

870118

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE GUADALAJARA

INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA DE CIENCIAS QUIMICAS



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

COMPARACION DE LA CONCENTRACION OBTENIDA
EN LA FASE LIQUIDA EN UNA TORRE DE ABSORCION
EMPAQUADA A DOS CONDICIONES DE ALIMENTACION GASEOSA

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A

MARINA NAVARRO NAVARRO

ASESOR: I. Q. ZEFERINO RAMIREZ BECERRA

GUADALAJARA, JALISCO. 1988



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Contenido

INTRODUCCION	I
NOVENCLATURA	II
CAPITULO I TORRE DE ASORACION	
1.1 Torres empacadas	1
1.2 Tipos de empaques	9
CAPITULO II DESCRIPCION DEL EQUIPO	
2.1 Torre de relleno	11
2.2 Equipo auxiliar	14
CAPITULO III PARTE EXPERIMENTAL	
3.1 Calibración de manómetros ...	17
3.2 Rutina de trabajo de la torre de relleno	17
3.3 Rangos de trabajo	18
3.3.1 Rango de trabajo para - el gas	16
3.3.2 Rango de trabajo para - la inyección	19
3.3.3 Rango de trabajo para - el líquido	20
3.4 Muestreo	21

CAPÍTULO IV	CÁLCULOS Y RESULTADOS	
4.1	Corridos	22
4.2	Cálculo de la concentración de CO_2	26
4.3	Cálculo de K_H	29
4.4	Cálculo estadístico	32
4.4.1	Pruebas estadísticas - para la concentración de CO_2	32
4.4.2	Pruebas estadísticas - para el K_H	35
CAPÍTULO V	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	
5.1	Resultados de la concentra- ción de CO_2	36
5.2	Resultados del K_H	36
5.3	Resultados del análisis esta- dístico	36
RESUMEN	.....	42
CONCLUSIONES	.....	43
BIBLIOGRAFÍA	.....	45
APÉNDICE		
A).	Calibración de manómetros	47
B).	Rutina de trabajo	52
C).	Tabla de constantes de la ley de -- Henry para el CO_2	54
D).	Descripción del método estadístico.	55

INTRODUCCIÓN

Introducción.

Para la operación de absorción se utilizan las torres de absorción empacadas que tienen el fin de hacer pasar o eliminar algún soluto que se encuentra en la fase gaseosa transfiriéndose a una fase líquida en la que sea soluble.

En esta tesis se hizo un estudio comparativo de la concentración en la fase líquida de CO_2 que se obtuvo en una torre de absorción empacada experimental a dos condiciones de alimento gaseoso, para decir en las condiciones se obtenía una mayor absorción del CO_2 , así como un análisis de todos los factores que se han de tomar en cuenta.

Se realizó un estudio preliminar que reportó una gran información acerca del trabajo de la torre y de las condiciones en las que se puede obtener una mayor absorción.

Los factores importantes deben ser considerados: el económico y el de absorción máxima. En ocasiones es necesario decidir por uno de ellos teniendo que sacrificar el otro.

Además, los datos obtenidos de concentración de CO_2 en fase líquida y del coeficiente de transmisión de masa se probaron estadísticamente para observar las diferencias significativas de cada condición de alimento gaseoso.

NOBENCLAFURA

Nomenclatura

dz	Altura diferencial de la torre
h	Altura de los cilindrados del empaque en m
y	Componente más volátil de la fase gaseosa, fracción molar
x	Componente más volátil de la fase líquida, fracción molar
K_L	Coefficiente global de transferencia de masa en fase líquida en kmol/h m^2 (kmol/m^3)
C_2	Concentración de CO_2 en el agua a la salida de la columna
C_1	Concentración de CO_2 en el agua a la entrada de la columna
C^*	Concentración de CO_2 en el equilibrio
C_B	Concentración de solución
H	Constante de Henry en atm/fracción molar
I	Inundación en %
ΔP	Diferencia de presión en cm
ρ_m	Densidad molar en kmol/m^3
d_p	Diámetro de cada pieza del empaque en m
D	Diámetro de la torre en m
L	Gasto molar del flujo en la fase líquida en kmol/h
G	Gasto molar del flujo de la fase gaseosa en l/h
N	Normalidad de la solución de NaOH usada en la titulación

- N_c Número de cilindros dentro de la torre
 r Radio de los cilindros
 A Superficie de absorción total de los cilindros en m^2
 V_2 Volumen de la solución de dióxido de carbono en m^3
 V_1 Volumen usado en la titulación de NaOH en m^3

PRUEBAS ESTADÍSTICAS

- x_1 Alimento gaseoso de 7
 y_1 Alimento gaseoso de 5
 Y Concentración de CO_2
 F Estadístico (paramétrico)
 T Estadístico (no paramétrico)
 λ_1 Flujo de alimento líquido
 λ_2 Flujo de alimento gaseoso
 α Nivel de significancia
 SCA Suma de cuadrados del alimento líquido
 SCB Suma de cuadrados del alimento gaseoso
 SCE Suma de cuadrados del error
 SCt Suma de cuadrados del total

CAPÍTULO I
TORRE DE ABSORCIÓN

1.1 Torres empacadas

La absorción de gases es una operación unitaria en la cual se disuelven en un líquido uno o más componentes solubles de una mezcla de gases.

El equipo utilizado para los contactos directos -- entre una mezcla de gases y un líquido puede ser una -- torre llena con material sólido empacado, una torre vacía a cuyo interior se rocía el líquido y por la que -- fluye el gas, o una torre que contiene cierto número de platos del tipo de cascadas de burbujeo, tamiz o válvula.

Las torres empacadas se emplean para un contacto -- continuo de la fase líquida con la fase gaseosa trabajando con un flujo a contracorriente como a corriente -- paralela.

Son columnas verticales llenas de un material adecuado para obtener una gran superficie de contacto, al cual se le llama empaque.

La columna en sí, no es otra cosa que un recipiente cilíndrico como un pedazo de tubo; el material adecuado para su construcción depende de los productos -- químicos que se van a procesar.

El cuerpo de la torre puede ser de madera, metal, porcelana química, ladrillo a prueba de ácidos, vidrio, plástico, metal cubierto de plástico o vidrio, u otro material, según las condiciones de corrosión.

Las piezas de relleno no deben ser mayores que la

octava parte del diámetro de la torre, para obtener una densidad plena de compactación.

El soporte de compactación:

a) Debe ser una rejilla abierta de barras, para evitar inundaciones, así como, el aumento de la presión del líquido que baja por la columna, la cual causa que el gas no ascienda por la torre, saliendo junto con el agua, provocando un burbujeo indeseable.

b) Es muy necesario cuando la velocidad del gas es elevada, para evitar el levantamiento del empaque durante un aumento repentino del gas.

c) Asegura un espacio abierto en el fondo de la torre, para así tener una buena distribución del gas en el empaque.

d) Debe tener un área libre suficientemente amplia para permitir el flujo del líquido y del gas con un mínimo de restricción.

e) Debe ser lo suficientemente fuerte para sostener el peso de una altura razonable del empaque.

f) Para su construcción se pueden utilizar varios materiales inclusive en metales, metales expandidos, cerámica y plásticos.

En general, se trabaja con estos equipos en contracorriente, es decir, las corrientes de gas y líquido fluyen en sentido contrario una de la otra.

En contracorriente se puede obtener un mayor gradiente de concentración y, por lo tanto, la rapidez de

absorción es más alta.

Se distinguen dos fases L y G, la fase L se refiere al líquido y la G es un gas o un vapor.

La fase L entra por la parte superior de la torre, como se muestra en la figura 1.1.1, y se distribuye sobre la superficie del empaque por medio de un distribuidor, el líquido fluirá hacia abajo a través del empaque siguiendo caminos tortuosos, exponiéndose por tanto, a una gran área superficial para contactar la fase G que sube; esta entrará por el fondo de la torre y subirá -- siguiendo también senderos tortuosos.

Existe un extraordinario número de variables que influyen en la extracción, algunos de ellos son:

Tamaño, forma y material del empaque

Diámetro de la torre

Profundidad del relleno

Diseño del distribuidor de la fase dispersa
el líquido que se dispersa.

Ventajas importantes de las torres empacadas en --
comparación con las torres de platos:

- 1.- Operaciones al vacío, la caída de presión de una torre empacada se puede diseñar con frecuencia para un nivel más bajo que en el caso de una torre de platos, y obtener de todos modos, un contacto adecuado entre el vapor y el líquido.

