



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN**

**COLUMNA DE ABSORCIÓN DE CO<sub>2</sub> DEL AIRE CON MATERIALES  
RECICLABLES**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO**

**P R E S E N T A:**

**JOSÉ ANTONIO MAYORAL CHAVANDO  
ISAAC KINLEY RIOS PRUNEDA**

**A S E S O R D E T E S I S**

**M EN C. CARLOS ALBERTO MORALES ROJAS**

**CUAUTITLAN IZCALLI, ESTADO DE MEXICO, 2013**



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.



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

U. N. A. M.  
**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**  
SUPERIORES CUAUTITLÁN

**DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO  
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**



**ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ**  
**Jefa del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán**

Con base en el Art. 28 del Reglamento de Exámenes Profesionales nos permitimos comunicar a usted que revisamos la: **TESIS**

**Columna de Absorción de CO2 del Aire con Materiales Reciclables**

Que presenta el pasante: **José Antonio Mayoral Chavando**

Con número de cuenta: **40806332-8** para obtener el Título de: **Ingeniero Químico**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**

**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 13 de Agosto de 2012.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>
<b>PRESIDENTE</b>	M. en C. Carlos Alberto Morales Rojas	
<b>VOCAL</b>	Dr. Eligio Pastor Rivero Martínez	
<b>SECRETARIO</b>	IQ. María Elena Quiroz Macias	
<b>1er SUPLENTE</b>	IQ. Elvia Mayen Santos	
<b>2do SUPLENTE</b>	M. en I. Arturo Ortega Díaz	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 120).  
HHA/pm



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

**DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO  
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**

**ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ  
Jefa del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán**

Con base en el Art. 28 del Reglamento de Exámenes Profesionales nos permitimos comunicar a usted que revisamos la: **TESIS**

**Columna de Absorción de CO2 del Aire con Materiales Reciclables**

Que presenta el pasante: **Isaac Kinley Rios Pruneda**

Con número de cuenta: **40800807-1** para obtener el Título de: **IngenieroQuímico**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**

**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 13 de Agosoto de 2012.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>
<b>PRESIDENTE</b>	M. en C. Carlos Alberto Morales Rojas	
<b>VOCAL</b>	Dr. Eligio Pastor Rivero Martínez	
<b>SECRETARIO</b>	IQ. María Elena Quiroz Macias	
<b>1er SUPLENTE</b>	IQ. Elvia Mayen Santos	
<b>2do SUPLENTE</b>	M. en I. Arturo Ortega Díaz	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 120).

HHA/pm



### AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

*Esta tesis se la dedico a mi Dios quién supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.*

*A mi familia, por brindarme su apoyo en todo momento.*

*A mi madre que me ha dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos.*

*A mis hermanos Aldo y Uriel que han sido un motivo de superación.*

*A Yadira Barrón Sánchez, mi novia a quien amo y quien me ha brindado su apoyo incondicional en todo momento.*

*A Antonio Mayoral a quien aprecio, ha sido un soporte y un gran amigo.*

*A mis maestros por proporcionarme las herramientas necesarias en mi formación y en especial al M en C. Carlos Alberto Morales Rojas por guiarme en este proceso.*

*Isaac Kinley Ríos Pruneda.*

*Lo que somos es un don de Dios a nosotros, lo que aprendemos es nuestro regalo a Dios. Le agradezco por este gran triunfo pero sobre por darme a mí madre que me apoyo en todo...*

*Antonio Mayoral Chavando.*



## ÍNDICE

### **CAPÍTULO 1**

#### **INTRODUCCIÓN**

1.1 Introducción	10
------------------	----

### **CAPÍTULO 2**

#### **ANTECEDENTES**

2.1 Antecedentes	11
2.2 Cambio climático y gases de efecto invernadero	12
2.3 Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	16
2.4 Implicaciones para México del Protocolo de Kioto	18

### **CAPÍTULO 3**

#### **REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

3.1 Principios de absorción	20
3.2 Selección del equipo de contacto	21
3.2.1 Columnas de relleno vs. columnas de platos	21
3.2.2 Problemas de una torre empacada	22
3.2.3 Problemas de una torre de platos	23
3.3 Parámetros de diseño	24
3.4 Columnas de platos	25
3.4.1 Tipos de platos	25
3.4.2 Diámetro de la columna	28
3.4.3 Altura de la columna	31
3.4.4 Dispositivos interiores de las columnas	32



## **CAPÍTULO 4**

### **ESTUDIO DE LA ABSORCIÓN DE CO<sub>2</sub> EN NaOH**

4.1 Antecedentes	34
4.2 Reacciones de efectuadas en la columna	35
4.3 Solubilidad de CO <sub>2</sub> en NaOH	36

## **CAPÍTULO 5**

### **CARACTERIZACIÓN DE LA COLUMNA DE ABSORCIÓN**

5.1 Caracterización de la columna de absorción.	37
5.2 Línea de equilibrio del sistema CO <sub>2</sub> -NaOH	39
5.3 Descripción del sistema	40
5.4 Cálculo del número de platos	46
5.5 Arreglo de platos	48
5.6 Cálculo del número de unidades de transferencia	53
5.7 Cálculo del coeficiente de transferencia de masa kg	57

## **CAPÍTULO 6**

### **DESCRIPCIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA COLUMNA Y SUS DISPOSITIVOS**

6.1 Construcción física de la torre	58
-------------------------------------	----

## **CAPÍTULO 7**

### **METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

7.1 Materiales y métodos	66
7.1.1 Plan de trabajo de la toma de alícuotas	66
7.1.2 Materiales y equipo de laboratorio.	67
7.2 Procedimiento	68
7.3 Resultados obtenidos	69
7.4 Análisis de resultados y conclusiones	69



## **CAPÍTULO 8**

### **ANÁLISIS ECONÓMICO**

8.1 El mercado de "bonos de carbono"	73
8.1.1 Unidades de remoción de emisiones (rmu)	73
8.2 Costo unitario de la columna de absorción	75
8.3 Eliminación de CO <sub>2</sub> anualmente.	77
8.3 Módulos domésticos.	77

## **CAPÍTULO 9**

### **CONCLUSIONES**

78

### **ANEXOS, TABLAS Y BIBLIOGRAFÍA**

Anexo 1 Propiedades físicas del CO <sub>2</sub>	79
Anexo 2 Espaciamiento entre platos	80
Anexo 3 Protocolo Kyoto	81
Anexo 4 Valoración ácido base	84
Bibliografía	85





## RESUMEN

La presente tesis nace como un proyecto de la materia de transferencia de masa I, donde se plantea la problemática del cambio climático y la generación de gases de efecto invernadero, debido a un modelo económico basado en la quema de combustibles que comprometen el futuro del planeta.

Este trabajo recoge la información general sobre los efectos involucrados en el cambio climático y al mismo tiempo propone una columna de absorción hecha con materiales reciclables para absorber cierta cantidad de  $\text{CO}_2$  de manera económica. La construcción de la columna de absorción de  $\text{CO}_2$  se desarrollará secuencialmente en los nueve capítulos en que está dividido este trabajo.

Dentro del último capítulo se realiza una propuesta con base en los resultados experimentales obtenidos de la columna de absorción propuesta.



## OBJETIVOS

### Objetivo general

- Caracterizar y evaluar el funcionamiento de una columna de absorción líquido-gas fabricada con materiales reciclables para reducir la concentración del CO<sub>2</sub> de una corriente de aire.

### Objetivos particulares

- Caracterizar y evaluar una columna de absorción con materiales reciclables
- Cuantificar el CO<sub>2</sub> absorbido por el prototipo.
- Comparar los resultados obtenidos con los esperados.
- Encontrar fallas en el prototipo y proponer mejoras



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una de las principales amenazas para el desarrollo sostenible y representa uno de los mayores retos ambientales con efectos sobre la economía global, la salud y el bienestar social. De no hacer algo hoy, sus impactos lo sufrirán con más intensidad las generaciones futuras. Por ello es necesario actuar desde este momento, reduciendo emisiones de CO<sub>2</sub>, buscando soluciones innovadoras para adaptarnos a los impactos del cambio climático.

Las industrias socialmente responsables han propuesto disminuir la concentración del CO<sub>2</sub> de la atmósfera mediante las siguientes propuestas:

- Mejora de la eficiencia energética de procesos: esta opción es la primera que hay que desarrollar por principios. Además es la que mejor se puede adaptar a otro tipo de sectores como el transporte o el consumo privado.
- Cambio de la estructura de consumo de la energía primaria dando más participación a las energías renovables.
- Desarrollo e implantación de Tecnologías para la captura, eliminación o Almacenamiento del CO<sub>2</sub>

El IPPC (Intergovernmental panel on climate change) establece que solo con las dos primeras medidas no será suficiente para reducir las emisiones al ritmo esperado motivo por el cual es necesario desarrollar e implementar las tecnologías necesarias para reducir la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Una de ellas es la absorción de gases.

La absorción de gases es un proceso de transferencia de masa muy común en la industria; consiste en colocar una mezcla gaseosa en contacto con un líquido absorbente, a fin de retirar de manera selectiva uno o más componentes del gas logrando su purificación.

La absorción puede implementarse perfectamente para la eliminación de CO<sub>2</sub>. En la presente tesis utilizamos este proceso de separación para reducir la concentración de CO<sub>2</sub> de una corriente de aire, mediante una columna de absorción construida de materiales reciclables.

Nuestra propuesta es fabricar la columna con latas desechadas, implementar sus partes internas, probarla y caracterizarla para cuantificar su eficiencia y su factibilidad técnico – económica.



## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES

Como compromiso ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y del Protocolo de Kioto, México cuenta con la Autoridad Nacional Designada que es el **Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y de Captura de Gases de Efecto Invernadero (COMEGEI)**, Comité intersecretarial, presidido por SEMARNAT, creado el 23 de enero de 2004 y cuya función es la de otorgar cartas de aprobación a proyectos como requisito indispensable para que puedan ser considerados para su registro como proyectos MDL (Mecanismo de desarrollo limpio) susceptibles de generar *Reducciones Certificadas de Emisiones de gases de Efecto Invernadero* (CERs por sus siglas en inglés) y hace constar que el proyecto contribuye al desarrollo sustentable del país y que las partes participantes lo hacen de manera voluntaria.

Este capítulo es muy importante puesto que fue lo que dio pie a la realización de esta tesis. Nos propusimos hacer que el lector comprenda claramente las consecuencias y efectos que trae una concentración de CO<sub>2</sub> elevada y se muestra cómo es que ésta ha ido en aumento a través de los años.

#### 2.1 ANTECEDENTES

En un mundo comercialmente globalizado, la dependencia de la energía y la contaminación asociada tienen que ver con el desarrollo y la competitividad económica.

La decisión unilateral de un grupo de países para la reducción de la contaminación supone introducir costos adicionales en los procesos de manufactura para reducir de las emisiones, y por lo tanto, disminuye la ventaja comparativa en el intercambio comercial global; por otra parte, la reducción de emisiones en países en vías de desarrollo supondría frenar sus posibilidades económicas. Es decir, la internalización de los costos de emisión (la más importante: CO<sub>2</sub>) implica una pérdida de competitividad, mientras que la externalización de costos con emisión libre supone económicamente una ventaja comparativa. Un camino alternativo sería la sustitución de la energía producida por combustibles fósiles por otras fuentes de energía no emisoras de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.



Globalmente, las energías renovables mencionadas anteriormente suponen menos del 3% del consumo mundial total, como se muestra en la Figura 2.1 En esta se muestra el peso a nivel mundial de las distintas fuentes de energía.

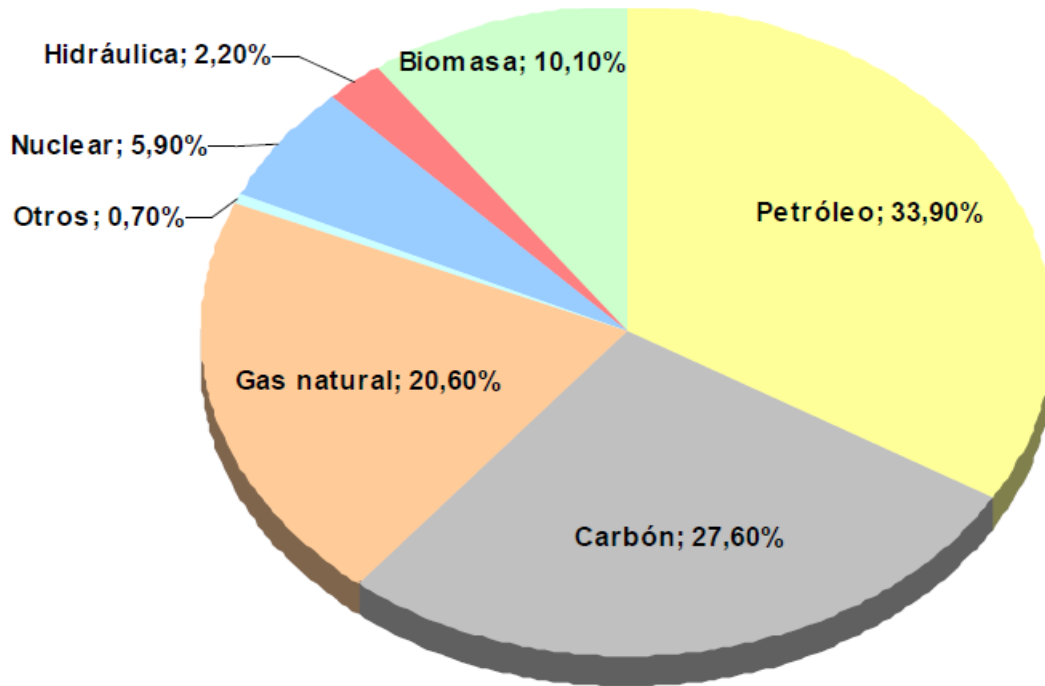


Figura 2.1 Distribución consumo Mundial de energía en 2007 (Fuente IEA “International Energy Agency”)

## 2.2 CAMBIO CLIMÁTICO Y GASES DE EFECTO INVERNADERO

Se llama cambio climático a la modificación del clima con respecto al historial climático a una escala global o regional. Poco apropiada, para hacer referencia tan sólo a los cambios climáticos que suceden en el presente, utilizándolo como sinónimo de calentamiento global. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático usa el término “cambios atmosféricos”. Tales cambios se producen a muy diversas escalas de tiempo y sobre todos los parámetros climáticos: temperatura, precipitaciones, nubosidad o fenómenos extremos. Son debidos tanto a causas naturales como antropogénicas. El término “climático climático” suele usarse sólo para referirse al cambio por causas humanas: Por lo tanto, por "cambio climático" se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.



Los gases de efecto invernadero son aquellos capaces de absorber las radiaciones emitidas por la superficie terrestre. El efecto invernadero es un fenómeno natural responsable de que la vida sea posible en la tierra. La temperatura media del planeta es de unos 15 °C, sin este efecto la temperatura sería mucho más baja.

El Sol activa el clima de la Tierra, irradiando energía en longitudes de ondas cortas predominantemente en la parte visible o casi visible (por ejemplo ultravioleta) del espectro. Aproximadamente una tercera parte de la energía solar que alcanza la zona superior de la atmósfera terrestre se refleja directamente de nuevo al espacio. Las dos restantes terceras partes son absorbidas por la superficie y, en menor magnitud, por la atmósfera. Para equilibrar la energía entrante absorbida, la Tierra debe, como promedio, irradiar la misma cantidad de energía al espacio. Como la Tierra es mucho más fría que el sol, ésta irradia en longitudes de onda mucho más largas, sobre todo en la parte infrarroja del espectro. La atmósfera, con la participación de las nubes, absorbe gran parte de esta radiación térmica emitida por los suelos y el océano y la vuelve a irradiar a la Tierra. Esto es lo que se denomina efecto invernadero.

Las paredes de vidrio de los invernaderos reducen el flujo del aire e incrementan la temperatura del aire dentro. De forma análoga, pero mediante un proceso físico diferente, el efecto invernadero de la Tierra calienta la superficie del planeta. Sin el efecto invernadero natural, la temperatura promedio de la superficie terrestre estaría por debajo del punto de congelamiento del agua. Por tanto, el efecto invernadero natural hace posible la vida tal como la conocemos. Los dos gases más abundantes en la atmósfera, el nitrógeno (que abarca el 78% de la atmósfera seca) y el oxígeno (que abarca el 21%), apenas ejercen efecto invernadero. El efecto invernadero proviene de las moléculas más complejas y mucho menos comunes. El vapor de agua es el gas de efecto invernadero más importante y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el segundo en importancia. El metano, el óxido nitroso, ozono y varios otros gases presentes en la atmósfera en pequeñas cantidades contribuyen también al efecto invernadero.



Los principales gases de efecto invernadero son:

- *Dióxido de carbono*: El dióxido de carbono ha aumentado su concentración en la atmósfera debido al uso de combustibles en el transporte, los sistemas de calefacción y aire acondicionado de edificaciones, la producción de cemento y otros bienes. Con la deforestación se libera  $\text{CO}_2$  y se reduce la absorción de este gas por las plantas. El dióxido de carbono se libera también en procesos naturales como la descomposición de la materia vegetal.
- *Metano ( $\text{CH}_4$ )*: El metano ha aumentado como resultado de las actividades humanas relacionadas con la agricultura, la distribución del gas natural y los vertederos. También hay procesos naturales en los que se libera metano, como por ejemplo, en los humedales. Las concentraciones de metano no están aumentando actualmente en la atmósfera porque su tasa de crecimiento disminuyó en los últimos decenios.
- *Óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ )*: Como resultado de las actividades humanas se emite también el óxido nitroso con el uso de fertilizantes y la quema de combustibles fósiles. Los procesos naturales de los suelos y los océanos también liberan  $\text{N}_2\text{O}$ .
- *Hidrofluorocarbonos (HFC)*: Las concentraciones de halocarbonos han aumentado básicamente debido a las actividades humanas. Los procesos naturales también han sido una fuente pequeña. Entre los halocarbonos principales se incluyen los clorofluorocarbonos (como CFC- 11 y CFC- 12), que se utilizaban extensivamente como agentes de refrigeración y en otros procesos industriales antes de que se conociese que su presencia en la atmósfera causara el agotamiento del ozono en la estratósfera. Las altas concentraciones de clorofluorocarbonos han ido disminuyendo como resultado de las regulaciones internacionales implementadas para proteger la capa de ozono.



- *Perfluorocarbonatos (PFC)*: Son subproductos de la fundición del aluminio y del enriquecimiento del uranio. Sustituyen también a los clorofluorocarbonos en la fabricación de semiconductores.
- *Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>)*: Se utiliza mucho en la industria pesada para el aislamiento de equipos de alta tensión y como auxiliar en la fabricación de sistemas de refrigeración de cables y de semiconductores.
- *Ozono*: El ozono es un gas de efecto invernadero que se produce y destruye continuamente en la atmósfera debido a reacciones químicas. En la tropósfera, ha aumentado la concentración de ozono como resultado de las actividades humanas en las que se liberan gases tales como monóxido de carbono, hidrocarburos y óxido de nitrógeno, que reaccionan químicamente produciendo el ozono. Como se menciona anteriormente, los halocarbonos liberados como consecuencia de las actividades humanas destruyen el ozono en la estratósfera y han abierto el hueco de ozono sobre la Antártida.

