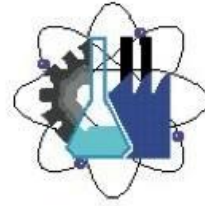




UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

ANÁLISIS DE LAS VARIABLES DE UN PROCESO DE ABSORCIÓN PARA SU OPERACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

KARLA ANAHI ALTAMIRANO TLALI

ASESORA:

DRA. MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO

CUERNAVACA, MOR.

AGOSTO 2021

Dedicatoria

A MIS PADRES...

Papá, me has enseñado a no darme por vencida y siempre buscar nuevas alternativas, y que un "NO" no debe de detenerme, esforzarme por poder lograr todo lo que me proponga.

Mamá, con tu amor, paciencia y motivación logras impulsarme a dar siempre lo mejor de mi ante cualquier circunstancia por más difícil que pareciera, jamás has dejado de creer y confiar en mí y eso me impulsa a seguir y seguir.

MIS HERMANOS...

Irving, que has sido un ejemplo para seguir y me has servido como motivación, Amairani, me impulsas a ser mejor persona para poder darte un buen ejemplo esperando a que seas mucho mejor que yo, y Zoe quien se convirtió en la luz de mi vida impulsándome a ser mejor cada día para hacerla sentir orgullosa.

MIS AMIGOS

Quienes se convirtieron en parte primordial durante este largo camino, compañeros de aventuras, desvelos, compañeros de un mismo sueño.

MIS MAESTROS...

Quienes creyeron en mí y me brindaron ayuda cuando lo necesite y se esforzaron para forjarme como una persona profesional.

GRACIAS POR IMPULSARME SIEMPRE Y APOYARME HASTA CUMPLIR ESTA META

Agradecimientos

A DIOS

Quien me ha permitido llegar hasta etapa de la vida, me ha demostrado que su amor hacia mí es grande, mi agradecimiento para él es infinito, me ha guiado y no ha soltado mi mano, sobre todo me ha permitido tener a mi familia quienes son mi más grande inspiración, motor y apoyo incondicional.

A MIS PADRES...

Por el gran apoyo que me han brindado, por la confianza y porque no han dejado de creer en mí pese a todas las circunstancias buenas y malas, este y los logros que se vengán son de ustedes también.

MIS MAESTROS...

A la Dra. Miriam Navarrete Procopio por el apoyo que he tenido de usted desde el momento que la conocí, así como la confianza que ha depositado en mí para realizar muchas actividades, por darme la oportunidad de aprender, compartirme de su conocimiento, tenerme paciencia y apoyarme en todo, GRACIAS.

Así como a distintos maestros que me han brindado su ayuda en diferentes situaciones, Dr. Orlando Fuentes Castañeda, Dr. Víctor Manuel Flores Velásquez, Mtra. María del Carmen Pérez Redondo, Dra. Fernanda Morales Guzmán, entre otros.

Resumen

La presente tesis realiza la experimentación y el análisis de una columna de absorción ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos; con el propósito de establecer las condiciones de operación (temperatura, concentración, presión y flujo) para su operación de forma continua en estado estacionario, cumpliendo con el objetivo de saturar por completo la solución absorbente.

Se realizaron pruebas experimentales a diferentes concentraciones de la solución absorbente; compuesta de Monoetanolamina (MEA) y Agua (H_2O) al (10, 15, 20, 25 y 30 % en peso), para absorber el CO_2 de una corriente gaseosa mezclado con aire, las concentraciones establecidas simulan las emisiones atmosféricas de una central carboeléctrica y una central de ciclo combinado (5.17 y 12.28% de CO_2), industrias que emiten millones de emisiones de gases de efecto invernadero al año mismo que provoca un daño que cada vez se hace menos irreparable.

Los experimentos se desarrollaron en columnas de absorción de diferentes capacidades de solución absorbente (0.250, 0.650 y 1.300 kg) que son las que se encuentran en el laboratorio, empacadas con monturas Berl de cerámica de $\frac{1}{2}$ in. Se alimento la columna con la solución absorbente según la capacidad y en un proceso a contracorriente de absorción se mantuvo contacto con la mezcla gaseosa, se esperó un incremento de temperatura y una saturación de la solución absorbente para cada concentración. Con los resultados experimentales se proponen los flujos volumétricos para las pruebas de absorción en continuo.

También se realizaron cálculos analíticos para conocer el tiempo de saturación teórico para poder verificar los resultados experimentales. La metodología propuesta para conocer el flujo volumétrico para las pruebas en continuo se valida al mantener constante el incremento de temperatura de la solución absorbente. En este trabajo también se realizó la caracterización de la solución absorbente libre y saturada de CO_2 a través de sus propiedades fisicoquímicas como densidad, viscosidad e índice de refracción.

Nomenclatura

v	Velocidad (m/s)
\dot{m}_e	Flujo másico de entrada (kg/s)
\dot{m}_s	Flujo másico de salida (kg/s)
NTU	Número de unidades de transferencia
MW	Peso molecular (kg/mol)
P	Presión (Pa)
PM _i	Peso molecular del componente i, (kg/mol)
PM _j	Peso molecular del componente j, (kg/mol)
R	Constante de los gases (L atm/mol K)
G_x	velocidad másica del líquido (kg * mol/s)
G_y	velocidad másica del gas (kg * mol/s)
μ_x	Viscosidad del líquido, (cP)
ρ_x	Densidad del líquido (kg/m ³)
ρ_y	Densidad del gas (kg/m ³)
F_p	Factor del relleno, (pie ²)
L	Velocidad del flujo molar del líquido (mol/h)
Q	Cantidad de calor
L_M	Velocidad másica molar del líquido (kg * mol/s)
T	Temperatura (K)
K_{La}	Coefficiente global volumétrico de materia para la fase líquida

K_{ga}	Coeficiente global volumétrico de materia para la fase gaseosa
K_{xa}	Fracción molar para la fase líquida
K_{ya}	Fracción molar para la fase gas
W	Concentración
V	Viscosidad
η	Número de moles
Q	Caudal
LPM	Litros por minuto
RPM	Revoluciones por minuto

Letras griegas

μ_G	Viscosidad del gas, (kg/m h)
μ_L	Viscosidad del líquido, (kg/m h)
μ_M	Viscosidad de la mezcla, (kg/m h)
ρ_G	Densidad del gas, (kg/m ³)
ρ_L	Densidad del líquido, (kg/m ³)
ρ_M	Densidad de la mezcla, (kg/m ³)

Especies químicas

CO ₂	Dióxido de carbono
Aire	Aire (composición O ₂ y N ₂)
MEA	Monoetanolamina
H ₂ O	Agua

CONTENIDO

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
NOMENCLATURA	IV
ABREVIACIONES	V
1 INTRODUCCIÓN	1
Objetivos	3
2 MARCO TEÓRICO	4
2.1 Operaciones Unitarias	4
2.1.1 Definición	4
2.1.2 Proceso de absorción	4
2.1.3 Columna empacada	5
2.1.4 Tipos de empaques	6
2.1.5 Sistema de equilibrio	8
2.1.6 Caída de presión y velocidad límite de flujo	9
2.1.7 Estado estacionario	11
2.2 Variables de operación	12
2.2.1 Flujo	12
2.2.2 Concentración	12
2.2.3 Temperatura	12
2.2.4 Presión	13
2.3 Estado del Arte	14
3 METODOLOGÍA	19

3.1	Descripción del sistema de absorción.....	19
3.2	Verificación de los instrumentos de medición	20
3.2.1	Termopares	20
3.2.2	Bomba peristáltica	22
3.2.3	Analizador de gases	22
3.2.4	Rotámetros	23
3.3	Condiciones de operación.....	24
3.3.1	Concentración de la corriente gaseosa	25
3.3.2	Concentración de la solución absorbente.....	26
3.3.3	Presión de operación.....	26
3.3.4	Temperatura de operación.....	27
3.3.5	Flujo de la solución absorbente	27
4	RESULTADOS	29
4.1	Determinación experimental de flujo volumétrico.....	29
4.2	Pruebas de saturación 1	32
4.2.1	Tiempos de saturación teóricos.....	34
4.2.2	Flujo de la solución absorbente	36
4.2.3	Relaciones de flujo L/G.....	37
4.4	Pruebas de saturación 2	39
4.5	Pruebas continuas de absorción	42
4.6	Caracterización de la solución absorbente.....	44
4.6.1	Densidad.....	45
4.6.2	Viscosidad	46