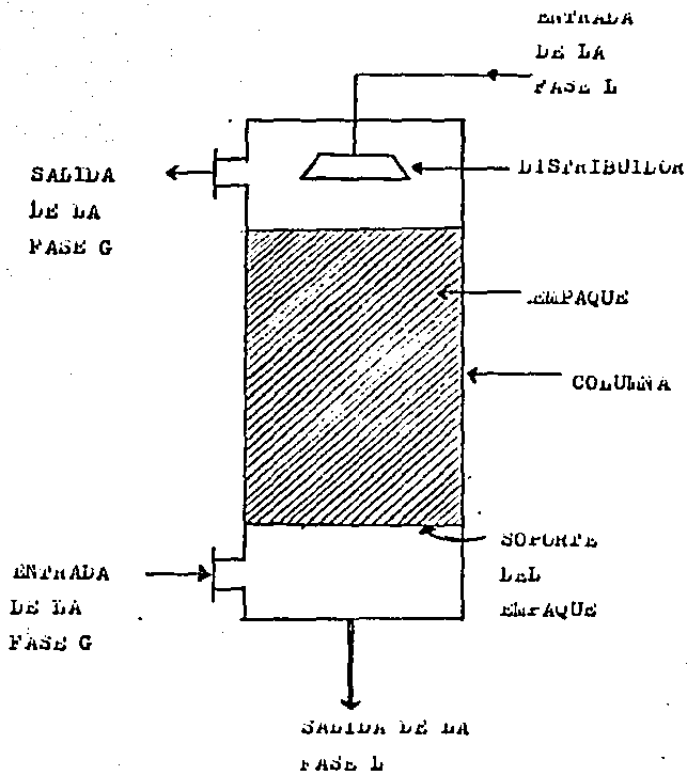


Fig. 1.1.1 COMPONENTES DE UNA TORRE EMPACADA

- 2.- Los líquidos espumantes se pueden manejar con frecuencia en forma más satisfactoria.
- 3.- La retención de líquido suele ser menor, por lo que se pueden manejar mejor materiales sensibles al calor.
- 4.- La construcción es más sencilla y barata cuando el sistema de absorción es corrosivo para los materiales de construcción normales.
- 5.- Para columnas pequeñas estas serán más económicas.

El balance de materia en este equipo se realiza -- refiriéndonos a la fig. 1.1.2 con la siguiente nomenclatura.

G = gasto molar del flujo de la fase G, kg moles/h

L = gasto molar del flujo de la fase L, kg moles/h

y = componente más volátil en la fase G, fracción molar

x = componente más volátil en la fase L, fracción molar

dz = altura diferencial de la torre, m

Subíndice 1 = número de la torre

Subíndice 2 = fondo de la torre

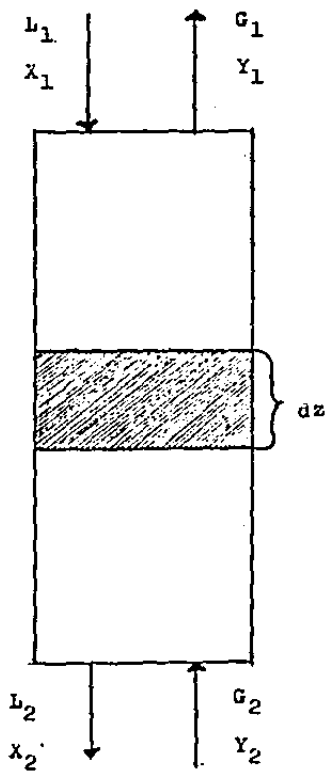


Fig. 1.1.2 BALANCE DE MATERIA

* La ecuación resultante será:

$$L = \frac{L_S}{(1 - x)} \quad (1.1.1)$$

$$G = \frac{G_S}{(1 - y)} \quad (1.1.2)$$

La ecuación de la transferencia de masa local --- entre dos fases será:

$$\frac{y_{A,G} - y_{A,i}}{x_{A,L} - x_{A,i}} = \frac{K_x}{K_y} \quad (1.1.3)$$

Las ecuaciones, para los coeficientes globales para la fase líquida (K_L) y la fase gaseosa (K_G) son:

$$K_L = \frac{L}{A \cdot C_m} \ln \left[\frac{C^x}{(C^x - C_2)} \right] \quad (1.1.4)$$

$$K_G = \frac{G}{A P} \ln \left[\frac{(C^* - C_1)}{(C^* - C_2)} \right] \quad (1.1.5)$$

* La deducción de las ecuaciones se refieren en la bibliografía V.

1.2 Tipos de empaques

Han sido utilizados muchos tipos de materiales de empaques, que van desde sólidos muy fáciles de adquirir como; piedras, botellas rotas, trozos de porcelana; hasta formas geométricas complejas y caras.

El empaque debe ofrecer las siguientes características:

- 1.- Superficie interfacial grande entre el líquido y el gas.
- 2.- Tener un gran volumen vacío, para permitir -- grandes volúmenes de fluido a través de pequeñas secciones transversales de la torre.
- 3.- Debe ser baja la caída de presión del gas.
- 4.- Resistencia a la corrosión.
- 5.- Químicamente inerte con respecto a los flujos que se están procesando.
- 6.- Tener una baja densidad a granel.
- 7.- Ser estructuralmente fuerte para permitir fácil manejo e instalación.
- 8.- Tener bajo precio.

El espesor de la pared es un factor importante, -- porque a medida que éste adelgaza, la resistencia mecánica disminuye.

Un espesor mayor dará como resultado un aumento -- en la caída de presión, un espacio libre menor, y un -- área reducida de superficie.

Los empaques son principalmente de dos tipos, al azar y regulares.

Los empaques al azar son aquellos que simplemente se arrojan en la torre durante la instalación y que se dejan caer en forma aleatoria. Los empaques regulares ofrecen las ventajas de una menor caída de presión para el gas y un flujo mayor; su instalación es más costosa que una de empaques aleatorios (azar).

En empaques al azar la consiudad del empaque es generalmente menor en la vecindad inmediata de las paredes de la torre, por esta causa, el líquido tiende a segregarse hacia las paredes y el gas a fluir en el centro de la torre.

Esta tenuencia disminuirá si la relación de diámetro de empaque a diámetro de torre se encuentra entre los límites de $1/8$ y $1/15$.

La inundación en los empaques al azar depende del acomodo del empaque. Generalmente, las velocidades de inundación para los empaques regulares serán considerablemente mayor.

CAPÍTULO II
DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

2.1 torre de relleno

El cuerpo de la torre es un tubo de vidrio con una longitud de 1.27m y su diámetro es de 5.08cm, los extremos de la torre están sellados con tapones, en donde se encuentran instalados los tubos de entrada y salida del gas y líquido (como se muestra en la fig. 2.1.1).

La torre trabaja a contracorriente, por la parte superior entra el líquido y sale el gas y por la inferior entra el gas y sale el líquido.

La entrada del líquido se hace por medio de un distribuidor del líquido, que es una pequeña regadera de plástico unida al tubo de entrada del líquido (fig. 2.1.1).

La entrada del gas se hace por la parte inferior de la torre mediante un distribuidor del gas, que es una campana de plástico (fig. 2.1.1) orada uniformemente en su parte superior para la distribución regular del gas entrante.

El empaque está constituido por pequeños cilindros plásticos de 0.6cm de diámetro, 1cm de longitud y 0.1cm de espesor de pared, que ofrece resistencia al aplastamiento por el peso del empaque y la presión, así como, impide su movimiento a la entrada del gas por el empaque.

El empaque se encuentra dentro de los límites permisibles

$$\frac{1}{15} < \frac{dp}{D} < \frac{1}{8}$$

$$\frac{1}{15} < \frac{0.6}{5.08} < \frac{1}{8}$$

$$\frac{1}{15} < 0.1181 < \frac{1}{8}$$

$$\frac{1}{15} < \frac{1}{8.4} < \frac{1}{8}$$

El empaque se encuentra sostenido en su parte inferior por una malla de alambre circular, la cual, permite el libre acceso tanto del gas como del líquido, además, de ser lo suficientemente fuerte para contener el peso del empaque.

En su parte superior se sostiene por una placa de plástico ranurada, que impide el movimiento del relleno y la redistribución del líquido entrante.

