



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**INTRODUCCION DEL VORTICE EN PROCESOS DE LA
INDUSTRIA QUIMICA Y TRATAMIENTO DE
AGUAS NEGRAS**

131
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

Ingeniero Químico

P R E S E N T A :

DAVID GOMEZ SALAS

MEXICO D. F.

1974



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

CLAS. Tesis
ADQ. 1974
FECHA
PROC. M.t. 100 128



QUÍMICA

UNAM

A MIS PADRES, HERMANOS, INNUMERABLES

AMIGOS Y CON TODO MI AMOR A LORNA.

MI AGRADECIMIENTO A:

Dr. Enzo Levi Lates

Ing. Eduardo Acosta Lara

Ing. Enrique Garcia López

Ing. Enrique Garcia Galeano

Por sus valiosas ideas, colaboración y supervisión. Así mismo,
al Instituto de Ingeniería, por todas las facilidades concedidas
en la realización de este trabajo.

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE

Presidente Prof. : ENRIQUE GARCIA GALEANO
Vocal " : ENRIQUE GARCIA LOPEZ
Secretario " : ALBERTO SOLANO SALAZAR
1. Suplente " : ARMANDO MENDOZA GAVITO
2. Suplente " : CARLOS FRANCO AJURIA

Tema desarrollado en; Ciudad Universitaria, México, D. F.

Sustentante: David Gómez Salas

Asesor del tema: I. Q. Enrique García López

Supervisor del tema: I. Q. Enrique García Galeano



Handwritten signatures and names over three horizontal lines. The top signature is clearly legible as "David G." and "S.". The middle signature is partially obscured but appears to be "Enrique García López". The bottom signature is also partially obscured but appears to be "Enrique García Galeano".

C O N T E N I D O

1 INTRODUCCION

2 GENERALIDADES

Descripción del dispositivo

Formación del vórtice y su comportamiento fluídico

Tipo de flujo en el tanque

Balance de Momentum

Cálculo de la potencia del vórtice

3 MEZCLADO

Objetivo

Procedimiento

Balance de materia

Interpretación de los resultados

Análisis del efecto de los baffles en el mezclado

4 TRANSFERENCIA GAS-LIQUIDO

Adaptación del dispositivo

Experimentación

Condiciones de los parámetros de experimentación

Interpretación de los resultados

5 TRATAMIENTO BIOLÓGICO CON LODOS ACTIVADOS

Descripción del dispositivo

Experimentación

Interpretación

Resultados

BIBLIOGRAFIA

APENDICE 1

Datos experimentales de mezclado

APENDICE 2

Datos experimentales de transferencia Gas-Líquido

I.- INTRODUCCION

La formación del vórtice fue observada y estudiada - por el Dr. Enzo Levi, investigador del Instituto de Ingeniería de la UNAM, quién realizó los estudios en un vórtice de agua - que logró estabilizar y encontró una ecuación que expresa su - comportamiento, la cual se corroboró más tarde experimentando en un vórtice de aire.

En este trabajo se inicia una serie de aplicaciones que pueden encontrarse dentro del área de las operaciones unitarias empleadas en la ingeniería química, a un vórtice que se origina en forma natural. Así mismo, se incorpora un nuevo sistema, que puede incorporarse a los conocimientos básicos de mecánica de flúidos y fenómenos de transporte que se imparten en la carrera.

Las operaciones unitarias que se tratan en forma teórica y experimental son: Mezclado y Transferencia de gas - líquido.

Estas operaciones se emplean, para una diversidad de fines, dentro de la industria química y en los procesos empleados en el tratamiento de aguas naturales y de desecho; de esto último se presenta un ejemplo.

Los resultados obtenidos ofrecen nuevas alternativas de realización y sugieren un enfoque diferente en las operaciones básicas donde intervienen los fenómenos de difusión, de -

transferencia de masa o transferencia de calor.

2.- GENERALIDADES.

Mediante el dispositivo del vórtice se produce una -
agitación en el tanque, que puede ser empleada para varios fines,
de acuerdo con los objetivos que se pretendan en una etapa del -
proceso:

1. Mezclar dos ó más fuidos miscibles
2. Poner en suspensión partículas sólidas
3. Dispersar un gas en el seno de un líquido en forma
de pequeñas burbujas
4. Dispersar un líquido dentro de otro no miscible, -
para formar una emulsión
5. Disolver un gas en un líquido
6. Disolver un sólido en un líquido
7. Evaporación de algún componente que se desee elimin
nar de una mezcla
8. Lograr la floculación para la eliminación de los -
sólidos suspendidos en un líquido
9. Favorecer la transmisión de calor entre un fluído
y un serpentín
10. Mantener la misma temperatura en todo el fluído

Con frecuencia un agitador cumple diversos fines simultáneamente, como ocurre en la hidrogenación catalítica de un líquido. En el tanque de hidrogenación el gas es dispersado a través del líquido en el cual están en suspensión las partículas só

lidas del catalizador siendo eliminado el calor producido en la reacción, por medio de un serpentín de refrigeración.

Al señalar las aplicaciones que se le pueden dar a la agitación, se hacen resaltar los posibles aprovechamientos del vórtice que podrán ser desarrollados en el futuro. Sin embargo, como ya se dijo solo fueron experimentadas las operaciones de mezclado y transferencia de gas - líquido en forma completa. Además, se realizó experimentalmente una aplicación concreta de la oxigenación en el tratamiento de aguas de desecho, o sea el tratamiento biológico con lodos activados de las aguas negras de la zona de Tecamachalco del Distrito Federal.

Por lo anterior, se divide el trabajo experimental y teórico en tres partes:

1. Mezclado
2. Transferencia de gas - líquido
3. Tratamientos biológicos con lodos activados.

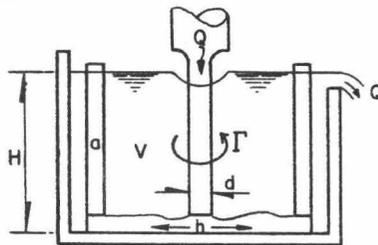
Estas partes incluyen por separados fundamentos, desarrollo experimental, desarrollo teórico y resultados para cada operación. En todas las pruebas realizadas, el vórtice fue formado con agua y, por tanto, el efecto de la viscosidad no pudo ser comprobado, quedando la experimentación en la rama de la hidrodinámica. Sin embargo, el cumplimiento, tanto en agua como en aire, de la ecuación que describe el comportamiento del vórtice nos permite suponer que en los fluidos newtonianos se podrían tener resultados reproducibles para un mismo reynolds.

DESCRIPCION DEL DISPOSITIVO.

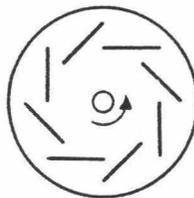
El dispositivo estará diseñado de acuerdo con la aplicación que se desee; sin embargo, existen invariablemente tres componentes principales:

- 1) El tanque principal, de volumen V
- 2) El estabilizador, de diámetro exterior D
- 3) La boquilla, de diámetro interior d

En la figura 2.1 se presenta un esquema de los componentes del dispositivo



a) Corte



b) Planta

Fig. 2.1 . - Dispositivo para producir el vórtice.

Explicación de los componentes.

Tanque. Es de forma cilíndrica, con base circular y de un volumen V . Está provisto de una descarga para un gasto Q ; su

diseño dependerá de la aplicación deseada.

Estabilizador. Es una serie de álabes a, verticales, que se colocan en el interior del tanque, formando un cilindro coaxial a este, de diámetro exterior D , orientados tangencialmente a un cilindro ideal interior. Los álabes se encuentran separados del fondo.

Boquilla. Es un tubo de diámetro interno d , que se coloca en el centro del tanque, en posición vertical, a una distancia h del fondo. La alimentación se realiza a través de esta.

FORMACION DEL VORTICE Y SU COMPORTAMIENTO FLUIDICO.

La formación del vórtice es un fenómeno natural, que se produce cuando un fluido sufre una aceleración externa, la cual puede ser producida por el arrastre que causa un fluido en movimiento sobre otro en reposo.

Un ejemplo de lo anterior es comunmente observado cuando un tanque lleno se descarga por el fondo, se produce un vórtice natural que se denomina vórtice de salida. En este fenómeno, se observan dos zonas: una en reposo R , en la parte superior, y otra en movimiento M , en la inferior.

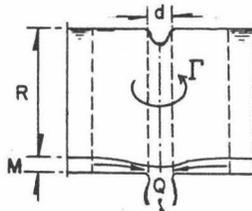


Fig. 2.2 Vórtice de salida

En el dispositivo descrito, el vórtice se origina por la entrada de un fluido por la boquilla; en este caso se llama vórtice de entrada, en el que se distinguen las mismas zonas - que en el vórtice de salida.

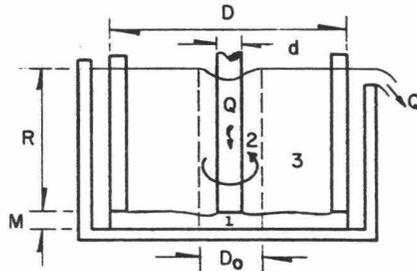


Fig. 2.3. Vórtice de entrada

El fluido que sale por la boquilla, en el fondo, se distribuye radialmente con una velocidad V_r , hacia la pared del tanque, ocasionando en su recorrido un arrastre al contenido del tanque; este sufre una aceleración y se forma un vórtice natural que se mantiene debido al estabilizador.

Tipo de flujo en el tanque. En el dispositivo se encuentran dos zonas con distinto comportamiento: La zona llamada M en la fig. 2.4 con flujo radial de velocidad V_r . La otra es la llamada R en la misma figura, donde la velocidad del fluido es un punto del tanque, tiene los tres componentes y el tipo de flujo global en el mismo, depende de las variaciones de estos tres componentes de la velocidad, de un punto a otro. El primer componente es radial y actúa en dirección perpendicular a la boquilla; el segundo es axial y actúa en dirección paralela a la

boquilla y el tercero, V_{θ} , es longitudinal, y actúa en dirección tangencial o azimutal en el remolino.

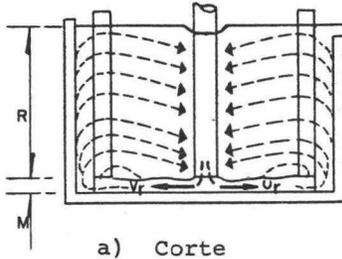


Fig 2.4 Tipo de flujo en el vórtice

Las características más importantes de este fenómeno son:

1. Si se llama r , a la distancia de un punto al eje, se observa que a partir de cierto valor r , llamado $D_0/2$, el remolino se comporta como un vórtice libre, por tanto, V_{θ} es inversamente proporcional a r y su intensidad es $\Gamma = 2\pi r V_{\theta}$

2. La intensidad del vórtice crece al aumentar el gasto Q y disminuye si aumenta: el diámetro interno de la boquilla d , la distancia de la boquilla al piso h y el tirante del fluido H .

3. La velocidad V_r en el fondo es inversamente proporcional a r .

Por la conservación de la energía se deduce que existe transferencia de energía cinética de la zona M a la zona R, lo que da origen a la fuerza centrípeta.

Balance de Momentum.