En la siguiente figura (2.2) se muestra gráficamente como ha ido incrementando las emisiones anuales mundiales de gases de efecto invernadero y los sectores que lo producen.

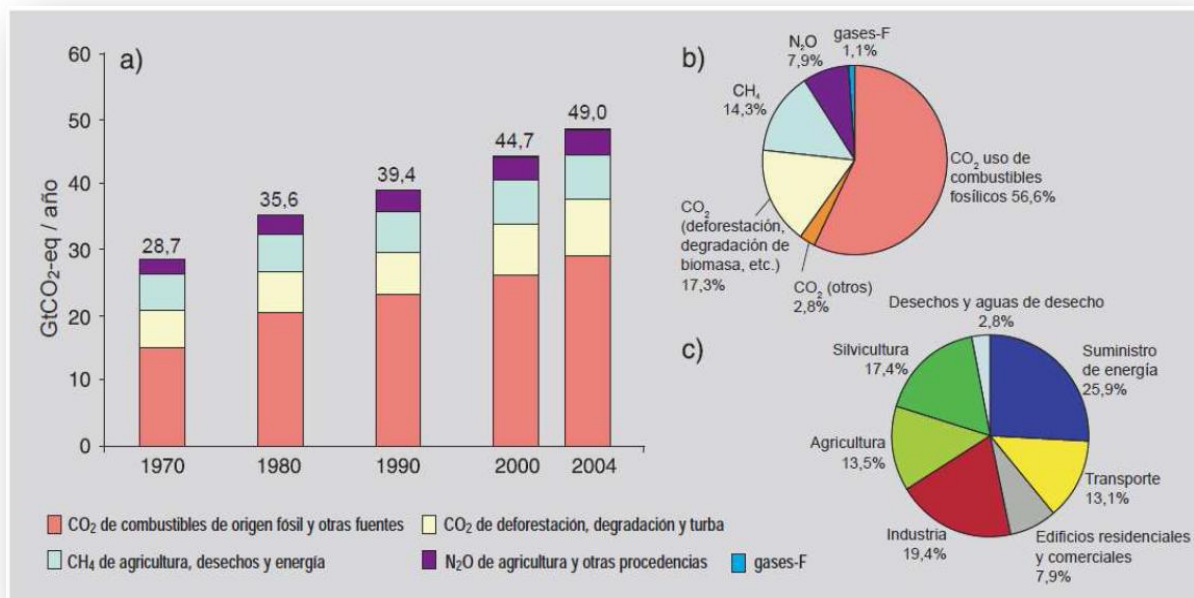


Figura 2. 2 a) Emisiones anuales mundiales de GEI (Gases de efecto invernadero) antropógenos; b) parte proporcional que representa diferentes GEI antropógenos respecto de las emisiones totales en 2004; c) parte proporcional que representan diferentes sectores en las emisiones totales de GEI antropógenos en 2004. (Fuente IPCC “Intergovernmental panel on climate change”)





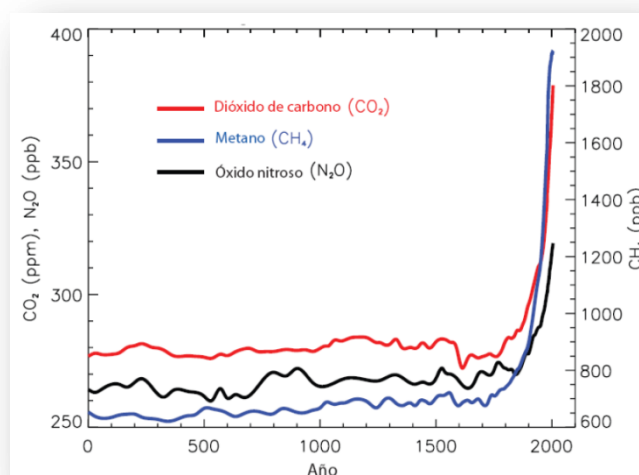
La Organización de las Naciones Unidas, a través del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático IPCC (Por sus siglas en inglés Intergovernmental Panel on Climate Change), considera en el Informe del Grupo de Trabajo I del Cuarto Informe de Evaluación que el calentamiento global es inequívoco y se debe a la acción humana con una probabilidad superior al noventa por ciento.

La Unión Europea, para prevenir las consecuencias negativas debidas al calentamiento global, considera que la temperatura media global superficial de la Tierra no debería incrementarse más de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales. Para ello, la concentración de CO<sub>2</sub> debería mantenerse muy por debajo de 450 partes por millón en volumen (ppmv).

### 2.3. DÍOXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>)

El CO<sub>2</sub> es el gas de efecto invernadero (GEI) de origen antropogénico más importante. Es un gas incoloro, inodoro y no venenoso. En el aire se encuentra en pequeñas proporciones. Es moderadamente soluble en el agua formando ácido carbónico H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Se forma en la combustión del carbono o sus derivados, especialmente los hidrocarburos (C + O<sub>2</sub> = CO<sub>2</sub>).

A partir de la revolución industrial (segunda mitad del siglo XVIII) la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera ha aumentado de 280 ppm hasta un rango de 300 a 350 ppm (Para los



cálculos que se realizaran se tomará 0.030 %); como se puede observar en la figura 2.3, este aumento contribuye al aumento de la temperatura global del planeta (0.6 °C en los últimos 100 años aproximadamente).

Figura 2. 3 Concentración de gases de efecto invernadero del año 0 a 2005 (Fuente IPCC)



La combustión de recursos fósiles supone el 75-90% de todas las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera por parte del ser humano. Otras fuentes de origen antropogénico son la producción de cementos, el transporte o la fabricación de aceros.

Las cantidades de dióxido de carbono emitidas a la atmósfera como resultados de la generación de una unidad de potencia varía fuertemente dependiendo de la fuente utilizada y del nivel de eficiencia con el que opera el proceso. La combustión del carbón es la más intensiva en cuanto a emisiones se refiere comparada con el fuel o el gas natural ya que presenta una relación carbono-hidrógeno mayor.

En la Figura 2. 4 Se muestran los principales países emisores de de CO<sub>2</sub>

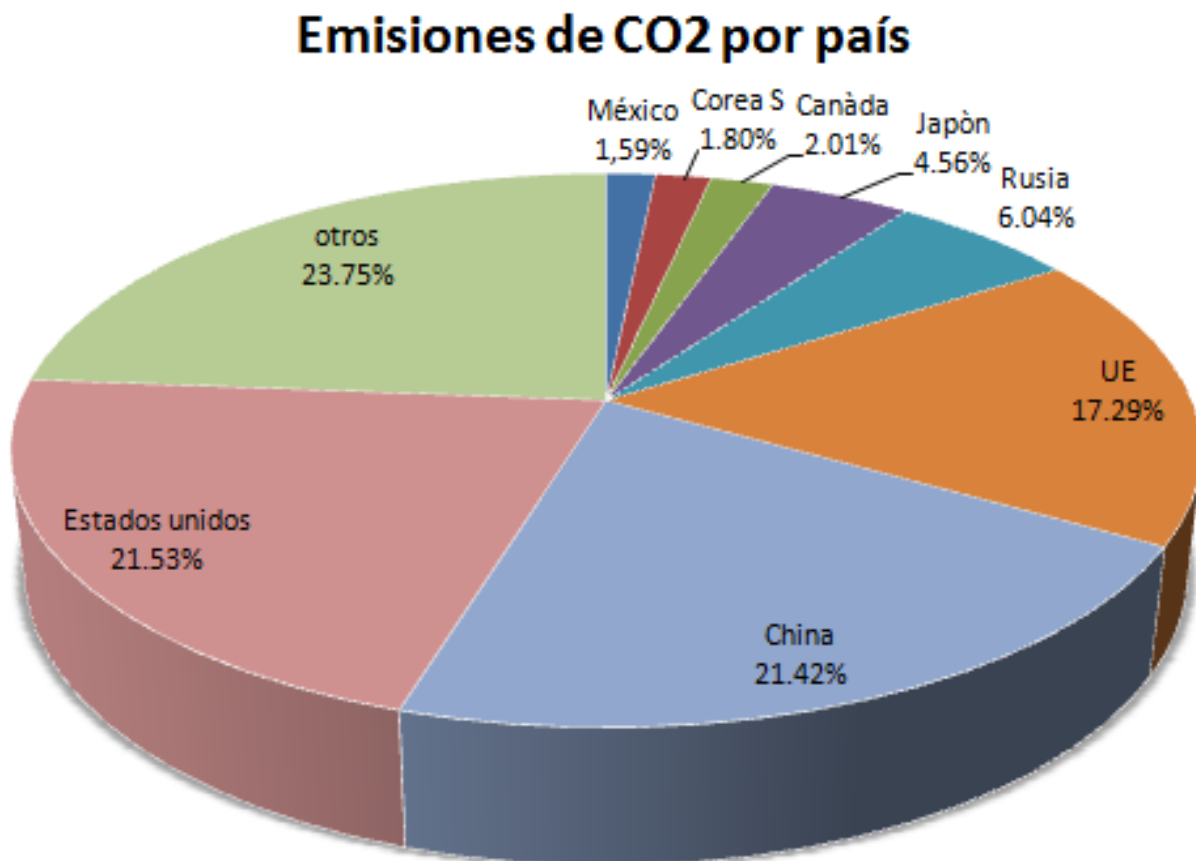


Figura 2. 4 Estructura mundial de las emisiones de CO<sub>2</sub> en 2007 (Fuente IEA “International Energy Agency”)



## 2.4 IMPLICACIONES PARA MÉXICO DEL PROTOCOLO DE KIOTO

México genera el 1.59% de los gases de efecto invernadero, con emisiones per cápita que corresponden al promedio mundial de cuatro toneladas de bióxido de carbono por habitante por año en quema de combustibles fósiles.

El apoyo al Protocolo (VER ANEXO 3 Protocolo Kioto) por parte de México no es fortuito. En el año de 1999, México tuvo unos de los peores años que ha vivido en las últimas dos décadas a causa de desastres naturales, de acuerdo con la Secretaría de Gobernación. La causa fue el cambio climático.

En 1999 se tuvieron que destinar 6 mil 700 millones de pesos para reconstruir caminos, escuelas, viviendas, hospitales y pagar empleos temporales a mexicanos afectados por lluvias, inundaciones, sequías y un temblor de 7.4 grados Richter.

México está interesado en cumplir con el Protocolo debido a los efectos que está teniendo con el clima mundial. Las inundaciones que mataron en México a más de 400 personas y dejaron otras 270,000 sin techo en los primeros años del siglo XXI, son sólo una señal de las cosas que están por ocurrir con nuestro clima.

En muchas regiones, también están en aumento los brotes de enfermedades transmitidas por el agua u originadas en ella, que a menudo ocurren durante el período cuando se verifica el fenómeno de El Niño, una corriente de agua cálida originada en el Océano Pacífico que provoca graves trastornos en el clima mundial. El Niño del período 1997-1998 fue el más potente del siglo XX y sus impactos se sintieron en todo el mundo porque causó extremadas sequías e incendios en Asia, naciones mediterráneas, la Amazonia, la selva tropical mexicana, Centroamérica y la costa este de Estados Unidos.

El ex presidente Vicente Fox Quesada afirmó que la entrada en vigor del Protocolo de Kioto es un primer paso en la dirección correcta, y señala que para frenar el cambio climático es necesario un trabajo de cooperación y corresponsabilidad.

Se prevé que en 25 años habrá en México ascensos de temperatura hasta los 54.5 grados y gran escasez de agua potable. Además, se prevé el resurgimiento de enfermedades transmitidas por mosquitos, desaparición de playas y mayores inundaciones. .



En el 2008, México y la Unión Europea han refrendado su apoyo al Protocolo de Kioto y convinieron en realizar consultas al más alto nivel que contribuyan al éxito de las negociaciones en el marco de la Convención de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. En la Primera Reunión del Diálogo de Política Sectorial en Medio Ambiente y Cambio Climático México-Unión Europea en Bruselas, Bélgica se establece un grupo de trabajo sobre cambio climático que se ocupará de intercambiar experiencias en el desarrollo de políticas ambientales, incluyendo mecanismos de mercado para la promoción de tecnologías tendientes a reducir la emisión de gases de efecto invernadero.

Además, fomentar la cooperación en ciencia y tecnología, así como promover estudios de vulnerabilidad y estrategias de adaptación al cambio climático.

La Comisión Europea respaldó la Estrategia Nacional de Cambio Climático de México, y ofreció promover proyectos en este país dentro del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) del Protocolo de Kioto para reducir gases de efecto invernadero y aumentar la captura de carbono.



## CAPÍTULO 3

### REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Como hemos observado en el capítulo anterior, la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera ha estado incrementado de manera exponencial en últimos años, es por eso que cada día es más urgente encontrar alternativas para reducir esta concentración, una de las maneras más prácticas y económicas, sería utilizar nuevas fuentes de energía, evitando así la quema de combustibles fósiles; sin embargo la dependencia de este recurso natural no renovable lo hace difícil, otra manera es mediante torres de absorción de  $\text{CO}_2$  y en este capítulo se pretende ampliar conocimientos sobre la absorción. Se estudiarán, desde un punto de vista descriptivo las partes y dispositivos más importantes de una columna de platos así como los parámetros de diseño más destacables. Aunque no se diseñará la columna propiamente dicha, utilizaremos algunos criterios y ecuaciones de diseño para caracterizar nuestra columna de absorción.

#### 3.1 PRINCIPIOS DE ABSORCIÓN

La absorción aplicada a los procesos de purificación de gases puede clasificarse dependiendo de la interacción entre los componentes del gas y el absorbente:

- *Absorción física:* En este proceso el componente a eliminar de la corriente de gas es más soluble en el líquido que los demás componentes, pero no hay reacción química con el absorbente. La concentración en la fase líquida depende de la presión parcial del componente en la fase gaseosa. Un ejemplo es la absorción de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono en el dimetil éter de polietilenglicol (proceso Selexol).
- *Absorción con reacción reversible:* Este tipo de absorción implica una reacción química entre el componente gaseoso que se absorbe y un componente de la fase líquida. Un ejemplo es la absorción de  $\text{CO}_2$  con aminas. Con un aumento de temperatura se puede desorber el componente que pertenecía a la fase gas. Presenta una curva de equilibrio no lineal y la velocidad de reacción afecta al coeficiente de absorción.
- *Absorción con reacción irreversible:* El producto de reacción que se forma no se descompone para regenerar el absorbente. Ejemplo de ello es la absorción de  $\text{CO}_2$  en  $\text{NaOH}$ .



### 3.2 SELECCIÓN DE EQUIPO DE CONTACTO

La elección del tipo de contacto para la columna de absorción es un parámetro fundamental en el proceso. La función principal de este equipo es crear una elevada interfase líquido-gas para mejorar el proceso de transferencia de materia. Normalmente se emplean los siguientes mecanismos:

- Dividir el gas en pequeñas burbujas que pasan por una fase de líquido continua (columna de platos).
- Difusión del líquido en películas delgadas a través de un flujo continuo de fase gaseosa (columnas de relleno).

Los dos tipos de equipos de contacto pueden ser usados en los diferentes procesos de purificación de gases, son intercambiables en gran medida aunque los requerimientos específicos y las condiciones de operación definen el equipo. Los equipos de contacto gas-líquido también pueden ser clasificados en columnas por etapas (varios contactos individuales), columnas diferenciales (contacto continuo) y columnas pseudo-equilibrio (combinan contacto continuo y etapas).

Cada tipo tiene sus ventajas y desventajas, como se muestra a continuación

#### 3.2.1 COLUMNAS DE RELLENO FRENTE A COLUMNAS DE PLATOS

La diferencia de costo entre las columnas de platos y de relleno es significativa, siendo más costosa una columna de relleno, en ocasiones este factor determina el tipo de contactor. Por otra parte, la eficiencia en una columna de relleno es mayor que en una columna de platos.

- *Condiciones que favorecen a las columnas de relleno:*
  1. Columnas de pequeño diámetro.
  2. Medios corrosivos.
  3. Destilaciones críticas a vacío, donde son imprescindibles caídas de presión bajas.
  4. Bajas retenciones de líquido (si el material es térmicamente inestable).
  5. Líquidos que forman espuma (debido a que en columnas de relleno la agitación es menor).



- *Condiciones que favorecen a las columnas de platos:*
  1. Cargas variables de líquido y/o vapor
  2. Presiones superiores a la atmosférica
  3. Bajas velocidades de líquido
  4. Gran número de etapas y/o diámetro
  5. Elevados tiempos de residencia del líquido
  6. Posible ensuciamiento (las columnas de platos son más fáciles de limpiar)
  7. Esfuerzos térmicos o mecánicos (que pueden provocar la rotura del relleno)

### 3.2.2 PROBLEMAS DE UNA TORRE EMPACADA

- *Inundación.* Esta condición ocurre cuando las velocidades del vapor y /o el líquido son tan grandes que la caída de presión del gas es superior a la carga neta de gravedad del líquido, que de esta forma es arrastrado hacia arriba en la columna.
- *Canalización.* La función del relleno es promover la turbulencia de los fluidos y la transferencia de materia mediante la dispersión del líquido que fluye sobre la superficie del relleno y por el interior del mismo Si el flujo del líquido y/o vapor es muy bajo, o si la alimentación líquida no se distribuye uniformemente sobre el relleno, tenderá a descender por las paredes mientras que el vapor circula por la parte central. A velocidades muy bajas puede no haber suficiente líquido para mojar la superficie del relleno.