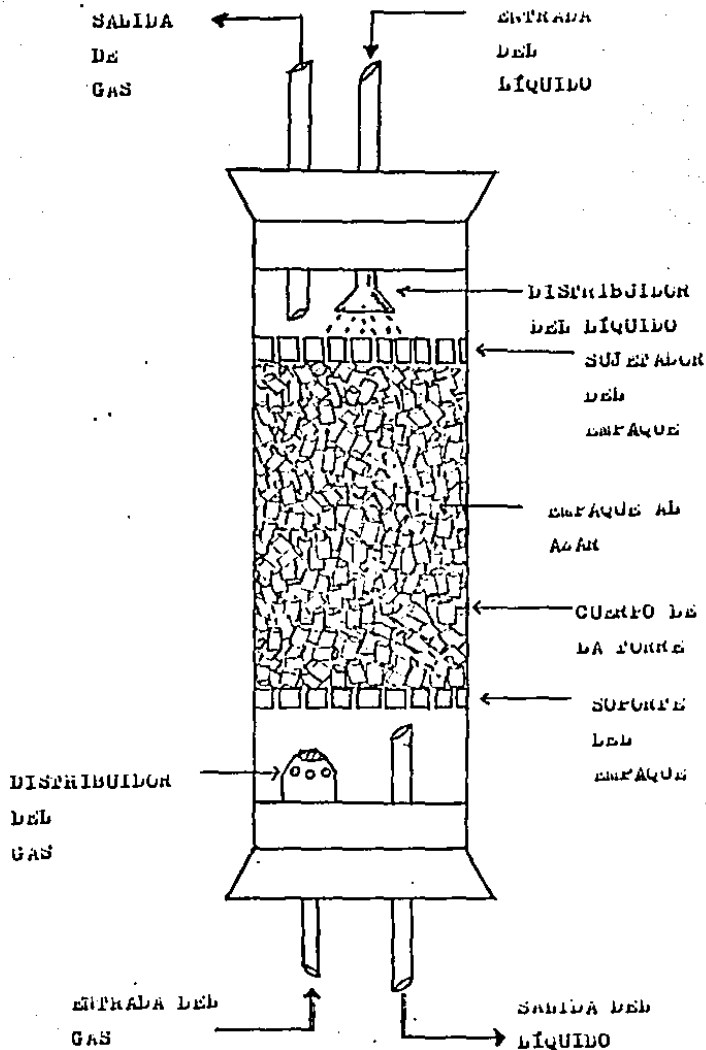


Fig. 2.1.1 FONTE EMPACADA

2.2 Equipo auxiliar

El equipo auxiliar se encuentra dividido en dos partes (fig. 2.2.1)

a) para el alimento líquido.

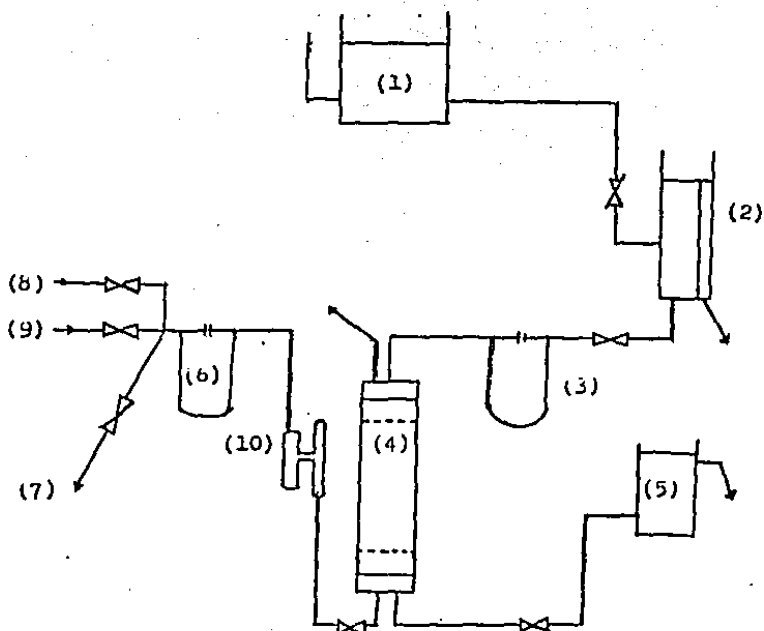
El tanque de alimentación, 1, es el que provee de líquido al dosificador de flujo, 2, que mantiene constante la alimentación manteniendo el caudal y la presión en un punto definido, el dosificador consiste en un recipiente de vidrio con un tubo a nivel constante que permite que cualquier exceso del líquido se elimine.

El líquido pasa a un manómetro de orificio, 3, que contiene tetracloruro de carbono coloreado con Iodo, el cual indica una diferencia de alturas con la que se puede calcular el caudal empleado, de ahí pasa a la torre de relleno, por la parte superior. Después de haber pasado por la torre, sale por la parte inferior de la misma, pasando al controlador de inundación, 5, el cual como su nombre lo indica controla la inundación de dicha torre en su nivel inferior permisible (50% de inundación), haciendo que ésta trabaje en las mejores condiciones. Además, nos proporciona un tapón hidráulico para evitar la salida del gas por la salida del líquido, ya que el gas al encontrar más presión en esta salida, se irá por el relleno, en el que la presión será menor y la podrá romper más fácilmente.

b) Para el alimento gaseoso.

Para el alimento gaseoso se usa una compresora, 3, que provee de aire, y el CO_2 se encuentra en un tanque a presión, 8, ambos se unen por medio de una tubería de vidrio en forma de "Y" que sirve como mezclador pasando a un manómetro de orificio, 6, que contiene tetracloruro de carbono coloreado con Iodo, el que por medio de una diferencia de altura nos dará información sobre la cantidad de alimento gaseoso (aire - CO_2) utilizado.

Después pasa a una trampa de flujo de gas, 10, la cual, es de vidrio en forma de "U" que nos ayuda a evitar la presión sobre el manómetro que se crea cuando el gas entra al empaque, además que en un aumento de flujo de gas no permita que el tetracloruro contamine la torre quedándose atrapado en ella, o en caso contrario, de disminución de presión evite que el agua llegue al manómetro dando tiempo para controlarlo. De la trampa pasa a la torre por la parte inferior pasando el gas por el empaque y saliendo por la parte superior de la torre.



- (1) TANQUE DE ALIMENTACIÓN
 (2) DOSIFICADOR DE FLUJO
 (3) MANÓMETRO DE ORIFICIO PARA FLUJO DE LÍQUIDO
 (4) PUMPE DE REBENDEO
 (5) CONTROLADOR DE INUNDACIÓN
 (6) MANÓMETRO DE ORIFICIO PARA FLUJO DE GAS
 (7) DESFOGUE
 (8) TANQUE DE CO₂
 (9) COMPRESORA
 (10) RESTRICTOR PARA EL FLUJO DE GAS

Fig. 2.2.1 DIAGRAMA DEL EQUIPO EMPLEADO

CAPÍTULO III
PARTI EXPERIMENTAL

3.1 Calibración de manómetros

Se calibraron los manómetros del gas y del líquido (ver apéndice A), dando como resultado las siguientes ecuaciones para el flujo de cada uno:
para el líquido

$$L = 17.6829 (\Delta P)^{0.5574} \quad (3.1.1)$$

para el gas

$$G = 126.24 (\Delta P)^{0.6211} \quad (3.1.2)$$

en donde:

L = flujo de líquido en kg/h

G = flujo de gas en l/h

ΔP = diferencia de presión en cm

3.2 Rutina de trabajo de la torre de relleno

Para iniciar a trabajar se debe poner a trabajar a la compresora (ver apéndice B) y esperar a que se cargue y revisar que todas las conexiones se encuentren en perfecto estado.

Cargada la compresora, se dispondrá a iniciar el trabajo regulando la entrada de CO_2 en el manómetro; -- se sigue con la regulación del aire, cuidando que el -- manómetro marque correctamente el rango de alimentación

gaseosa (aire + CO_2) seleccionada.

Después se introduce el alimento líquido y para esto se regula la presión en el manómetro. Se deja trabajar hasta que la inyección se mantenga constante y el trabajo de la torre se normalice; luego de 5 min, se comenzará a tomar las muestras.