4.6.3	Índice de refracción	47
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50

APÉNDICES

	Apéndice A (Metodología experimental “Pruebas de saturación”).....	53
	Apéndice B (Preparación de la solución)	54
	Apéndice C (Cálculo analítico del tiempo de saturación)	55
	Apéndice D (Cálculo de los caudales).....	58
	Apéndice E (Metodología experimental “Pruebas en continuo”).....	60
	Referencias.....	61

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 2.1.3	Torre empacada de absorción	5
Figura 2.1.4	Montura Berl	6
Figura 2.1.5	Curva de equilibrio a 40 y 120°C	9
Figura 2.1.6	Componentes de la torre para el balance de materia	11
Figura 3.1	Torre de absorción.....	20
Figura 3.2.1	Calibración de los termopares	21
Figura 3.2.2	Flujo real de la bomba peristáltica	22
Figura 3.2.3	Calibración del analizador de gases	23
Figura 3.2.4	Calibración de los rotámetros	24
Figura 3.3.5	Diagrama de la metodología experimental para el flujo de la solución absorbente	28
Figura 4.1	Validación de la metodología experimental (MEA 30% wt) ...	31
Figura 4.2.1	Saturación de la solución absorbente	32

Figura 4.2.2.1	Incremento de la temperatura de la solución absorbente en la columna 1 a 1.300 y 0.650 kg	33
Figura 4.2.2.2	Incremento de la temperatura de la relación de flujos (L/G)	38
Figura 4.4.1	Saturación de la solución de MEA con 12.5% vol. de CO ₂ ...	40
Figura 4.4.2	Saturación de la solución MEA con 5% vol. de CO ₂	41
Figura 4.5.1	Comparación del incremento de la temperatura de la prueba de saturación y una prueba en continuo para una solución absorbente al 30% wt MEA para tratar un flujo gaseoso al 12.5% vol. CO ₂	43
Figura 4.5.2	Prueba en continuo con 12% vol. de CO ₂	44
Figura 4.6.1	Medición de densidad	45
Figura 4.6.1.2	Comportamiento de la densidad	46
Figura 4.6.2.1	Viscosímetro rotacional.....	46
Figura 4.6.2.2	Comportamiento de la viscosidad	47
Figura 4.6.3.1	Refractómetro	47
Figura 4.6.3.2	Comportamiento del índice de refracción.....	48

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 2.1.4	Características de los empaques.....	7
Tabla 3.3.1	Concentración de la corriente gaseosa.....	25
Tabla 3.3.2	Concentraciones de la solución absorbente MEA-H ₂ O.....	26
Tabla 4.1	Condiciones de operación para las pruebas de saturación.	30
Tabla 4.2.1	Resultados de las pruebas de saturación de la columna 1.	34

Tabla 4.2.2.1	Resultados de tiempos de saturación calculados en la columna 1.....	35
Tabla 4.2.2.1	Concentración de la solución absorbente y flujos	36
Tabla 4.3.1	Incremento de la temperatura en función de las relaciones de flujo L/G	37
Tabla 4.3.1.2	Comparación de resultados con referencia bibliográfica.....	39
Tabla 4.4.1	Tiempos de saturación de la solución absorbente	42
Tabla 4.6.3	Propiedades físicas.....	49
Tabla 5.1	Conclusiones	51

1 *Introducción*

El calentamiento global es un fenómeno generado por los cambios de temperatura debido a que existen demasiados gases de efecto invernadero; este es un efecto natural debido a que retienen parte de la energía del suelo y se emite por haber sido calentado por la radiación solar. Algunos de estos gases son vapor de agua, dióxido de carbono (CO_2), ozono (O_3) y metano (CH_4). [1]

Las centrales termoeléctricas y carboeléctricas son una de las principales fuentes de contaminación debido a las grandes cantidades que emiten de estos gases durante sus procesos en su mayoría dióxido de carbono (CO_2) que al entrar en contacto con las radiaciones solares no permiten que estas salgan del planeta y provocan que la temperatura de este vaya en aumento. [2]

Algunas centrales para “evitar” los altos índices de emisiones colocan chimeneas de considerable altura, lo cual hace que la contaminación química que producen se diluya mucho, pero se transporte a largas distancias, afectando frecuentemente a otras zonas e incluso a otros países, de cualquier manera, sigue afectando.

La reducción de las emisiones de CO_2 y la acumulación de gases de invernadero en la atmósfera requiere una combinación de estrategias: mayor uso de plantas generadoras que no emitan CO_2 ; mayor uso de tecnologías de mayor eficiencia y menor emisión de CO_2 (por ejemplo, plantas de ciclo combinado); y una amplia gama de estrategias fuera del sector eléctrico, como medidas para la conservación de energía y el secuestro de carbono. [3]

Un sistema implantado a nivel industrial para este problema es la absorción química mediante aminas (monoetanolamina MEA o aminas similares) para la captura de CO_2 .

El proceso de absorción es una operación unitaria controlada por la transferencia de materia que consiste en eliminar un componente de interés presente en una corriente gaseosa mediante la utilización de un disolvente líquido que captura dicho compuesto

de interés, el CO_2 se puede capturar por medio de este proceso a contracorriente en un líquido que discurre por una columna empacada. [4]

En este trabajo se realizarán pruebas experimentales para alcanzar el estado estacionario en una columna de absorción, mediante un proceso de estado estacionario que tenga como variables de proceso a parametrizar en las corrientes gaseosa y líquida el flujo y la concentración, manteniendo constantes las variables de proceso temperatura y la presión.

El proceso consiste en tratar un flujo gaseoso con concentración conocida de CO_2 por un proceso de absorción con monoetanolamina a 5 diferentes concentraciones, la columna es alimentada continuamente con un flujo conocido de solución absorbente que permita mantener el máximo porcentaje de absorción bajo ciertas condiciones de operación.

Objetivos

Objetivo general

- Establecer las condiciones de operación para alcanzar el estado estacionario de un proceso continuo de absorción, para la captura de CO_2 simulando centrales de ciclo combinado y carboeléctricas.

Objetivos específicos

- Desarrollar un método experimental para conocer el tiempo de saturación del material absorbente.
- Establecer los valores de las variables de procesos flujo, temperatura y concentración para la operación del sistema de absorción de manera continua.
- Caracterizar la solución absorbente libre y saturada de CO_2 mediante la determinación de sus propiedades físicas.

2 *Marco teórico*

A continuación, se describen los elementos teóricos planteados por diferentes autores (Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriot, Joaquín Ocon, Gabriel Tojo) y que permite fundamentar el proceso del trabajo desarrollado en los capítulos posteriores.

2.1 Operaciones Unitarias

2.1.1 Definición

Un proceso es aquel en el que las materias primas se transforman para originar productos útiles. Todo proceso a cualquier escala puede descomponerse en una serie ordenada de lo que pudieran llamarse operaciones unitarias, transformando una mezcla de sustancias en dos o más productos que difieran en composición, teniendo como objetivo purificar una solución.[5] Algunos ejemplos de operaciones unitarias son: pulverización, secado, cristalización, absorción, desorción, filtración, evaporación, destilación, etc.

2.1.2 Proceso de Absorción

Un proceso de absorción de gases es una operación unitaria básica de transferencia de masa de la ingeniería química que estudia la separación de uno o varios componentes de una mezcla gaseosa por disolución en un líquido, a fin de disolver de manera selectiva uno o más componentes del gas y de obtener una solución de éstos en el líquido, estas operaciones requieren la transferencia de masa de una sustancia en la corriente gaseosa al líquido. [6]

2.1.3 Columna empacada

Un equipo que se utiliza en este proceso de absorción Líquido-Gas es una torre empacada. Este dispositivo consiste en una columna cilíndrica, o bien una torre, esta se equipa con distintos tipos de empaques para un mejor proceso. El gas que contiene el soluto entra en al espacio debajo del empaque y este asciende a través de los intersticios del empaque, en contracorriente con el flujo del líquido. El empaque proporcionará que un mejor contacto entre el líquido y el gas, esto favorecerá un mejor contacto entre las fases.