Para esto dividimos idealmente tres zonas dentro del vórtice (Fig. 2.3)

1. De diámetro d
2. De diámetro D_0
3. De diámetro D

El momentum: en la sección 1 es: $\dot{M}_1 = \rho Q V_{r1}$ --- 2.1

en la sección 3 es: $\dot{M}_3 = \rho Q V_{r3}$ --- 2.2

$$\dot{M}_1 - \dot{M}_3 = \rho Q (V_{r1} - V_{r3}) = \rho Q^2 \left(\frac{1}{A_1} - \frac{1}{A_3} \right) = \frac{\rho Q^2}{\pi h} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) \text{-----} 2.3$$

$$\dot{M}_1 - \dot{M}_3 = (1 - \alpha) \frac{\rho Q^2}{\pi h d} \text{-----} 2.4$$

donde $\alpha = \frac{d}{D}$ ----- 2.5

Entre las secciones 1 y 3, es el lugar donde el fluido sigue un comportamiento de vórtice libre, con una altura H (despreciando h) y su fuerza centrípeta F_c es:

$$F_c = \int_{D_0/2}^{D/2} \rho (2\pi r H) \frac{V_\theta^2}{r} dr = 2\pi \rho H \int_{D_0/2}^{D/2} V_\theta^2 dr \text{-----} 2.6$$

donde

Aceleración centrípeta = V_θ^2/r

Masa del líquido = $\rho (2\pi r H) dr$ entre r y r+dr

$$\text{de } \Gamma = 2\pi r v_{\theta} \quad v_{\theta} = \frac{\Gamma}{2\pi r} \quad \text{-----} \quad 2.7$$

$$F_c = 2\pi\rho H \int_{D_0/2}^{D/2} \frac{\Gamma^2}{(2\pi r)^2} dr = \frac{\rho H \Gamma^2}{2\pi} \int_{D_0/2}^{D/2} \frac{dr}{r^2} \quad \text{-----} \quad 2.8$$

integrando :

$$F_c = \frac{\rho H \Gamma^2}{2\pi} \left[\frac{1}{r} \right]_{D_0/2}^{D/2} = \frac{\rho H \Gamma^2}{2\pi} \left[\frac{2}{D_0} - \frac{2}{D} \right] \quad \text{-----} \quad 2.9$$

$$F_c = \frac{\rho H \Gamma^2}{\pi} \left[\frac{1}{D_0} - \frac{1}{D} \right] = \frac{\rho H \Gamma^2}{\pi D} (\beta - 1) \quad \text{-----} \quad 2.10$$

$$\text{donde } \beta = \frac{D}{D_0} \quad \text{-----} \quad 2.11$$

Para iguales condiciones la razón β se mantiene cons
tante.

Como la fuerza centrípeta se debe a la variación de -
momentum

$$\frac{\dot{M}_1 - \dot{M}_3}{F_c} = \frac{c D Q^2}{hdH \Gamma^2} \quad \text{-----} \quad 2.12$$

$$\text{donde } c = \left(\frac{1-\alpha}{\beta-1} \right) = \text{constante} \quad \text{-----} \quad 2.13$$

La fuerza centrípeta F_c , será proporcional a la variaia
ción de momentum $\dot{M}_1 - \dot{M}_3$ y, por tanto, la razón $\frac{\dot{M}_1 - \dot{M}_3}{c F_c} =$
constante = Eju ----- 2.14

Por lo que

$$Eju = \frac{D Q^2}{hdH \Gamma^2} = \text{constante} \quad \text{-----} \quad 2.15$$

$$Q_2^2 = \frac{Eju \, hdH\Gamma^2}{D} \quad \therefore \quad Q = \sqrt{Eju} \, \sqrt{hd} \, \sqrt{\frac{H}{D}} \, \Gamma \quad \text{-----} \quad 2.16$$

haciendo $\Gamma_0 = \Gamma \sqrt{\frac{H}{D}}$ y $q_0 = \frac{Q}{\sqrt{hd}}$ ----- 2.17

tenemos $q_0 = \sqrt{Eju} \, \Gamma_0$ ----- 2.18

Siendo

q_0 - descarga unitaria modificada

Γ_0 - intensidad unitaria modificada

Graficando q_0 vs Γ_0 se encuentra a $Eju = 0.579$, quedando la ecuación definitiva.

$$\frac{Q}{\sqrt{hd}} = 0.761 \, \Gamma \sqrt{\frac{H}{D}} \quad \text{-----} \quad 2.19$$

Cálculo de la potencia del vórtice.

Toda la energía que existe en el vórtice, se debe a la energía cinética de la alimentación por la boquilla. Por lo anterior, la potencia del vórtice se puede determinar conociendo - la energía cinética de entrada.

La energía cinética de entrada por unidad de masa

$$E_c = \frac{V_r^2}{2g_c} \quad \text{-----} \quad 2.20$$

donde
$$V_{r1} = \frac{Q}{\pi dh} \text{ ----- } 2.21$$

sustituyendo (2.21) en (2.20) ----- 2.22

$$E_c = \frac{1}{2g_c} \left(\frac{Q}{\pi dh} \right)^2$$

Esta ecuación representa la energía cinética en función de Q. Sin embargo, interesa más obtenerla en función de la intensidad

$$\frac{Q}{\sqrt{hd}} = 0.761 \Gamma \sqrt{\frac{H}{D}} \text{ ----- } 2.23$$

$$E_c = \frac{1}{2g_c} \frac{0.579 \Gamma^2}{\pi^2 d^2 h^2} \frac{Hhd}{D} = .02933248 \frac{\Gamma^2 H}{g_c dHD} \text{ --- } 2.24$$

cuyo análisis dimensional es correcto

$$E_c = \frac{(L^2 T^{-1})^2 L}{LMF^{-1} T^{-2} LLL} = FL M^{-1} \text{ ----- } 2.25$$

Esta ecuación es de la energía cinética por unidad de masa y por unidad de tiempo. La potencia será por tanto:

$$P = Q_m E_c \text{ ----- } 2.26$$

donde Q_m es el gasto en masa.

3.- MEZCLADO.

Objetivo. Obtener los datos experimentales para encontrar las expresiones matemáticas que relacionen las condiciones de turbulencia con las de mezcla.

Para esto se realizaron pruebas en que se usó como trazador el NaCl. En la fig. 3.1 se observa la nomenclatura usada.

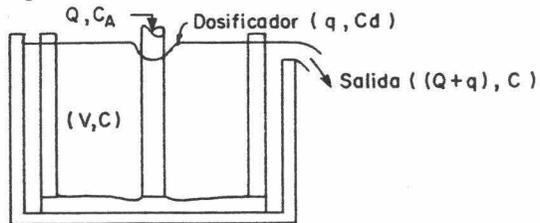


Fig. 3.1 Nomenclatura en mezclado

Procedimiento.

Se alimentó agua al dispositivo, dejando que se estabilizara el gasto, el cual se midió a la salida, después se muestreaba a la salida antes y durante la dosificación de NaCl a intervalos de 30 segundos.

Hipótesis para el balance de materia

I. Existen dos comportamientos en el experimento

- a) No estacionarias: Las condiciones del proceso dependen del tiempo.
- b) Estacionarias: Las condiciones del proceso no dependen del tiempo.

- II. La concentración de salida es igual a la del tanque en un mezclado completo.
- III. La concentración de salida aumenta en las condiciones no estacionarias y alcanza un valor constante cuando llega al régimen estacionario.

Balance de materia.

Se presenta el balance de materia para los dos casos:

Primero. Condiciones estacionarias

$$QC_A + qCd = (Q + q) C_s \quad - - - 3.1$$

$$C_s = \frac{QC_A + qCd}{Q + q} = \text{constante (concentración de salida)}$$

- - - 3.2

Segundo. Condiciones no estacionarias

$$V \frac{dC}{dt} = QC_A + qCd - (Q + q) C \quad - - - 3.3$$

$$C = C_A + C_A X \quad \text{concentración instantánea de salida}$$

- - - 3.4

Condiciones frontera:

Iniciales: $t = 0$, $C = C_A$ $x = 0$

Finales : $t = t$, $C = C$, $x = x$

$$\frac{dC}{dt} = C_A \frac{dx}{dt} \quad - - - 3.5$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{QC_A + qCd - (Q+q)(C_A + C_Ax)}{V C_A} \quad \text{--- 3.6}$$

Integrando de 0 a x y de 0 a t

$$t = \theta \ln \left(\frac{q(Cd - C_A)}{QC_A + qCd - (Q+q)(C_A + C_Ax)} \right), \quad \theta = \frac{V}{Q+q} \quad \text{--- 3.7}$$

En esta ecuación se observa que:

Para $x = 0$, $t = 0$

Para $x = \frac{C_s - C_A}{C_A}$, $t = \alpha$

Lo cual describe un proceso ideal donde teóricamente la concentración va tomando en forma asintótica, valores cercanos a C_s , para diferentes tiempos

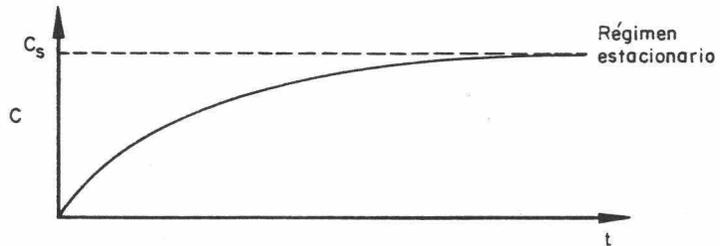


Fig. 3.2 Variación de la concentración con el tiempo.

Para mayor claridad, la ecuación del balance de materia

$$V \frac{dc}{dt} = QC_A + qCd - (Q+q)C$$

la integramos $\int_{C_A}^C \frac{dc}{QC_A + qCd - (Q+q)C} = \int_0^t \frac{dt}{V} \quad \text{--- 3.8}$

integrando de C_A a C y de θ a t

$$C = \frac{QC_A + qCd}{Q+q} - \frac{q(Cd - C_A)}{Q+q} e^{-V\theta}, \quad \theta = \frac{V}{Q+q} \quad - - - 3.9$$

Como teóricamente C_s sólo lo alcanza en un tiempo infinito, se puede considerar que las condiciones estacionarias, en un buen mezclado, se logran para un valor de $C = 0.95 C_s$ y de ésta forma calcular el tiempo teórico en alcanzar el régimen estacionario que se denominará t' .

Experimentalmente, el tiempo real en alcanzar el régimen estacionario puede encontrarse de la siguiente forma:

$$\text{Entrada} \quad QC_A + qCd$$

$$\text{Salida} \quad (Q + q) C$$

$$\text{si} \quad x = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} = \frac{(Q + q) C}{QC_A + qCd} \quad - - - 3.10$$

en régimen estacionario x permanece constante.

De acuerdo con lo anterior, se realizaron las pruebas en las siguientes condiciones:

Q, en lt/seg	H, en cm	h, en cm	D, en cm	d, en cm	V, en lt	Γ , en cm ² /seg	V_{θ} , en cm/seg
32.50	65	5	145	10.16	2663.2	6820.86	14.97343
27.50	63.5	5	145	10.16	2596.0	5839.26	12.81858
22.12	62.0	5	145	10.16	2540.0	4753.37	10.43480
17.00	60.5	5	145	10.16	2464.0	3698.14	8.11831
12.05	59.5	5	145	10.16	2432.0	2741.97	6.01928
7.00	57.0	5	145	10.16	2336.0	1568.82	3.44394

Los resultados obtenidos se presentan en el Apéndice I, haciéndose resaltar la repetición de la experiencia para un gasto de 12.05 lt/seg.

Interpretación de los resultados.