3.3 Rangos de trabajo

3.3.1 Rango de trabajo para el gas

Para elegir el rango para el gas, intervino tanto la capacidad de la torre, como la del tanque de CO_2 , además el factor de economía. Después de analizar estos aspectos se optó por trabajar con dos rangos que son:

$$\Delta P_{\text{CO}_2} + \Delta P_{\text{aire}} = \Delta P_{\text{gas}}$$

ΔP_{CO_2}	ΔP_{aire}	ΔP_{gas}	G
1	4	5	343.026
2	5	7	422.750

3.3.2 Rango de trabajo para la inundación

Para la inundación se tomó un rango de:

50% < inundación < 80%

ya que es el rango en el que la torre de relleno trabaja con mayor efectividad para la absorción del gas en el líquido (propiamente dicho absorción del CO_2 en agua).

3.3.3 Rango de trabajo para el líquido

Para el rango de trabajo del líquido se tomó en cuenta la inundación:

ΔP_{gas}	$\Delta P_{\text{líquido}}$	Inundación
5	1	56%
	2	62%
	3	65%
	4	68%
	5	72%
	6	74%
	7	78%
7	1	59%
	2	63%
	3	66%
	4	71%
	5	73%
	6	77%
	7	Fuera de rango > 80%

Los resultados se tratarán por pruebas estadísticas por lo que tienen que darse por pares, desechándose la prueba para un $\Delta P_{\text{líquido}} = 7$

El rango queda definido entre:

$$1 \leq \Delta P_{\text{líquido}} \leq 6$$

$$17.6829 \text{ kg/h} \leq L \leq 48.0 \text{ kg/h}$$

* Cada par viene dado por la concentración de CO_2 reportado en cada caso de $\Delta P_{\text{líquido}}$ para cada condición de ΔP_{gas} . $\Delta P_{\text{líquido}} = n$ ($\Delta P_{\text{gas}} = 5$, $\Delta P_{\text{gas}} = 7$) donde $n = 1, 2, \dots, 6$

El trabajar con un flujo menor de 17.6829 kg/h da por resultado un goteo indeseable y un flujo mayor de 48 kg/h provoca la inundación de la torre.

3.4 Muestreo

Cuando la torre alcanza su estado estacionario se esperan 5min y se recogen las muestras cada una con un intervalo de 5 min.

Cada muestra se titula con NaOH valoración reciente-mente.

Se dejan de tomar muestras hasta que el gusto de NaOH se mantenga constante.

CAPÍTULO IV
CÁLCULOS Y RESULTADOS

4.1 Corridas

Los resultados de las corridas se muestran en las tablas 4.1.1 y 4.1.2.

La tabla 4.1.1 muestra los resultados para un $\Delta P_{\text{gas}} = 5$ constante variando el $\Delta P_{\text{liquido}} = n$ ($n=1,2,\dots,6$).

Para las titulaciones de estas corridas se trabajó con dos soluciones de NaOH de normalidad diferente, ya que se agotó la primera.

La primera solución de NaOH de $N = 0.0692$, se utilizó en las pruebas en las que intervino un $\Delta P_{\text{liquido}}$ de 1 a 4; y la segunda solución de NaOH de $N = 0.06635$ en las pruebas en las que intervino un $\Delta P_{\text{liquido}}$ de 5 a 6.

Se preparó un litro de solución de NaOH en cada caso, en virtud de que si se desea obtener la mayor precisión posible no es conveniente una cantidad mayor, ya que después de cierto tiempo la normalidad cambia por la acción de diversos factores (contacto con el aire, tiempo, etc.).

La tabla 4.1.2 muestra los resultados para un $\Delta P_{\text{gas}} = 7$ constante variando el $\Delta P_{\text{liquido}} = n$.

Para cada condición se usó una sola solución de NaOH con una $N = 0.06635$.

Las tablas muestran el volumen de NaOH utilizado en cada titulación y el tiempo que tardó en estabilizarse cada corrida y su réplica.

Tiempo (minutos) = T

Volumen (cm^3) = V

Corrión = C

Réplica = R

$\Delta P_{\text{gas}} = 5$						
T	$\Delta P_{\text{liquido}} = 1$		2		3	
	V_C	V_R	V_C	V_R	V_C	V_R
5	2.2	2.0	2.0	2.0	2.2	2.5
10	2.2	2.2	2.0	2.0	2.2	2.2
15	2.2	1.8	2.0	2.0	2.2	2.2
20	2.1	1.9	2.0	2.0	2.2	1.9
25	2.2	2.2	2.0	2.0	2.2	2.2
30	2.2	2.2	2.0	2.0	2.2	2.2
35	1.9	2.2	2.0	2.0	2.2	1.8
40	2.0	2.2	2.0	2.0	2.2	2.2
45	1.8	2.2	2.0	2.0	2.2	1.9
50	2.0	2.2			2.2	1.8
55	1.0	2.2				2.0
60	2.0					1.9
65	2.0					2.2
70	2.0					2.2
75	2.0					2.2
80	2.2					2.2
85	2.2					2.2
90	2.2					2.2
95	2.2					2.2
100	2.2					2.2
105	2.2					2.2

TABLA 4.1.1 RESULTADOS DE LAS CORRIAS

Continuación de la tabla 4.1.1

5						
T	4		5		6	
	V_C	V_R	V_C	V_R	V_C	V_R
5	2.1	2.4	1.8	2.3	2.4	2.3
10	1.8	2.5	1.5	2.2	2.5	2.3
15	2.1	2.2	2.2	2.2	2.2	2.3
20	1.7	1.7	2.2	2.2	2.2	2.3
25	2.2	2.4	2.2	2.2	2.4	2.3
30	2.0	2.0	2.2	2.2	2.3	2.3
35	1.9	1.9	2.2	2.2	2.3	2.3
40	1.9	1.9	2.2	2.2	2.3	2.3
45	1.9	1.9	2.2	2.2	2.3	2.3
50	1.9	1.9	2.2		2.3	
55	1.9	1.9	2.2		2.3	
60		1.9			2.3	
65		1.9			2.3	
70		1.9			2.3	
75		1.9				
80		1.9				
85		1.9				

$\Delta P_{\text{tubo}} = 7$						
T	$\Delta P_{\text{líquido}} = 1$		2		3	
	V_C	V_R	V_C	V_R	V_C	V_R
5	2.3	2.3	2.4	2.7	2.3	2.7
10	2.3	2.3	2.7	2.7	2.5	2.7
15	2.3	2.3	2.7	2.7	2.5	2.7
20	2.3	2.3	2.7	2.7	2.6	2.7
25	2.3	2.3	2.7	2.7	2.7	2.7
30	2.3	2.3	2.7	2.7	2.7	2.7
35	2.3	2.3	2.7	2.7	2.7	2.7
40	2.3	2.3	2.7	2.7	2.7	2.7
45	2.3	2.3	2.7	2.7	2.7	2.7
50			2.7		2.7	
55					2.7	
60					2.7	
T	$\Delta P_{\text{líquido}} = 4$		5		6	
	V_C	V_R	V_C	V_R	V_C	V_R
5	2.7	2.9	2.5	3.0	2.5	2.6
10	2.9	2.9	2.8	3.0	2.5	2.5
15	2.9	2.9	3.0	3.0	2.5	2.5
20	2.9	2.9	3.0	3.0	2.5	2.5
25	2.9	2.9	3.0	3.0	2.5	2.5
30	2.9	2.9	3.0	3.0	2.5	2.5
35	2.9	2.9	3.0	3.0	2.5	2.5
40	2.9	2.9	3.0	3.0	2.5	2.5
45	2.9	2.9	3.0	3.0	2.5	2.5
50	2.9	2.9	3.0		2.5	2.5

TABLA 4.1.2 RESULTADOS DE LAS COMIDAS

4.2 Cálculo de la concentración de CO_2

La ecuación para obtener la fracción molar de equilibrio es:

$$x^{\text{II}} = \frac{P}{H} \quad (4.2.1)$$

donde:

P es la presión atmosférica de Guadalajara $P = 0.8355$ - atmósferas

H es la constante de Henry cuyo valor para una temperatura de operación $T = 16^{\circ}\text{C}$ es de $H = 1344$ atmósferas

Llamando C_B a la concentración de solución se obtiene

$$x^{\text{II}} = \frac{C^{\text{II}}}{C_B} \quad (4.2.2)$$

donde:

C^{II} es la concentración de equilibrio

C_B se tomará como agua pura

$$C_B = \frac{1000}{18} \text{ kmol/m}^3$$

Igualando las ecuaciones obtenemos

$$\frac{P}{H} = \frac{C^{\text{II}}}{C_B} \quad (4.2.3)$$

Despejando

$$C^{\text{II}} = \frac{C_B P}{H} \quad (4.2.4)$$

Sustituyendo valores

$$C^x = \frac{1000 (0.8355)}{18 (1.344)}$$

$$C^x = 0.03454 \text{ kmol/m}^3$$

Para obtener la concentración a la salida de la torre de relleno C_2 se usa:

$$C_2 = \frac{V_1 N}{2V_2} \quad (4.2.5)$$

donde:

C_2 es la concentración de dióxido de carbono

V_1 es el volumen usado en la titulación de NaOH

N es la normalidad de la solución de NaOH usada en la titulación.