La inundación y la canalización restringen los intervalos de los flujos de líquido y vapor para la operación de la columna, marcando el límite máximo de operación. Consideraciones de tipo práctico (como fijar una eficacia mínima y una caída de presión máxima) limitan aún más el intervalo de trabajo. Aunque las *columnas de platos* pueden generalmente operar dentro de intervalos más amplios de los flujos de vapor y líquido que las columnas de relleno, tienen también sus propios problemas:



### 3.2.3 PROBLEMAS DE UNA TORRE DE PLATOS

- **Formación de espuma.** Si se forma un nivel de espuma elevado, el líquido es arrastrado por el gas hasta la etapa siguiente y las eficacias de separación disminuyen. Por otra parte, la espuma puede también arrastrar vapor hacia la etapa inferior. En casos extremos, los tubos de bajada del líquido se pueden llenar totalmente de espuma y provocar inundación de una forma análoga a lo que ocurre en columnas de relleno. Por otra parte, las columnas de platos pueden inundarse aún cuando no se forme espuma si las caídas de presión o las velocidades de flujo del líquido son suficientemente grandes para que el nivel de líquido sobrepase el espaciado entre los platos, dando lugar a retroceso del líquido en los tubos de descenso.
- **Arrastre.** Aún cuando el nivel de espuma formado sobre el líquido del plato no es muy alto, si la separación del líquido y el vapor que se han puesto en contacto es inadecuada, parte de esa espuma se mezcla con el líquido del plato superior, disminuyendo así la eficacia. El arrastre se debe con frecuencia a un tamaño inadecuado de los tubos de descenso del líquido o del espaciado entre los platos.
- **Mala distribución del líquido.** Si los platos de la columna son muy grandes o están mal diseñados puede variar la altura del líquido a través del plato dando lugar a un apreciable gradiente hidráulico. Esto puede provocar un flujo no uniforme del gas. Las medidas habituales de prevención consisten en utilizar varios tubos descendentes o pasos y divisiones en los platos, o bien dirigir el flujo de vapor de forma que fuerce el líquido a circular a través del plato.
- **Goteo.** Muchos platos sólo cuentan con la presión del gas para mantener el líquido sobre el plato, de forma que en el punto de goteo, comienza a caer líquido a través de los orificios de los platos. El caso extremo recibe el nombre de vaciamiento.
- **Eficacia.** La eficacia de una columna de platos se mide en función de la eficacia del plato, es decir, en función de la diferencia existente entre la composición de las corrientes que abandonan una etapa con respecto a las composiciones de las mismas en el caso de que estuviesen en equilibrio.

La eficacia de una columna de relleno se mide en función de la eficacia del relleno, que es inversamente proporcional a la altura equivalente a un plato





teórico (HETP). Los valores de la eficacia de los platos y de la HEPT son funciones complejas de muchos factores: temperatura, presión, composición, densidad, viscosidad, difusividad, velocidades de flujo del líquido y vapor, tendencia a la formación de espuma, turbulencia del líquido y del vapor, tamaño de las burbujas.

Las siguientes consideraciones fueron base para elegir una columna de absorción de platos

- Económicamente es más barata que una columna de relleno.
- Es Fácil de limpiar
- No requerimos una absorción elevada.

### 3.3. PARÁMETROS DE DISEÑO

En este apartado tocaremos los principales parámetros de diseño que serán de gran utilidad para la caracterización de la columna de absorción de platos:

- **Capacidad.** Los datos de equilibrio de un sistema establecen el número de etapas de contacto necesarias para producir una determinada separación. Aunque este número de etapas es independiente del flujo de alimentación, las dimensiones físicas del equipo (particularmente el diámetro) aumentarán proporcionalmente con el flujo que circule a su través, siendo tales dimensiones función de la hidrodinámica y del tiempo que se precisa en cada etapa. Es importante que una columna esté diseñada para operar con un intervalo de composiciones y flujos tan alto como sea posible.
- **Cubiertas y platos**  
La torre puede fabricarse de diferentes materiales, según las condiciones de corrosión encontradas. Se utilizan vidrio, metales vidriados, carbón impermeable, plásticos y aun madera, pero con mayor frecuencia metales. Para torres metálicas, las cubiertas son generalmente cilíndricas, debido a su costo. Con el fin de facilitar la limpieza, las torres de diámetro pequeño tienen orificio para las manos.



### 3.4 COLUMNAS DE PLATOS

Las torres de platos son cilindros verticales en que el líquido y el gas se ponen en contacto en forma de pasos sobre platos o charolas. El líquido entra en la parte superior y fluye en forma descendente por gravedad. En el camino, fluye a través de cada plato y a través de un conducto, al plato inferior. El gas pasa hacia arriba, a través de orificios de un tipo u otro en el plato; entonces burbujea a través del líquido para formar una espuma, se separa de la espuma y pasa al plato superior. El efecto global es un contacto múltiple a contracorriente entre el gas y el líquido, aunque cada plato se caracteriza por el flujo transversal de los dos. Cada plato en la torre es una etapa, puesto que sobre el plato se ponen los fluidos en contacto íntimo, ocurre la difusión interfacial y los fluidos se separan. El número de platos teóricos o etapas en el equilibrio en una columna o torre sólo depende de lo complicado de la separación que se va a llevar a cabo y sólo está determinado por el balance de materia y las consideraciones acerca del equilibrio. La eficiencia de la etapa o plato y por lo tanto, el número de platos reales se determina por el diseño mecánico utilizado y las condiciones de operación. Por otra parte, el diámetro de la torre depende de las cantidades de líquido y gas que fluyen a través de la torre por unidad de tiempo.

#### 3.4.1 TIPOS DE PLATOS

Los tipos de platos más comunes son: platos de válvula, platos perforados y platos de caperuzas de borboteo.

*Platos de válvula.* Son platos con orificios de gran diámetro cubiertos por tapaderas móviles que se elevan cuando el flujo de vapor aumenta. Como el área para el paso del vapor varía en función de la velocidad del flujo, los platos de válvula pueden operar eficazmente a velocidades bajas de vapor (las válvulas se cierran).

- *Platos perforados.* Los platos perforados más ampliamente utilizados tienen placas con orificios, circulando el líquido con flujo cruzado a través del plato. Sin embargo, también se utilizan platos de “lluvia” con flujo en contracorriente y sin tubos de descenso, en los que el líquido y el vapor fluyen a través de los mismos orificios. Existen diseños híbridos de platos perforados y de válvulas, combinando las ventajas



de la baja caída de presión y bajo coste de los platos perforados con el amplio intervalo de operación de los platos de válvula. Tanto en los platos perforados como en los de válvula el contacto se produce entre el vapor que asciende a través de los orificios y la masa de líquido que se mueve a través del plato.

En la Figura 3.1 se observa que el líquido baja por el tubo de descenso alcanzando el plato en el punto A. Aunque no se representa el vertedero de entrada, éste se utiliza frecuentemente para evitar el flujo ascendente de vapor a través del tubo de bajada del líquido. En el intervalo comprendido entre A y B se representa líquido claro de altura  $h_{li}$ , debido a que habitualmente no hay orificios en esta parte del plato. Desde B hasta C es la llamada parte activa, con una elevada aireación y una altura de espuma  $h_f$ . La altura de líquido  $h_l$  en el manómetro de la derecha puede considerarse como la carga de líquido claro sedimentado de densidad  $\rho_l$ . La espuma comienza a colapsar en C, ya que no hay perforaciones desde C hasta D. La altura de líquido a la salida es  $h_{lo}$  y el gradiente hidráulico es  $(h_{li} - h_{lo})$  (que en este caso es prácticamente cero) (gradiente hidráulico es la diferencia de nivel del líquido necesario para que el líquido fluya a través del plato).

Los diámetros de los orificios están generalmente comprendidos entre 0.3 y 1.3 cm, siendo preferidos los más grandes cuando existe la posibilidad de ensuciamiento. Un área grande de orificios contribuye al goteo, mientras que un área de orificios pequeña aumenta la estabilidad del plato pero incrementa también la posibilidad de arrastre e inundación, así como la caída de presión. Con frecuencia el tamaño de los orificios y su espaciado son diferentes en las distintas secciones de la columna con el fin de acomodarse a las variaciones de flujo. Otra práctica frecuente es dejar sin construir algunos orificios con el fin de flexibilizar el posible aumento futuro de la carga de vapor.

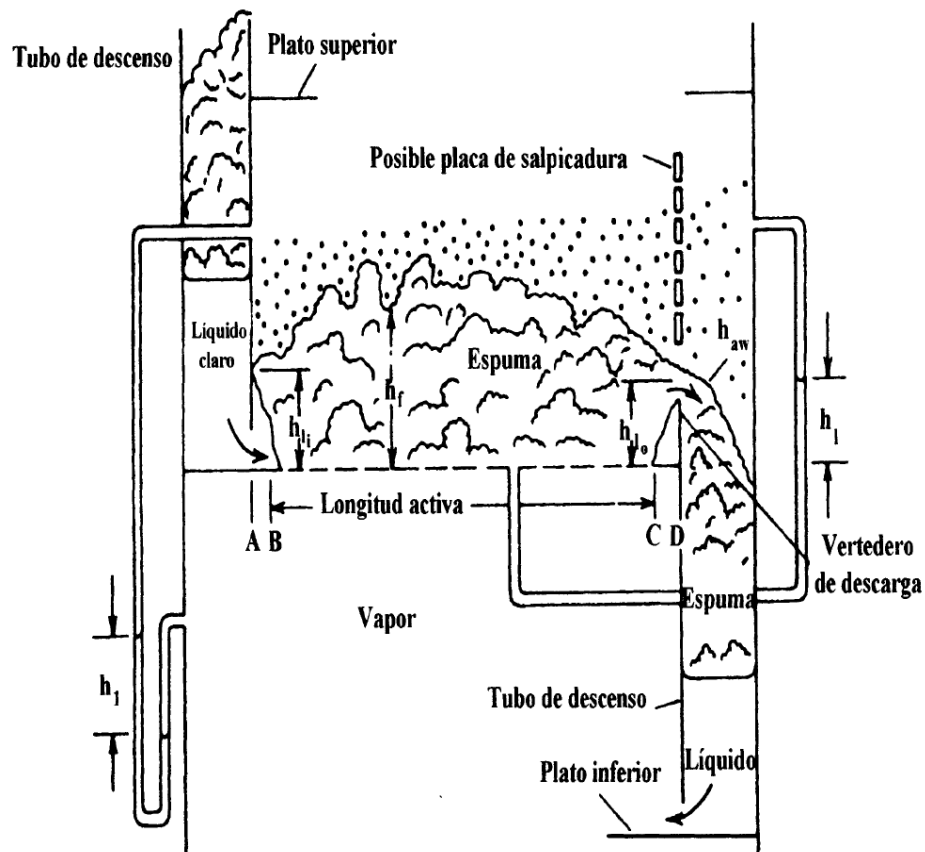


Figura 3.1. Plato perforado.

- *Platos de caperuza de borboteo.* Una caperuza de borboteo consta de un tubo ascendente sujeto al plato mediante soldadura, tornillos, etc., y una caperuza sujeta al tubo ascendente o al plato. Aunque la mayor parte de las caperuzas tienen ranuras (de 0.30 a 0.95 cm de ancho y 1.3 a 3.81 cm de longitud), algunas no las presentan, saliendo el vapor de la caperuza por debajo del reborde inferior que está a una distancia inferior a 3.81 cm del plato. El tamaño de las caperuzas comerciales está comprendido entre 2.54 y 15 cm de diámetro.

Generalmente están dispuestas sobre el plato en los vértices de triángulos equiláteros formando filas orientadas en dirección perpendicular al flujo. Con estos datos se quiere poner de manifiesto el hecho de que a la hora de diseñar cualquier dispositivo, nada se deja al azar sino que todo detalle es el resultado de estudios teóricos y experimentales conducentes al buen funcionamiento del equipo.



Las únicas ventajas de los platos de caperuzas de borboteo son:

- a) no permiten el goteo si están adecuadamente unidos a la torre
- b) hay una gran abundancia de material publicado y de experiencia de los usuarios.

Las desventajas son:

- a) generan elevadas caídas de presión
- b) las eficacias de etapa son de un 10 - 20 % inferiores que en platos perforados o de válvula
- c) estos platos son más caros que los platos perforados y que los de válvula.

De los tipos de platos presentados anteriormente elegimos por ser económicos, fáciles de fabricar y su eficiencia considerablemente buena los “Platos perforados”

### 3.4.2 DIÁMETRO DE LA COLUMNA

El límite habitual de diseño viene dado por la inundación de arrastre que se origina por un excesivo transporte de líquido arrastrado por el vapor hasta el plato superior. El arrastre de líquido puede deberse al arrastre de gotitas en suspensión por el vapor ascendente o a la proyección de partículas de líquido por los chorros de vapor que se forman en las perforaciones del plato, en las válvulas o en las ranuras de las caperuzas. Souders y Brown correlacionaron satisfactoriamente los datos de inundación de arrastre para 10 columnas comerciales de platos suponiendo que el transporte de las gotitas en suspensión controla la magnitud del arrastre. Para la velocidad incipiente de inundación o arrastre  $U_f$ , la gotita está suspendida de tal forma que la suma vectorial de las fuerzas de gravitación, flotación y rozamiento que actúan sobre la gotita es cero:

**ECUACIÓN (3.1)**





En la Figura 3.2 se observa que el valor de CF depende del espaciado entre los platos y de la relación

— — **ECUACIÓN (3.5)**

Donde:

L = velocidad de flujo molar de la fase líquida

V = velocidad de flujo molar de la fase vapor

ML = peso molecular de la fase líquida

MG = peso molecular de la fase gas

El valor de C necesario para calcular la  $U_f$ . Se obtiene a partir de la Figura 3.2, corrigiendo CF para tener en cuenta la tensión superficial, la tendencia a la formación de espuma y la relación entre el área de los orificios de gas ( $A_h$ ) y el área activa del plato ( $A_a$ ), de acuerdo con la relación empírica

**ECUACIÓN (3.6)**

Donde:

FST = factor de tensión superficial =  $(\text{tensión superficial del líquido (dinas/cm)/20})^{0.2}$

FF = factor de espuma (para sistemas que no forman espuma

FF vale 1; para muchos absorbedores puede valer  $>0.75$ )

FHA = 1.0 para  $A_h/A_a > 0.10$  y  $5(A_h/A_a) + 0.5$  para  $0.1 > A_h/A_a > 0.06$

Es típico que el diámetro de la columna DT se base en el 85 % de la velocidad de inundación  $U_f$  utilizando C con CF tomado de la Figura 3.2, Considerando la relación entre el flujo molar de vapor y la velocidad de inundación

— **ECUACIÓN (3.7)**

donde A = área total de la sección transversal de la columna y



$A_d$  = área ocupada por los tubos de descenso del líquido, se puede calcular el valor de  $DT$  como:

ECUACIÓN (3.8)

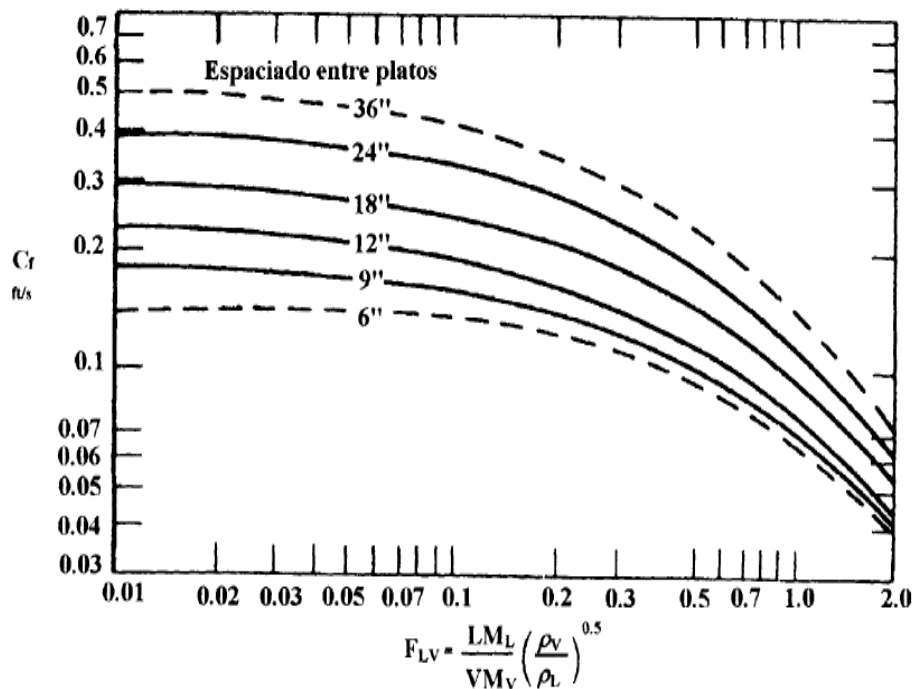


Figura: 3.2 Capacidad de inundación de arrastre

### 3.4.3 ALTURA DE LA COLUMNA

Para calcular el diámetro de la columna utilizando la Figura 3.2 es preciso especificar el espaciamiento entre los platos. A medida que aumenta el espaciamiento entre los platos aumenta la altura de la columna, pero su diámetro disminuye. Para un amplio intervalo de condiciones se considera óptimo un espaciamiento de 24 pulgadas (60 cm), que es el mínimo requerido para un fácil mantenimiento. Sin embargo, para columnas de pequeño diámetro y gran número de etapas puede ser deseable un espaciamiento menor, mientras que se utilizan con frecuencia espaciamientos mayores para columnas de gran diámetro y bajo número de etapas.

Cuando los flujos de vapor varían apreciablemente de un plato a otro, puede variarse el diámetro de la columna, el espaciamiento entre los platos y el área de los orificios con el fin de reducir el coste de la columna y asegurar la eficacia de la operación.





Tomando como base las estimaciones del número de platos reales y el espaciado entre los platos, se puede calcular la altura de la columna entre los platos de cabeza y cola (como se ha comentado al hablar de las columnas de relleno, el cálculo del número de pisos de una columna será estudiado ampliamente en temas posteriores). Adicionando 1.2 m por encima del plato superior para separar el líquido arrastrado y 3 m por debajo del plato de cola para disponer de suficiente capacidad de remansamiento, se puede estimar la altura total de la columna. Si la altura es superior a 64 m (equivalente a 100 platos con un espaciado de 24 pulgadas) puede ser preferible acoplar dos o más columnas en serie en vez de una sola columna. (La torre de destilación más alta del mundo está instalada en el complejo de Shell Chemical Company en Deer Park, Texas. La columna fracciona etileno y tiene 338 ft de alto y 18 ft de diámetro (101.4 m de alto x 5.4 m de diámetro).

#### 3.4.4 DISPOSITIVOS INTERIORES DE LAS COLUMNAS

- *Salpicaderas.* Se utilizan a veces para evitar salpicaduras del líquido sobre los tubos descendentes al pasar a una sección adyacente del mismo plato.
- *Placas con hileras de púas.* Se colocan en la parte superior de los conductos de descenso o de los vertederos para romper la espuma y evitar su arrastre.
- *Vertederos de entrada.* Se utilizan para asegurar el cierre de líquido en los conductos de descenso cuando se opera con elevados flujos de vapor o bajos flujos de líquido.
- *Colectores y cierres de entrada y salida.* Se utilizan para asegurar el cierre de líquido bajo todas las condiciones.
- *Paneles de salpicadura.* Se utilizan para prevenir salpicaduras y promover la uniformidad de flujo.
- *Agujero de hombre.* El diámetro del agujero es un factor importante en el diseño de los platos, ya que afecta al número de piezas que se han de instalar y al diseño del plato.
- *Cerchas, anillos, soportes.* En torres de gran diámetro los platos se soportan sobre viguetas acanaladas. El método a utilizar para sujetar los platos a la carcasa requiere experiencia y una cuidadosa planificación. Los platos deben de estar nivelados para asegurar una distribución uniforme del flujo.