El soluto contenido en el gas es absorbido por la parte superior, el líquido se enriquece capturando el soluto a medida que este va descendiendo por la torre y el líquido concentrado al cual se le denomina *licor concentrado o solución absorbida*, sale por la parte inferior de la torre. [7] La figura 2.1.3, muestra los componentes principales de una columna de absorción de gases.

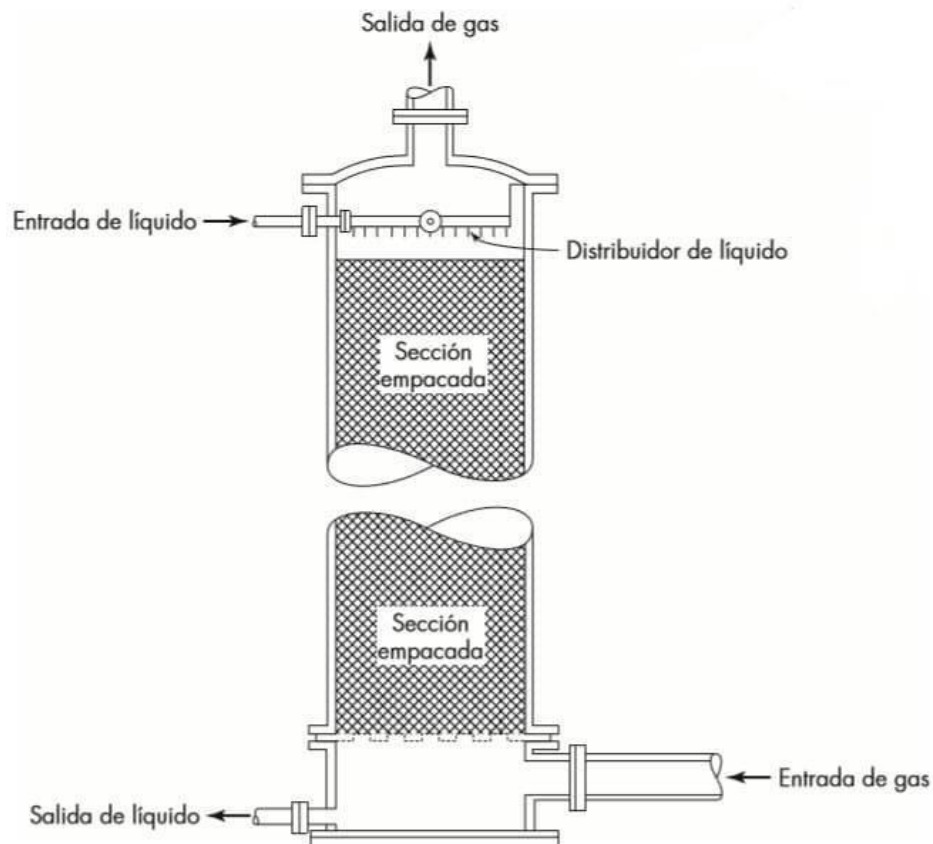


FIGURA 2.1.3 TORRE EMPACADA DE ABSORCIÓN

2.1.4 Tipos de empaques

El empaque proporciona una gran área de contacto entre el líquido y el gas, favoreciendo así un íntimo contacto entre las fases. El soluto contenido en el gas rico es absorbido por el líquido fresco que entra a la torre, y el gas diluido o agotado, sale de la torre por la parte superior. El líquido se enriquece en soluto a medida que desciende por la torre y el líquido concentrado, llamado licor concentrado sale por el fondo de la torre a través de la salida del líquido.

Existen diferentes tipos de empaques, estos se dividen en tres: aquellos que son cargados de una forma aleatoria en la torre, los que son colocados a mano y aquellos que se conocen como ordenados o estructurados. Los empaques aleatorios que son con los que trabajamos tienen medidas de 6 a 75 mm ($\frac{1}{3}$ o 3 in) en su dimensión mayor. La mayoría de los empaques aleatorios de las torres se construyen con materiales baratos e inertes, como arcilla, porcelana o aluminio. Dentro de estos empaques están las montaduras cerámicas de Berl, misma que se muestra en la figura 2.1.4



FIGURA 2.1.4 MONTURA BERL

Algunas características generales de este tipo de empaque es que la silla de montar de Berl de cerámica es un embalaje al azar de la torre de la abertura, formado como una silla de montar fuera dentro y afuera, la silla de montar de Berl se realiza mejor con respecto a los anillos de Raschig [7] en los aspectos incluso de la distribución fluida y de la resistencia baja, hace una presión más baja contra la pared interna de la torre que el embalaje del anillo, los caracteres de la alta fuerza mecánica, de la alta

estabilidad química, y de la resistencia excelente del calor, silla de montar de Berl de cerámica pueden resistir de alta temperatura, de alta presión, ácido, el álcali, la sal y diversos solventes orgánicos. [7]. En la siguiente tabla se muestra las características principales de los diferentes tipos de empaques (*tabla 2.1.4*)

TABLA 2.1.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS EMPAQUES [7]

Tipo de empaque	Material	Tamaño nominal en pulgadas	Factor del Empaque (Fp)
Anillos Raschig	Ceramica	$\frac{1}{2}$	580
		$1\frac{1}{2}$	155
		2	65
Anillos Pall	Metal	$\frac{1}{2}$	56
		$1\frac{1}{2}$	40
		2	27
Monturas Berl	Cerámica	$\frac{1}{2}$	240
		$1\frac{1}{2}$	110
		2	65
Monturas Intalox	Cerámica	$\frac{1}{2}$	200
		1	92
		$1\frac{1}{2}$	52
		2	40
		3	22

2.1.5 Sistema de equilibrio para procesos

El proceso de absorción es una operación isotérmica. Si una mezcla de gases se pone en contacto con un líquido, la solubilidad en el equilibrio de cada gas será, en ciertas condiciones, independiente de la de los demás, siempre y cuando el equilibrio se describa en función de las presiones parciales en la mezcla gaseosa. Si todos los componentes del gas, excepto uno, son básicamente insolubles, sus concentraciones en el líquido serán tan pequeñas que no podrán modificar la solubilidad del componente relativamente soluble; entonces se puede aplicar la generalización, al mismo tiempo que las moléculas disueltas del líquido tienden a volver a la fase gaseosa, estableciéndose un equilibrio dinámico entre las moléculas del gas que pasan a la disolución y las que retoman en la parte gaseosa.[7]

Si varios componentes de la mezcla son apreciablemente solubles, la generalización será aplicable únicamente si los gases que se van a disolver son indiferentes ante la naturaleza del líquido; esto sucederá en el caso de las soluciones ideales. [7]

Cuando una fase líquida se considera ideal, la presión parcial en el equilibrio de gas en la solución puede ser calculada sin necesidad de determinaciones experimentales. Hay cuatro características significativas de las soluciones ideales que se relacionan entre sí: [7]

- 1- Las fuerzas intermoleculares promedio de atracción y repulsión en la solución no cambian al mezclar los componentes.
- 2- El volumen de la solución varía linealmente con la composición.
- 3- No hay absorción ni evolución de calor al mezclar los componentes. Sin embargo, en el caso de gases que se disuelven en líquidos, este criterio no incluye el calor de condensación del gas al estado líquido.

- 4- La presión total de vapor de la solución varía linealmente con la composición expresada en fracción mol.