V_2 es el volumen de la solución de dióxido de carbono

$$V_2 = 25\text{cm}^3 \quad (\text{es constante})$$

En la tabla 4.2.1 se muestran el V_1 , N y C_2 , para un $\Delta P_{\text{gas}} = 5$.

En la tabla 4.2.2 se muestran los mismos valores antes mencionados, pero con un $\Delta P_{\text{gas}} = 7$.

Tabla 4.2.1 concentración de CO_2

$\Delta P_{\text{gas}} = 5$			
$\Delta P_{\text{liquido}}$	V_1	N	C_2
1	2.2	0.0892	0.003925
2	2.0	0.0892	0.003566
3	2.2	0.0892	0.003925
4	1.9	0.0892	0.003390
5	2.2	0.06635	0.002919
6	2.3	0.06635	0.003052

Tabla 4.2.2 concentración de CO_2

$\Delta P_{\text{gas}} = 7$			
$\Delta P_{\text{liquido}}$	V_1	N	C_2
1	2.3	0.06635	0.003052
2	2.7	0.06635	0.003563
3	2.7	0.06635	0.003563
4	2.9	0.06635	0.003648
5	3.0	0.06635	0.003961
6	2.5	0.06635	0.003317

4.3 Cálculo de K_L

Para el cálculo de K_L se usa la ecuación 1.1.4

$$K_L = \frac{L}{A \cdot C_m} \ln \frac{C^x}{(C^x - C_2)}$$

$$A = N_c (2\pi rh + 2\pi r^2) \quad (4.3.1)$$

donde:

A es la superficie de absorción total de los cilindros

N_c es el número de cilindros dentro de la torre

r es el radio de los cilindros

h es la altura de los cilindros

$$N_c = 2665$$

$$r = 0.003 \text{ m}$$

$$h = 0.01 \text{ m}$$

sustituyendo los valores

$$A = 2665 (2\pi (0.003)(0.01) + 2\pi (0.003)^2)$$

$$A = 0.65304 \text{ m}^2$$

$$L = \text{kmol} / \text{h}$$

$$C_m = 55.55 \text{ kmol} / \text{m}^3$$

$$K_L = \text{kmol} / \text{h m}^2 \quad (\text{kmol} / \text{m}^3)$$

sustituyendo en 1.1.4

$$K_L = \frac{L}{0.65304} \ln \frac{0.03454}{0.03454 - C_2}$$

donde:

L se puede dar en kg / h , y

C_2 en kmol / m^3

La tabla 4.3.1 muestra los valores de K_L para un $\Delta P_{\text{gas}} = 5$ y un $\Delta P_{\text{gas}} = 7$, así como el flujo.

$\Delta P_{\text{líquido}}$	L	$\Delta P_{\text{gas}} = 5$		$\Delta P_{\text{gas}} = 7$	
		C_2	K_L	C_2	K_L
1	17.6829	0.003925	0.003200	0.003052	0.002505
2	26.0223	0.003966	0.004345	0.003563	0.004304
3	32.6212	0.003925	0.006020	0.003563	0.005471
4	38.2950	0.003390	0.006078	0.005848	0.006920
5	43.3669	0.002919	0.005864	0.003981	0.006132
6	48.0059	0.003052	0.006600	0.003317	0.007421

Tabla 4.3.1 Resultados de K_L

4.4 Cálculo estadístico

Se aplicarán dos métodos estadísticos; análisis de varianza para dos factores y la prueba de rangos con signo de Wilcoxon. (Ver apéndice D)

Se aplicarán estas pruebas a la concentración de CO_2 y al K_L para tener una información más completa.

4.4.1 Pruebas estadísticas para la concentración de CO_2

A.- Análisis de varianza para dos factores

Hipótesis $Y = f(X_1, X_2)$

X_1 = Flujo de alimento líquido

X_2 = Flujo de alimento gaseoso

Y = Concentración de CO_2

$X_1 \backslash X_2$	5	7	t_j
1	0.003925	0.003052	0.006977
2	0.003668	0.003583	0.007151
3	0.003925	0.003583	0.007506
4	0.003390	0.003848	0.007236
5	0.002919	0.003981	0.006900
6	0.003052	0.003317	0.006369
t_j	0.020779	0.021364	0.042143

$$c = \frac{(0.042143)^2}{12} = 0.000148$$

$$SCT = (0.0001495 - 0.000148) = 0.0000015$$

$$SCA = (0.0002967/2) - 0.000148 = 0.0000004$$

$$SCB = (0.0008882/6) - 0.000148 = 0.000000031223$$

$$SCC = SCT - SCA - SCB = 0.0000010668$$

Fuentes de variación	gl	SC	Varianza	F	F* _{0.05}
A	5	0.0000004	8×10^{-8}	0.37425	5.05
B	1	3.1223×10^{-8}	3.1223×10^{-8}	0.14338	6.61
c	5	1.0688×10^{-6}	2.1376×10^{-7}		
T	11	0.0000015			

$F < F^*$ se rechaza la hipótesis

Conclusión: No existe diferencia significativa entre los experimentos.

Y = No es función del alimento gaseoso ni del alimento líquido.

B.- Rangos con signo de Wilcoxon

$$H_0 = x_i \leq y_i$$

$$H_a = x_i > y_i$$

donde:

x_i es el alimento gaseoso de 7

y_i es el alimento líquido de 5

	y_i	x_i	$D_i = y_i - x_i$	$|D_i|$	Rango	R_i^*
1	0.003925	0.003052	0.000873	0.000873	5	5
2	0.003568	0.003583	-0.000015	0.000015	1	0
3	0.003925	0.003563	0.000342	0.000342	3	3
4	0.003390	0.003646	-0.000458	0.000458	4	0
5	0.002919	0.003981	-0.001062	0.001062	6	0
6	0.003052	0.003317	-0.000265	0.000265	2	0
					21	8

Estadístico:

$$T = \sum_{i=1}^6 R_i = 8$$

$$\text{con } \alpha = 0.05 \quad T_{0.95}(6) = 3$$

$$T_{0.05}(6) = \frac{6(7)}{2} - 3$$

$$T_{0.05}(6) = 21 - 3 = 18$$

Puesto que $T = 8 < 18$ no se rechaza H_0 y se concluye que con $\alpha = 0.05$ no existe diferencia significativa en la concentración de CO_2 para el alimento gaseoso.

4.4.2 pruebas estadísticas para el K_L

A.- Análisis de varianza para dos factores

Hipótesis $Y = f(X_1 , X_2)$ $Y = K_L$

$X_1 \backslash X_2$	5	7	t_i
1	0.003266	0.002505	0.005771
2	0.004345	0.004364	0.006709
3	0.006026	0.003471	0.011497
4	0.006058	0.006926	0.012984
5	0.005864	0.006132	0.013996
6	0.006800	0.007421	0.014221
t_j	0.032359	0.034619	0.067176

$$c = \frac{(0.067178)^2}{12} = 0.0003761$$

$$SCF = 0.0004076 - 0.0003761 = 0.0000315$$

$$SCA = (0.000808 / 2) - 0.0003761 = 0.0000279$$

$$SCB = (0.0022595 / 6) - 0.0003761 = 0.0000005$$

$$SCG = 0.0000031$$

Fuentes de variación	gl	SC	Varianza	F	$F^*_{0.05}$
A	5	0.0000279	0.0000056	9.0322	5.05
B	1	0.0000005	0.0000005	0.83333	6.61
E	5	0.0000031	0.0000006		
T	11	0.0000315			

$F < F^*$ se rechaza la hipótesis

Conclusión:

Para A, $F > F^*$ no se rechaza la hipótesis.

Para B, $F < F^*$ se rechaza la hipótesis.

Para el caso del K_D se ve claramente en esta prueba que el flujo del líquido es un factor muy importante ya que el factor de concentración no tuvo influencia lo que indica que $Y = f(X_1)$.