En la Figura 3.3 se muestran algunos de estos dispositivos.

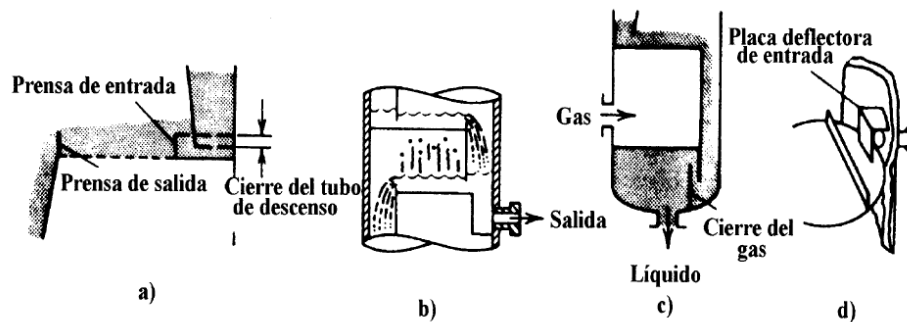


Figura 3.3 Dispositivos internos de columnas. a) Vertedero de entrada. b) Colector de salida. c) Cierre de gas. d) salpicaderas.

Además de especificar el diámetro y la altura de una columna, también se incluye otros los elementos que la componen. A continuación se citan algunos de los parámetros que se deben tener en cuenta:

- *Diámetro de los orificios de los platos:* el área de los orificios debe ser tal que a la velocidad de vapor más baja todavía no se produzca el goteo del líquido.
- *Dimensiones del borde del plato:* la altura del borde del plato determina el volumen de líquido sobre el plato, lo que es un factor importante para determinar la eficacia del plato.
- *Distancia entre los centros de los orificios:* dependerá del número de orificios activos que se requieren y del área de orificio determinada. En general, no debe ser inferior a 2 veces el diámetro del orificio, y el intervalo normal es de 2 - 4 veces.
- *Diseño del tubo de descenso del líquido:* su área debe ser tal que el nivel de líquido y de espuma que se alcanza en el tubo sea inferior al que hay en el plato (del que desciende el líquido). Si el nivel alcanzado es mayor la columna se inundará. El nivel debe ser superior al existente en el plato al que llega el líquido, para que exista cierre hidráulico, y el vapor no ascienda por el conducto de bajada de líquido.

Para todo ello existen ecuaciones empíricas, gráficos, correlaciones, valores promedio, que conducen a un primer valor aproximado. Si los resultados que se logran, entonces nos conducen a valores adecuados de velocidad de goteo, de arrastre, pérdida de carga, y las dimensiones del equipo serán válidas. En caso contrario se deben modificar hasta optimizar el diseño.



## CAPÍTULO 4

### ESTUDIO DE LA ABSORCIÓN DEL SISTEMA CO<sub>2</sub> EN NaOH

La absorción de dióxido de carbono en soluciones acuosas de hidróxidos fuertes es probablemente el proceso de absorción con reacción que más ha sido estudiado en forma experimental. Los primeros trabajos efectuados han sido expuestos muy claramente por Sherwood y Pigford, posteriormente por Hikita (1952) y actualmente por Pao-Chi Chen (2012) en su artículo “*Absorption of Carbon Dioxide in a Bubble-Column Scrubber*”. En este capítulo mostraremos información de los investigadores citados que será de gran utilidad para caracterizar la columna de absorción.

#### 4.1 ANTECEDENTES

Entre las justificaciones científicas y económicas para el empleo de compuestos de sodio figuran:

1. Solubilidad completa en agua sin formación de incrustaciones
2. Las reacciones con CO<sub>2</sub> son directas y pueden representarse mediante ecuaciones químicas equilibrada

Sin embargo la reglamentación ambiental prohíbe la eliminación de elevadas concentraciones de compuestos de sodio en aguas naturales y los presuntos usuarios de soluciones depuradoras con base en sodio deberán consultar los reglamentos locales sobre contaminación del agua, en nuestro caso es algo que no nos preocupa puesto que la concentración de los compuestos sodio no es muy elevada, inclusive puede ser neutralizado con ácido cítrico.

Compuestos tales como carbonato de sodio, bicarbonato de sodio, carbonato de sodio e hidróxido de sodio (sosa cáustica) o mezclas de los mismos, son eficaces para la absorción de CO<sub>2</sub>. Cada uno de dichos compuestos reacciona con CO<sub>2</sub> para producir carbonato de sodio Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.



## 4.2 REACCIONES EFECTUADAS EN LA COLUMNA

Cuando el dióxido de carbono es absorbido en una solución de hidróxido, debemos considerar dos reacciones

**REACCIÓN (1)**

**REACCIÓN (2)**

Para las reacciones [1 y 2], las constantes de equilibrio a dilución infinita a 20 °C son:

—, — **ECUACIÓN (4.1)**

La reacción [2] puede considerarse como instantánea, mientras que la reacción [1] se efectúa a velocidad finita, siendo la constante cinética a dilución infinita y 20 °C aproximadamente

— **ECUACIÓN (4.2)**

Cuando existe una alta concentración de hidróxido libre, la reacción [2] es completamente desplazada hacia la izquierda. De hecho, la razón de bicarbonato a carbonato está dada por:

————— ———— **ECUACIÓN (4.3)**

Y puede suponerse nula siempre en cuando la concentración de hidróxido sea mayor, de,

—

La reacción global que se lleva a cabo durante la absorción de dióxido de carbono en soluciones de hidróxido puede plantearse como la sigue:

**REACCIÓN (3)**

Y en nuestro sistema en particular la reacción es:

**REACCIÓN (3.1)**



Y su velocidad de reacción está dada por:

**ECUACIÓN (4.4)**

La dependencia de la temperatura de la reacción está gobernada por una energía de activación de 13,250 cal; el valor de  $k$  también depende de la fuerza iónica de la solución de acuerdo a la ecuación

**ECUACIÓN (4.5)**

Donde a dilución infinita está dada por:

— (T en K) **ECUACIÓN (4.6)**

Siendo el valor de A igual a 0.13 para soluciones de hidróxido de sodio, y el valor de la fuerza iónica (I)

- **ECUACIÓN (4.7)**

La presión de vapor del dióxido de carbono sobre soluciones que contienen hidroxilo libre es despreciable, por lo tanto la reacción [3] se puede considerar irreversible.

### 4.3 SOLUBILIDAD DE CO<sub>2</sub> EN NaOH

No es posible medir por métodos convencionales la solubilidad del dióxido de carbono en soluciones con los cuales reacciona (Hw), pero gracias a los múltiples trabajos que se han realizado se ha podido llegar a la siguiente expresión.

— **ECUACIÓN (4.8)**

Mientras que el coeficiente de Henry (H) puede ser calculado por la siguiente expresión

Log — **ECUACIÓN (4.9)**

Donde el efecto de la temperatura sobre  $K_s$  no es muy grande y el valor a cualquier temperatura puede tomarse aproximadamente como igual al valor a 25 °C



# CAPÍTULO 5

## CARACTERIZACIÓN DE LA COLUMNA DE ABSORCIÓN

### 5.1 CARACTERIZACIÓN DE LA COLUMNA DE ABSORCIÓN.

En este capítulo se describen las operaciones de transferencia de masa que caracterizan la columna de absorción construida con materiales reciclados. La columna de absorción funciona con flujos a contra corriente con el fin de efectuar el contacto líquido-gas; a continuación se representa dicha operación en la figura 5.1

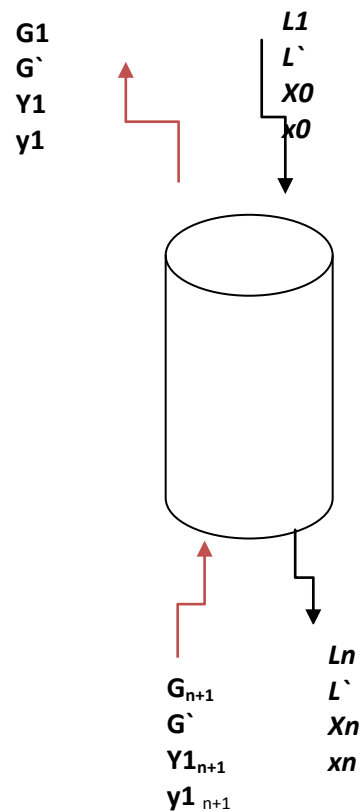


Figura 5.1 Absorción en contra corriente

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del aire se absorbe utilizando una solución de  $\text{NaOH}$  0.80 M, en donde es válido el modelo de la ley de Henry que solo aplica para gases poco solubles y presiones parciales menores o iguales a 1 atm.



Se utiliza el valor del coeficiente de Henry de 33.25 atm/ unidad de fracción molar, según la tesis **Gas-Liquid Contact Area of Random and Structured Packing** “ Ian David Wilson, B.S.” Presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas, May 2004.

## 5.2 LINEA DE EQUILIBRIO DEL SISTEMA CO<sub>2</sub>-NaOH

Con coeficiente de Henry para el sistema CO<sub>2</sub>- NaOH se grafica la línea de equilibrio a partir de las siguientes ecuaciones (ecuación 5.1 y figura 5.2):

$$x = \frac{p^*}{H} \quad \text{ECUACIÓN (5.1)}$$

Dónde:

$p^*$  = la presión parcial del gas en la fase gaseosa [atm]

x= fracción molar [—————]

H= coeficiente de Henry [—————].

Sustituyendo:

$$p^* = 33.25 x$$

Las siguientes expresiones se utilizan en la ecuación 5.1, en donde la presión de trabajo es 0.7698 atm

$$y^* = \frac{p^*}{P} \quad \text{ECUACIÓN (5.1.1)}$$

$$Y = \frac{y^*}{1-y^*} \quad \text{ECUACIÓN (5.1.2)}$$



$$X = \dots \text{ ECUACIÓN (5.1.3)}$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores obtenemos como resultado la siguiente ecuación y tabla:

\_\_\_\_\_

Ecuación para la línea de equilibrio del absorbedor, graficada en la figura 5.2

LÍNEA DE EQUILIBRIO				
p* (atm)	x	y	X	Y
0,0002	6,01504E-06	0,00025981	6,01507E-06	0,000259875
0,0003	9,02256E-06	0,00038971	9,02264E-06	0,000389864

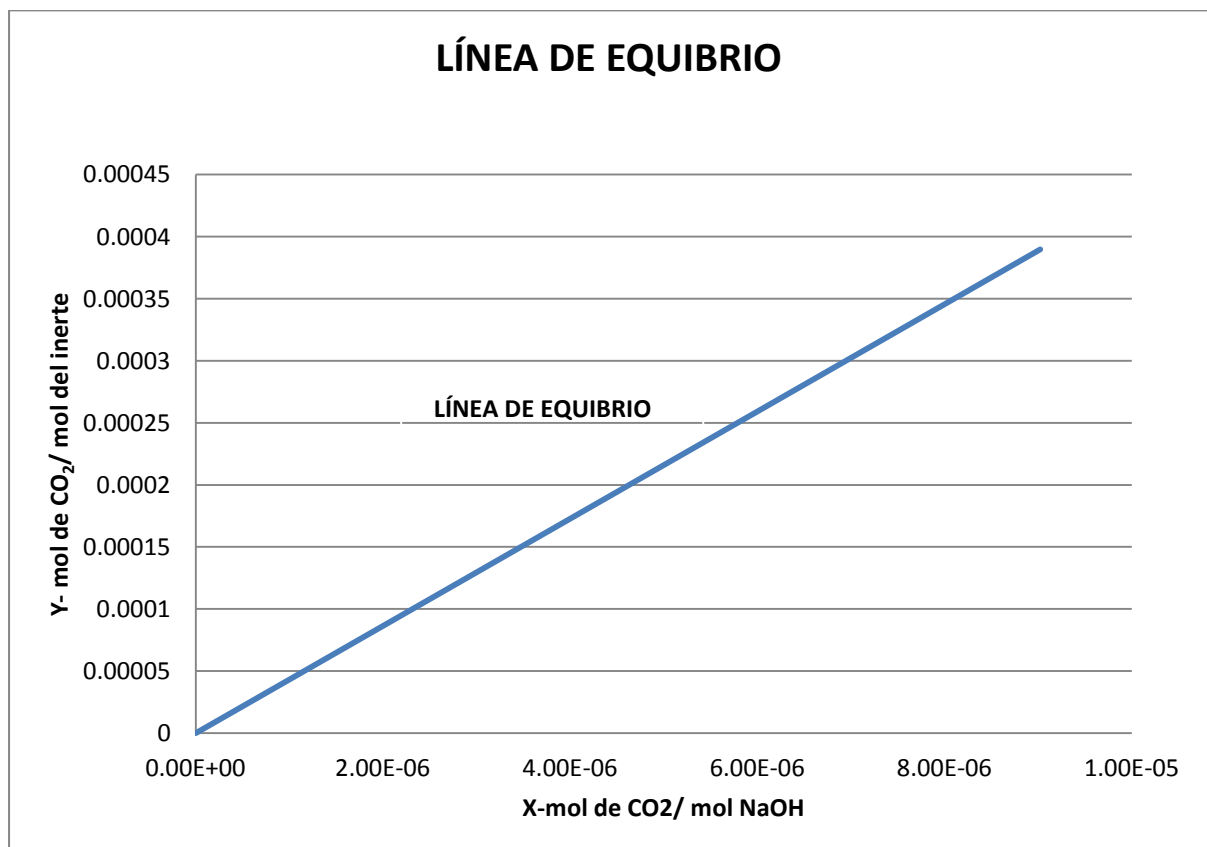


Figura 5.2 “Línea de equilibrio”





### 5.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de absorción propuesto en esta tesis está definido por los materiales utilizados. Se conocen sus características geométricas y el valor del flujo del aire, motivo por el cual se realizan los cálculos en reversa para conocer el flujo óptimo de líquido. A continuación mencionaremos algunas de las características de los materiales que utilizamos:

- Diámetro de las latas de jabón = 0.24m
- Flujo del ventilador = 50 CFM

- **Cálculo del área de sección normal (S)**

Donde el diámetro de la columna = 0.24m

$$S = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$S = \frac{\pi (0.24)^2}{4} = 0.04524 \text{ m}^2$$

● ————— ECUACIÓN (5.2)

- **Cálculo de la velocidad másica (G):** Una vez conocida el área de sección normal (S), se realizan los siguientes cálculos:

$$G = \frac{Q}{S} \text{ ECUACIÓN (5.3)}$$

En donde

**El flujo volumétrico (Q):** El valor de la velocidad del gas es determinado midiendo la velocidad del flujo a la salida de la columna mediante un anemómetro **V = 0.5**

Este valor esta dado por las especificaciones del ventilador 50 CFM.

$$1 \text{ CFM} = 1.7 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q = V \times A = V(\pi r^2) \text{ ECUACIÓN (5.4)}$$

$$Q = 0.522 \text{ m/s} \times (\frac{0.24}{2})^2 \times \pi = 0.02361 \text{ m}^3/\text{s} = 85.01 \text{ m}^3/\text{h}$$



- o **Masa del gas de entrada (m)**

$$m = \dots \text{ ECUACIÓN (5.5)}$$

En donde la densidad puede ser calculada mediante la siguiente ecuación

$$\rho = \dots \text{ ECUACIÓN (5.6)}$$

$$\rho = \frac{\dots}{\dots}$$

Sustituyendo los valores

$$m = \dots \text{ 77.65}$$

- o Obteniendo la **velocidad másica (G)** del aire

$$G = \dots \text{ ECUACIÓN (5.7)}$$

$$G = \left( \frac{\dots}{\dots} \right) = 1716.53$$

- **Con la ecuación siguiente calculamos G'**

$$G' = \dots \text{ ECUACIÓN (5.8)}$$

Donde  $y$  es la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire (0.0003) según el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)

$$G' = G (1-y)$$



$$G' = 1716.53 \text{ ———— } (1 - 0.0003) = 1716.015 \text{ ————}$$

Con el fin de conocer la cantidad de masa que circulara en la columna se hace la conversión a Kmol;

$$G' = \frac{\text{—————}}{\text{—————}}$$

$$\text{Moles de gas inerte (aire) } G' = 2676.92 \text{ ————}$$

Moles de CO<sub>2</sub> por hora a la entrada:

$$\text{—————}$$

- **Línea de operación**

En la Columna de absorción entra un flujo de 85 — de aire con el 0.03% <sup>1</sup>de CO<sub>2</sub>. La absorción se verifica a contracorriente, con una solución de NaOH a 0.8M. Para caracterizar la columna de absorción se considera eliminar solo el 50% del CO<sub>2</sub> pues de esta forma la cantidad de platos se ajusta a la construcción, además se logra disminuir la cantidad de flujo de la solución de NaOH.

- **Composición del gas de entrada ( )**

$$\text{—————}$$

Donde (y) es la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire (0.03%)

$$Y_{n+1} = \text{—————} \quad 3.0009 \times 10^{-4} \text{ mol de CO}_2/\text{mol aire}$$

- **La composición de la mezcla gaseosa a la salida de la torre (Y1) :**

<sup>1</sup> Datos del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)



Como se desea eliminar solo el 50% del  $\text{CO}_2$  de la corriente gaseosa. La composición de la mezcla gaseosa a la salida, expresada en relación molar será:

$$1.5 \times 10^{-4} \text{ mol de } \text{CO}_2/\text{mol aire}$$

- **Cantidad de  $\text{CO}_2$  en la solución de NaOH a la entrada es:**

$$0$$

- **Cantidad de  $\text{CO}_2$  en la solución de NaOH a la salida:**

La máxima concentración a la salida de la columna, corresponde al empleo de la mínima cantidad de solución de NaOH 0.8 M, en donde  $X_{\text{salA}} = 6.9 \times 10^{-6}$ , sin embargo para columnas de absorción, el flujo recomendado del líquido para el absorbedor, deberá estar comprendido en el intervalo de **1.1 a 1.5 veces el flujo mínimo**, pues si utiliza menos líquido la composición del líquido saliente será obviamente mayor, puesto que las fuerzas motrices para la difusión son menores y la absorción se vuelve más difícil, por lo tanto se recalculara la  $X_{\text{SalidaB}}$ , considerando que la columna trabajara con el 10% sobre el flujo mínimo del líquido<sup>2</sup>.