Cálculo de t' teórica y comparación con t' experimental, se observaron los siguientes resultados:

No.de Prueba	Q, en lt/seg	C _A , en mg/lt	q, en lt/seg	C _d , en mg/lt	C _s , en mg/lt	θ, en seg.	t' teórica, min +seg	t' exp en min +seg
1	32.5	63	0.0073	66000	77.807139	81.926213	1'+49.5"	1'+45"
2	27.5	70	0.0075	79500	91.656821	94.374262	2'+26.5"	2'+30"
3	22.12	70	0.0070	80000	95.286302	114.791883	3'+11.6"	3'+15"
4	17.00	70	0.0075	80000	105.247685	144.877260	4'+34.9"	5'+30"
5 y 6	12.05	70	0.0075	65000	110.387725	201.700187	6'+41.3"	8'+00"
7	7	70	0.0110	80000	195.407217	333.190700	14'+10.3"	12'+00"

Esto permite observar que un buen mezclado se obtiene - para intensidades mayores a 4500 cm²/seg. aproximadamente, en este rango se alcanza un valor de 0.95 C_s en un tiempo igual al teóricico, para intensidades menores, el régimen estacionario, se alcanza en un tiempo mayor y existe siempre una acumulación. Debido a lo anterior, el concepto de eficacia E, se introduce para lograr una mejor evaluación de operación a intensidades < 4500 cm²/seg

$$E = \frac{C - C_e}{C_s - C_e} \times 100$$

- - - 3.11

En esta expresión el numerador representa las condiciones reales y el denominador las condiciones ideales de un buen mezclado. Así se calculó la eficacia, obteniendo los siguientes resultados

Prueba No.	1	2	3	4	5	6	7
Eficacia	100	100	100	95	88	88	89

Con el fin de aumentar la eficacia se repitieron estas experiencias, empleando bafles para aumentar la turbulencia, resultando una ventaja sobre otros sistemas de agitación; los bafles -- pueden ser colocados donde se desee, pues no existen elementos mecánicos como hélices o paletas dentro del tanque.

En el diseño de los bafles se buscó que estos presentaran un frente en que las pérdidas de energía cinética fueran mínimas y para esto se hicieron series de tres varillas cilíndricas de una pulgada de diámetro que se colocaron como se muestra en la fig. 3.3.

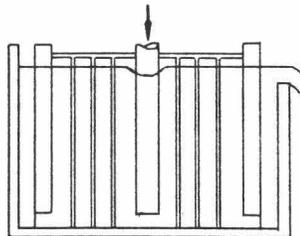


Fig. 3.3 Corte señalando 2 bafles en el vórtice.

Como es lógico, los baffles aumentan la turbulencia, pero disminuyen la intensidad del vórtice, por lo que debe ser encontrado un óptimo. Para esto se debe ensayar con distintos números de baffles y observar la eficacia.

Los resultados se presentan en el Apéndice 1.

Análisis del efecto de los baffles en el mezclado.

Los experimentos realizados con igual gasto poseen - -
igual tiempo de residencia; sin embargo, poseen diferente t' teó-
rico y por esto el primer paso será determinar este parámetro.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Q, en lt/seg	C _A , en mg/seg	q, en lt/seg	C _d , en mg/lt	C _s , en mg/lt	θ, en seg	t' teórico min +seg	t' exp ' + "	No B
12.05	62.5	0.00695	80000	108.578455	201.700187	7'+11.35"	8'+00"	2
12.05	43.7	.0069	71000	84.307396	201.700187	7'+36.89"	7'+30"	3
12.05	49.0	.00675	70000	88.162233	201.700187	7'+20.56"	7'+45"	4
12.05	43.7	0.007	73000	86.156590	201.700187	7'+41"	6'+30"	5
12.05	45	.0064	70000	82.134800	201.700187	7'+24.12"	8+00"	6
22.12	63	.00715	70000	85.598914	114.791883	3'+11.79"	3+00"	2
22.12	43.7	.0069	71000	65.826844	114.791883	3'+38.7"	5+00"	3
22.12	49	.0076	80000	76.460167	114.791883	3'+46.3"	3'+30"	4
22.12	40	0.007	80000	65.295792	114.791883	3'+55.02"	3+30"	5
22.12	47.5	0.00695	65000	67.901360	114.791883	3'+25.85"	3'+30"	6
32.5	54	0.0064	80000	69.740113	81.926212	2'+3.47"	3+30"	2
32.5	44.5	0.0070	73000	60.210109	81.926213	2'+15.35"	4+00"	3
32.5	47.5	0.0064	80000	63.241392	81.926213	2'+11.49"	2'+30"	4
32.5	40	0.007	80000	57.218445	81.926213	2'+27.04"	3+30"	5
32.5	45	0.00652	80000	61.036986	81.926213	2'+15.92"	3'+00"	6

Este análisis comparativo de los resultados con distinto
número de baffles o sin ellos, para un mismo gasto, se puede reali-

zar de mejor manera si se observa el comportamiento de un "factor de forma" de la concentración $\frac{C - C_A}{C_S - C_A}$, con respecto a otro "factor de forma", del tiempo t/t' teórico donde c y t son variables.

Análisis teórico. La función que expresa el factor de forma $\frac{C - C_A}{C_S - C_A}$; en función de t/t' , es exponencial y puede obtenerse de la siguiente forma:

De la ecuación 3.9, sabemos

$$C = \frac{Q C_A + q C_d}{Q + q} - \frac{q (C_d - C_A)}{Q + q} e^{-t/\theta} \quad - - - 3.12$$

restando C_A , se obtiene

$$C - C_A = \frac{Q C_A + q C_d - q (C_d - C_A) e^{-t/\theta} - C_A (Q + q)}{Q + q} \quad - - - 3.13$$

de la ecuación 3.2

$$C_S = \frac{Q C_A + q C_d}{Q + q} \quad - - - 3.14$$

restando C_A , se obtiene

$$C_S - C_A = \frac{Q C_A + q C_d - C_A (Q + q)}{Q + q} \quad - - - 3.15$$

dividiendo 3.13 entre 3.15

$$\frac{C - C_A}{C_S - C_A} = 1 - e^{-t/\theta} \quad - - - 3.16$$

se conoce que: $t' = \theta C$ donde $C = \ln \left(\frac{q (C_d - C_A)}{.05 (Q C_A + q C_d)} \right)$ - - - 3.17

despejando θ y sustituyendo

$$\frac{C - C_A}{C_S - C_A} = 1 - e^{-ct/t'} \quad - - - 3.18$$

Esta ecuación representa un modelo idealizado de la forma

$$y = 1 - e^{-ct/t'} \quad - - - 3.19$$

que se puede expresar como

$$y = b (1 - e^{-ct/t'}) \quad - - - 3.20$$

donde b representa un factor de las condiciones reales del experimento y es el valor que alcanza $\frac{C - C_A}{C_S - C_A}$, en el régimen estacionario. Para su buen mezclado ideal, en el que no existe -- acumulación, $b=1$.

Significado físico de b y c . El factor b representa el grado de mezclado que se alcanza y cuando se trabaja en condiciones estacionarias es el único que posee significación. El factor c representa una constante de velocidad con que se llega al régimen estacionario y solo interesa cuando se desean conocer las condiciones no estacionarias.

Resultados experimentales empleando bafles. De acuerdo al análisis teórico, se pueden encontrar expresiones algebraicas que describan el comportamiento de los experimentos. Las ecuaciones halladas se presentan a continuación:

Q, en lt/seg.	No de Bafles	E c u a c i o n e s
12.05	0	$y = 0.6810 (1 - e^{-1.9902 t/t'})$
12.05	2	$y = 0.836 (1 - e^{-2.1386 t/t'})$
12.05	3	$y = 0.864 (1 - e^{-2.2652 t/t'})$
12.05	4	$y = 1 - e^{-2.1842 t/t'}$
12.05	5	$y = 0.834 (1 - e^{-2.2856 t/t'})$
12.05	6	$y = 0.807 (1 - e^{-2.2019 t/t'})$
22.12	0	$y = 1 - e^{-1.6691 t/t'}$
22.12	2	$y = 0.96 (1 - e^{-1.6707 t/t'})$
22.12	3	$y = 1 - e^{-1.9054 t/t'}$
22.12	4	$y = 1 - e^{-1.9715 t/t'}$
22.12	5	$y = 0.897 (1 - e^{-2.0540 t/t'})$
22.12	6	$y = 0.91 (1 - e^{-1.7932 t/t'})$
32.50	0	$y = 1 - e^{-1.3366 t/t'}$
32.50	2	$y = 1 - e^{-1.3071 t/t'}$
32.50	3	$y = 1 - e^{-1.6521 t/t'}$
32.50	4	$y = 1 - e^{-1.6050 t/t'}$
32.50	5	$y = 1 - e^{-1.7948 t/t'}$
32.50	6	$y = 1 - e^{-1.6391 t/t'}$

En las ecuaciones se demuestra claramente que el número de baffles óptimo en los experimentos es de cuatro. Las condiciones más críticas se tienen en un gasto de 12.05 lt/seg. y con cuatro baffles no existe acumulación. En las fig. 3.4 y 3.5 se muestran gráficamente los resultados.

De acuerdo con los resultados, se logra un buen mezclado para intensidades de $2741 \text{ cm}^2/\text{seg}$. Estableciéndose en este trabajo este valor como el límite a partir del cual se aseguran la existencia de las condiciones turbulentas necesarias y suficientes para el mezclado de dos líquidos miscibles.

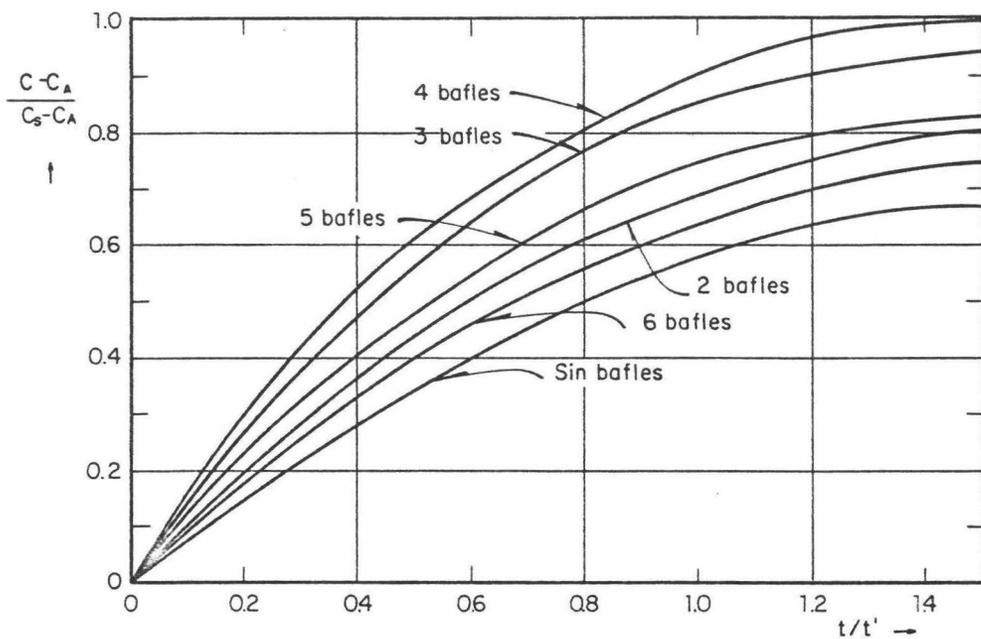


Fig 3.4 Valores de eficacia con respecto al factor de forma del tiempo

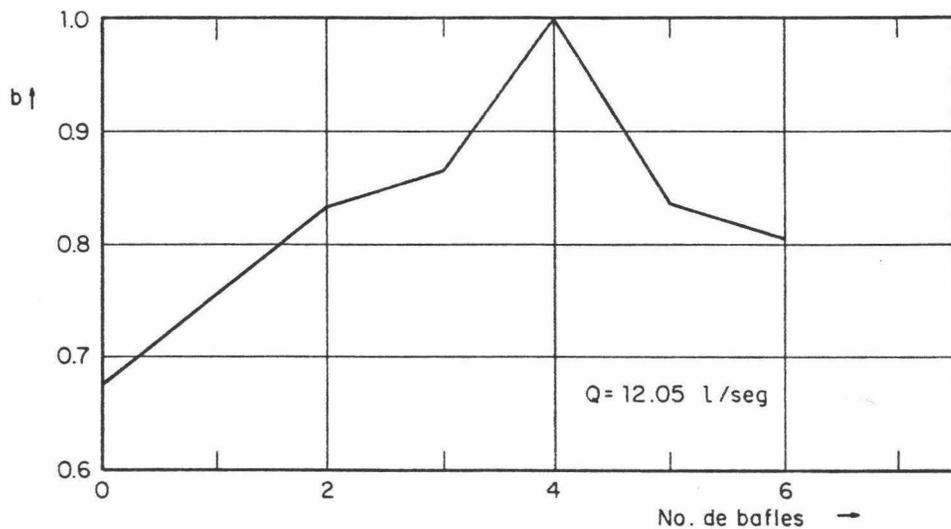


Fig 3.5 Optimización del Número de baffles

4.- TRANSFERENCIA GAS-LIQUIDO.