B.- rangos con signo de Wilcoxon

$$H_0 = x_i \cong y_i$$

$$H_a = x_i > y_i$$

	y_i	x_i	$D_i = y_i - x_i$	$|D_i|$	Ranko	n_i^*
1	0.003266	0.002505	0.000761	0.000761	4	4
2	0.004345	0.004364	-0.000019	0.000019	1	0
3	0.006026	0.005471	0.000555	0.000555	2	2
4	0.006056	0.006926	-0.000868	0.000868	5	0
5	0.005864	0.005132	-0.002268	0.002268	6	0
6	0.006800	0.007421	-0.000621	0.000621	3	0
					21	0

Estadístico

$$T = \sum_{i=1}^6 n_i = 6$$

con $\alpha = 0.05$ $T_{0.95}(6) = 3$

$$T_{0.05}(6) = \frac{6(7)}{2} - 3$$

$$T_{0.05}(6) = 21 - 3 = 18$$

Conclusión:

Puesto que $T = 6 < 18$ no se rechaza H_0 y se concluye que con $\alpha = 0.05$ no hay diferencia en la concentración de los dos experimentos, y nos indica que la concentración de CO_2 no depende del alimento, y el K_L sólo depende del alimento líquido como lo informó la prueba anterior y no del alimento gaseoso.

CAPÍTULO V
DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 resultados de la concentración de CO_2

Los resultados reportados por la tabla de concentración de CO_2 nos muestra que para un $\Delta P_{\text{liquido}}$ de 1 y 5 la variación es la más alta y es muy nociva, mientras que en las otras sus diferencias son menores.

para obtener una concentración de CO_2 mayor para cada alimento gaseoso se pueden ver claramente en la figura (5.1.1), las condiciones necesarias.

5.2 resultados del K_L

En el cálculo de K_L se muestra como a mayor flujo de líquido aumenta el K_L , excepto para el flujo líquido de 5 y un $\Delta P_{\text{gas}} = 7$, este es el caso que se desvía de manera mayor, en la figura (5.2.1) se muestra el comportamiento del K_L con respecto al flujo.

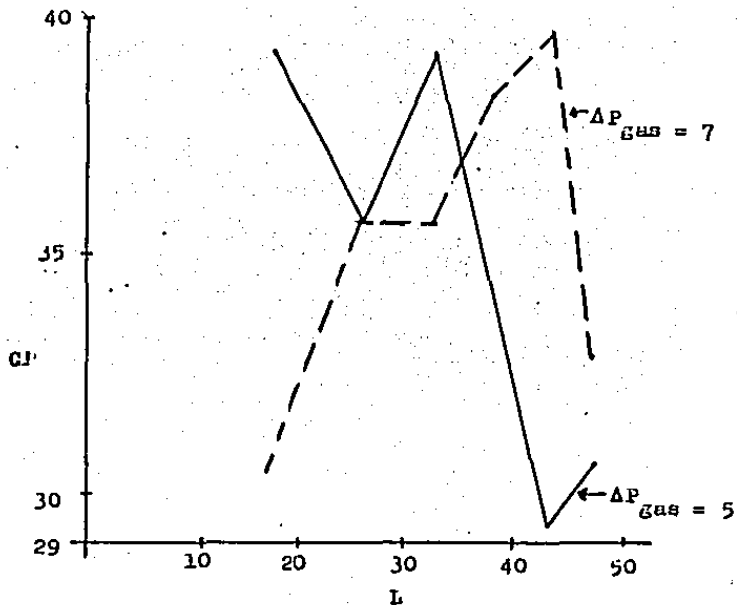
5.3 resultados del análisis estadístico

La información de las pruebas nos indica que no hay diferencia significativa en las concentraciones de CO_2 obtenidas para cada caso de alimento gaseoso y líquido.

Para el K_L en el análisis de varianza para los factores nos indica claramente la influencia del alimento líquido, ya que el parámetro de b es directamente - - -

proporcional al K_L (como se muestra en la ecuación --- 1.1.4), mientras que la concentración de CO_2 no tuvo influencia directa y no se detecta en las pruebas estadísticas.

Nota.- Por la poca información que se tiene para las gráficas (ya que se cuenta con solo 6 datos) fue imposible hacer una suavización de las -- mismas, ya que al hacerlo se perdía una gran información.



C' es la concentración $C \times 10^4$

L es el flujo líquido

Figura 5.1.1 Concentración en función del flujo.

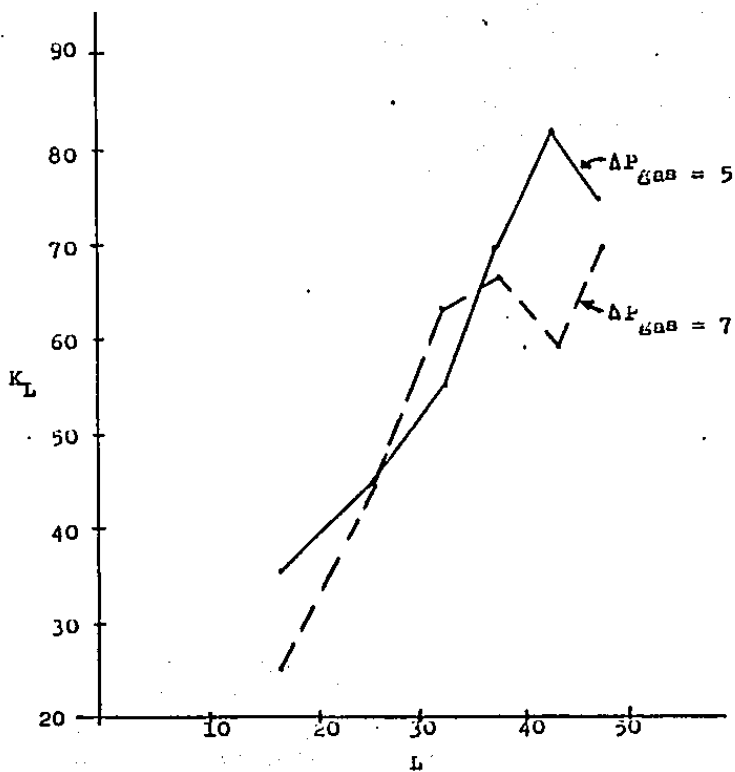


Figura 5.2.1 Coeficiente de Absorción en función del Flujo.

RESUMEN

RESUMEN

Se trabajó con una torre de absorción empírica --- experimental, calibrándose los manómetros y estableciéndose las condiciones de trabajo de inundación. (50% - 60%), alimento gaseoso ($\Delta P_{gas} = 5, 7$) y alimento líquido ($\Delta P_{liquido} = 1, 2, 3, 4, 5, 6$), tomando en cuenta el factor económico.

rutina de trabajo: se abre primero el conducto de el gas y se establece la cantidad de alimento gaseoso - que se va a usar; una vez controlado, se abre el conducto del líquido y se establece la cantidad utilizada para esa corriente; ya establecida la inundación, se esperan unos minutos para llegar al estado estacionario y se comienza a muestrear; cada muestra se titula con --- NaOH ; se termina de muestrear hasta que el gasto del --- líquido titulante se mantenga constante.

La titulación nos indica la concentración de CO_2 - en cada muestra.

Se calcula el K_L a partir del CO_2 y del flujo líquido.

Los datos se tratan estadísticamente comparando el K_L y la concentración de CO_2 por medio de dos pruebas - estadísticas una paramétrica (análisis de varianza para dos factores) y la otra no paramétrica (rangos con signo de wilcoxon), que nos darán información sobre --- las condiciones en las que nos ofrece una mayor concentración de CO_2 y qué ventajas y desventajas puede ofrecer el trabajar en esa condición establecida.

CONCLUSIONES

Conclusiones

La comparación de la concentración obtenida en la fase líquida en una torre de absorción empacada experimental, nos indicó que el comportamiento de la absorción para los dos casos de alimento gaseoso no tiene una diferencia significativa para los resultados en la concentración final de CO_2 y se puede trabajar a las dos condiciones indistintamente.

En las condiciones de alimento líquido se observó que su absorción no varió en forma notoria.

Cuando las condiciones de Δr_{gas} y $\Delta r_{\text{liquido}}$ aumentaron se pudo constatar un aumento en la temperatura dentro de la torre, por lo que la absorción del CO_2 no aumentó ya que al aumentar la temperatura disminuye la solubilidad del CO_2 en el agua.

Después de analizar estos resultados se puede concluir que para trabajar con la torre en condiciones de facilidad de manejo, se trabajará con un $\Delta r_{\text{gas}} = 1$, ya que, el control de la entrada del gas en el manómetro se estabiliza y no hay problema con él. Como el gasto del CO_2 aumenta se tendrá la desventaja de que el caudal de CO_2 se agotará más rápido.