- **CALCULO DE L'**

**Calculamos — (pendiente de la línea R de operación del gráfico 5.3)**

$$— = —$$

$$— = 21.739$$

---

<sup>2</sup>- “Relación Mínima liquido- gas para absorbedores” - Treybal Robert E., 1985, Traducción de: mass transfer operations, Segunda Edición, McGraw Hill, México.



$$Si G' = 2676.92 \text{ —————}$$

$$L'_{\text{mín}} = 2676.92 \times 21.739 = 58.1935 \text{ ———}$$

**Al 10% del flujo mínimo de la solución se busca  $X_{\text{salB}}$  (ver gráfico 5.3) ;**

$$L'_{\text{min}} = (58.1935) \times 1.1 = 64.012 \text{ Kmol/h}$$

$$\text{—} = \text{—————}$$

Calculando  $X_{\text{sal}}$

$$X_{\text{sal}} = \text{—————} = 6.269$$

$$\text{—} = 23.9257$$

$$Si G' = 2676.92 \text{ —————}$$

$$L' = 2676.92 \times 23.9257 = 64.047 \text{ ———}$$

$$L' = 64.047 \text{ ———} \quad \text{—} \quad \text{—} \quad 2561.891 \text{ —}$$

$$\rho_L = 1032 \text{ kg/m}^3$$

$$Q_L = 2561.891 \text{ —————} = 2.4824 \text{ —}$$

En la siguiente gráfica se muestra la línea de operación con el punto DR que corresponde a la relación mínima liquido-gas — , mientras el punto DF muestra la línea de operación con el 10% superior al mínimo.(ver figura 5.3) ( ver tabla5.1)

Tabla 5.1 puntos trazados sobre el diagrama X-Y correspondientes a las condiciones de flujo mínimo en el sistema (DR) y las condiciones de trabajo al 10 % sobre el flujo mínimo (DF).

	X	Y
D	0	0,00015009
R	0,0000069	0,00030009
F	0,0000062	0,00030009

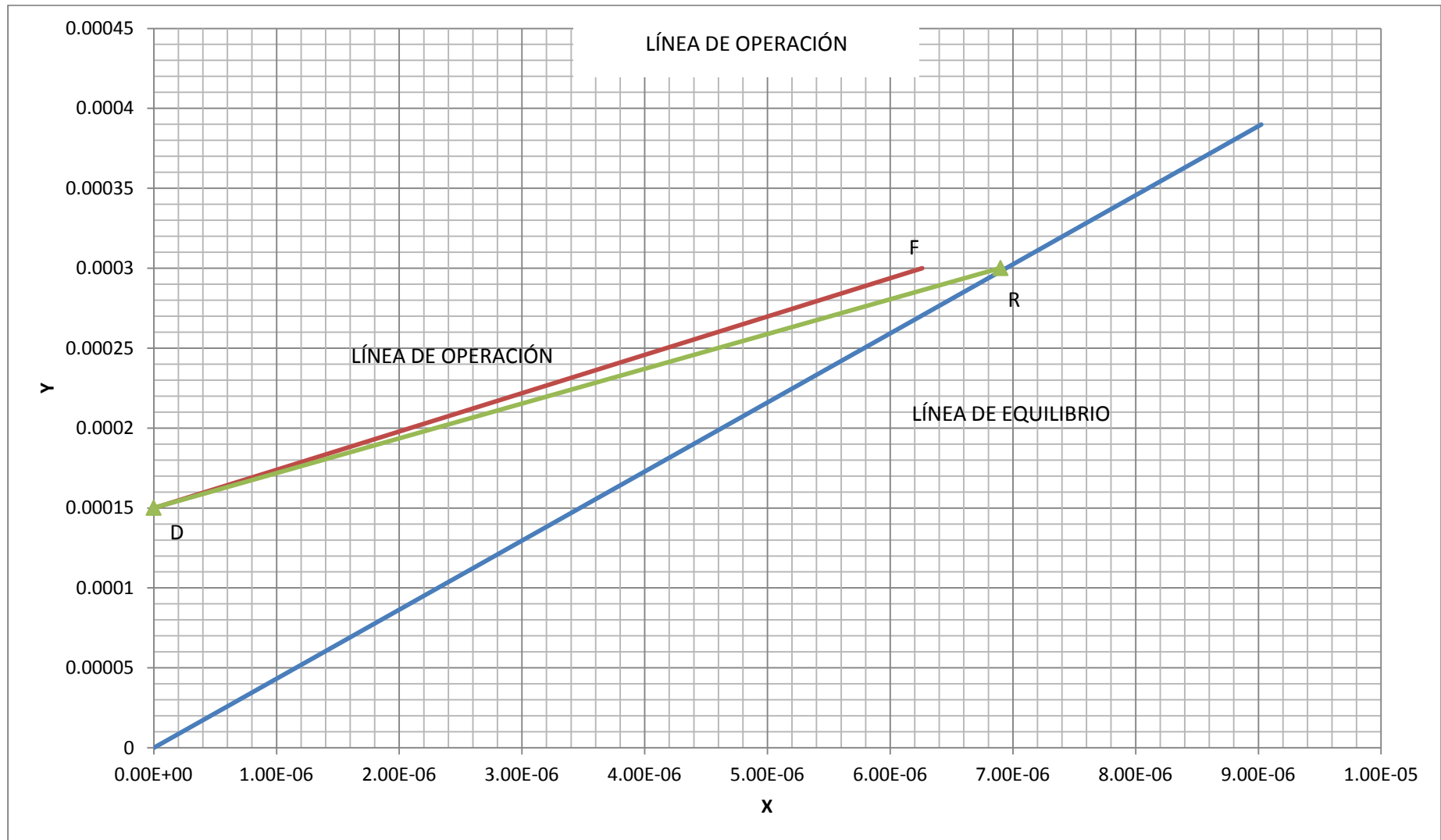


Figura 5.3 Línea de operación condiciones de flujo mínimo en el sistema (DR) y las condiciones de trabajo al 10 % sobre el flujo mínimo (DF).



## 5.4 CÁLCULO DEL NÚMERO DE PLATOS

El cálculo del número de platos se hará usando la ecuación de Kremser-Brown-Souders, así como de forma gráfica ver (figura 5.4).

- **Cálculo Analítico del número de platos**

Cuando pueden considerarse rectas tanto la curva de equilibrio como la línea de operación, el número de etapas teóricas puede calcularse analíticamente. Este caso se presenta frecuentemente cuando se opera con mezclas diluidas de gases y líquidos que cumplen con la ley de Henry.

$$n = \frac{y_1 - y_2}{A} \quad \text{ECUACIÓN (5.8)}$$

$$A = \frac{m}{L} \quad \text{ECUACIÓN (5.9)}$$

**Donde:** El factor de absorción (A) es la relación entre la pendiente de la línea de operación y la de la curva en el equilibrio

-

- Calculando el factor de Absorción (ver ecuación 5.9):

$$A = \frac{m}{L}$$

De la ecuación 5.8:

$$n = \frac{y_1 - y_2}{A}$$

$$n = \frac{y_1 - y_2}{\frac{m}{L}}$$

$$n = \frac{L}{m} (y_1 - y_2)$$

Los métodos utilizados para el cálculo del número de platos arrojan resultados similares, entonces en la manufactura de la columna de absorción se utilizaron 3 platos perforados.

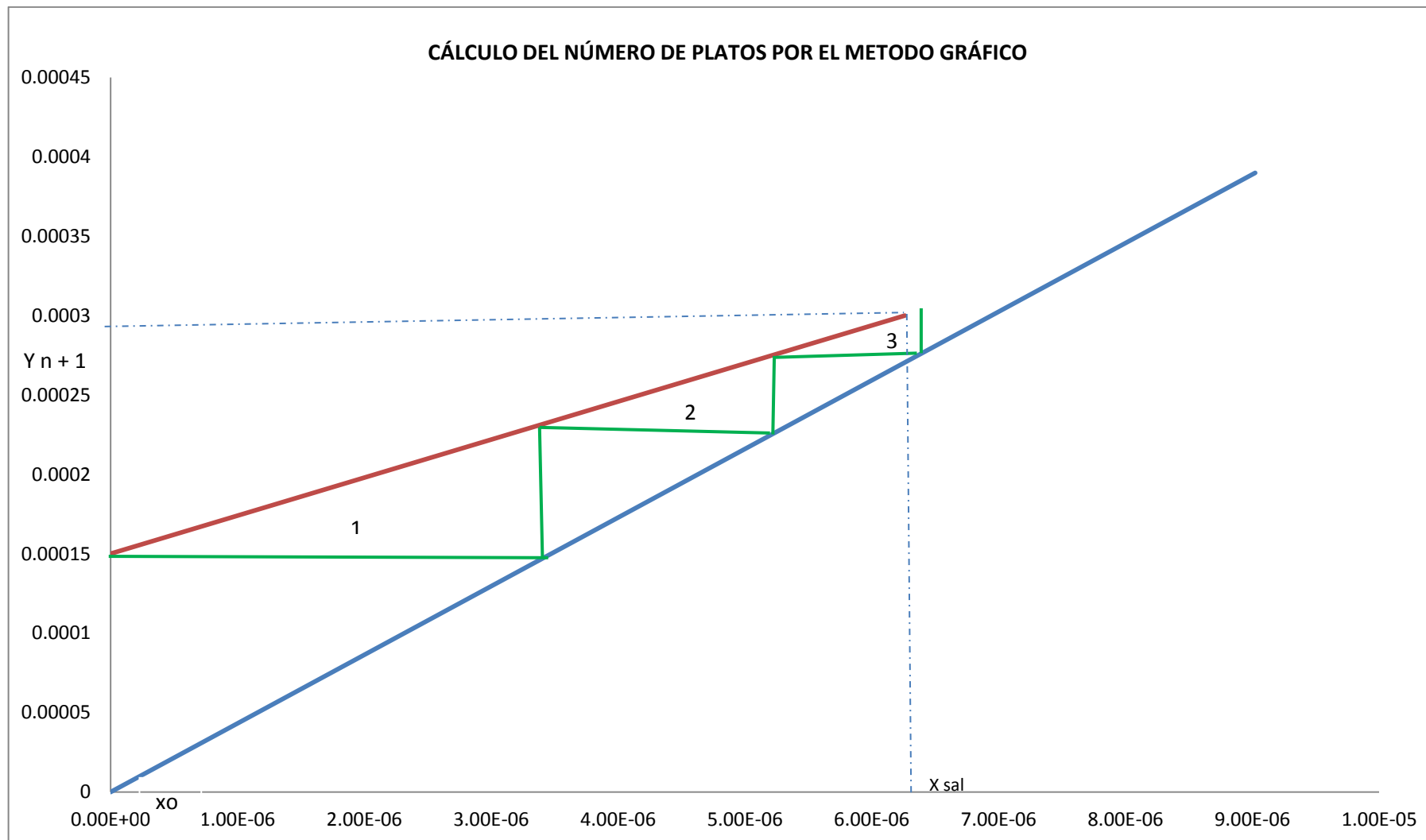


Figura 5.4 Se calculan 3 platos por el método McCabe-Thiele.





## 5.5 ARREGLO DE LOS PLATOS

Datos:

1. Fase gaseosa: Aire 2.67 \_\_\_\_\_ con 0.03% en mol de CO<sub>2</sub>
2. Fase líquida: NaOH con un exceso del 10% = 64.03 \_\_\_\_\_
3. Temperatura de operación: Ambiente (25°C)
4. Presión de operación: 0.7698 atm

### I. Flujos de gas y líquido

Flujo de fase gaseosa: \_\_\_\_\_

Flujo de fase líquida: \_\_\_\_\_

### II. Perforaciones del plato: El diámetro de los orificios de los platos ( $d_o$ ) es 6 mm (0.006m) con 18 mm entre centros de los orificios(Pt)

- Área de orificio ( $A_o$ )

\_\_\_\_\_ ECUACIÓN (5.10)

\_\_\_\_\_

- Área de orificio / Área Activa

\_\_\_\_\_ ECUACIÓN (5.11)

\_\_\_\_\_

- Área activa



### III. Determinación de los factores $\alpha$ y $\beta$

De la tabla 6.2 del Treybal los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  son los siguientes

Tabla 6.2 Dimensiones recomendadas para torres de platos perforados

1. Constantes de inundación $C_F$ [Eqs. (6.29) and (6.30)], $d_o < 6 \text{ mm } (\frac{1}{4} \text{ in})$					
Rango de $\frac{A_p}{A_o}$	Rango de $\frac{L'}{G'} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5}$	Unidades de $t$	Unidades de $o$	Unidades $\alpha, \beta$ de $V_F$	
> 0.1	0.01–0.1, utilizar valores en 0.1	m	N/m	m/s	$\alpha = 0.0744t + 0.01173$
					$\beta = 0.0304t + 0.015$
		en	dinas/cm $\times 10^{-3}$	ft/s	$\alpha = 0.0062t + 0.0385$ $\beta = 0.00253t + 0.050$
< 0.1 Multiplicar $\alpha$ y $\beta$ por $5A_o/A_p + 0.5$					

- $\alpha = 0.0744t + 0.01173 = 0.03033$
- $\beta = 0.0304t + 0.015 = 0.0226$

Donde  $t$  es el espaciamiento entre platos, en este caso es de 0.25 m

### IV. Constante de inundación ( $C_F$ )

$$\text{ECUACIÓN (5.12)}$$

Donde  $\sigma$  es la tensión superficial en N/m

En la siguiente figura 5.5 podemos determinar la tensión superficial: Con una fracción en masa de 0.031 y a una temperatura ambiente de aproximadamente 300 K, por lo tanto la tensión superficial es de 0.095 N/m

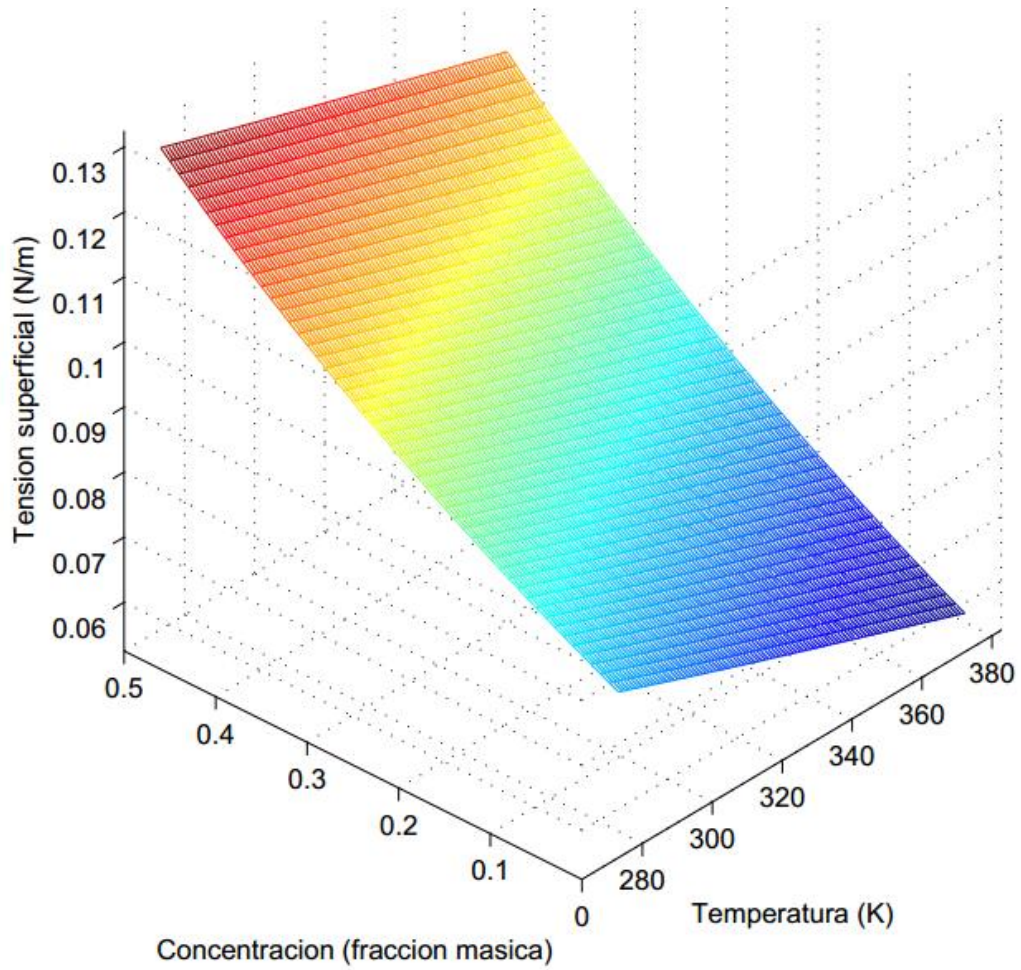


Figura 5.5 tensión superficial de soluciones de NaOH-agua (Tomada de la tesis para Magister, Valentina Echeverri Ocampo, Control de los Evaporadores de los Laboratorios de Procesos Productivos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Universidad Nacional de Colombia 2005)

V. Velocidad superficial del gas

— ECUACIÓN (5.13)

VI. Velocidad de goteo o lagrimeo ( $V_{ow}$ )



— ——— — —  
**ECUACIÓN (5.14)**

Donde

—

————— ————— ————— ————— —————

**VII. Arrastre**

De acuerdo a los cálculos anteriores tenemos lo siguiente:

- Empleándose una velocidad del 50% de la velocidad de inundación
- 1.68
- 
- — —

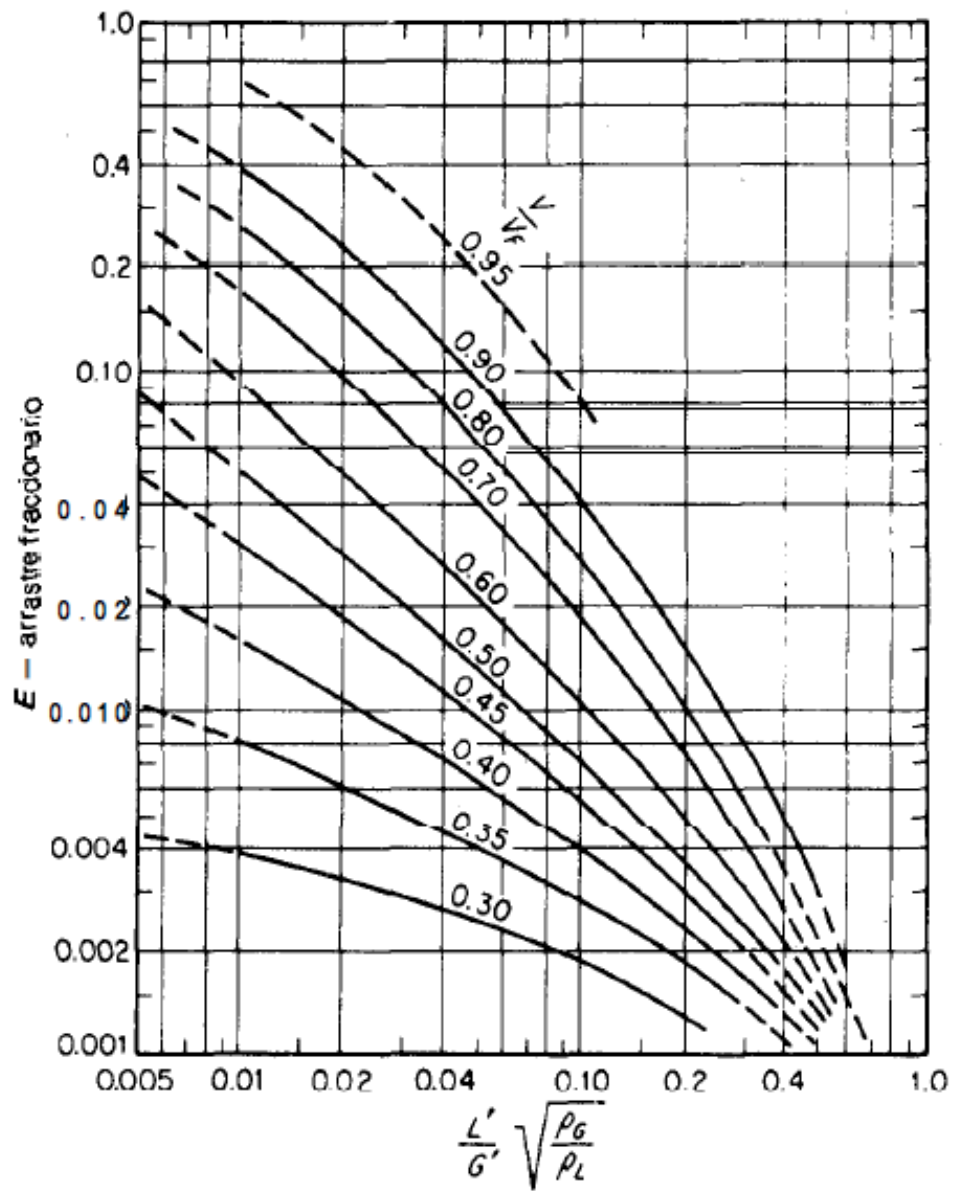


Figura 5.6 "Fracción de arrastre"