Los agitadores se emplean también con frecuencia para absorber un gas en un líquido. Esta operación unitaria se puede realizar por medio del vórtice, y sus ventajas y desventajas sobre otros dispositivos dependen de la naturaleza de los componentes, así como de las condiciones que interesen en la operación.

Para estudiar este fenómeno de transferencia de un gas a un líquido se estudió la transferencia del oxígeno del aire al agua a la presión y temperatura ambiente.

Adaptación del dispositivo. Se utilizó el mismo dispositivo empleado en los experimentos de mezclado, haciéndole las siguientes modificaciones en la línea de alimentación:

1. Se construyó un Venturi, con unas perforaciones en el estrechamiento máximo, para inyectarle aire por arrastre con agua.

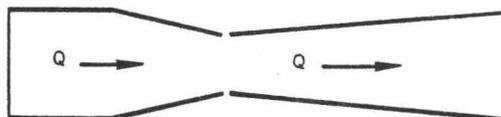


Fig 4.1 Diagrama del Venturi

Este Venturi se colocó entre la alimentación y la boquilla.

2. El agua alimentada se trataba previamente inyectando una solución de Na_2SO_3 y CoCl_2 en la tubería de la alimenta--

ción para agotar el oxígeno disuelto.

3. Se adaptó una salida antes del Venturi que servía - para tomar las muestras y determinar las condiciones del agua en la entrada al proceso.

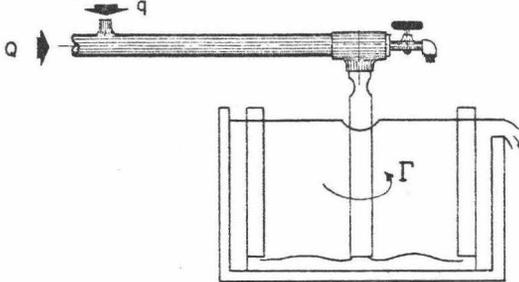
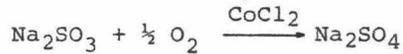


Fig 4.2 Dispositivo para la oxigenación.

El oxígeno disuelto en el agua de alimentación se abate según la reacción:



De acuerdo a la estequiometría, se encuentra que la - relación de Na_2SO_3 es 7.9 veces mayor que el oxígeno disuelto. La concentración de CoCl_2 recomendada para la reacción es de -- 1.5 mg/lt.

Esta reacción se verificó en laboratorio, en la forma siguiente:

Una muestra de agua de concentración de oxígeno disuelto conocida y de volumen conocido, se trató con las cantidades - necesarias de Na_2SO_3 y CoCl_2 para reaccionar con oxígeno disuelto. Se introdujo previamente un polarógrafo en la muestra agitada y,

se encontró que el abatimiento era casi instantáneo, haciendo difícil en la práctica obtener su cinética. Sin embargo, se concluyó que el tiempo de reacción era insignificante.

Experimentación:

Se determinó la cantidad a dosificar de Na_2SO_3 y CoCl_2 en base al gasto de agua en la concentración de oxígeno disuelto, en cada prueba.

Se inyectó en forma continua en la alimentación, la solución de Na_2SO_3 y CoCl_2 por medio de un dosificador, tomándose una muestra antes del Venturi para conocer las condiciones reales de entrada al proceso. Así mismo, se muestreaba en la salida del vórtice en diferentes tiempos asegurándose en obtener los datos en condiciones estacionarias.

Las muestras se tomaban en botella de DBO y se fijaba el oxígeno disuelto en el sitio de muestreo, para determinar más tarde la concentración en el laboratorio. La determinación se realizó empleando el método Winkler modificado, que señalan los métodos estándar para análisis de aguas y aguas de desecho.

A continuación se presentan las condiciones en que se realizaron las pruebas.

No.de Prueba	H, en cm.	h, en cm	D, en cm.	d. en cm.	Q, en cm.	No.de álabes	No.de baffles	ϕ 'del Venturi	q, en ml/seg.
1	56.2	5	145	10.16	20	16	0	7.62	10
2	56.2	5	145	10.16	20	16	2	7.62	10
3	56.2	5	145	10.16	20	16	2	7.62	10
4	56.2	5	145	10.16	20	16	0	7.62	10
5	56.2	5	145	10.16	20	16	0	7.62	10
6	56.2	5	145	10.16	20	16	0	7.62	15.1
7	54.6	5	145	10.16	10.46	16	0	7.62	15.1
8	54.6	5	145	10.16	20	16	0	5.08	15.1
9	54.6	5	145	10.16	10	16	0	5.08	15.0
10	45.8	5	145	10.16	5	16	0	5.08	15
11	46.0	5	145	10.16	6.15	16	0	5.08	15
12	45.0	1.5	145	10.16	5	16	0	5.08	15
13	56.2	1.5	145	10.16	19.01	16	0	5.08	10
14	58.2	1.5	175	10.16	24.37	16	0	7.62	15
15	53.0	1.5	175	10.16	24.37	16	0	7.62	15
16	43	1.5	175	10.16	24.37	16	0	7.62	15
17	73	1.5	175	10.16	24.37	16	0	7.62	15
18	33	1.5	175	10.16	24.37	16	0	7.62	15
19	63	1.5	175	10.16	24.37	16	0	7.62	15
20	63	1.5	175	10.16	24.37	16	0	7.62	15
21	63	1.5	145	10.16	24.37	16	0	7.62	15
22	63	1.5	175	10.16	24.37	16	0	7.62	15
23	63	1.5	175	10.16	24.37	8	0	7.62	15
24	73	1.5	175	10.16	24.37	8	0	7.62	15
25	33	1.5	175	10.16	24.37	8	0	7.62	15
26	43	1.5	175	10.16	24.37	8	0	7.62	15
27	53	1.5	175	10.16	24.37	8	0	7.62	15
28	68	1.5	175	10.16	24.37	8	0	7.62	15
29	58	1.5	175	10.16	24.37	8	0	7.63	15
30	48	1.5	175	10.16	24.37	8	0	7.63	15
31	68	1.5	175	10.16	24.37	16	0	7.63	15
32	58	1.5	175	10.16	24.37	16	0	7.63	15
33	48	1.5	175	10.16	24.37	16	0	7.63	15

En estas condiciones mecánicas del dispositivo se realizaron las pruebas, tomando muestras en la entrada del Venturi y en la salida del tanque para diferentes tiempos, asegurándose de trabajar cuando se habían alcanzado las condiciones de régimen estacionario. Los resultados obtenidos se presentan en el Apéndice 2, donde se da el tiempo en minutos y la concentración en miligramos por litro de oxígeno disuelto.

INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS.

Fundamentos. La transferencia de oxígeno del aire al agua, se puede saber conociendo las condiciones de equilibrio en la interfase y de esa manera la velocidad de transferencia de masa se conoce mediante

$$N = \frac{dc}{dt} = K_L (C^* - C) \text{ - - - - - 4.1}$$

en donde

N = Velocidad de transferencia de masa

C = Concentración de oxígeno en la fase líquida

C* = Concentración de oxígeno en la fase líquida en equilibrio con la fase gaseosa.

K_L = Coeficiente global de transferencia de masa.

a = Area interfacial por unidad de volumen

t = Tiempo.

Estableciendo las condiciones de un reactor de retro mezclado en flujo continuo, la ecuación 4.1 puede integrarse - dentro de los límites siguientes:

$$\int_{C_E}^{C_S} \frac{dc}{C^* - c} = K_L a \int_0^{\theta} dt \text{ - - - - - 4.2}$$

$$\ln \frac{C^* - C_E}{C^* - C_S} = K_L a \theta \quad \therefore K_L a = \frac{1}{\theta} \ln \frac{C^* - C_E}{C^* - C_S} \text{ - - - 4.3}$$

donde

C_E = Concentración de entrada, en tiempo θ .

C_S = Concentración de salida, en tiempo θ .

θ = Tiempo de residencia.

Las condiciones de equilibrio se conocen mediante la ley de Henry, que establece: la solubilidad de un gas en un líquido o temperatura constante es directamente proporcional a la presión del gas sobre el líquido. Se llama constante de la ley de Henry al factor de proporcionalidad H . Su magnitud depende de la naturaleza del gas y del solvente, temperatura y unidades en que se expresa la presión.

Su ecuación es: $N = P/H$ - - - - - 4.4

donde N es la fracción mol de soluto en el solvente, y P es la presión del soluto en fase gaseosa.

Cuando varios gases se disuelven simultáneamente en un solvente, la ecuación 4.4 es válida para cada gas independientemente. Con tal que N sea la fracción mol y P la presión parcial de cada gas. Por tanto, la fracción mol de O_2 disuelto en el agua, se puede calcular en la forma siguiente

$$\bar{P}_{O_2} = P_T (y) \implies N_{O_2} = \bar{P}_{O_2}/H \dots 4.5$$

\bar{P}_{O_2} = Presión parcial del oxígeno en el aire

P_T = Presión atmosférica,

y = Fracción mol de O_2 en el aire (0.21)

Para expresar el oxígeno disuelto en mg/lt:

$$\text{OD mg/lt} = (N) \left(\frac{55.5555 \text{ moles totales}}{\text{litro}} \right) \left(\frac{32000 \text{ mg}}{\text{moles O}_2} \right)$$

$$\text{Las unidades de N son } \left(\frac{\text{moles de O}_2}{\text{moles de totales}} \right)$$

De esta manera puede calcularse el O₂ disuelto de saturación para las condiciones en que se realizarón las pruebas.

que son:

$$T = 18^\circ\text{C}$$

$$P = 586 \text{ mm de Hg}$$

$$y = 0.209$$

la constante de Henry para esta temperatura

$$H = 3.87 \times 10^4 \text{ atmósfera / fracción mol}$$

$$\text{Presión parcial del oxígeno} = \bar{P}_{\text{O}_2} = \frac{0.209 \times 586}{760} = 0.1612$$

Fracción mol de O₂ disuelto en el agua =

$$N = \frac{0.1612}{2.87 \times 10^4} = 4.165 \times 10^{-6}$$

Concentración de O₂ disuelto en mg/lt=

$$(32000) (55.5555) (4.165) = 7.405$$

La determinación de K_La para el proceso se hará de acuerdo a la ecuación

$$K_L a = \frac{1}{\theta} \frac{\ln C - C_E}{C - C_s} \text{ - - - - - 4.6}$$

donde

θ es el tiempo de residencia y se calcula mediante:

$$\theta = \frac{V}{Q} \text{ - - - - - 4.7}$$

V = Volumen del tanque

Q = Gasto volumétrico

El cálculo de $K_{L,a}$ nos dará un factor de forma para realizar una comparación de los resultados obtenidos en diferentes condiciones. Con los valores de oxígeno disuelto obtenidos experimentalmente, que se presentan en el anexo A₂, con los tiempos de residencia para cada prueba y empleando un valor $C_s = 7.4$ - mg/lt de oxígeno, se obtienen los siguientes valores de $K_{L,a}$.