Si tomamos en cuenta el factor de economía, trabajaremos con un $\Delta r_{\text{gas}} = 5$ y hay que controlar manualmente la estabilidad del manómetro cerrando o abriendo la llave de entrada del aire y cuidando que no varíe del punto

escogido.

Para el factor de K_L se puede decir que éste varía en función del gasto del líquido.

Sería interesante trabajar la torre colocando ahora sensores de temperatura para observar el efecto de ésta sobre la absorción del soluto.

BIBLIOGRAFIA

Bibliografía

- I.- Treybal, Robert E.
OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA
 (Segunda Edición) México. Mc Graw Hill. 1960
- II.- A.S. Foust, L.A. Wenzel, G.W. Clump, Louis Maus,
PRINCIPIOS DE OPERACIONES UNITARIAS
 México. C.E.C.S.A. 1979.
- III.- Perry, J.H.
CHEMICAL ENGINEERS HANDBOOK
 (4th Edition) Tokyo. Mc Graw Hill Book Company,
 Kogakusha Co. 1973.
- IV.- Segura Alcalá, Hugo Raúl
TESIS PROFESIONAL, DETERMINACION EXPERIMENTAL
DE LOS COEFICIENTES GLOBALES DE ABSORCIÓN EN
FASE LIQUIDA EN UNA TORRE DE REBLENDO
 U.A.G. 1984.
- V.- Ambríz Hernández, Silvia
TESIS PROFESIONAL, CONSTRUCCION Y PROBA DE UNA
TORRE DE REBLENDO EXPERIMENTAL PARA EL CALCULO
DE COEFICIENTES GLOBALES DE TRANSFERENCIA DE
MASA EN FASE LIQUIDA
 U.A.G. 1987.

- VI.- Krayszig, Erwin
INTRODUCCIÓN A LA ESTADÍSTICA MATEMÁTICA
PRINCIPIOS Y MÉTODOS
(Sexta Edición) México. LIMUSA. 1962.
- VII.- Miller, Irwin. Freund, John E.
PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA PARA INGENIEROS
(Cuarta edición) México. REVERTE. 1980.
- VIII.- Hendenhall, William. Scheaffer, Richard L.
ESTADÍSTICA MATEMÁTICA CON APLICACIONES
México. Grupo editorial Iberoamérica. 1967.

APÉNDICES

Apéndice A

Calibración de manómetros

Se calibró cada uno de los manómetros, el del gas y el del líquido.

a).- Manómetro de gas

La calibración del manómetro del gas se hizo por desplazamiento de agua.

Se utilizó un recipiente de 25 l y una probeta de 1 l.

El recipiente se llena de agua así como la probeta, esta se coloca invertida dentro del recipiente, una vez que se define el ΔP_{gas} a trabajar, se introduce una manguera dentro de la probeta y se toma el tiempo que tarda el gas en desplazar al líquido dentro de la probeta, se hicieron dos réplicas para cada condición.

Los resultados son: (Ver Tabla A.1)

donde:

P es la diferencia de presión en cm

\bar{L} es el promedio del gasto en ml/s

T es el tiempo en s

AP	T	L	AP	T	L	AP	T	L
1.5	23.5	49.28	3.5	17	69.69	5.5	12.9	89.84
	23			16.5			12.9	
	23.5			16			12.6	
7.5	9	129.69	9.5	7.9	142	11.5	7	164.28
	8.6			8.2			7	
	9			8.2			7.1	
15.5	5.7	192.74	17	5	209.1			
	6.1			5.5				
	6.1			5.5				

Tabla A.1

Ecuación:

$$L = A (\Delta P)^b$$

aplicando Ln

$$\ln L = \ln A + b \ln \Delta P$$

datos para la linealización:

donde:

L es el gasto del líquido en l/h

AP	LnAP	L	Ln L
17	2.83	752.76	6.624
15.5	2.74	693.86	6.542
11.5	2.44	591.41	6.382
9.5	2.25	511.20	6.237
7.5	2.01	466.86	6.146
5.5	1.70	323.424	5.778
3.5	1.25	250.86	5.524
1.5	0.405	177.41	5.176

Linearizando:

$$\ln A = 4.838$$

$$A = 126.24$$

$$b = 0.6211$$

$$\text{Correlación} = 0.9995$$

la ecuación del gasto del gas resulta

$$G = 126.24 (\Delta P)^{0.6211}$$

donde

G es el gasto del gas en l/h

b).- Manómetro del líquido

La calibración del manómetro del líquido se hizo - por medición de ml en un tiempo fijo.

Se utilizó un recipiente de 1 l y el tiempo se fijó de 30 s para cada caso, primeramente se define en el manómetro para el líquido el ΔP a utilizar y se miden - los ml gastados para ese tiempo, se hicieron dos réplicas para cada condición.

Los resultados son: (Ver tabla A.2)

donde:

ΔP es la diferencia de presión en cm

\bar{L} es el promedio del gasto en ml/s

T es el tiempo en s

T = 30s

ΔP	ml	gastos		L
16	670	670	670	22.3333
15	660	660	660	22.0000
14	645	645	645	21.5000
13	620	620	620	20.0007
12	590	590	590	19.0007
11	560	560	560	18.0007
10	530	530	530	17.0007
9	500	500	500	16.0007
8	470	470	470	15.0007
7	440	440	440	14.0007
6	390	395	395	13.1000
5	370	370	370	12.3333
4	320	320	320	10.6607
3	280	280	275	9.2007
2	225	225	225	7.5000
1	140	140	140	4.0667

Tabla A.2

Ecuación:

$$L = A (\Delta P)^b$$

aplicando Ln

$$\ln L = \ln A + b \ln \Delta P$$

datos para la linealización: (Ver tabla A.3)

donde:

L es el gasto del líquido en l/h \approx kg/h

AP	L	Ln L	Ln AP
16	80.3999	4.3870	2.7726
15	79.2000	4.3720	2.7081
14	77.4000	4.3490	2.6391
13	74.4001	4.3095	2.5649
12	70.8001	4.2599	2.4848
11	67.2001	4.2077	2.3979
10	63.6001	4.1526	2.3026
9	60.0001	4.0943	2.1972
8	56.4001	4.0325	2.0794
7	52.8001	3.9665	1.9459
6	47.5200	3.8612	1.7918
5	44.3999	3.7932	1.6094
4	38.4001	3.6481	1.3863
3	33.3601	3.5074	1.0986
2	27.0000	3.2958	0.6931
1	16.8001	2.8214	0.0000

Tabla A.3

linearizando:

$$\ln A = 2.8726$$

$$\text{Correlación} = 1.0000$$

$$A = 17.6829$$

$$b = 0.5574$$

$$L = 17.6829 (\Delta P)^{0.5574}$$

Apéndice B

Rutina de trabajo

Primamente se carga la compresora (que dura 30 minutos); mientras tanto, se disponará el equipo para la titulación (armando el aparato, preparando la solución de NaOH si es necesario, tener la fenolftaleína y todo el material auxiliar); una vez cargada la compresora se abre la llave del aire y se ve si en el equipo no hay fugas (se corrigen en caso afirmativo); se cierra la llave del aire (la del acfogue siempre queda abierta); se dispone a abrir la llave del tanque de CO_2 y se controla en el manómetro el alimento a entrar (que será en nuestro caso $\Delta P_{\text{CO}_2} = 1$ ó 2cm); se abre inmediatamente la válvula de aire y se controla el $\Delta P_{\text{gaseoso}}$ final que se desea ($\Delta P_{\text{gas}} = 5$ ó 7 respectivamente con el CO_2).

Luego se abre la válvula del agua y se controla en el manómetro de $\Delta P_{\text{liquido}}$ a utilizar ($\Delta P_{\text{liquido}} = 1, \dots, 6$); se deja que la torre trabaje hasta que su nivel de inundación se mantiene constante; se esperan 5 minutos y se comienza a muestrear.

Para muestrear, se abre el conducto que se encuentra insertado en una tubería en forma de "T", antes del control de inundación y se deja correr algo del líquido (ya que se queda en la manguera de julina una pequeña

cantiósa del líquido inicial) y se toma la muestra, --
la cual se titula inmediatamente.