En realidad, no existen soluciones ideales y las mezclas reales sólo tienden a ser ideales como límite. La condición ideal requiere que las moléculas de los componentes sean similares en tamaño, estructura y naturaleza química; tal vez la aproximación más cercana a dicha condición sea la ejemplificada por las soluciones de isómeros ópticos de compuestos orgánicos. Cuando la mezcla gaseosa en equilibrio con una solución líquida ideal, sigue también la ley de los gases ideales, la presión parcial p^* de un soluto gaseoso A es igual al producto de su presión de vapor p a la misma temperatura por su fracción mol en la solución x . [14]

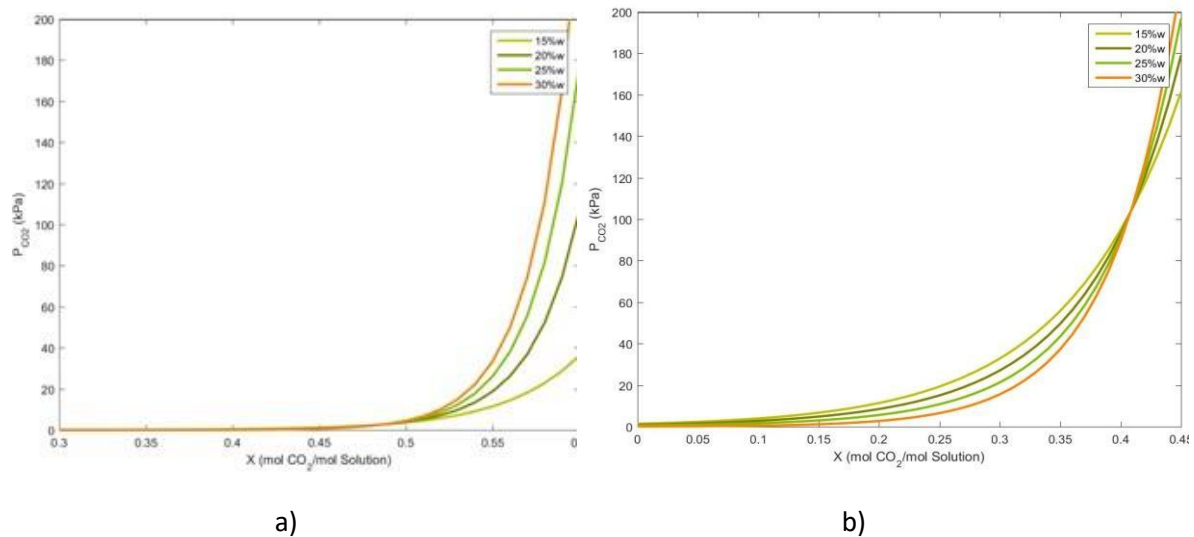


FIGURA 2.1.5 CURVA DE EQUILIBRIO, A) DATOS DE EQUILIBRIO A 40°C, B) DATOS DE EQUILIBRIO A 120°C [14]

2.1.6 Caída de presión y velocidad límite de flujo

La caída de presión por unidad de longitud (o profundidad) del empaque se debe a la fricción del fluido; se grafica en coordenadas logarítmicas frente a la velocidad de flujo del gas G_y , expresada en masa de gas por hora y por unidad de área de la sección transversal, considerando que la torre está vacía. [7]

$$G_y = u_o \rho_y \quad \text{ec. 2.1}$$

Balance de materia

El balance de materia se puede realizar en base masa o en base mol, puede ser total o por componente, también se puede realizar un balance por átomos. Es importante resaltar que el balance de materiales es un balance de masa, no de volumen o de moles. Por consiguiente, para el caso de un balance de materia en base molar en donde se verifique una reacción química se utilizarán los principios estequiométricos para llevar a cabo el balance. En sistemas isotérmicos, solamente se requiere resolver los balances de materia para resolver el problema. En sistemas no isotérmicos se requiere resolver los balances de materia y energía de forma simultánea. [7]

Balance total de materia:

$$L_a + V = L + V_a \quad \text{ec. 2.2}$$

Para el componente A:

$$L_a x_a + V_y = Lx + V_a y_a \quad \text{ec. 2.3}$$

Donde V es la velocidad del flujo molar de la fase gaseosa y L la de la fase líquida en el mismo punto de la torre. Las concentraciones x y y correspondientes a las fases L y V, respectivamente, se aplican para un punto dado. Las ecuaciones de los balances globales de materia, con base en las condiciones extremas, son:

Balance total de materia:

$$L_a + V_o = L_b + V_a \quad \text{ec. 2.4}$$

Para el componente A:

$$L_a x_a + V_b y_b = L_b x_b + V_a y_a \quad \text{ec. 2.5}$$

La relación entre x y y en cualquier punto de la columna, que se obtiene reordenando la ecuación (2.4)

$$y = \frac{L}{V} x + \frac{V_a y_a - L_a x_a}{V} \quad \text{ec. 2.6}$$

La línea de operación debe estar por arriba de la línea de equilibrio para que la absorción tenga lugar, puesto que esto proporciona una fuerza impulsora positiva $y - y^*$ para la absorción. En la ecuación (2.1.6), x y y representan las composiciones globales del líquido y el gas, respectivamente, en contacto entre sí en cualquier sección de la columna. Se supone que las composiciones para una altura determinada son independientes de la posición en el empaque. La absorción de un componente soluble desde una mezcla gaseosa da lugar a una disminución de la velocidad total del gas V a medida que el gas pasa a través de la columna, mientras que el flujo del líquido L aumenta. [7]

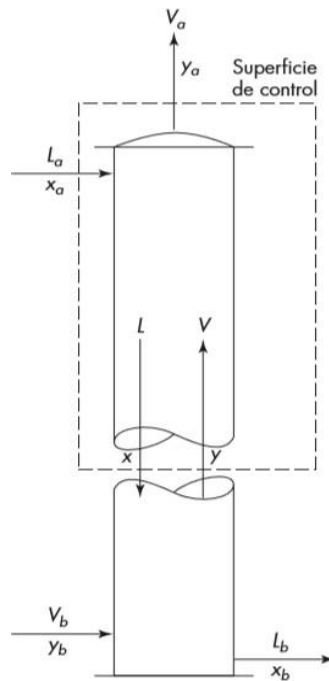


FIGURA 2.1.6 COMPONENTES DE LA TORRE PARA EL BALANCE DE MATERIA [7]

2.1.7 Estado estacionario

El estado de un sistema es dicho estacionario si todas las magnitudes que caracterizan el sistema se quedan constante en el tiempo. Al contrario, si una o varias variables del estado cambian en el tiempo, se dice que el sistema realiza un proceso (una transformación o evolución).

2.2 Variables de proceso

2.2.1 Flujo

Es el estudio del movimiento de un fluido gaseoso o líquido en movimiento. La cantidad volumétrica o másica de un fluido que escurre a través de una sección de tubería o canal por unidad de tiempo.

El flujo volumétrico es la cantidad volumétrica que fluye a través de determinada sección en un cierto intervalo de tiempo. Las unidades volumétricas más comunes son: $\frac{m^3}{s}$, $\frac{m^3}{h}$, $\frac{L}{s}$, $\frac{L}{h}$, *GPM* (*galones por minuto*), entre otras. Flujo másico, es la cantidad

en masa de un fluido que fluye a través de cierta sección en un cierto intervalo de tiempo. Las unidades másicas más consideradas son: $\frac{kg}{s}$, $\frac{kg}{h}$, $\frac{T}{h}$, $\frac{lb}{h}$, entre otras. [8]

2.2.2 Concentración

La concentración química es la cantidad en que se encuentran las sustancias que se disuelven (solute) en relación con la o las sustancias que lo disuelven (solvente). Existen concentraciones en unidades másicas ($\frac{w}{w}$, *kg*, *g*, *mg*), volumétricas ($\frac{v}{v}$, *L*, *mL*, *m³*), %, entre otras. [9]

2.2.3 Temperatura

La temperatura de una sustancia en determinado estado de agregación (sólido, líquido o gas) es una medida de energía cinética promedio de sus moléculas. Debido a que es imposible medir esta energía de manera directa, la temperatura debe determinarse en forma indirecta midiendo alguna propiedad física de la sustancia, cuyo valor depende de la temperatura de manera conocida. [9]

La unidad de medida de la temperatura son grados, en ellas se asignan escalas, las dos escalas de temperatura más comunes se definen utilizando el punto de congelación (T_f) y el punto de ebullición (T_b) del agua a presión de 1 atm. *Escala de*

Celsius ($^{\circ}C$), a T_f se le asigna un valor de $100^{\circ}C$. en esta escala, el *cero absoluto* (en teoría, la temperatura más baja de la naturaleza) es de $-273.15^{\circ}C$. *Escala Fahrenheit* a T_f se le asigna un valor de $32^{\circ}F$ y a T_b un valor de $212^{\circ}F$. el *cero absoluto* $-459.67^{\circ}F$. Las escalas *Kelvin* y *Rankine* se define de manera tal, que el *cero absoluto* tiene un valor de 0 y el tamaño del grado es el mismo que el de los grados *Celsius* (escala Kelvin) o de los grados Fahrenheit (escala Rankine). [9]