No.de Prueba	Volumen, en lt	θ en seg	$K_L a$
1	2065.912	103.296	1.435553×10^{-3} seg ⁻¹
2	2065.912	103.296	1.880665×10^{-3} seg ⁻¹
3	2065.912	103.296	0.3405047×10^{-3} seg ⁻¹
4	2065.912	103.296	1.773124×10^{-3} seg ⁻¹
5	2065.912	103.296	2.045563×10^{-3} seg ⁻¹
6	2065.912	103.296	1.408818×10^{-3} seg ⁻¹
7	2007.096	191.883	0.7503227×10^{-3} seg ⁻¹
8	2007.096	100.355	1.306602×10^{-3} seg ⁻¹
9	2007.096	200.709	1.029394×10^{-3} seg ⁻¹
10	1683.608	336.722	0.969155×10^{-3} seg ⁻¹
11	1690.960	274.953	0.736648×10^{-3} seg ⁻¹
12	1683.608	336.722	0.433972×10^{-3} seg ⁻¹
13	2065.912	108.675	1.754688×10^{-3} seg ⁻¹
14	2139.432	87.790	1.909762×10^{-3} seg ⁻¹
15	1948.280	79.946	1.275730×10^{-3} seg ⁻¹
16	1580.680	64.862	1.849758×10^{-3} seg ⁻¹
17	2683.480	110.114	1.406741×10^{-3} seg ⁻¹
18	1213.080	49.778	2.709837×10^{-3} seg ⁻¹
19	2315.880	95.030	2.147953×10^{-3} seg ⁻¹
20	2315.880	95.030	1.725739×10^{-3} seg ⁻¹
21	2315.880	95.030	1.782151×10^{-3} seg ⁻¹
22	2315.880	95.030	1.831097×10^{-3} seg ⁻¹
23	2575.44	105.681	1.379583×10^{-3} seg ⁻¹
24	2984.24	122.455	1.190606×10^{-3} seg ⁻¹
25	1349.040	55.357	2.199641×10^{-3} seg ⁻¹
26	1757.840	72.131	1.641459×10^{-3} seg ⁻¹
27	2166.640	88.906	1.981039×10^{-3} seg ⁻¹
28	2779.840	114.068	1.519969×10^{-3} seg ⁻¹
29	2371.040	97.293	1.749983×10^{-3} seg ⁻¹
30	1962.240	80.519	1.250265×10^{-3} seg ⁻¹
31	2499.680	102.572	1.949638×10^{-3} seg ⁻¹
32	2132.080	87.488	2.313303×10^{-3} seg ⁻¹
33	1764.480	72.404	2.176783×10^{-3} seg ⁻¹

5.- TRATAMIENTO BIOLÓGICO CON LODOS ACTIVADOS.

Este experimento se realizó en un pequeño vórtice formado en un recipiente cilíndrico de 30 cm de diámetro y 20 cm de altura, con un estabilizador de 18 cm de altura.

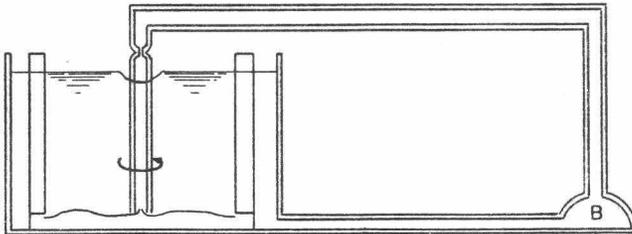


Fig. 5.1 Dispositivo para tratamiento biológico

El dispositivo era un sistema formado por un tanque agitado por un vórtice, con un Venturi en la boquilla y con recirculación completa por medio de una bomba. El agua negra a tratar fue mezclada con Lodos activados de la planta de Chapultepec y se determinaba el consumo de materia orgánica con respecto al tiempo. El oxígeno necesario para este proceso biológico se toma del oxígeno disuelto que por arrastre con el Venturi, se inyecta al sistema.

Esta prueba es una aplicación del fenómeno de oxigenación que se estudió separadamente y se presenta en este trabajo en la -- sección de transferencia gas-líquido, resalta la existencia de una reacción de desaparición de la materia orgánica oxidable, debido a los núcleos de bacterias denominados lodos activados.

Como una medida indirecta de materia orgánica existente se determinó la demanda bioquímica de oxígeno de acuerdo con los métodos estándar para análisis de agua y aguas de desecho.

Con los datos obtenidos experimentalmente, el diseño del tanque podrá hacerse determinando la cinética de reacción, la cual, en estudios experimentales se ha llegado a la conclusión de que puede considerarse de primer orden.

Determinación de DBO última en las muestras

$$r = \frac{-dc}{dt} = kc \text{ - - - - - 5.1}$$

siendo:

$$y = \text{DBO en un tiempo } t$$

$$L = \text{DBO total}$$

La DBO existente será

$$c = L - y \text{ - - - - - 5.2}$$

derivando

$$\frac{dc}{dt} = \frac{-dy}{dt} = \text{ - - - - - 5.3}$$

sustituyendo 5.3 y 5.2 en 5.1

$$\frac{dy}{dt} = K (L-y) \text{ - - - - - 5.4}$$

integrando de cero a y , y , de cero a t , y ordenando

$$y = L(1 - e^{-kt}) \text{ - - - - - 5.5}$$

Donde se debe determinar el valor de L y K en la ecuación, para esto existen varios métodos, considerándose el método

Reed and Theriault como uno de los más aproximados en el ajuste de este tipo de curvas. Consiste en calcular los valores de y para pares de valores de L y K y comparar con los valores de y observados experimentalmente, encontrando los valores de L y K donde la suma del cuadrado de las discrepancias sea mínima.

Para ilustrar lo anterior se presenta un ejemplo:

Suponiendo $K = 0.16$ y $L = 220$ para un experimento dado, la suma del cuadrado de las diferencias es:

Tiempo	Y Observada	Y' Calculada	Y - Y'	(Y-Y') ²
1	82	67.80	14.20	201.64
2	112	114.70	-2.70	7.29
3	153	147.15	5.85	34.22
4	163	169.60	-6.60	43.56
5	176	185.13	-9.13	83.36
6	192	195.88	-3.88	15.05
7	200	203.31	-3.31	10.96

$$S(0, 16, 220) = 396.08$$

Este método, aun cuando es laborioso tiene la ventaja de computarse fácilmente. El rango de valores de K y L , en el cual deban hacerse los tanteos se determina resolviendo por simultáneas la ecuación $y = L(1 - e^{-Kt})$ para parejas de valores de

Y y t obtenidas experimentalmente. En nuestro ejemplo tenemos:

185	190	195	200	205	210	215	220	225	230	L(mg/lt)
6949	5366	4353	3309	2434	1729	1193	826	628	599	0.14
5381	4142	3083	2202	1500	977	634	449	483	677	0.15
4137	3038	2128	1405	870	524	366	396	614	1020	0.16
3159	2195	1428	858	484	307	328	642	855	1565	0.17
2400	1566	937	512	292	276	466	850	1458	2261	0.18
1821	1111	614	329	255	394	746	1307	2081	3058	0.19
1390	800	479	276	342	628	1132	1854	2796	3957	0.20
1084	607	356	329	528	953	1602	2477	3577	4902	0.21

K = Dia⁻¹

Obteniendo un valor mínimo de S cuando L = 205 y K=0.19

Determinando la DBO_u, se encuentra la variación de la -
 DBO_u con respecto al tiempo en que se desarrolla el proceso.

La reacción es de primer orden:

$$- \frac{d DBO_u}{dt} = K DBO_u \text{ ----- 5.6}$$

la DBO_u en un tiempo t es igual a

$$DBO_u = DBO_{u0} (1-x) \text{ ----- 5.7}$$

donde x es la conversión

$$x = \frac{DBO_u}{DBO_{up}} \text{ ----- 5.8}$$

derivando 5.7

$$\frac{d DBO_u}{dt} = -DBO_{u0} \frac{dx}{dt} \text{ ----- 5.9}$$

sustituyendo 5.9 y 5.7 en 5.6

$$\frac{dx}{dt} = K(1-x) \text{ - - - - - 5.10}$$

integrando y tomando límites de 0 a x y 0 a t .

$$\ln \left(\frac{1}{1-x} \right) = Kt \text{ - - - - - 5.11}$$

Así se obtiene el valor de K que es la constante cinética y el proceso es intermitente.

La materia orgánica es oxidable biológicamente, por lo que se escogió la DBO_u como parámetro de diseño. Sin embargo en forma indirecta se puede realizar el estudio cinético determinando la demanda química de oxígeno, que es una medida de la cantidad de materia oxidable total. Esta prueba se realizó siguiendo los métodos estándar para análisis de aguas y aguas de desecho.

La ecuación de primer orden

$$- \frac{d DQO}{dt} = K DQO \text{ - - - - - 5.12}$$

Expresando la ecuación en función de las condiciones iniciales

$$DQO = DQO_0 (1-x) \text{ - - - - - 5.13}$$

derivando

$$\frac{d DQO}{dt} = - DQO_0 \frac{dx}{dt} \text{ - - - - - 5.14}$$

sustituyendo 5.13 y 5.14 en 5.12 y ordenando

$$\frac{dx}{dt} = K(1-x) \text{ - - - - - 5.15}$$

integrando y tomando límites de 0 a x y de 0 a t

$$\ln \frac{1}{1-x} = Kt \quad \text{--- 5 16}$$

donde

$$x = \frac{DQO}{DQO_0} \quad \text{--- 5 17}$$

En este método siempre $x < 1$, ya que toda la materia oxidable químicamente no lo es biológicamente.

Resultados

Los resultados obtenidos logran el objetivo que se persigue, es decir, demuestran la aplicación de este fenómeno en el proceso. En este experimento, el proceso se realizó en forma intermitente para varias concentraciones de lodos activados hasta obtener los mejores resultados, se experimentó con dos tipos de Venturi y con varias intensidades.

Cuando se desee aplicar este proceso, se deberá experimentar con las aguas de desecho a tratar y optimizar las condiciones a nivel piloto y proceder al diseño con los datos obtenidos experimentalmente. En esta aplicación no se optimizó la intensidad por causas circunstanciales.

Se presentan a continuación los valores encontrados de DBO_u en una prueba, señalando las condiciones e ilustrando el cálculo de la constante cinética K, del proceso:

Condiciones

$$Q = 0.36 \text{ lt/seg}$$

$$h = 0.5 \text{ cm}$$

$$\text{Venturi} = 3/8 \text{ pulg}$$

$$\Gamma = 560 \text{ cm}^2/\text{seg}$$

Volumen de agua negra, 15 lt

Volumen de Lodos activados, 1 lt

Procedimiento. - Cuatro horas de aireación tomando muestras cada media hora y con doce horas de sedimentación, realizando la prueba de la DBO_u como se indicó anteriormente.

Resultados

Tiempo en Horas	L, en mg/lt	L-Y, en mg/lt	x_o a	$(\ln(1-x)) t$, en horas	t^2 , en horas ²
0	320	0	0	-	-
0.5	200	120	.375	-0.2350	0.25
1.0	120	200	.625	-0.9808	1.00
1.5	90	230	.7180	-1.9025	2.25
2.0	80	240	.750	-2.7726	4.00
2.5	70	250	.7813	-3.7996	6.25
3.0	30	290	.9063	-7.1014	9.00
3.5	30	290	.9063		
4.0	30	290	.9063		

$$\sum_{i=1}^6 \ln(1-x) t = -16.7919 \text{ h}$$

$$\sum t^2 = 22.75$$

$$K = \frac{-\sum \ln(1-x) t}{\sum t^2} = +0.7381 \text{ h}$$

Donde se ajustó la curva por el método de mínimos cuadrados.

