03823 08	0.03148 55	0.01489 45	0.00783 02
1.82	0.03375 52	0.03775 22	0.03110 56	0.01473 18	0.00774 84
1.83	0.03319 46	0.03728 00	0.03073 04	0.01457 10	0.00766 74
1.84	0.03264 87	0.03681 39	0.03035 99	0.01441 19	0.00758 74
1.85	0.03209 15	0.03635 40	0.02999 41	0.01425 46	0.00750 81
1.86	0.03157 29	0.03590 01	0.02963 78	0.01409 90	0.00742 97
1.87	0.03105 24	0.03545 21	0.02927 61	0.01394 53	0.00735 21
1.88	0.03052 03	0.03501 03	0.02892 36	0.01379 29	0.00727 53
1.89	0.03004 63	0.03457 37	0.02857 59	0.01364 24	0.00719 93
1.90	0.02978 03	0.03414 30	0.02823 23	0.01349 35	0.00712 42
1.91	0.02922 22	0.03371 80	0.02787 30	0.01334 63	0.00704 96
1.92	0.02869 18	0.03329 86	0.02755 79	0.01320 07	0.00697 62
1.93	0.02817 91	0.03288 46	0.02722 76	0.01305 67	0.00690 33
1.94	0.02765 38	0.03247 59	0.02690 02	0.01291 43	0.00683 12
1.95	0.02706 60	0.03207 17	0.02657 75	0.01277 34	0.00675 99
1.96	0.02654 55	0.03167 46	0.02625 87	0.01263 41	0.00668 93
1.97	0.02601 22	0.03128 17	0.02594 40	0.01249 64	0.00661 95
1.98	0.02547 59	0.03089 39	0.02563 31	0.01236 01	0.00655 04
1.99	0.02492 67	0.03051 12	0.02532 63	0.01222 54	0.00648 20
2.00	0.02435 43 $\begin{bmatrix} (-6)2 \\ 3 \end{bmatrix}$	0.03013 34 $\begin{bmatrix} (-6)1 \\ 3 \end{bmatrix}$	0.02502 78 $\begin{bmatrix} (-7)8 \\ 3 \end{bmatrix}$	0.01209 21 $\begin{bmatrix} (-7)3 \\ 3 \end{bmatrix}$	0.00641 43 $\begin{bmatrix} (-7)1 \\ 3 \end{bmatrix}$



Tesis y Copias
“EXCELLENCE”

López Cotilla 1449 Tel. 25-47-21

GUADALAJARA, JAL.

S I S T E M A S X E R O X

TESIS • INFORMES • MEMORIAS • TESINAS • COPIAS
TRANSCRIPCIONES IBM • REDUCCIONES EN
ALBANESE Y BOND • COPIAS A CUALQUIER
TAMAÑO Y EN COLOR • HELIOGRAFICAS •
ENCARGOLADO • REFILADO • ALMEGROFA •
MADUROS • POLIESTERS • IMPRESION DE FORMAS
Y PASTAS • OFFSET • ENCUADERNADO •
GRABADO DE ESTENCILES • REVELADO DE ROLLOS
SERVICIO A DOMICILIO • CREDITO • BANCOTARJETAS