2.2.4 Presión

La presión es la relación entre la fuerza y el área sobre la cual actúa la misma. En consecuencia, las unidades de presión son unidades de fuerza entre unidades de área

($\frac{N}{m^2}$, $\frac{dina}{cm^2}$ y $\frac{lb}{in^2}$ o *psi*). La unidad de presión SI, $\frac{N}{m^2}$, se llama Pascal (*Pa*).[9]

2.3 Estado del Arte

CAPTURA DE CO₂ DE LAS CENTRALES ELÉCTRICAS, PARTE 1. ESTUDIO PARAMÉTRICO DEL RENDIMIENTO TÉCNICO BASADO EN MONOETANOLAMINA (Mohammad R.M. Abu-Zahra, Léon H.J. Schneiders, John P.M. Niederer, Paul H.M Feron, Geert F. Versteeg) [10]

Se realizó en ASPEN Plus con la subrutina RADFRAC. Esta optimización tenía como objetivo reducir el requerimiento de energía para la regeneración de solventes investigando los efectos de CO₂, porcentajes de eliminación, concentración de MEA, carga pobre del disolvente, presión del separador y la temperatura del disolvente.

COMPARACIÓN DE DISOLVENTES QUÍMICOS PARA MITIGAR EMISIONES DE CO₂ DE LAS CENTRALES DE ENERGÍA DE CARBÓN (A. Chakma, A. K. Mehrotra and B. Nielsen) [11]

Esta investigación examina los problemas clave relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero en una planta carboeléctrica, se examinó la rentabilidad de seis disolventes a base de etanolamina. En general, se encontró que la monoetanolamina (MEA) es el mejor disolvente.

ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA LA OPERACIÓN FLEXIBLE DE LA CENTRAL ELÉCTRICA CON PLANTA DE CAPTURA DE CO₂ (Yu-Jeng Lin, David Shan-Hill Wong, Shi-Shang Jang) [12]

Se propusieron esquemas de control para mejorar la flexibilidad de la producción de energía sin causar perturbaciones hidráulicas sustanciales en planta de captación. Las simulaciones se implementaron utilizando ASPEN Plus. Al variar la estrategia de flujo de solvente pobre, se manipuló la tasa de flujo de solvente reciclado para controlar el CO₂ de la tasa de captura.

CAPACIDAD CALORÍFICA DE MEZCLAS A BASE DE MONOETANOLAMINA ACUOSA, DIETANOLAMINA, N-METILDIETANOLAMINA Y N-METILDIETANOLAMINA CON DIÓXIDO DE CARBONO (Ralph H. Weiland, John C. Dingman, and D. Benjamin Cronin) [13]

Se informan nuevos datos sobre la capacidad calorífica de soluciones acuosas cargadas de CO₂ de monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA), N-metildietanolamina (MDEA) y mezclas acuosas a base de MDEA con MEA y DEA.

MODELADO DE CAPTURA DE CO₂ POR MONOETANOLAMINA ACUOSA (Stefano Freguia and Gary T. Rochelle) [14]

Se realizaron análisis de sensibilidad en las variables del proceso para encontrar las condiciones de operación con un requerimiento de vapor bajo. Muchas variables afectan fuertemente el desempeño del proceso, pero una optimización general muestra que no hay formas económicas de reducir los requerimientos de vapor en más del 10%.

MODELIZACIÓN DEL RENDIMIENTO DE UN SISTEMA DE ELIMINACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO PARA CENTRALES ELÉCTRICAS (Umberto Desideri, Alberto Paolucci) [15]

En este trabajo se modeló un sistema de remoción y licuefacción de dióxido de carbono, que separa el dióxido de carbono de los gases de escape de las centrales eléctricas convencionales. El sistema se basa en un sistema de extracción por absorción química de amina, seguido de una unidad de licuefacción para tratar el CO₂ eliminado para su transporte y almacenamiento.

SOLUBILIDAD DEL CO₂ EN 15, 30, 45 Y 60% DE MASA MEA DE 40 A 120 1C Y REPRESENTACIÓN DEL MODELO UTILIZANDO EL MARCO UNIQUAC

EXTENDIDO (Ugochukwu E. Aronu, Shahla Gondal, Erik T. Hessen, Tore Haug-Warberg, Ardi Hartono, Karl A. Hoff, Hallvard F. Svendsen) [16]

Nuevos datos experimentales para el equilibrio vapor-líquido de CO₂ en soluciones acuosas de monoetanolamina se presentan para MEA 15, 30, 45 y 60% de masa y de 40 a 120 °C. Las presiones parciales de CO₂ sobre las soluciones MEA cargadas se midieron utilizando un aparato de equilibrio a baja temperatura, mientras que las presiones totales se midieron con un aparato de equilibrio a alta temperatura. Los datos experimentales se dan como presión parcial de CO₂ en función de la carga en solución para temperaturas de 40 a 80 °C y como presiones totales para temperaturas de 60 a 120 °C para las diferentes concentraciones de MEA. Se aplicó el marco del modelo UNIQUAC y se ajustaron los parámetros del modelo al nuevo Datos de VLE y datos de solubilidad física de CO₂ de la literatura. El modelo da una buena representación de los datos experimentales de VLE para presiones parciales de CO₂ y presiones totales para todas las concentraciones de MEA con una desviación relativa absoluta media (AARD) de 24,3% y 11,7%, respectivamente.

INVESTIGACIÓN SOBRE ENERGÍA Y EXERGÍA EN DOS CENTRALES MEJORADAS DE IGCC CON DIFERENTES ESQUEMAS DE CAPTURA DE CO₂ (Yang Cao, Boshu He, Guangchao Ding, Liangbin Su, Zhipeng Duan) [17]

Se analizan termodinámicamente y se comparan dos sistemas de generación de energía compuestos por tecnologías de captura de CO₂ una de precombustión con polietilenglicol dimetiléter (PGDE) y la segunda de postcombustión con monoetanolamina (MEA). Se realizan análisis de sensibilidad de diversos parámetros que posteriormente son optimizados obteniendo eficiencias energéticas y exergéticas de 37,36% y 34,50% para el sistema con captura de CO₂ de poscombustión, mientras que 38,67% y 36,19% para el sistema con captura de CO₂ de precombustión, sin embargo, las condiciones operativas para el sistema precombustión son extremas altas presiones y bajas temperaturas comparadas con las de postcombustión.

ANÁLISIS DE LA EXERGÍA CONVENCIONAL Y AVANZADA DE LA CAPTURA DE CO₂ POSTCOMBUSTIÓN BASADA EN LA ABSORCIÓN QUÍMICA INTEGRADA CON UNA CENTRAL ELÉCTRICA Y CARBOELÉCTRICA (Akeem K. Olaleyea, Meihong Wang) [18]

En su trabajo mencionan que el sistema de captura de CO₂ post combustión basado en la absorción química incurre en una grave penalización energética debido al uso de energía para la regeneración del disolvente, por lo que estudian el proceso a través de simulaciones en estado estable en donde analizan las unidades con mayor pérdida de energía y ubican en que unidades podrían disminuir dichas pérdidas.

PERSPECTIVAS DE UTILIZAR MODELOS DE COLUMNAS BASADOS EN EL EQUILIBRIO EN LA SIMULACIÓN DINÁMICA DE PROCESOS DE CAPTURA DE CO₂ TRAS LA COMBUSTIÓN PARA CENTRALES ELÉCTRICAS DE CARBÓN (Rohan Dutta, Lars O. Nord, Olav Bolland) [19]

Se modeló y simuló una configuración de planta piloto adoptada de la literatura utilizando este simulador. Los resultados de la simulación se compararon con los datos de la planta y con los resultados utilizando modelos basados en tasas estándar disponibles en la literatura. Se encontró que los perfiles de temperatura en las columnas y los balances generales de masa y energía eran similares. El control de la proporción de líquido a gas proporcionó más control sobre el servicio del hervidor mientras se controlaba la tasa de captura enfocada en mantener una cierta proporción de captura. Se discuten las ventajas y desventajas y, en base a eso, se consideró que la proporción de captura de control era adecuada para usar mientras la planta de energía funciona de manera flexible con estrictas regulaciones de emisiones.