La ecuación a ajustar es:

$$\ln(1-x) = -Kt \quad \text{--- 5.18}$$

haciendo

$$\sum(\ln(1-x) + Kt)^2 = \text{Mínima} \quad \text{--- 5.19}$$

derivando con respecto a K

$$2 \sum [\ln(1-x) + Kt] (+t) = 0 \quad \text{--- 5.20}$$

despejando K

$$K = \frac{-\sum[(\ln(1-x)) t]}{\sum t^2} \quad \text{--- 5.21}$$

que es la expresión aplicada.

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

- 1 APHA, AWWA AND WPCF
Standard Methods for the examination of water and wastewater
13th Edition, 1971
- 2 BIRD, R.B. W.E. STEWARD AND E.N. LIGHTFOOT
Transport Phenomena
Wiley, 1960
- 3 ISAACS W.P. AND GAUDY A.F.
Atmospheric Oxygenation in Simulated Stream
Journal of the Sanitary Engineering Division
No. SA2, abril de 1968, páginas 319-322
- 4 JOHN E. BALL AND MICHAEL J. HUMENICK
High-purity oxygen in biological treatment of municipal wastewater
Journal W.P.C.F., Vol. 44, No. 1, enero de 1972, páginas 65-76
- 5 JOHN M. FAIRALL
Simulated reactor kinetics for closed systems
Journal W.P.C.F., Vol. 44, No. 10, octubre de 1972, páginas 1968-1986
- 6 KEITH L. MURPHE AND BORIS BOYKO
Longitudinal mixing in espiral aeration tanks
Journal of Sanitary Engineering Division
Vol. 96, No. SA2, abril de 1970, páginas 211-221
- 7 LARRY N. HUGHES AND JOHN F. MEISTER
Turbine aeration in activated sludge processes
Journal W.P.C.F., Vol. 44, No. 8, agosto de 1972, páginas 1581-1600

- 8 LEVI ENZO
Investigaciones sobre vórtices de eje vertical
Proceedings, International Association for Hydraulics
Research Third
Latin-American Congress on Hydraulics, Vol. 1, 1968
páginas 74-84
- 9 LEVI ENZO
Momentum Transfer from a jet to a vortex
Proceedings, XIV Congress of International Association for
Hydraulics Research, Vol. 1, 1971, páginas 127-134
- 10 LEVI ENZO
Experiments on unstable vortices
Journal of Engineering Mechanics Division, Proceeding of -
the American Society of Civil Engineering, Junio de 1972,
páginas 539-559
- 11 MARK W. TENNEY AND GERALD J. BUDZIN
How good is your mixing?
Water and wastes Engineering, mayo 1972, páginas 57-59
- 12 MC CABE W.L. AND J.C. SMITH
Unit operations of Chemical Engineering
Mc Graw - Hill, 1956
- 13 M.S. LIU, R.M.R. BRANION AND D.W. DUNCAN
Oxygen transfer to water and to sodium sulfite solutions
Journal W.P.C.F., Vol. 44, No. 1 enero de 1972
páginas 34-46
- 14 PERRY J.H.
Chemical Engineers' Hand Book
Mc Graw - Hill, 1963

- 15 R. C. LANDINE
A note on the solubility of oxygen in water
Water & Sewage Works, Agosto de 1971,
páginas 242-244

- 16 Z. STERBACEK AND P. TAUSK
Mixing in the Chemical Industry
Pergamon Press, 1965.

A P E N D I C E 1 .

Datos del dosificador

$C_d = 66000 \text{ mg/lt}$
 $q_d = 0.0073 \text{ lt/seg}$

Datos de la alimentación

$C_A = 63 \text{ mg/lt}$
 $Q_A = 32.5 \text{ lt/seg}$

Tiempo en,min	Cs, en mg/lt	X	Tiempo en,min	Cs, en mg/lt	X
0	63	0.809694	7.5	82.0	1.053888
0.5	70.0	0.899660	8.0	77.4	0.994467
1.0	73.8	0.948499	8.5	80.0	1.028183
1.5	76.0	0.976774	9.0	80.0	1.028183
2.0	77.4	0.994767	9.5	80.0	1.028183
2.5	80.0	1.028183	10.0	80.0	1.028183
3.0	75.0	0.963922	10.5	77.4	0.994467
3.5	80.0	1.028183	11.0	80.0	1.028183
4.0	77.4	0.994467	11.5	80.0	1.028183
4.5	77.4	0.994467	12.0	82.0	1.053888
5.0	80.0	1.028183	12.5	80.0	1.028188
5.5	80.0	1.028183	13.0	77.4	0.994467
6.0	77.4	0.994467	13.5	80.0	1.028188
6.5	77.4	0.994467	14.0	80.0	1.028188
7.0	82.0	1.053888	14.5	80.0	1.028188

Datos del dosificador

Cd = 79500 mg/lt

qd = 0.0075 lt/seg

Datos de la alimentación

C_A = 70.0 mg/ltQ_A = 27.5 lt/seg

Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X	Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X
0.0	70	0.763718	7.5	87.5	0.954648
0.5	70	0.763718	8.0	87.5	0.954648
1.0	80	0.872821	8.5	90	0.981924
1.5	82.5	0.900097	9.0	90	0.981924
2.0	82.5	0.900097	9.5	87.5	0.954648
2.5	90.0	0.981924	10.0	87.5	0.954648
3.0	90.0	0.981924	10.5	87.5	0.954648
3.5	85.0	0.927372	11.0	87.5	0.954648
4.0	90.0	0.981924	11.5	87.5	0.954648
4.5	90.0	0.981924	12.0	87.5	0.954648
5.0	90.0	0.981924	12.5	90	0.981924
5.5	90.0	0.981924	13.0	90	0.981924
6.0	90.0	0.981924	13.5	90	0.981924
6.5	90.0	0.981924	14.0	90	0.981924
7.0	90.0	0.981924	14.5	90	0.981924

Datos del dosificador

$$C_d = 80\ 000\ \text{mg/lt}$$

$$q_d = 0.0075\ \text{lt/seg}$$

Datos de la alimentacion

$$C_A = 70\ \text{mg/lt}$$

$$Q_A = 17\ \text{lt/seg}$$

Tiempo en min	Cs, en mg/lt	X	Tiempo en min	Cs, en mg/lt	X
0	70	0.665098	7.5	100.0	0.950140
0.5	77.5	0.736358	8.0	100.0	0.950140
1.0	77.5	0.776358	8.5	97.5	0.926386
1.5	82.5	0.783865	9.0	100.0	0.950140
2.0	87.5	0.783865	9.5	100.0	0.950140
2.5	90.0	0.855126	10.0	100.0	0.950140
3.0	90.0	0.855126	10.5	100.0	0.950140
3.5	90.0	0.855126	11.0	100.0	0.950140
4.0	92.5	0.878879	11.5	100.0	0.950140
4.5	95.0	0.902633	12.0	100.0	0.950140
5.0	95.0	0.902633	12.5	100.0	0.950140
5.5	97.5	0.926386	13.0	100.0	0.950140
6.0	97.5	0.926386	13.5	100.0	0.950140
6.5	97.5	0.926386	14.0	100.0	0.950140
7.0	100.0	0.950140	14.5	100.0	0.950140

Datos del dosificador

Cd= 80 000 mg/lt

qd= 0.007 lt/seg

Datos de la alimentación

CA = 70 mg/lt

QA = 22.12 lt/seg

Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X	Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X
0.0	70.0	0.734628	7.5	97.5	1.033232
0.5	77.5	0.813338	8.0	97.5	1.023232
1.0	80.0	0.839575	8.5	97.5	1.023232
1.5	85.0	0.892048	9.0	97.5	1.023232
2.0	85.0	0.892048	9.5	97.5	1.023232
2.5	90.0	0.944522	10.0	97.5	1.023232
3.0	90.0	0.944522	10.5	97.5	1.023232
3.5	97.5	1.023232	11.0	97.5	1.023232
4.0	97.5	1.023232	11.5	97.5	1.023232
4.5	97.5	1.023232	12.0	97.5	1.023232
5.0	95.5	0.996995	12.5	97.5	1.023232
5.5	97.5	1.023232	13.0	95.0	0.996995
6.0	97.5	1.023232	13.5	95.0	0.996995
6.5	97.5	1.023232	14.0	95.0	0.996995
7.0	97.5	1.023232	14.5	95.0	0.996995

Datos del dosificador

$C_d = 65\ 000\ \text{mg/lt}$

$q_d = 0.0075\ \text{lt/seg}$

Datos de la Alimentación

$C_A = 70\ \text{mg/lt}$

$Q_A = 12.05\ \text{lt/seg.}$

Tiempo Cs, en en,min mg/ lte	X	Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X	
0	70	0.634128	7.5	92.5	0.837955
0.5	70	0.634128	8.0	92.5	0.837955
1.0	70	0.634128	8.5	95.0	0.860603
1.5	70	0.634128	9.0	95.0	0.860603
2.0	70	0.634128	9.5	95.0	0.860603
2.5	75	0.679423	10.0	97.5	0.883250
3.0	77.5	0.702071	10.5	95.0	0.860603
3.5	77.5	0.702071	11.0	97.5	0.883250
4.0	85.0	0.770013	11.5	97.5	0.883250
4.5	87.5	0.792661	12.0	95.0	0.860603
5.0	87.5	0.792661	12.5	97.5	0.883250
5.5	90.0	0.815308	13.0	95.0	0.860603
6.0	90.0	0.815308	13.5	97.5	0.883250
6.5	90.0	0.815308	14.0	97.5	0.883250
7.0	92.5	0.837955	14.5	97.5	0.883250

Datos del dosificador

Cd = 65 000 mg/lt

qd = 0.0075 lt/seg

Datos de la Alimentación

C_A = 70.00 mg/ltQ_A = 12.05 lt/seg

Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X	Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X
0	70	0.634128	7.5	92.5	0.837955
0.5	70	0.634128	8.0	95.0	0.860603
1.0	70	0.634128	8.5	95.0	0.860603
1.5	70	0.634128	9.0	95.0	0.860603
2.0	75	0.679423	9.5	97.5	0.883250
2.5	77.5	0.702071	10.0	95.0	0.860603
3.0	77.5	0.702071	10.5	97.5	0.883250
3.5	85.0	0.770013	11.0	97.5	0.883250
4.0	87.5	0.792661	11.5	95.0	0.860603
4.5	87.5	0.792661	12.0	97.5	0.883250
5.0	90.0	0.815308	12.5	95.0	0.860603
5.5	90.0	0.815308	13.0	95.0	0.860603
6.0	90.0	0.815308	13.5	97.5	0.883250
6.5	92.5	0.837955	14.0	97.5	0.883250
7.0	92.5	0.837955	14.5	97.5	0.883250

Datos del dosificador

 $C_d = 80\ 000\ \text{mg/lt}$ $q_d = 0.011\ \text{lt/seg}$

Datos de la alimentación

 $C_A = 70\ \text{mg/lt}$ $Q_A = 7\ \text{lt/seg}$

Tiempo en,min	Cs, en mg/lt	X	Tiempo en,min	Cs, en mg/lt	X
0	70	0.358226	7.5	153	0.782980
0.5	70	0.358226	8.0	150	0.767628
1.0	77.5	0.396608	8.5	155	0.793215
1.5	82.5	0.422195	9.0	175	0.895566
2.0	100.0	0.511752	9.5	160	0.818803
2.5	102.5	0.521987	10.0	168	0.859743
3.0	107.5	0.550133	10.5	152.5	0.780422
3.5	113.0	0.578280	11.0	165	0.844391
4.0	123.0	0.629455	11.5	170	0.869978
4.5	132.0	0.675512	12.0	175	0.895566
5.0	130.0	0.665277	12.5	165	0.844391
5.5	131.0	0.670395	13.0	175	0.895566
6.0	141.5	0.724129	13.5	165	0.844391
6.5	145.0	0.742040	14.0	175	0.895566
7.0	148.0	0.757393	14.5	175	0.895566

Datos del dosificador

$C_d = 80\ 000\ \text{mg/lt}$

$q = 0.00682\ \text{lt/seg}$

Datos de la alimentación

$C_A = 45\ \text{mg/lt}$

$Q = 32.65\ \text{lt/seg}$

Con seis baffles.