Mediante la figura 5.6 podemos determinar la fracción de araste  $E=0.0015$  o el 0.15%



## 5.6 CÁLCULO DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA

En el cálculo de número de unidades de transferencia, se realiza mediante la ecuación integral (5.15) a partir de las líneas de operación y equilibrio (Ver figura 5.7)

NOG — - — ECUACIÓN (5.15)

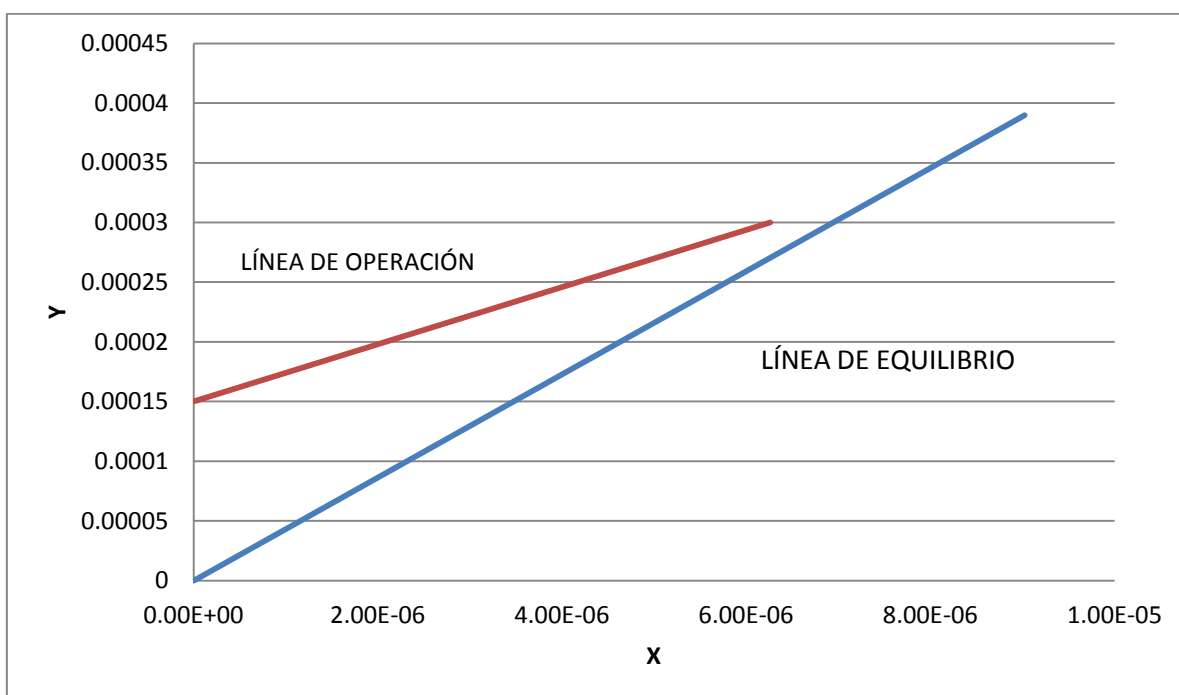


Figura 5.7 Línea de operación y equilibrio

En donde Y1 y Y2 están definidos por las concentraciones de la corriente gaseosa a la entrada y a la salida de la columna.

$$Y1 = 1.5009 \times 10^{-4} \text{ mol de CO}_2/\text{mol aire}$$
$$Y2 = 3.0009 \times 10^{-4} \text{ mol de CO}_2/\text{mol aire}$$

En la siguiente tabla se muestran los valores resumidos para el cálculo del término que corresponde a la integral:



X	Y	Y*	Y-Y*
0	0.000150010	0.000000007	0.00015
1.00E-06	0.000173972	0.000043202	0.00013
1.50E-06	0.000185953	6.48065E-05	0.00012
2.00E-06	0.000197934	0.000086411	0.00011
2.50E-06	0.000209915	0.000108016	0.00010
3.00E-06	0.000221896	0.00012962	0.00009
3.50E-06	0.000233877	0.000151225	0.00008
4.00E-06	0.000245858	0.000172829	0.00007
4.50E-06	0.000257839	0.000194434	0.00006
5.00E-06	0.000269820	0.000216038	0.00005
5.50E-06	0.000281801	0.000237643	0.00004
6.00E-06	0.000293782	0.000259247	0.00003
6.30E-06	0.000300971	0.00027221	0.00003

Se ha de efectuar la integración con los límites desde  $1.5009 \times 10^{-4}$  a  $3.0009 \times 10^{-4}$ , ver el área bajo la curva figura 5.8

$1/(Y-Y^*)$	$dY/Y-Y^*$
6665.9112	0.15972856
7647.01384	0.09161887
8254.46876	0.09889679
8966.76022	0.10743075
9813.59084	0.11757663
10837.0541	0.12983874
12098.8476	0.14495629
13693.1904	0.16405811
15771.5025	0.18895837
18593.5815	0.2227697
22645.6968	0.27131809
28956.1315	0.20815405
34769.4265	0.0833145
suma	1.9886



De la ecuación 5.15 se sustituye el término faltante

$$\text{NOG} \quad \text{---} \quad - \quad \text{---}$$

$$\text{NOG} \quad \quad - \quad \text{-----} =$$

$$\text{NOG} = 1.9886 + - \ln 0.9998 = 1.9886$$



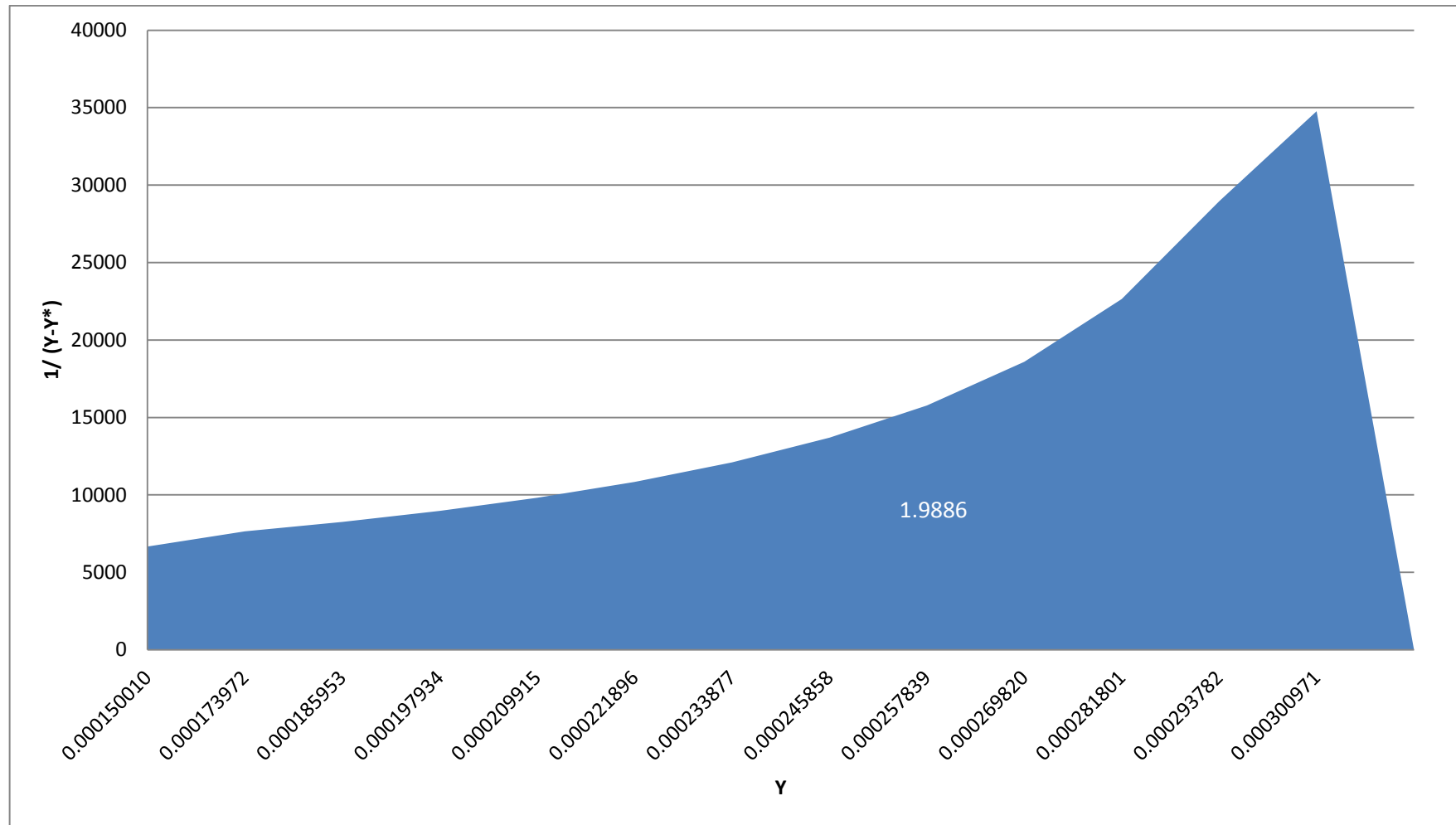


Figura 5.8 Área bajo la curva con límites de 0.00015 a 0.00030009



## 5.7 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA $K_G$

Por lo general, para condiciones en flujo turbulento no es posible calcular coeficientes de transferencia de masa, debido a la imposibilidad para describir matemáticamente las condiciones de flujo. En lugar de esto, se confía en datos experimentales.

En literatura se encuentra que Cryder y Maloney absorbieron  $\text{CO}_2$  en soluciones de dietanol, aminas y sustancias básicas en columnas de absorción, encontrando valores en el rango de 3,4 – 11,9  $\text{kmol/hm}^3 \text{ atm}$ , según la siguiente ecuación (ver ecuación 5.16).

### ECUACIÓN (5.16)

Por lo tanto se utilizará la siguiente expresión anterior, que se encuentra en función de la velocidad másica del líquido para calcular el  $K_{Ga}$ .

$$K_{Ga} = 3.40 X$$

$$K_{Ga} = 3.40 X 3.7506 = 12.75 \text{ kmol/hm}^3$$

Con el desarrollo de la expresión anterior, se observa que al no encontrar influencia del flujo de gas sobre el coeficiente global, indica claramente que toda la resistencia a la transferencia se encuentra en la fase líquida.



## CAPÍTULO 6

### DESCRIPCIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN E LA COLUMNA Y SUS DISPOSITIVOS

#### 6.1 CONSTRUCCIÓN FÍSICA DE LA TORRE

- **Materiales**

- 4 Latas de Jabón o de alimentos (diámetro:0.24m Altura 0.25 m)
- Lamina galvanizada perforada calibre 22.
- Bomba de pecera que suministra un flujo de 2500 L/h.
- Ventilador de computadora de 12 x 12 x 2.5 cm ( LxAxH) Rotación 2500RPM +/- 10% flujo de 50cfm.
- Mangueras de PVC ¾ in
- Base de metal
- Botella de pvc

- **CUERPO DE LA COLUMNA**

Con los cálculos realizados en el capítulo 5, se procedió a la construcción de este dispositivo hecho materiales reciclados, como a continuación se describe:

1.- Se tenía muy claro que el cuerpo de la torre tendría que hacerse materiales resistentes al medio ambiente, por ello se pensó realizarlo con latas metálicas, en este caso se reutilizaron las que contienen detergente comercial. Ver figura 6.2

2.- La lámina perforada que es desecho de una fabrica dedicada a la construcción de casetas acústicas, sirvió para construir los platos de la columna. Estos platos se cortaron con tijeras para lámina al diámetro de las latas.



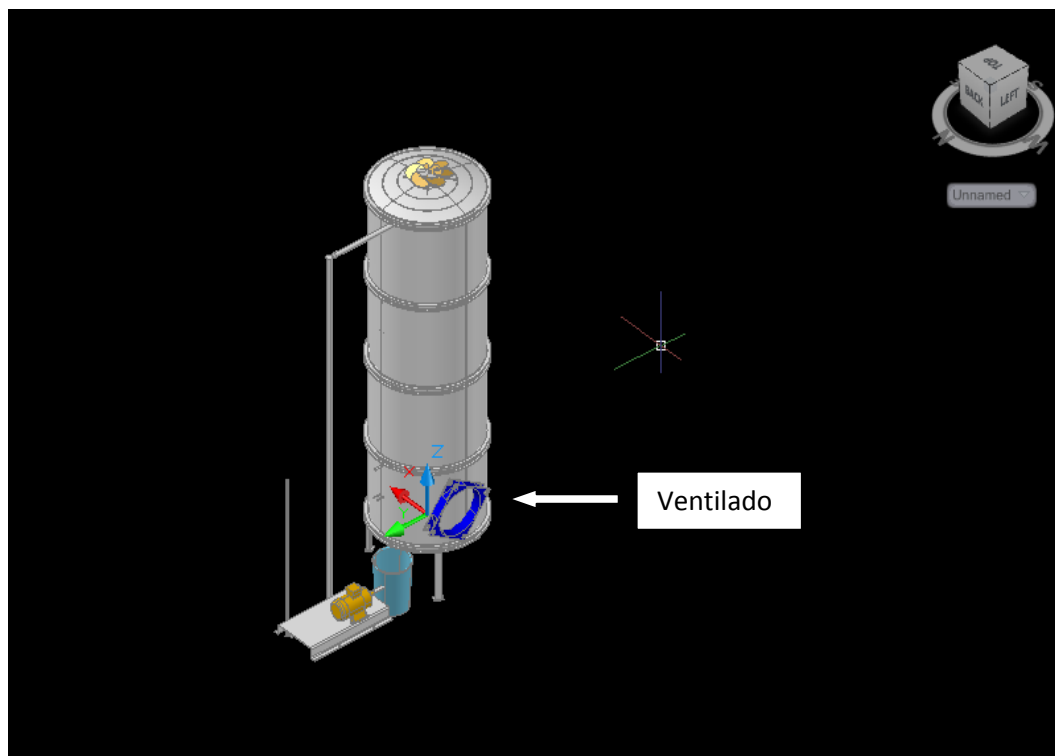


Figura 6.1 ventilador en el cuerpo de la columna de absorción.



Figura 6.2 interior de la columna de absorción.



Figura 6.3 “Arreglo triangular de los platos”



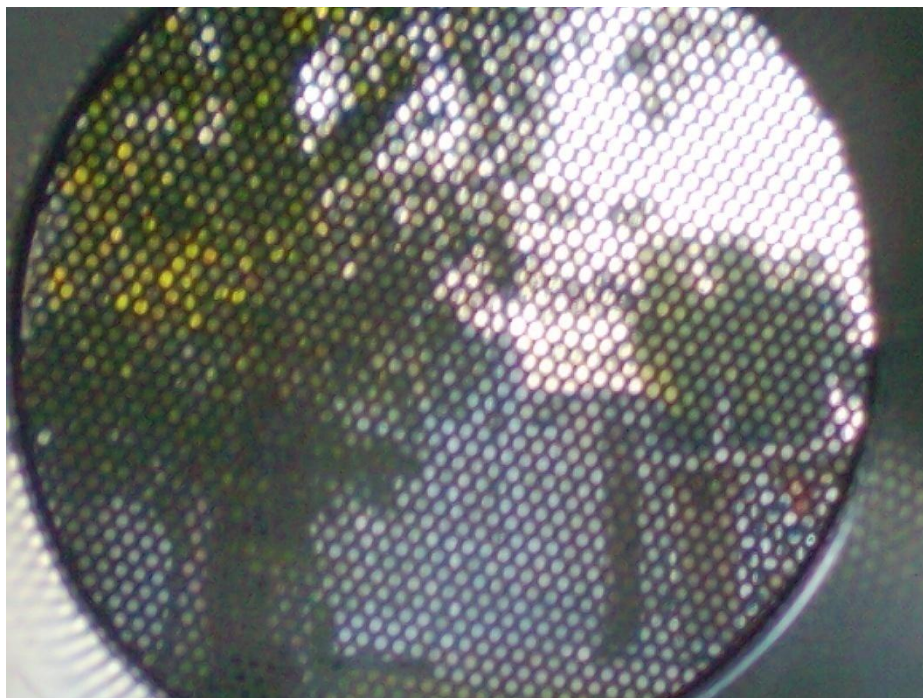


Figura 6.4 “Platos ensamblados a las bases del cuerpo de la columna”

- **Dispositivo controlador del flujo de aire**

Se utilizó un ventilador de computadora que suministra aire de manera constante a una flujo de 50cfm



Figura 6.5 “ventilador de computadora”



Figura 6.6 “Ventilador instalado en la parte inferior de la columna”

- **Dispositivo controlador del flujo del líquido absorbente**

La bomba de pecera se puede regular en 3 flujos, 2500 L/h 2000 L/h y 1200 L/h



Figura 6.7 bomba de pecera.



- **Distribuidor del flujo del líquido**

Siendo una manguera de PVC DE  $\frac{3}{4}$  in, con ranuras cada 2 cm para asegurar la distribución adecuada del líquido absorbente.



Figura 6.8 manguera de PVC

- **Deposito de la solución y residuos**

Para el suministro de la solución se utiliza un recipiente de plástico con capacidad de 10 lts, en donde se sumerge la bomba de tipo acuario.