MODELADO DE LA CAPTURA DE CO₂ POR MONOETANOLAMINA ACUOSA (Stefano Freguia and Gary T. Rochelle) [20]

Mediante simulaciones del proceso de captura de CO₂ post combustión se realizaron análisis de sensibilidad en las variables del proceso para encontrar las condiciones de

operación con un bajo requerimiento de vapor. Muchas variables afectan fuertemente el desempeño del proceso, pero una optimización general muestra que no hay formas económicas de reducir los requerimientos de vapor en más del 10%. El trabajo del hervidor se puede reducir desde el caso base que representa las condiciones actuales de operación industrial, en un 5% si se agregan ácidos al solvente, en un 10% si la altura del absorbedor se aumenta en un 20% y en un 4% el trabajo perdido en la planta de energía se ve afectado por la variación de la presión del separador, pero no de manera significativa, por lo que se puede elegir cualquier presión adecuada para operar el separador.

SIMULACIÓN EN ESTADO CONTINUO Y ANÁLISIS DE LA POTENCIA SUPERCRÍTICA DE UNA CARBOELÉCTRICA CON CAPTURA DE CO₂ (Akeem K. Olaleye a, Meihong Wang a, Greg Kelsall) [21]

Este artículo presenta una simulación de estado estable y un análisis de exergía de una central eléctrica de carbón supercrítica (SCPP) integrada con captura de CO₂ poscombustión (PCC). La simulación se validó comparando los resultados con un estudio de caso de diseño nuevo basado en una unidad SCPP de 550 MWe. Los análisis muestran que la caldera de paso único exhibe la mayor destrucción de exergía, pero también tiene una influencia limitada en el potencial de ahorro de combustible del sistema. Se consideraron cuatro casos de la configuración de captura integrada de SCPP-CO₂ para reducir las irreversibilidades termodinámicas en el sistema al reducir las fuerzas impulsoras responsables del proceso de captura de CO₂. La configuración AIC + SF muestra la reducción más significativa en la destrucción de exergía en comparación con el sistema SCPP con captura de CO₂ convencional. Este estudio muestra que la mejora en el diseño del rendimiento de la turbina y las fuerzas impulsoras responsables de la captura de CO₂ (sin comprometer el costo) pueden ayudar a mejorar la eficiencia racional del sistema integrado.

3 *Metodología*

El propósito de este proyecto es conocer las condiciones operativas para las variables de proceso iniciales (flujo, presión, temperatura y concentración) en un proceso continuo de absorción para alcanzar la máxima capacidad absorbente de la solución química con el gas a mitigar.

El procedimiento para lograr los objetivos de este trabajo consiste en primero determinar las concentraciones y el flujo del gas a tratar, posteriormente establecer las concentraciones la solución absorbente, seguida de fijar la presión de operación y las temperaturas de entrada de los fluidos y por último calcular y validar el flujo de la solución.

3.1 Descripción del sistema de absorción

La columna de absorción a operar se encuentra ubicada en el laboratorio de procesos de separación 2, dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) de la FCQel de la UAEM. El gas para tratar en el proceso es una mezcla de aire-CO₂, de la cual se pretende absorber el CO₂ al poner el flujo gaseoso en contacto con una solución absorbente compuesta de H₂O-MEA.

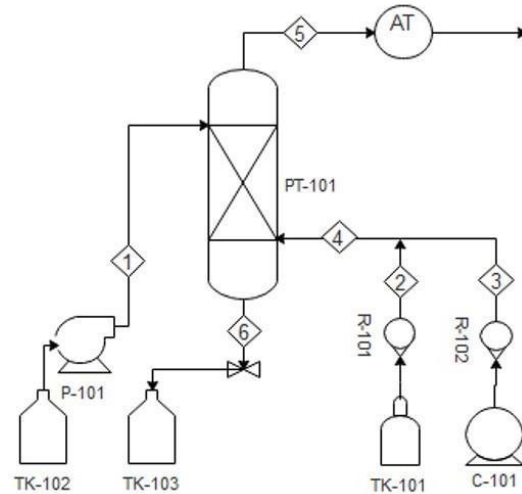
A continuación, se describe el sistema de absorción que se muestra en la Figura 3.1

El sistema consta de una columna acrílica (PT-101) empacada con monturas Berl de ½ pulgada. La solución absorbente se prepara en el tanque (TK-102) y se alimenta por la corriente 1 a través de una bomba peristáltica (P-101). Para el flujo de gas hay un tanque que contiene el CO₂ puro (TK-101) y un compresor que alimenta el flujo de aire (C-101), la concentración de la mezcla se controló con los rotámetros (R-101, R-102) y es alimentada por la corriente 4. La MEA contenida en la solución reacciona con el CO₂ cuando el gas fluye a través de la torre empacada en un flujo a contracorriente. El gas purificado se ventila a la atmósfera desde la parte superior del absorbedor por la corriente 5, en la misma corriente, se instaló un analizador de gases

para determinar la concentración de CO_2 . A través de la corriente 6 sale la solución rica en CO_2 y es almacenada en el (TK-103). El sistema cuenta con 4 termopares tipo K localizados en las corrientes 1,4,5 y 6.



A) COLUMNA DE ABSORCIÓN EMPACADA LOU



B) DTI DE UN PROCESO DE ABSORCIÓN

FIGURA 3.1 TORRE DE ABSORCIÓN

3.2 Verificación de los instrumentos de medición

Para poder llevar a cabo los experimentos en el sistema de absorción se realizaron unas pruebas para verificar el correcto funcionamiento de los instrumentos de medición. Los instrumentos verificados con el objetivo de obtener su curva de ajuste para el valor medido fueron; 4 termopares, 1 bombas peristáltica, 2 rotámetros y 2 analizadores de gases. Para estas pruebas se utilizaron las condiciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias, con una presión de 0.8 atm y 19°C (292.15 K).

3.2.1 Termopares

Es un a sensor para medir temperatura. Consiste en dos metales diferentes unidos por un extremo. Cuando la unión de los dos metales se calienta o enfría se produce un voltaje que se puede correlacionar con la temperatura [22]. Para la calibración de los termopares tipo J esto de acuerdo con su rango de temperatura (-0°C a 750°C) fue

necesario tener un termómetro patrón que te tomo como referencia, sumergiendo los termopares y el termómetro digital en agua dentro de un matraz de 250 mL.

Se realizaron mediciones de temperatura mediante un sistema de adquisición programado en Arduino, obteniendo temperaturas desde la temperatura ambiente 21°C hasta 70°C con incrementos de 10 y 5 °C, posteriormente se graficaron los valores para obtener la función de ajuste. La Figura 3.2.1 muestra los datos graficados y la ecuación de ajuste para cada termopar.