Tiempo en, min	C_s , en mg/lt	X	Tiempo en min	C_s , en mg/lt	X
0	45	0.731808	7.5	62.5	1.016400
0.5	48.3	0.785474	8.0	62.5	1.016400
1.0	52.5	0.853776	8.5	62.5	1.016400
1.5	52.5	0.853776	9.0	60.2	0.978996
2.0	48.5	0.788726	9.5	61.4	0.998511
2.5	57.2	0.930209	10.0	62.0	1.008269
3.0	58.1	0.944845	10.5	60.2	0.978996
3.5	59.0	0.959491	11.0	62.5	1.016400
4.0	58.5	0.951350	11.5	62.5	1.016400
4.5	59.8	0.972491	12.0	62.0	1.016400
5.0	57.8	0.939967	12.5	62.5	1.016400
5.5	59.8	0.972491	13.0	60.0	0.975744
6.0	57.5	0.935088	13.5	62.5	1.016400
6.5	59.8	0.972491	14.0	62.5	1.016400
7.0	60.2	0.978996	14.5	52.5	1.016400

Datos del dosificador

$C_d = 65\ 000\ \text{mg/lt}$
 $q = 0.00695\ \text{lt/seg}$

Datos de la alimentación

$C_A = 47.5\ \text{mg/lt}$
 $Q = 22.12\ \text{lt/seg}$

Con seis baffles

Tiempo Cs, en en, min	Cs, en mg/lt	X	Tiempo en min	Cs, en mg/lt	X
0	47.5	0.699544	7.5	63.8	0.939598
0.5	47.5	0.699594	8.0	62.5	0.920453
1.0	50.0	0.736362	8.5	62.5	0.920453
1.5	52.5	0.773180	9.0	62.5	0.920453
2.0	52.5	0.773180	9.5	63.8	0.939598
2.5	55.2	0.812944	10.0	63.8	0.939598
3.0	59.8	0.880689	10.5	63.8	0.939598
3.5	60.0	0.883635	11.0	63.8	0.939598
4.0	62.5	0.920453	11.5	63.8	0.939598
4.5	60.0	0.883633	12.0	62.5	0.920453
5.0	62.5	0.920453	12.5	62.5	0.920453
5.5	62.5	0.920453	13.0	63.8	0.939598
6.0	62.5	0.920453	13.5	63.8	0.939598
6.5	62.5	0.920453	14.0	63.8	0.939598
7.0	63.8	0.939598	14.5	63.8	0.939598

Datos del dosificador

$C_d = 70\ 000\ \text{mg/lt}$
 $q = 0.0064\ \text{lt/seg}$

Datos de la alimentación

$C_A = 45\ \text{mg/lt}$
 $Q = 12.05\ \text{lt/seg}$

Con seis baffles

Tiempo en,min	Cs, en mg/lt	X	Tiempo en,min	Cs, en mg/lt	X
0	45.0	0.547880	7.5	67.5	0.821820
0.5	45.0	0.547880	8.0	70.0	0.852258
1.0	45.0	0.547880	8.5	70.0	0.852258
1.5	49.0	0.596580	9.0	70.2	0.854693
2.0	52.5	0.639193	9.5	72.0	0.876608
2.5	55.0	0.669631	10.0	72.5	0.882695
3.0	57.8	0.703721	10.5	74.8	0.910698
3.5	60.0	0.730506	11.0	74.8	0.910698
4.0	60.0	0.730506	11.5	74.8	0.910698
4.5	62.5	0.760944	12.0	74.8	0.910698
5.0	67.2	0.818167	12.5	74.8	0.910698
5.5	62.5	0.818167	13.0	75.0	0.913133
6.0	66.0	0.803557	13.5	74.8	0.910698
6.5	66.5	0.809645	14.0	75.0	0.913133
7.0	67.5	0.821820	14.5	75.0	0.913133

Datos del dosificador

$C_d = 80\ 000\ \text{mg/lt}$

$q = 0.007\ \text{lt/seg}$

Datos de la alimentación

$C_A = 40\ \text{mg/lt}$

$Q = 37.5\ \text{lt/seg}$

Con cinco baffles

Tiempo en min	Cs, en mg/lt	x	Tiempo en min	Cs, en mg/ lt	x
0	40	0.699075	5.5	56.2	0.982201
0.5	42	0.734029	6.0	57.2	0.999678
1.0	45.5	0.795198	6.5	57.2	0.999678
1.5	48.2	0.842386	7.0	58.2	1.017155
2.0	49.7	0.868601	7.5	58.2	1.017155
2.5	52.0	0.908798	8.0	58.2	1.017155
3.0	52.5	0.917536	8.5	58.2	1.017155
3.5	52.5	0.917536	9.0	58.2	1.017155
4.0	55.0	0.961228	9.5	58.2	1.017155
4.5	55.3	0.966472	10.0	58.2	1.017155
5.0	56.0	0.978705	10.5	58.2	1.017155

Datos del dosificador

$C_d = 80\ 000\ \text{mg/lt}$

$q = 0.007\ \text{lt/seg}$

Datos de la alimentación

$C_A = 40\ \text{mg/lt}$

$Q = 22.12\ \text{lt/seg}$

Con cinco bafles

Tiempo en,min	Cs, en mg/lt	X	Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X
0	40	0.612697	5.5	59.0	0.903580
0.5	40	0.612597	6.0	60.0	0.918895
1.0	47.5	0.727459	6.5	61.0	0.934210
1.5	50.0	0.765746	7.0	60.2	0.921958
2.0	52.5	0.804033	7.5	62.5	0.957183
2.5	54.8	0.839258	8.0	62.5	0.957183
3.0	54.9	0.840789	8.5	62.5	0.957183
3.5	59.0	0.903580	9.0	62.7	0.960246
4.0	56.8	0.869888	9.5	62.7	0.960246
4.5	58.0	0.888266	10.0	62.7	0.960246
5.0	59.0	0.903580	10.5	62.7	0.960246

Datos del dosificador

$C_d = 73\ 000\ \text{mg/lt}$

$q = 0.007\ \text{lt/seg}$

Datos de la alimentación

$C_A = 43.7\ \text{mg/lt}$

$Q = 12.05\ \text{lt/seg}$

Con cinco bafles

Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X	Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X
0	43.7	0.507805	5.5	72.5	0.842468
0.5	43.7	0.507805	6.0	72.0	0.836658
1.0	45.0	0.522911	6.5	75.0	0.871519
1.5	52.5	0.610063	7.0	74.1	0.861061
2.0	57.5	0.668165	7.5	75.0	0.871519
2.5	60.0	0.697215	8.0	75.0	0.871519
3.0	59.7	0.693729	8.5	77.0	0.894759
3.5	62.5	0.726266	9.0	75.0	0.871519
4.0	62.8	0.729752	9.5	77.0	0.871519
4.5	69.1	0.802959	10.0	75.8	0.880815
5.0	68.1	0.791339	10.5	79.1	0.919162

Datos del dosificador

 $C_d = 80\ 000\ \text{mg/lt}$ $q = 0.0064\ \text{lt/seg}$

Datos de la alimentación

 $C_A = 47.5$ $Q = 32.65\ \text{lt/seg}$ Con cuatro baffles

Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X	Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X
0	47.5	0.751450	7.5	63.5	1.005239
0.5	55.0	0.870674	8.0	63.5	1.005239
1.0	60.0	0.949832	8.5	63.5	1.005239
1.5	57.5	0.910255	9.0	63.5	1.005239
2.0	58.8	0.930835	9.5	63.5	1.005239
2.5	60.0	0.949832	10.0	63.8	1.009988
3.0	62.8	0.994157	10.5	63.8	1.009988
3.5	63.5	1.005239	11.0	63.8	1.009988
4.0	62.5	0.989408	11.5	63.8	1.009988
4.5	63.8	1.009988	12.0	63.8	1.009988
5.0	64.8	1.025818	12.5	63.8	1.009988
5.5	65.0	1.028984	13.0	63.5	1.005239
6.0	63.8	1.009988	13.5	63.5	1.005239
6.5	63.8	1.009988	14.0	63.5	1.005239
7.0	63.8	1.009988	14.5	63.8	1.009988

Datos del dosificador

$C_d = 80\ 000\ \text{mg/lt}$
 $q = 0.0076\ \text{lt/seg}$

Datos de la alimentación

$C_A = 49\ \text{mg/lt}$
 $Q = 22.12\ \text{lt/seg}$

Con cuatro baffles

Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X	Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X
0	49	0.640828	7.5	78.1	1.021401
0.5	52.5	0.686601	8.0	78.1	1.021401
1.0	52.5	0.686601	8.5	78.1	1.021401
1.5	58.8	0.768993	9.0	77.3	1.010938
2.0	65.0	0.85007	9.5	77.3	1.010938
2.5	68.8	0.899774	10.0	77.3	1.010938
3.0	71.2	0.921162	10.5	77.3	1.010938
3.5	73.8	0.965165	11.0	77.3	1.010938
4.0	73.0	0.954762	11.5	77.3	1.010938
4.5	76.6	1.001784	12.0	77.3	1.010938
5.0	77.3	1.010938	12.5	77.3	1.010938
5.5	76.2	0.996552	13.0	77.3	1.010938
6.0	77.3	1.010938	13.5	76.6	1.001784
6.5	80.0	1.0462449	14.0	77.3	1.010938
7.0	78.1	1.021401	14.5	77.3	1.010938

Datos del dosificador

 $C_d = 70\ 000\ \text{mg/lt}$ $q = 0.00675\ \text{lt/seg}$

Datos de la alimentación

 $C_A = 49\ \text{mg/lt}$ $Q = 12.05\ \text{lt/seg}$ Con cuatro baffles

Tiempo Cs, en en,min mg/lt	X	Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X	
0	49	0.555794	7.5	82.3	0.933506
0.5	51.2	0.580748	8.0	85.0	0.964132
1.0	57.4	0.651072	8.5	87.5	0.992488
1.5	60.0	0.680564	9.0	87.5	0.992488
2.0	62.2	0.705518	9.5	85.0	0.964132
2.5	65.0	0.737277	10.0	87.5	0.992488
3.0	70.0	0.793991	10.5	88.8	1.007234
3.5	72.0	0.816676	11.0	90.0	1.020845
4.0	73.0	0.828019	11.5	87.5	0.992488
4.5	75.0	0.850704	12.0	90.0	1.020245
5.0	79.5	0.900612	12.5	90.0	1.020245
5.5	80.0	0.907418	13.0	90.0	1.020245
6.0	82.5	0.935775	13.5	90.0	1.020245
6.5	80.0	0.907418	14.0	90.0	1.020245
7.0	81.2	0.921029	14.5	90.0	1.020245