Figura 6.9 “Recipiente para almacenar la solución absorbente”

- **Columna en azotea para la absorción de CO<sub>2</sub> aire.**



Figura 6.9 Columna de absorción instalada en la azotea de un hogar



Figura 6.10 ventilador que proporciona un flujo de aire constante a la columna de absorción.



## CAPÍTULO 7

### METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

#### 7.1 MATERIALES Y MÉTODOS

La columna de absorción realizada con materiales reciclados se puso en funcionamiento 1 hora, para verificar experimentalmente su eficiencia, durante 10 días tomando muestras de 10 ml para su posterior análisis.

Para arrancar la columna y alcanzar el estado estacionario se procedió a lo siguiente:

- Se llena el depósito de alimentación y almacenamiento (Cubeta) con solución de hidróxido de sodio 0.8 M
- Se conecta la bomba y se sumerge en la solución de NaOH 0.8M para suministrar un flujo continuo
- Se conecta el ventilador de aire para mantener un flujo constante.

##### 7.1.1 PLAN DE TRABAJO DE LA TOMA DE ALÍCUOTAS

La torre estuvo en función durante 2 semanas por una hora de lunes a viernes, con flujos constantes de aire y de líquido absorbente, las pruebas de la cantidad absorbida de CO<sub>2</sub> se hicieron semanalmente con las siguientes fechas:

	Fecha
<b>Día 1</b>	11-Abril-2012
<b>Día 2</b>	12-Abril-2012
<b>Día 3</b>	13-Abril.2012
<b>Día 4</b>	14-Abril-2012
<b>Día 5</b>	15-Abril-2012
<b>Día 6</b>	24-Abril.2012
<b>Día 7</b>	25-Abril-2012
<b>Día 8</b>	26-Abril-2012
<b>Día 9</b>	27-Abril.2012
<b>Día 10</b>	28-Abril-2012

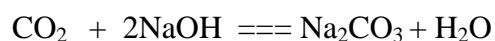


Se tomaron alícuotas de 10ml por cada día y fueron valoradas de acuerdo al método de Winkler.

### 7.1.2 MATERIALES Y EQUIPO DE LABORATORIO.

Material	Cantidad
pro pipeta	1
pipeta graduada 10 ml	1
Pipeta volumétrica 5ml	2
Soporte Universal	1
Pinzas para bureta	1
Bureta de 50 ml	1
Vasos de precipitados de 25 ml	5
Matraz aforado de 1 L	2
barra magnética	1
<b>Equipos</b>	
Agitador magnético	1
pH metro	1
<b>Reactivos e indicadores</b>	
Fenofaleina al 0,1 % en etanol del 96 %.	1
Disolución acuosa de naranja de metilo (heliantina) al 0,1 %.	1
Disolución acuosa de cloruro de bario al 10 %.	
HCl	

Para cuantificar el CO<sub>2</sub> absorbido por nuestra torre se cuantificará el carbonato producto de la siguiente reacción:





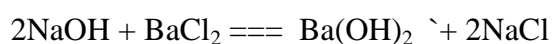
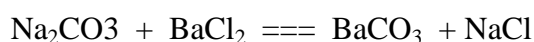
Esta cuantificación se realizó de NaOH.- CO<sub>3</sub>. Se realizó por medio de dos titulaciones ácido- base con HCl a 0.1M.

Para la selección de la bureta, se utilizó una gráfica de valoración. Para reflejar un aproximado de la cantidad de HCl utilizado. (Ver anexo 4)

## 7.2 PROCEDIMIENTO

Este método se basa en titular la alcalinidad total es decir, correspondiente al Hidróxido de sodio y a los carbonatos totales

- Primeramente se tomó una alícuota de 10ml de nuestra solución de NaOH 0.8M, después de 1 hr en contacto continuo con el aire. A esta se le agrega Anaranjado de metilo, para ser valorada con HCl a 0.1M
- En la segunda valoración se toma otra alícuota de 10ml, y se calienta hasta llegar a los 70 C, después agregamos cloruro de bario, para que el bicarbonato de sodio precipite como en la siguiente reacción



El hidróxido se tituló con HCl valorado empleando fenolftaleína como indicador, es importante mencionar que se hizo lentamente y con una agitación continua pues el HCl puede actuar sobre el precipitado, en estas condiciones el cambio de color tiene lugar cuando se ha neutralizado todo el hidróxido.



### 7.3 RESULTADOS OBTENIDOS

En esta sección se cuantifica la cantidad de gramos de NaOH.- CO<sub>3</sub> obtenidos experimentalmente. Para compararlos con los calculados. A continuación se presentan una tabla con los volúmenes que se obtuvieron al seguir la metodología mencionada en cada titulación.

RESULTADOS DE LA VALORACIÓN		
No. de muestra	VALORACIÓN 1 (ml HCL)	VALORACIÓN 2 (ml HCl)
1	79	63.0
2	79	64.5
3	77	63.0
4	79	62.0
5	79	63.0
6	78	64.0
7	79	63.5
8	80	64.0
9	80	62.0
10	79	63.0

### 7.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

#### Cálculo de gramos de reactivo analítico (gR) de NaOH a 0.8M

Nuestra solución absorbente es Hidróxido de sodio a 0.8M en 2L.

$$2L \times 0.8 \frac{g}{L} \times 40 \frac{g}{mol} = 65.2gr$$

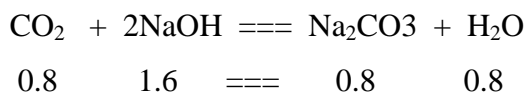
#### 1. Cantidad máxima que se puede absorber en esta solución NaOH

Con una concentración de 0.8M de NaOH en 2L tenemos

\_\_\_\_\_



Por estequiometría la cantidad máxima de  $\text{CO}_2$  que puede reaccionar con nuestra solución es la siguiente:



A continuación se harán los cálculos para ilustrar la determinación de  $\text{CO}_2$  absorbido por medio de esta metodología para el 1er día; para los siguientes días solo resultados.

- Primera valoración

La cantidad necesaria para valorar toda alcalinidad fue 79 ml de HCl.

- Segunda valoración

La cantidad necesaria para valorar los hidróxidos fue de 63ml de HCl

x 10ml de solución

- Si tenemos 2 L solución entonces la cantidad total es de

- Y por lo tanto los moles absorbidos de  $\text{CO}_2$  es

\_\_\_\_\_

Y por lo tanto la cantidad de moles absorbidos de  $\text{CO}_2$  es 0.16



## PLAN DE TRABAJO EXPERIMENTAL

HOJA DE TRABAJO PARA LA CUANTIFICACIÓN DE CO<sub>2</sub> ABSORBIDO, EN UN SISTEMA NaOH.- CO<sub>3</sub>. POR MEDIO DE UNA TITULACIÓN ACIDO BASE CON HCL A 0.1M

### ANÁLISIS EXPERIMENTAL

	1	2	3	4	5	NOTAS
ml HCl (1ra)	10	10	12	13	14	SE CAMBIO A SOLUCIÓN POR DÍA.
ml HCl (2da)	79	79	77	79	79	
mol CO <sub>2</sub> absorbidos	63	64.5	63	62	63	
gr de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.1600	0.1450	0.1400	0.1700	0.1600	
	16.96	15.37	14.84	18.02	16.96	
	6	7	8	9	10	SE CAMBIO SOLUCIÓN POR DÍA.
ml HCl (1ra)	78	79	80	80	79	SE CAMBIO SOLUCIÓN POR DÍA.
ml HCl (2da)	64	63.5	64	62	63	
mol CO <sub>2</sub> absorbido	0.1400	0.1550	0.1600	0.1800	0.1600	
gr de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	14.84	16.43	16.96	19.08	16.96	





En la siguiente gráfica se resumen los moles  $\text{CO}_2$  absorbidos por día en la solución, observando que hay repetitividad en los resultados.

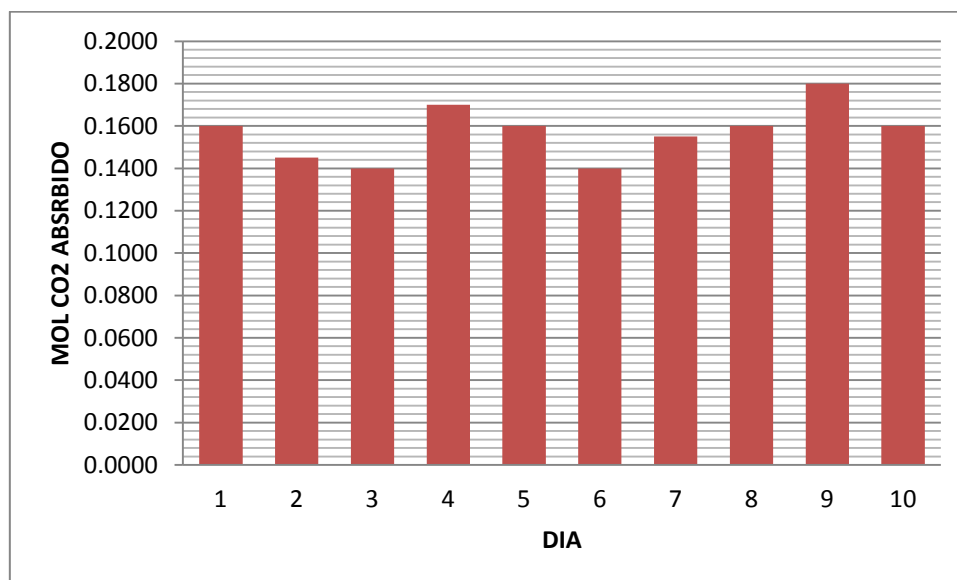


Figura 7.1 "ABSORCIÓN MOL DE  $\text{CO}_2$

La absorción real en promedio es 0.157 moles de  $\text{CO}_2$  por hora.

Los cálculos descritos en el capítulo 5 demuestran que teóricamente en cada hora deberían absorberse una cantidad de 0.8033 moles de  $\text{CO}_2$  /h

Esto significa que la eficiencia real de la torre es:

\_\_\_\_\_

Esta eficiencia quizá se deba a que la columna presenta lloriqueo o goteo en los platos, como lo demuestra el capítulo 5, Siendo

- 
- Velocidad del aire suministrada por el ventilador = 0.5m/s



## CAPÍTULO 8

### ANÁLISIS ECONÓMICO

En este capítulo exponemos el costo beneficio de la columna de absorción

#### 8.1 EL MERCADO DE "BONOS DE CARBONO"

El nombre de “bonos de carbono” se ha dado como un nombre genérico a un conjunto de instrumentos que pueden generarse por diversas actividades de reducción de emisiones. Así, se puede decir que existen “varios tipos” de bonos de carbono, dependiendo de la forma en que éstos fueron generados, (para este trabajo solo es de interés el último punto):

- Certificados de Reducción de Emisiones (CERs)
- Montos Asignados Anualmente (AAUs)
- Unidades de Reducción de Emisiones (ERUs)
- Unidades de Remoción de Emisiones (RMUs)

##### 8.1.1 UNIDADES DE REMOCIÓN DE EMISIONES (RMU)

Las Unidades de Remoción de Emisiones solamente pueden ser usadas por los países dentro del período de compromiso durante el cual fueron generadas, y son para cumplir con sus compromisos de reducción de emisiones. Estos créditos no pueden ser considerados en períodos de compromiso posteriores.

Las transacciones de bonos pueden ser desde una simple compra o venta de una cantidad específica de bonos, hasta una estructura de compra-venta con diversas opciones. Algunas de las opciones son las siguientes:

##### **Compras Spot:**

El precio del bono y la cantidad de bonos se acuerdan en la fecha del acuerdo de compra-venta pero la entrega y el pago del bono se realizan en una fecha futura cercana. Se puede considerar como si la compra-venta ocurriera en el momento, aunque pasen unos días entre el pago y la entrega. Esto se hace para asegurar un precio conveniente



para ambas partes y para reducir el riesgo de que el bono no se venda en el futuro.

### **Contratos de entrega futura:**

Se acuerda la compra-venta de una cantidad específica de bonos al precio de mercado actual, pero el pago y la entrega se realizarán en fechas futuras, generalmente de acuerdo a un cierto calendario de entregas.

### **Opciones:**

Las partes compran o venden la opción (el derecho a decidir) sobre si la venta se realizará o no en una fecha y a un precio pactados. De esta manera, el comprador tiene el derecho a comprar la cantidad de bonos ofrecida por el vendedor, pero no tiene la obligación de comprarlos una vez llegada la fecha acordada. Las condiciones de precio, cantidad y fecha de entrega de los bonos se acuerdan el día de elaboración del contrato, y también se acuerda una fecha que marca la fecha límite para que el comprador mantenga su derecho de compra. En este caso, el vendedor está a la expectativa y depende de la decisión del comprador, pero si la compra-venta se realiza, el comprador le pagará una cantidad adicional denominada  $\gamma$  premium.

Todas las operaciones de compra-venta en el comercio de bonos de carbono están regidas por un contrato entre el comprador y el vendedor.

No hay un valor “oficial” sobre el precio de una tonelada de CO<sub>2</sub> reducida o no emitida. Aunque algunas agencias multilaterales han establecido ciertos precios para los proyectos de reducción de emisiones financiados por ellas mismas (por ejemplo, hasta 2005, el Banco Mundial emplea un precio de \$5 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente no emitida), el precio de la tonelada está sujeto a oferta y demanda de bonos de carbono en el mercado.

Dado que existen diferentes esquemas para el comercio de los bonos y diferentes sitios del mundo donde se pueden comprar y vender, pueden existir precios diferentes por cada tonelada de CO<sub>2</sub>. Por ejemplo:



- **Chicago Climate Exchange:** en operación desde diciembre del 2003; el precio ha fluctuado desde \$0.90 hasta los \$2.10 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> (datos a junio de 2005).
- **European Climate Exchange Carbón:** en operación desde abril del 2005; el precio ha fluctuado entre \$6.40 y \$19.70 euros por tonelada de CO<sub>2</sub> (datos a junio de 2005).

## 8.2 COSTO UNITARIO DE LA COLUMNA DE ABSORCIÓN

A continuación desglosamos el costo de la fabricación de esta columna de absorción

MATERIALES	COSTO
Latas	\$10
Bomba	\$100
Manguera	\$3
Costo del NaOH 50% (Anual)	\$345
Cubeta	\$10
Lamina galvanizada cal 22 reciclada	\$30

Total = \$498 MX/año

NOTA: (IQUISA vende NaOH al 50w/w % si la densidad del NaOH al 50% es igual a 1.4085 g/cm<sup>3</sup> significa que 1L (1000cm<sup>3</sup>) pesa 1.4085 Kg es decir 0.704Kg son NaOH,

Necesitamos la siguiente cantidad de NaOH para preparar 1 Litro de solución NaOH 0.8M

Entonces con un litro de NaOH al 50% se pueden preparar 22 Litros de NaOH 0.8M, el precio por litro de NaOH al 50% es de \$2.08 Mx y necesitamos 2 litros por hora, y consideramos que la solución alcanza solo un 20% de saturación en 1 hr. Entonces solo necesitamos 10L de NaOH 0.8M por día, en año serian 3,650L es decir 166L de NaOH al 50%.

Como podemos darnos cuenta el costo de la columna es relativamente bajo, además el tiempo de vida útil mínimo es de 6 meses a 1 año y este puede verse aumentado si se limpia el cuerpo de la columna y la bomba periódicamente.



La columna absorbe una cantidad real de  $0.157 \text{ Moles de CO}_2 \text{ h}^{-1} = 6.9 \text{ gCO}_2 \text{ /h} = 167 \text{ gCO}_2 \text{ /h} = 60.50 \text{ KgCO}_2 \text{ /año}$

Además se produce un promedio de  $0.157 \text{ Moles de Na}_2\text{CO}_3 \text{ /h} = 13.18 \text{ gNa}_2\text{CO}_3 \text{ /h}$  y por un año  $115.45 \text{ KgNa}_2\text{CO}_3$

Actualmente el costo por bono carbono es aproximadamente 20 euros y un bono carbono es igual a 1 tonelada de  $\text{CO}_2$  eliminado, esto significa que aunque el costo por torre es relativamente bajo estamos muy lejos de que una sola torre sea capaz de eliminar 1 tonelada de  $\text{CO}_2$  por año. Sin embargo el costo de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  es de \$1,200 Mx por bulto de 50 Kg. Lo que podría hacerla factible económicamente, cabe mencionar que no se están considerando costos de la operación, como energía eléctrica y la neutralización con ácido cítrico.

Viéndolo desde el punto de vista medio ambiental es algo muy práctico. Pues de acuerdo al libro “*Los Sumideros Naturales de  $\text{CO}_2$  de M. Enrique Figueroa Clemente y Susana Redondo Gómez*” Una de estas torres equivaldría a varios árboles y/o arbustos, dependiendo el caso, como lo muestra la siguiente tabla, aunque también es cierto que, esta torre comparada con otros tipos de arboles ni siquiera compite.

ARBOLES DE GRAN TAMAÑO		ARBUSTOS	
Pinus halepensis (Pino carrasco)	48870 kg.CO2 año	Viburnun tinus (Durillo)	46 kg.CO2 año
Pinus pinea (Pino piñonero)	27180 kg.CO2 año	Chamaerops humilis (Palmito)	40 kg.CO2 año
Melia azederach (Melia)	5969 kg.CO2 año	Nerium oleander	31 kg.CO2 año
Quercus ilex (Encina)	5040 kg.CO2 año	Ligustrum ovalifolium (Aligustre)	1,3 kg.CO2 año
Qercus suber (Alcornoque)	4537 kg.CO2 año	Myrtus communis (Mirto)	0,6 kg.CO2 año
Gleditsia triacanthos	802 kg.CO2 año	Pistacea lentiscus (Lentisco)	0,2 kg.CO2 año
Jacaranda ovalifolia (Jacaranda)	1832 kg.CO2 año	(Paspalum paspalodes (Gramas))	1,5 kg.CO2 año
Ulmus minor (Olmo)	762 kg.CO2 año		
Brachichiton populneum	957 kg CO2 año		
Citrus aurantium (Naranja)	555 kg.CO2 año		
Olea europae (Olivo)	570 kg.CO2 año		
Populus alba (Alamo)	498 kg.CO2 año		
Platanus x hispanica (Platano)	478 kg.CO2 año		
Cupresus sempervirens	385 kg.CO2 año		
Laurus noviles	384 kg.CO2 año		



Ligustrum ovalifolium (Aligustre)



### 8.3 ELIMINACIÓN DE CO<sub>2</sub> ANUALMENTE.

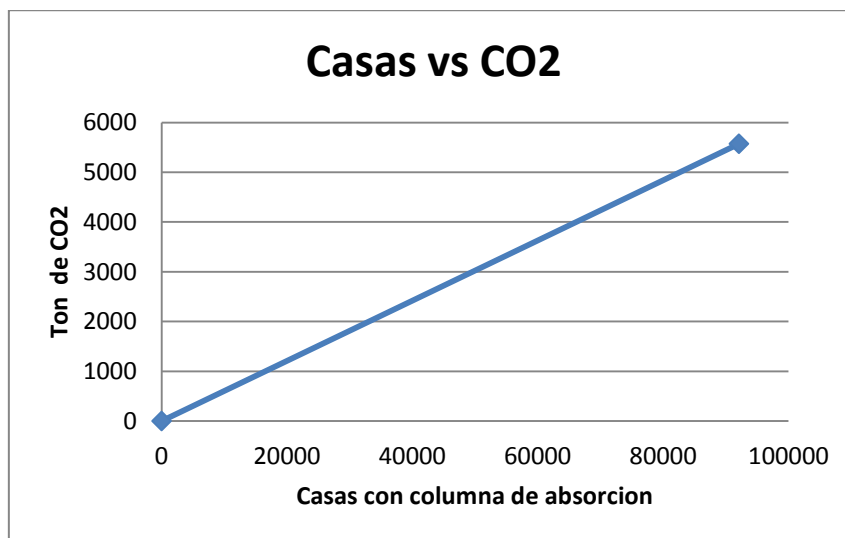
Para reflejar la verdadera utilidad de la columna, se estima anualmente la cantidad de CO<sub>2</sub> removido en base a los resultados experimentales del capítulo anterior. 60.50KgCO<sub>2</sub>/año

### 8.3 MÓDULOS DOMÉSTICOS.

Según el Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI) en su Censo General de Población y Vivienda 2000. TULTITLAN cuenta con un total de 92,114 viviendas. Por lo que con los datos anteriores se planea la idea de un proyecto en el cual la población mexicana adopte participación con la eliminación de CO<sub>2</sub> para contribuir con medio ambiente:

- ✓ Crear un programa de conciencia para contribuir al medio ambiente.
- ✓ Que cada familia adopte una columna de absorción (árboles artificiales), pues el costo de operación construcción es muy bajo.
- ✓ Crear un grupo especializado para la asesoría técnica del producto.