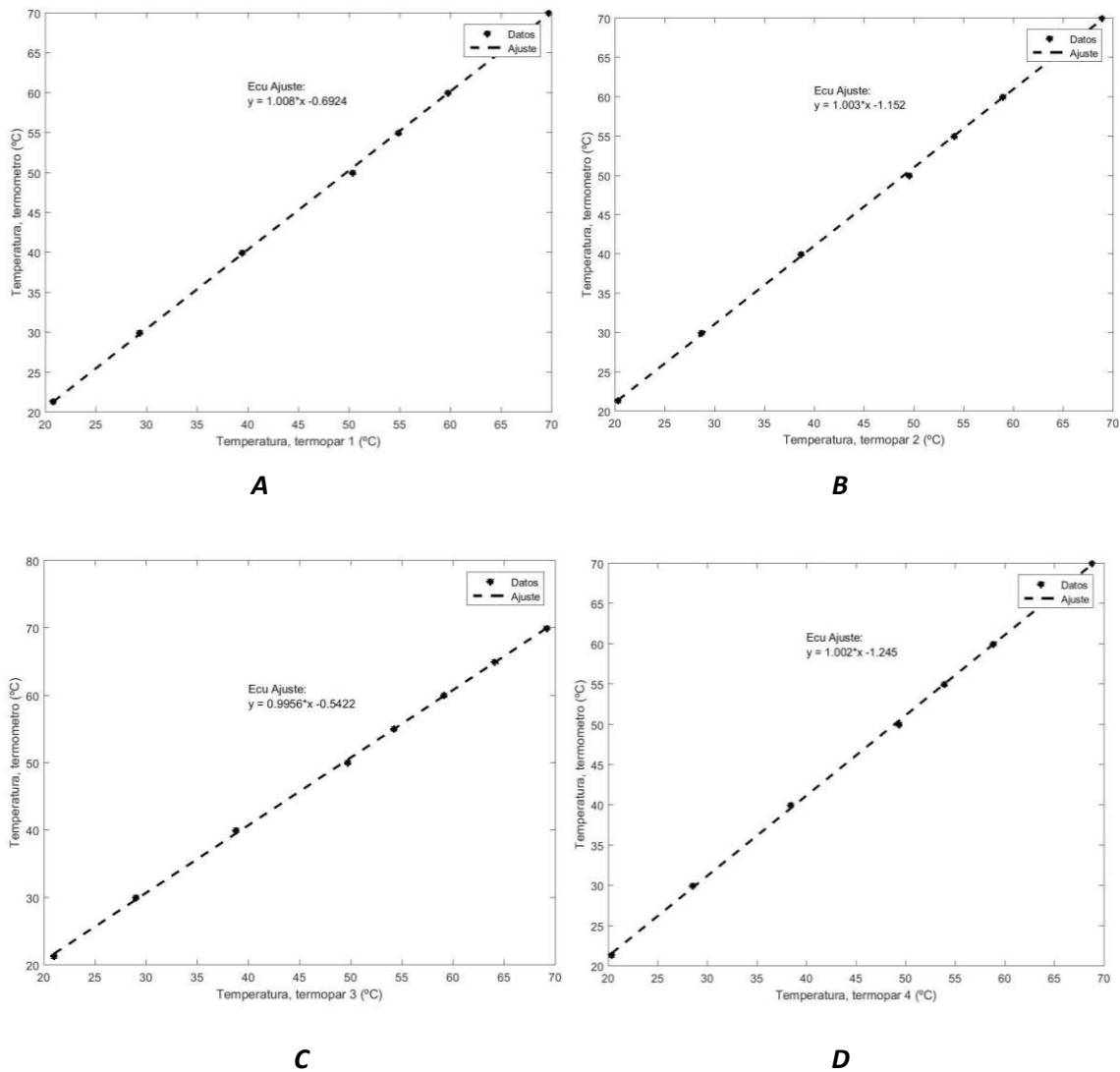


FIGURA 3.2.1 CALIBRACIÓN DE TERMOPARES A) ENTRADA DE LÍQUIDO B) SALIDA DE LÍQUIDO, C) ENTRADA DE GAS, D) SALIDA DE GAS.

3.2.2 Bomba peristáltica

La bomba peristáltica es un tipo de bomba hidráulica de desplazamiento positivo usada para bombear una variedad de fluidos. El fluido es contenido dentro de un tubo flexible empotrado dentro de una cubierta circular de la bomba [22]. La bomba que se utilizó es de marca masterflex EW-77916-10.

La calibración consistió en coleccionar agua a la salida del sistema de absorción (corriente 6) en un tiempo cronometrado, registrando tiempo, masa y temperatura. Posteriormente se realizaron los cálculos para obtener el flujo volumétrico real que fue graficado contra el flujo controlado por la bomba. La Figura 3.2.2 muestra los valores graficados y la ecuación de ajuste para el flujo volumétrico.

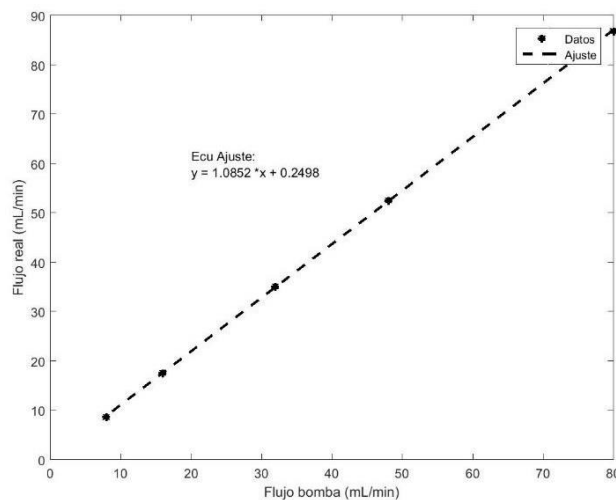


FIGURA 3.2.2 FLUJO REAL DE LA BOMBA PERISTÁLTICA

La bomba peristáltica registra un flujo real del 80%, por lo cual se tuvo que realizar una gráfica que mostrara el flujo real que está pasando durante la prueba.

3.2.3 Analizador de gases

Es un instrumento utilizado para medir la cantidad de monóxido de carbono, dióxido de carbono entre otros gases, derivados de una combustión [22]. Se utilizó un kit analizador de gases de combustión (CO , CO_2 y O_2) con memoria para 50 lecturas con un rango de lectura mínimo de CO_2 0% y máximo 25%.

Para las pruebas con los analizadores de gases, se hacía pasar un flujo gaseoso de Aire- CO₂ controlado con los rotámetros en la entrada de la corriente gaseosa de la columna de absorción, cerrando por completo las válvulas de las corrientes de entrada y salida de la solución adsorbente, y de esta manera por principio de continuidad asegurar que el flujo y composición de entrada del aire es igual al flujo y composición en la corriente de salida, en dicha corriente fue instalado el kit analizador de gases en el cual se daba lectura a la concentración en % de CO₂. Se realizaron mediciones para un rango de fracción molar de CO₂ controlado con los rotámetros de 0 a 0.17, rango que será utilizado en las pruebas experimentales. La Figura 3.2.3 muestra los resultados de los datos obtenidos en cada analizador y su respectiva ecuación de ajuste.

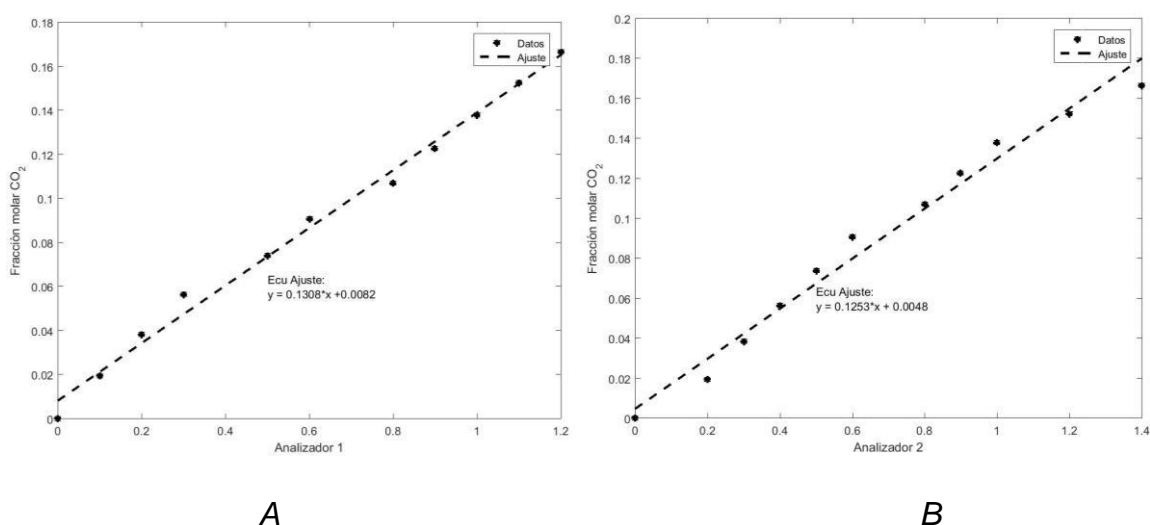


FIGURA 3.2.3 CALIBRACIÓN DEL ANALIZADOR DE GASES, A) ANALIZADOR 1, ANALIZADOR 2

3.2.4 Rotámetros

El rotámetro (Cole- Parmer) es un caudalímetro industrial que se usa para medir el caudal de líquidos y gases. El rotámetro consiste en un tubo y un flotador y lee los valores en LPM [22]. Para calibrar los rotámetros se realizaron diferentes pruebas tanto para el rotámetro 1 (marca de 0 a 1 LPM) y el rotámetro 2 (indica de 0 a 20 LPM).