Se trabaja con el mismo ΔP_{gas} y se varía el ΔP_{liq} --
siguiendo el mismo procedimiento ($\Delta P_{\text{liquido}} =$
2, ..., 6); cuando se termine de trabajar con estas con-
diciones se cambia el ΔP_{gas} y se vuelve a variar el --
 $\Delta P_{\text{liquido}}$ realizando el mismo procedimiento anterior.

Después de cada corrida se lava la torre; cerrando
la válvula de entrada de CO_2 , se deja únicamente el ---
aire para el lavado; se abre la llave de la toma de ---
muestras para que se vacíe del líquido más rápidamente;
cuando se vacíe, se cierra la entrada del aire y se ---
inunda la torre con agua, vaciándola después. Este pro-
cedimiento se realiza dos veces, cuando se lava de nue-
vo después de finalizar el trabajo para dejarla lista -
para el siguiente día.

Apéndice C

Tabla de constantes de la ley de Henry para el CO_2
en el agua a distintas temperaturas

Temperatura (°C)	$H \times 10^{-4}$ (Atm/fracción molar)
0	0.0728
10	0.104
20	0.142
30	0.186
40	0.233
50	0.283
60	0.341

Apéndice D

Descripción del método estadístico

a).- Análisis de varianza para dos factores.

La mayoría de los experimentos consisten en el estudio de los efectos de una o más variables independientes sobre una respuesta.

El procedimiento de análisis de varianza trata de analizar la variación de una respuesta y de asignar porciones (componentes) de esta variación a cada una de las variables de un conjunto de variables independientes. El razonamiento se basa en que las variables de respuesta se modifican por la variación de algún conjunto de variables independientes desconocidas. Como el investigador rara vez incluirá, si alguna vez lo hace, todas las variables que afectan a la respuesta, aún cuando se puede observar una variación aleatoria en la respuesta. El objetivo del análisis de varianza es identificar variables independientes importantes en un estudio y determinar cómo interactúan y afectan a la respuesta.

El método para experimentos que contienen algunas variables independientes puede explicarse desarrollando intuitivamente el procedimiento.

Hipótesis $Y = (x_1, x_2)$

	x_{21}	x_{22}	.....	x_{2n}	t_i
x_{11}	Y_{11}	Y_{12}	.....	Y_{1n}	t_1
x_{12}	Y_{21}	Y_{22}	.....	Y_{2n}	t_2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
x_{1k}	Y_{k1}	Y_{k2}	.....	Y_{kn}	t_k
$\frac{t_j}{n}$	t_1	t_2	.....	t_n	T

$$C = \frac{(T)^2}{kn}$$

suma de cuadrados (SC)

$$SCF = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k Y_{ij}^2 - C$$

$$SCA = \frac{\sum t_i^2}{n} - C$$

$$SCB = \frac{\sum t_j^2}{k} - C$$

$$SCe = SCF - SCA - SCB$$

donde:

A y B son tratamientos (agitación, temperatura, gas, líquido, etc)

e es el error

T es el total

Puentes de variación	Grados de libertad (g.l.)	SC	Varianza (V)	F	F^*
A	$k - 1$	SCA	$\frac{SCA}{k - 1}$	$\frac{VA}{VE}$	T a b l a D.1 F.95
B	$n - 1$	SCB	$\frac{SCB}{n - 1}$	$\frac{VB}{VE}$	
E	$(k-1)(n-1)$	SCE	$\frac{SCE}{(k-1)(n-1)}$		
T	$kn - 1$	SCT			

Si $F < F^*$ se rechaza la hipótesis.

$m \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7
1	161.00	200.00	216.00	225.00	230.00	234.00	237.00
2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4
3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33

Tabla D.1 Distribución F con (m, n) grados de libertad para el valor de 0.95

b).- Rangos con signo de Wilcoxon

En las pruebas del signo y de Mc Nemar se usa la escala ordinal dentro de cada par y al considerar las diferencias se toma en cuenta solo la dirección de la diferencia (positiva o negativa). Si además de la dirección puede medirse la magnitud de las diferencias puede usarse una prueba más potente. Esta es la llamada prueba de Wilcoxon. En estas condiciones, es decir cuando la escala en las observaciones es al menos ordinal y las diferencias pueden medirse en una escala de intervalo se dice que la escala es métrica Ordinal.

Una suposición extra de la prueba es que la distribución de las diferencias es simétrica.

Datos.- Se tienen n' pares de observaciones $(x_1, y_1); (x_2, y_2); \dots; (x_{n'}, y_{n'})$.

Se calculan los valores absolutos de las n' diferencias.

$$|d_i| = |y_i - x_i| \quad ; i = 1, 2, \dots, n'$$

Sean n las $d_i \neq 0 \quad (n \leq n')$

Se asignan rangos a las n diferencias (valores absolutos) que son diferentes de cero. Rango 1 a la mas pequeña, rango 2 a la segunda mas pequeña, rango n a la mayor.

Un problema que puede surgir al asignar los rangos

es que dos diferencias (o más) tengan el mismo valor absoluto. En ese caso se les asigna a cada una de ellas el valor promedio que les correspondería si estuvieran en orden ascendente.

Ejemplo.

(8,9); (5,7); (2,0); (8,4); (9,1); (0,3);
 (9,14); (0,10); (6,1); (13,2); (12,7); --
 (6,6)

D_i	1	2	-2	-4	-8	-3	5	10	-5	-11	-5	0
$|D_i|$	1	2	2	4	8	3	5	10	5	11	5	0
Rangos	1	2.5	2.5	5	9	4	7	10	7	11	7	-

Suposiciones:

- i).- Cada D_i es una variable aleatoria continua
- ii).- La distribución de cada D_i es simétrica
- iii).- Las D_i son independientes
- iv).- Las D_i tienen la misma mediana
- v).- La escala es al menos de intervalo en las D_i

hipótesis

Sea M_d la mediana de las D_i

A).- $H_0: M_d = 0$ vs $H_a: M_d \neq 0$

B).- $H_0: M_d \leq 0$ vs $H_a: M_d > 0$

C).- $H_0 : M_d \geq 0$ vs $H_a : M_d < 0$.

Nota.- La hipótesis alternativa en B puede interpretarse como " las Y son mayores que las X " y en el caso C como " las X son mayores que las Y ".

Estadístico.- sea

$$R_i^* = \begin{cases} 0 & \text{si } y_i < x_i \quad (D_i < 0) \\ \text{Rango asignado a } (x_i, y_i) & \text{si } y_i > x_i \\ & (D_i > 0) \end{cases}$$

El estadístico es entonces

$$T = \sum_{i=1}^n R_i^*$$

Regla de decisión.- La distribución de T bajo H_0 es fácil de calcular. En la tabla D.2 se dan puntos críticos de la distribución. La regla de decisión es:

A).- Rechazo H_0 si $T > T_{\alpha/2}(n)$ o $T < T_{1-\alpha/2}(n)$

B).- Rechazo H_0 si $T > T_{\alpha}(n)$

C).- Rechazo H_0 si $T > T_{1-\alpha}(n)$

La tabla D.2 sólo da valores críticos en la cola izquierda. Los valores críticos en la cola derecha se obtiene mediante la relación:

$$T_{\alpha}(n) = \frac{n(n+1)}{2} - T_{1-\alpha}(n)$$

Esto se debe a que la distribución de T bajo H_0 es simétrica y la suma de los rangos (igual a la suma de los primeros n números) es

$$i = \frac{n(n+1)}{2}$$

En esta prueba se tienen prácticamente todas las suposiciones de la prueba paramétrica, excepto la de distribución normal de las observaciones, por lo que sería adecuada para muestras pequeñas cuando se sospecha no normalidad en la población.

n	T _{.995}	T _{.99}	T _{.975}	T _{.95}	T _{.90}	T _{.80}	T _{.70}
4	0	0	0	0	1	3	3
5	0	0	0	1	3	4	5
6	0	0	1	3	4	6	8
7	0	1	3	4	6	9	11
8	1	2	4	6	9	12	14
9	2	4	6	9	11	15	18
10	4	6	9	11	15	19	22
11	6	8	11	14	18	23	27
12	8	10	14	18	22	28	32
13	10	13	18	22	27	33	38
14	13	16	22	26	32	39	44
15	16	20	26	31	37	45	51
16	20	24	30	36	43	51	58
17	24	28	35	42	49	58	65
18	28	33	41	48	56	66	73
19	33	38	47	54	63	74	82
20	38	44	53	61	70	82	91

Tabla D.2 Valores críticos para la prueba de rangos con signo de Wilcoxon.