Si solo consideramos los hogares en TULTITLAN, instalando estos módulos domésticos se absorberían kg de CO<sub>2</sub> por año (aprox. 5563.74 Ton de CO<sub>2</sub>/año, pero si ahora consideramos todos los hogares de México, la cifra de CO<sub>2</sub> eliminado crecería enormemente.



Como observamos en la gráfica, la cantidad de CO<sub>2</sub> eliminado por año comienza a ser considerable.



## CAPÍTULO 9

### CONCLUSIONES

Pensar en reutilizar materiales que usualmente son considerados como desechos y darles una función ambiental, fue un reto que concluyó satisfactoriamente, pues queda claro que es imperativo trabajar en la concientización de las nuevas generaciones, y apostar al “El desarrollo sustentable”.

Hoy en día ya existen muchas formas de eliminar el CO<sub>2</sub> de la atmósfera, sin embargo los métodos son caros y por ello muchas veces no son implementados; por lo tanto encontrar formas prácticas y baratas para hacer esta tarea es fundamental. Es por eso que ese trabajo de tesis brinda una propuesta de ingeniería ecológica y abre las puertas a la continuidad y mejora del prototipo de propuesto de columna de absorción. Algunas de ellas son las siguientes.

- Aumentar la velocidad del aire mayor a 4.46 Así evitaríamos el lloriqueo de la torre y mejoraría la eficiencia significativamente.
- Al aumentar el flujo del aire, sería necesario aumentar el flujo de la solución de Hidróxido de sodio y quizá su concentración, esto significaría mayor CO<sub>2</sub> eliminado
- Si se aumenta la concentración de NaOH sería necesario cambiar el material del cuerpo y de los platos por plástico, Probablemente podrían utilizarse tambos de plástico que desechan las industrias.
- Sería bastante conveniente cambiar el suministro de energía por una pequeña celda solar

Por otro lado también se concluye que se logro absorber CO<sub>2</sub> de la atmósfera, no obstante al cuantificar se tuvo una diferencia significativa respecto a los valores calculados, debido a que siempre existe una resistencia en la transferencia de masa, sin embargo este proyecto enfocado con un panorama a nivel a macro, indica que instalar columnas de absorción en las azoteas de algunos hogares, provocaría la eliminación de CO<sub>2</sub> en orden de toneladas de tal modo que se convierten en cifras muy buenas para la comercialización de los bonos de carbono, bicarbonato de sodio



## ANEXOS, TABLAS Y BIBLIOGRAFÍA

### ANEXO 1 “PROPIEDADES FÍSICAS DEL CO<sub>2</sub>”

PROPIEDADES FÍSICAS DEL CO <sub>2</sub>	
Estado de agregación	Gas
Apariencia	Gas incoloro
Densidad a 298 K y 1 atm	1,98 kg/m <sup>3</sup> en estado gaseoso
	1,6 kg/m <sup>3</sup> en estado sólido
Peso molecular	44,01 g/mol
Punto de fusión	195 K (-78°C)
Punto de ebullición	216 K (-57°C)
Viscosidad	0,07 cP a -78°C
Punto crítico	31 °C y 72 atm
Fase gas (1atm, 0°C)	
Densidad del gas	1,976 kg/m <sup>3</sup>
Volumen específico	0,506 m <sup>3</sup> /kg
C <sub>p</sub>	0,0634kJ/mol*K
C <sub>v</sub>	0,0278 kJ/mol*K
C <sub>p</sub> /C <sub>v</sub>	1,308
Viscosidad	13,72 μN*s/m <sup>2</sup>
Conductividad térmica	14,65 mW
Solubilidad en agua	1,716 vol/vol
Entalpía	21,34 kJ/mol
Entropía	117,2 J/mol*K
Fase líquida	
Presión de Vapor	58,5 (bar)
Densidad del líquido	1032 kg/m <sup>3</sup> (-20°C 19,7bar)
Viscosidad	99 μN*s/m <sup>2</sup>
Fase sólida	
Densidad	1,6 kg/m <sup>3</sup>
Calor latente de vaporización	571,1 kJ/kg





## ANEXO 2. ESPACIAMIENTO ENTRE PLATOS

**Tabla 6.1 Condiciones y dimensiones generales recomendadas para las torres de platos**

1. Espaciamiento de los platos			
Diámetro de la torre, $T$		Espaciamiento de la torre, $t$	
m	ft	m	in
1 menos	4 menos	0.15	6 <b>mínimo</b>
1-3	4-10	0.50	20
3-4	10-12	0.60	24
4-8	12-24	0.75	30
		0.90	36

2. Flujo del líquido	
<b>a.</b> No superior a $0.015 \text{ m}^3/(\text{m diam}) \cdot s$ ( $0.165 \text{ ft}^3/\text{ft} \cdot s$ ) para platos de flujo transversal de un solo paso	
<b>b.</b> No superior a $0.032 \text{ m}^3/$ longitud de derramadero ( $0.35 \text{ ft}^3/\text{ft} \cdot s$ ) para otros.	

3. Sellado de los vertederos	
<b>a.</b> Vacío, n, 5 mm <b>minimum</b> , 10 de <b>preferencia</b> ( $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$ in)	
<b>b.</b> Presión atmosférica y superior, 25 mm mínimo, 40 mm de preferencia (1-1.5 in)	

4. Longitud del derramadero para derramaderos rectangulares rectos, platos de flujo transversal, $0.6T$ a $0.8T$ , $0.7T$ típica			
Longitud del derramadero $W$	Distancia desde centro de la torre	Porcentaje del brea de la torre utilizada por un vertedero	%
$0.55 T$	<b>0.4181T</b>	3.877	
<b>0.60T</b>	0.3993 T	5.257	
<b>0.65T</b>	0.25167	<b>6.899</b>	
<b>0.70T</b>	0.3562 T	8.808	
$0.75 T$	0.32% T	11.255	
<b>0.80T</b>	0.1991 T	14.145	

5. Caída de presión normal por plato	
Presión total	Caída de presión
35 mmHg abs	3 mm Hg o menos
1 std atm	<b>500-800 N/m<sup>2</sup></b> (0.07-0.12 lb <sub>f</sub> /in <sup>2</sup> )
$2 \times 10^6 \text{ N/m}^2$	1000 N/m <sup>2</sup>
300 lb <sub>f</sub> /in <sup>2</sup>	0.15 lb <sub>f</sub> /in <sup>2</sup>



DIAMETRO DE LA TORRE (D)		ESPACIAMIENTO DE PLATOS, t	
M	Ft	0.1524 m	6" MINIMO
$D \leq 1.22$	$D \leq 4$	0.4572 - 0.508	18-20"
$1.22 < D \leq 3.05$	$4 < D \leq 10$	0.610	24"
$3.05 < D \leq 3.66$	$10 < D \leq 12$	0.762	30"
$3.66 < D \leq 7.32$	$12 < D \leq 14$	0.914	36"

### ANEXO 3. "PROTOCOLO KYOTO"

El Protocolo de Kioto, sucesor de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, es uno de los instrumentos jurídicos internacionales más importantes destinado a luchar contra el cambio climático. Contiene los compromisos asumidos por los países industrializados de reducir sus emisiones de algunos gases de efecto invernadero, responsables del calentamiento global. Las emisiones totales de los países desarrollados deben reducirse durante el periodo 2008-2012 al menos en un 5 % respecto a los niveles de 1990.

#### SÍNTESIS

El 4 de febrero de 1991, el Consejo autorizó a la Comisión para que participara, en nombre de la Comunidad Europea, en las negociaciones sobre la **Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático**, adoptada en Nueva York el 9 de mayo de 1992. La Comunidad Europea ratificó la Convención marco mediante la Decisión [94/69/CE](#), de 15 de diciembre de 1993. La Convención, por su parte, entró en vigor el 21 de marzo de 1994.

La Convención marco contribuyó de manera decisiva al establecimiento de los principios clave de la lucha internacional contra el cambio climático. Concretamente,



definió el principio de las «responsabilidades comunes pero diferenciadas». Asimismo, contribuyó a reforzar la concienciación pública, a escala mundial, sobre los problemas relacionados con el cambio climático. No obstante, la Convención no contempla compromisos en términos de cifras detalladas por países respecto a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Por consiguiente, las Partes de la Convención decidieron, en la primera Conferencia de las Partes, que se celebró en Berlín en marzo de 1995, negociar un protocolo que contuviera medidas de reducción de las emisiones de los países industrializados en el período posterior al año 2000. Tras una larga preparación, el 11 de diciembre de 1997 se aprobó el **Protocolo de Kioto**.

El 29 de abril de 1998, la Comunidad Europea firmó el Protocolo, y en diciembre de 2001, el Consejo Europeo de Laeken confirmó la voluntad de la Unión de que el Protocolo de Kioto entrara en vigor antes de la cumbre mundial de desarrollo sostenible de Johannesburgo (del 26 de agosto al 4 de septiembre). Así, y para alcanzar este objetivo, **la presente Decisión aprueba el Protocolo en nombre de la Comunidad**. Los Estados miembros se comprometieron a depositar sus instrumentos de ratificación al mismo tiempo que la Comunidad y, en la medida de lo posible, antes del 1 de junio de 2002.

El anexo II de la Decisión indica los **compromisos en materia de limitación y reducción de las emisiones** acordados por la Comunidad y sus Estados miembros para el primer período de compromiso (2008-2012).

### **Contenido del Protocolo**

El Protocolo de Kioto se aplica a las emisiones de **seis gases de efecto invernadero**:

Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>);

Metano (CH<sub>4</sub>);

Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O);

hidrofluorocarbonos (HFC);

perfluorocarbonos (PFC);



hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>).

El Protocolo representa un importante paso hacia adelante en la lucha contra el calentamiento del planeta, ya que contiene **objetivos obligatorios y cuantificados** de limitación y reducción de gases de efecto invernadero.

Globalmente, los Estados Partes en el Acuerdo del anexo I de la Convención marco (esto es, los países industrializados) se comprometen conjuntamente a reducir sus emisiones de gas de efecto invernadero para lograr que las emisiones totales de los países desarrollados disminuyan, **al menos, un 5 % con respecto al nivel de 1990** durante el período 2008-2012. El anexo B del Protocolo contiene los compromisos cuantificados suscritos por los Estados Partes en el Acuerdo.

Los Estados que eran miembros de la UE antes de 2004 deberán reducir **conjuntamente sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 8 %** entre los años 2008 y 2012. Los Estados miembros que se hayan incorporado a la UE después de esa fecha se comprometen a reducir sus emisiones en un 8 %, a excepción de Polonia y Hungría (6 %), así como de Malta y Chipre, que no se encuentran incluidos en el Anexo I de la Convención Marco.

Para el período anterior a 2008, las Partes se comprometen a realizar progresos en el cumplimiento de sus compromisos, a más tardar, en el año 2005, y a facilitar las pruebas correspondientes.

El año 1995 puede considerarse el año de referencia para los Estados Partes en el Acuerdo que lo deseen en lo que respecta a las emisiones de HFC, PFC y SF<sub>6</sub>.

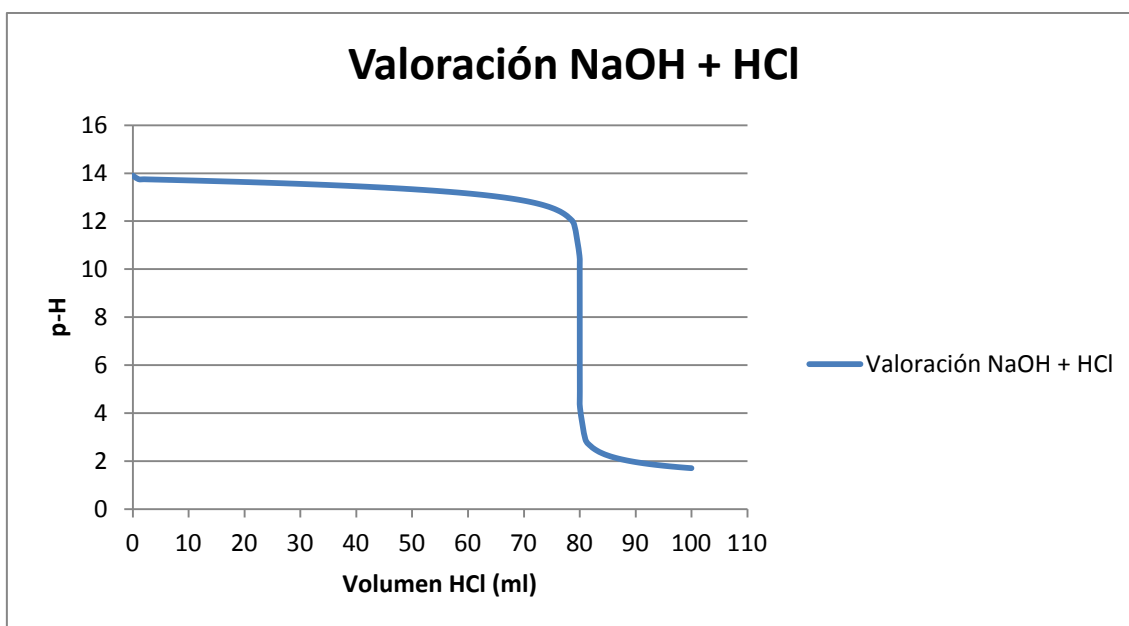
Para alcanzar estos objetivos, el Protocolo propone **una serie de medios**:

reforzar o establecer políticas nacionales de reducción de las emisiones (aumento de la eficacia energética, fomento de formas de agricultura sostenibles, desarrollo de fuentes de energías renovables, etc.).

Cooperar con las otras Partes contratantes (intercambio de experiencias o información, coordinación de las políticas nacionales por medio de permisos de emisión, aplicación conjunta y mecanismo de desarrollo limpio).



## ANEXO 4 VALORACIÓN ACIDO-BASE





## BIBLIOGRAFÍA

1. Perry J.H., 2010, Manual del Ingeniero Químico, Tomos I y III. Séptima Edición, McGraw Hill, España.
2. Roos R. D., 1974, La industria y la contaminación de Aire, Primera Edición, Editorial Diana.
3. Treybal Robert E., 1985, Traducción de: mass transfer operations, Segunda Edición, McGraw Hill, México.
4. Ocon, J. y Tojo, G., 1967, Problemas de Ingeniería Química, Vols. 1 y 2, Aguilar, Madrid.
5. McCabe W.L., Smith J.C. y Harriott P., 2002, Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, 6ª Ed. McGraw-Hill.
6. Baird y Colín, 2001, **Química ambiental**. 2<sup>da</sup> Ed., Revertè, Barcelona.
7. Seinfeld, J.H.; Pandis, S.N., 2006, Atmospheric Chemistry and Physics: From air pollution to climate change, N.Y., USA.
8. Melgar M.A y Lazo C.E, 2004, Efecto, de la reacción química en la transferencia de Masa en el Proceso de Absorción de Dióxido de Carbono-Aire en fase acuosa. Universidad Nacional del Centro del Perú.
9. Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la zona metropolitana de valle de Toluca. [Fecha de consulta: 25 enero 2012]. Disponible en: <http://www.edomex.gob.mx/calidaddelaire/menu-enlaces>
10. Principales Causes Atmosféricas. [Fecha de consulta: 25 enero 2012]. Disponible en: <http://www.edomexico.gob.mx/medioambiente/mapa/documentacion/Principales%20Cauces%20Atmosfericos.pdf>
11. Skoog D. A., West D. M. y Holler F.J., 1997, Fundamentos de Química Analítica. Ed. Revertè. Barcelona.
12. Field y Cols, 1962 , Pilot Plant Studies of the Hot Carbonate Process for Removing Carbon Dioxide and Hydrogen, US, Bureau of Mines Bulletin.
13. [Fecha de consulta: 23 abril 2012]. Disponible en <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20214/fichero/4Cap%EDtulo+3%252FCap%EDtulo3.pdf>



14. Biblioteca de la universidad de Sevilla. [Fecha de consulta: 25 enero 2012].  
Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20214/fichero/4-Cap%EDtulo+3%252FCap%EDtulo3.pdf>
15. Eliminación del dióxido de carbono del gasnatural por depuración húmeda empleandocompuestos de sodio. [Fecha de consulta: 27 enero 2013].  
<http://www.scribd.com/doc/30159030/Tesis-Maestr-a-CO2-Del-Gas-Natural-Con-NaOH>.
16. Legislation sumamaries enviroment. [Fecha de consulta: 27 enero 2013].  
Disponible en: [http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/tackling\\_climate\\_change/l28060\\_es.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/l28060_es.htm)
17. [http://cambio\\_climatico.ine.gob.mx/sectprivcc/mercadobonoscarbono.html](http://cambio_climatico.ine.gob.mx/sectprivcc/mercadobonoscarbono.html)
- 18 INEGI. [Fecha de consulta: 19 febrero 2013]. <http://www.inegi.org.mx/>
18. Tesis **Gas-Liquid Contact Area of Random and Structured Packing** “Ian David Wilson, B.S.” Presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas, May 2004.