Datos del dosificador

 $C_d = 73\ 000\ \text{mg/lt}$ $q = 0.007\ \text{lt/seg}$

Datos de la alimentación

 $C_A = 44.5\ \text{mg/lt}$ $Q = 32.5\ \text{lt/seg}$ Con tres baffles

Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X	Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X
0	44.5	0.739074	5.5	58.8	0.976580
0.5	47.5	0.788904	6.0	58.0	0.963293
1.0	48.0	0.797208	6.5	58.8	0.976580
1.5	50.2	0.833747	7.0	57.5	0.954983
2.0	53.8	0.893538	7.5	59.1	0.981563
2.5	51.0	0.847034	8.0	59.1	0.981563
3.0	56.2	0.933398	8.5	60.0	0.996510
3.5	55.0	0.913468	9.0	59.1	0.981563
4.0	56.2	0.933398	9.5	60.0	0.996510
4.5	58.0	0.963293	10.0	60.0	0.996510
5.0	58.2	0.966615	10.5	59.1	0.981563

Datos del dosificador

$C_d = 71\ 000\ \text{mg/lt}$

$q = 0.0069\ \text{lt/seg}$

Datos de la alimentación

$C_A = 43.7\ \text{mg/lt}$

$Q = 22.12\ \text{lt/seg}$

Con tres baffles

Tiempo en,min	Cs, en mg/lt	X	Tiempo en,min	Cs, en mg/lt	X
0	43.7	0.663863	6.5	63.4	0.964652
0.5	47.5	0.721590	6.0	65.0	0.987439
1.0	48.7	0.739820	6.5	64.8	0.984401
1.5	51.1	0.776279	7.0	63.8	0.969209
2.0	53.8	0.817296	7.5	65.0	0.987439
2.5	55.0	0.835525	8.0	63.8	0.969209
3.0	56.7	0.861351	8.5	65.0	0.987439
3.5	59.0	0.896291	9.0	65.0	0.987439
4.0	57.7	0.876542	9.5	65.0	0.987439
4.5	58.8	0.893253	10.0	65.0	0.987439
5.0	60.0	0.911482	10.5	65.0	0.987439

Datos del dosificador

$C_d = 71\ 000\ \text{mg/lit}$

$q = 0.0069\ \text{lt/seg}$

Datos de la alimentación

$C_A = 43.7\ \text{mg/lit}$

$Q = 12.05\ \text{lt/seg}$

Con tres baffles

Tiempo en,min	Cs, en mg/lit	x	Tiempo en,min	Cs, en mg/lit	x
0	43.7	0.518342	5.5	75.0	0.889602
0.5	45.2	0.536134	6.0	73.5	0.871810
1.0	48.5	0.575276	6.5	73.7	0.874183
1.5	55.0	0.652375	7.0	75.0	0.889602
2.0	57.5	0.682029	7.5	76.6	0.908581
2.5	58.8	0.697448	8.0	79.5	0.942979
3.0	63.8	0.756755	8.5	77.5	0.919256
3.5	65.0	0.770989	9.0	77.5	0.919256
4.0	67.5	0.800642	9.5	78.8	0.934676
4.5	70.0	0.830296	10.0	78.8	0.934676
5.0	70.0	0.830296	10.5	78.8	0.934676

Datos del dosificador

$C_d = 80\ 000\ \text{mg/lt}$
 $q = 0.0064\ \text{lt/seg}$

Datos de la alimentación

$C_A = 54\ \text{mg/lt}$
 $Q = 32.65\ \text{lt/seg}$

Con dos bafles

Tiempo en,min	Cs, en mg/lt	X	Tiempo en,min	Cs, en mg/lt	X
0	54.0	0.777876	7.5	70.0	1.008358
0.5	56.0	0.806687	8.0	70.0	1.008358
1.0	61.0	0.878712	8.5	70.0	1.008358
1.5	61.5	0.885915	9.0	68.0	0.979548
2.0	62.2	0.895998	9.5	68.0	0.979548
2.5	63.8	0.919046	10.0	68.8	0.991072
3.0	64.1	0.923368	10.5	69.7	1.004037
3.5	66.0	0.950735	11.0	70.0	1.008358
4.0	65.0	0.936333	11.5	70.0	1.008358
4.5	66.4	0.956500	12.0	70.0	1.008358
5.0	65.2	0.939214	12.5	69.7	1.004037
5.5	68.0	0.979548	13.0	68.8	0.991072
6.0	68.8	0.991072	13.5	69.7	1.004037
6.5	68.0	0.979548	14.0	69.7	1.004037
7.0	68.0	0.979548	14.5	69.7	1.004037

Datos del dosificador

 $C_d = 70\ 000\ \text{mg/lt}$ $q = 0.00715\ \text{lt/seg}$

Datos de la alimentación

 $C_A = 63\ \text{mg/lt}$ $Q = 22.12\ \text{lt/seg}$ Con dos baffles

Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X	Tiempo en, min	Cs, en mg/lt	X
0	63	0.735991	7.5	82.5	0.963797
0.5	64.8	0.757019	8.0	82.5	0.963797
1.0	73.2	0.855151	8.5	83.0	0.969638
1.5	73.8	0.862160	9.0	83.0	0.969638
2.0	77.3	0.903049	9.5	83.0	0.969638
2.5	78.2	0.913563	10.0	83.8	0.978984
3.0	81.4	0.950947	10.5	83.8	0.978984
3.5	83.8	0.978984	11.0	83.8	0.978984
4.0	84.8	0.990667	11.5	84.8	0.990667
4.5	87.5	0.963797	12.0	84.8	0.990667
5.0	82.5	0.963797	12.5	84.8	0.990667
5.5	82.5	0.963797	13.0	83.8	0.978984
6.0	83.8	0.978984	13.5	83.8	0.978984
6.5	84.8	0.990667	14.0	83.8	0.978984
7.0	82.5	0.963797	14.5	83.8	0.978984

Datos del dosificador

 $C_d = 80\ 000\ \text{mg/lt}$ $q = .00695\ \text{lt/seg}$

Datos de la alimentación

 $C_A = 62.50\ \text{mg/lt}$ $Q = 12.05\ \text{lt/seg}$ Con dos baffles

Tiempo en,min	Cs, en mg/lt	X	Tiempo en,min	Cs, en mg/lt	X
0	62.5	0.575621	7.5	91.2	0.839946
0.5	64.0	0.589436	8.0	94.0	0.865733
1.0	67.0	0.617065	8.5	95.0	0.874943
1.5	74.5	0.688903	9.0	96.2	0.885995
2.0	75.8	0.679693	9.5	97.0	0.893363
2.5	77.5	0.711928	10.0	97.5	0.897968
3.0	78.8	0.725743	10.5	97.5	0.897968
3.5	83.0	0.764424	11.0	96.2	0.885995
4.0	86.0	0.792054	11.5	97.5	0.897968
4.5	86.7	0.798501	12.0	100	0.920993
5.0	89.0	0.819684	12.5	101	0.930203
5.5	89.0	0.819684	13.0	100	0.920993
6.0	89.0	0.819684	13.5	101	0.930203
6.5	92.7	0.853761	14.0	101	0.930203
7.0	91.2	0.839946	14.5	101	0.930203

APENDICE 2 .

"CONCENTRACION EN PARTES POR MILLON Y TIEMPO EN MINUTOS"PRUEBA 1

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0.0	7.4	---
2.5	1.0	4.0
5.0	0.8	2.6
7.5	1.8	3.0
10.0	1.8	2.8

PRUEBA 2

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0.0	7.4	---
2.5	4.6	6.0
5.0	4.0	5.6
7.5	4.4	5.2
10.0	4.4	5.0

PRUEBA 3

76

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.66	----
5	0.66	1.98
10	0.86	0.86
15	1.9	2.04

PRUEBA 4

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	----
5	1.9	3.8
10	1.4	3.6
15	1.8	3.6
20	1.6	3.4

PRUEBA 5

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	---
5	2.8	4.6
10	2.6	4.4
15	2.4	4.2
20	2.2	4.4
25	2.6	4.4

PRUEBA 6

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	---
1.28	1.6	2.8
6.28	1.8	3.6
11.28	1.6	3.2
16.28	1.6	3.4
21.28	1.6	3.4

PRUEBA 7

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	7.4
3	1.8	3.2
8	0.8	2.6
13	1.0	2.8
18	0.8	2.8
23	0.8	2.8

PRUEBA 8

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	7.4
1'52"	0.4	2.0
6'52"	0.6	2.6
11'52"	0.2	2.6
16'52"	0.2	2.6
20'52"	0.6	2.8

PRUEBA 9

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	7.4
5	0.6	3.8
10	0.4	3.0
15	0.6	3.0
20	0.0	2.4

PRUEBA 10

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.6	7.6
5	2.2	5.6
10	2.0	4.2
15	2.2	6.0
20	2.0	3.8

PRUEBA 11

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	7.4
4'30"	1.8	4.2
9'30"	2.0	4.0
14'30"	2.0	3.8
19'30"	1.8	3.8

PRUEBA 12

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	7.4
4'34"	3.0	4.2
9'34"	2.0	3.8
14'34"	2.2	3.6
19'34"	2.0	3.8
21'19"	2.6	3.6

PRUEBA 13

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	7.6
5	2.6	4.4
10	2.6	4.4
15	3.0	4.6
20	2.4	4.0
22.5	2.2	4.0

PRUEBA 14

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	7.4
1'40"	1.0	3.2
6'40"	1.8	3.2
11.40"	1.2	3.4
16'40"	1.2	3.2
19'40"	1.2	3.2



PRUEBA 15

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	7.4
5	3.4	3.6
10	3.0	4.2
15	3.0	4.0
20	3.0	4.2

PRUEBA 16

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	7.4
5	2.0	3.0
10	2.4	3.6
15	2.4	3.8
20	2.5	3.8

PRUEBA 17

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	7.4
5	3.4	5.0
10	3.6	4.6
15	3.2	4.4
20	3.4	4.4

PRUEBA 18

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	7.4
5	2.4	3.6
10	2.0	3.6
15	2.4	3.8
20	2.2	3.5

PRUEBA 19

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	---
5	0.0	2.6
10	0.4	3.0
15	0.8	3.4
20	1.2	3.6

PRUEBA 20

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	---
3	0.4	2.8
6	0.0	2.4
9	0.2	2.4

PRUEBA 21

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	---
3	0.8	3.2
6	1.2	3.0
9	1.0	3.0

PRUEBA 22

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	---
3	0.6	3.2
6	0.4	2.6
9	0.6	2.6

PRUEBA 23

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	---
3	0.6	3.4
6	0.6	3.0
9	0.6	2.8

PRUEBA 24

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	---
3	0.6	3.2
6	1.0	2.6
9	1.0	2.4

PRUEBA 25

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	---
3	1.2	2.6
6	1.4	3.0
9	1.6	3.0

PRUEBA 26

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	---
3	1.4	3.2
6	1.6	2.8
9	1.6	2.8

PRUEBA 27

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	---
3	1.2	3.4
6	1.2	3.2
9	1.2	3.2

PRUEBA 28

0	7.4	---
3	2.2	4.6
6	2.6	3.8
9	2.8	4.0

PRUEBA 29

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	---
3	0.0	2.4
6	0.0	2.4
9	0.0	2.5

PRUEBA 30

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	---
3	1.4	3.6
6	1.8	2.4
9	1.6	2.4

PRUEBA 31

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	---	---
3	0.6	3.6
6	0.4	3.0
9	0.6	2.6

PRUEBA 32

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	---	---
3	0.6	3.2
6	0.8	3.4
9	0.4	2.8

PRUEBA 33

Tiempo	C. de entrada	C. de salida
0	7.4	---
3	2.8	4.4
6	2.8	4.2
9	2.8	4.0