Las siguientes gráficas muestran el comportamiento de los rotámetros, teniendo en el eje de las abscisas (x) , el valor establecido en el rotámetro haciendo pasar un flujo controlado de CO₂ para el rotámetro 1 y un flujo controlado de aire para el rotámetro 2, mientras que en el eje de las y se establece la fracción de CO₂ molar a la que corresponde dichos flujos. Para el rotámetro 1 se fue variando el flujo de CO₂ de 0 a 1 LPM en intervalos de 0.1 LPM manteniendo fijo el flujo de aire en un valor de 5 LPM. Para el rotámetro 2 se fue variando el flujo aire de 2 a 19 LPM en intervalos de 1 LPM manteniendo fijo el flujo de CO₂ en un valor de 2 LPM.

La Figura a) muestra los resultados y la ecuación de ajuste lineal para el rotámetro 1, mientras que la Figura b) muestra los resultados y la ecuación exponencial de segundo orden para el rotámetro 2.

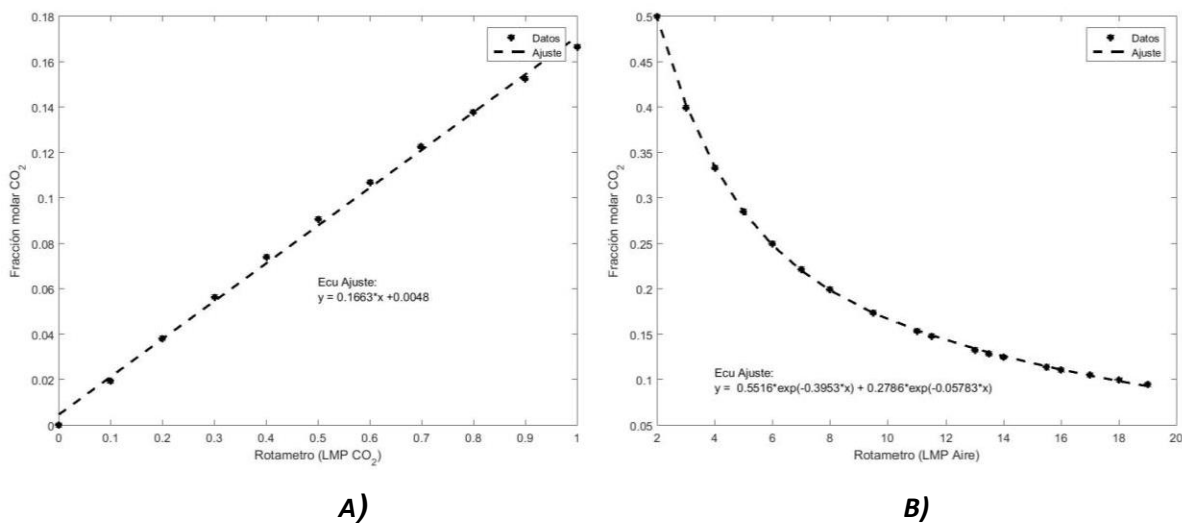


FIGURA 3.2.4 CALIBRACIÓN DE LOS ROTÁMETROS A) ROTÁMETRO 1, B) ROTÁMETRO 2

3.3 Condiciones de operación

Para los experimentos del sistema de absorción fue necesario establecer los valores de las diferentes variables de proceso para el correcto funcionamiento del sistema. En este trabajo se tuvo como objetivo establecer las condiciones de operación para realizar experimentos de absorción en forma continua alcanzando el estado estacionario.

3.3.1 Concentración de la corriente gaseosa

El proceso de absorción como se especificó en el apartado [2] de este trabajo consistió en absorber de una corriente gaseosa un soluto contaminante. Para el sistema de estudio se pretendió absorber CO_2 de una corriente gaseosa mezclado con aire. La determinación de la concentración de CO_2 a tratar consistió en hacer un estudio de la problemática real en México en relación con la contaminación de CO_2 proveniente de la quema de combustibles.

Las centrales termoeléctricas son instalaciones donde se producen grandes cantidades de energía a base de carbón, fuelóleo o gas natural. En dichas centrales la energía de la combustión del carbón, fuelóleo o gas natural se emplea para hacer la transformación del agua en vapor. Estas producen grandes emisiones de gases de efecto invernadero, específicamente producen aproximadamente 94 millones de toneladas al año de CO_2 en México. [23]. Las centrales carboeléctricas convierten la energía química contenida en el carbón en energía eléctrica.

Para el efecto, las plantas carboeléctricas queman el carbón, convirtiendo de esta manera la energía química en energía térmica (calor). [24] El calor liberado en la caldera por la combustión es transferido al agua de alimentación, la cual, por efecto del calor, se convierte en vapor. El vapor generado en la caldera a altas condiciones de presión y de temperatura es dirigido a la turbina, donde se convierte su energía térmica en energía mecánica de rotación del eje. Esta energía mecánica de rotación es convertida a energía eléctrica en el generador eléctrico, el cual está acoplado directamente al eje de la turbina. Por ello se estableció simular la concentración de gases de combustión provenientes de centrales de gas natural y de carbón. *Tabla*

3.3.1 Concentraciones de la corriente gaseosa

Concentración de CO_2	Fujo de Aire (LPM)	Fujo de CO_2 (LPM)	Fujo total (LPM)
5.17 vol %	5.5	0.3	5.8
12.28 vol%	5.0	0.7	5.7
12.5 vol %	14	2	16

3.3.2 Concentración de la solución absorbente

La monoetanolamina (MEA) es una especie química que se utiliza como material absorbente en el proceso de captura de CO₂, varios estudios demuestran su alta capacidad de absorción de CO₂ y sus ventajas y desventajas en su uso. Dentro de las ventajas es que es muy reactiva y de bajo peso molecular, dentro de las desventajas se tiene que es corrosiva a altas concentraciones, requiere de energía para su regeneración y al ser un reactivo su costo es significativo [25, 26, 27, 28, 29]. Debido a mitigar el problema de corrosión en los procesos de absorción en este trabajo se establecieron concentraciones de MEA por debajo del 30% en peso.

La Tabla 3.3.2 muestra las concentraciones de la solución absorbente establecidas, así como las cantidades másicas requeridas para alcanzar dicha concentración.

Tabla 3.3.2 Concentraciones de la solución absorbente MEA – H₂O

Concentración Masica	Concentración Molar
MEA 10% wt	MEA 3.17 % mol
MEA 15% wt	MEA 4.94% mol
MEA 20% wt	MEA 6.86 % mol
MEA 25% wt	MEA 8.94% mol
MEA 30% wt	MEA 11.21% mol

3.3.3 Presión de operación

La presión de operación de todas las unidades de absorción para el fin de capturar CO₂ en un proceso post combustión es igual a la presión atmosférica ya que la columna empacada donde se realiza el proceso de absorción está expuesta a la atmósfera [18, 19, 20, 21]. Para este estudio se estableció que la columna de absorción se operó a

presión atmosférica en el LOU igual a 0.8 atmosferas (dato monitoreado constantemente con el barómetro digital marca Taylor).

3.3.4 Temperaturas de operación

Las temperaturas que se establecen en este trabajo son en las corrientes de entrada; del gas a tratar y de la solución absorbente. En la literatura se reportan altas temperaturas para la corriente gaseosa ya que dicha corriente gaseosa proviene de la quema del combustible para la producción de energía eléctrica. Dentro el proceso global de captura de CO₂ post combustión se cuenta con una unidad de intercambio de calor para disminuir la temperatura de los gases previo a la entrada de la columna de absorción, llegando a los 40°C [27,31].

En este estudio establecí la temperatura de entrada del gas a temperatura ambiente ya que la corriente gaseosa se alimenta directamente de la mezcla del aire ambiente proporcionado por el compresor y del CO₂ del tanque de almacenamiento, dicha temperatura es determinada por el termopar que se localiza en la corriente de entrada de gas. La solución absorbente MEA-H₂O, es una solución que libera energía en su preparación aumentando la temperatura dependiendo de la concentración que se prepara. En concentraciones al 30% en peso de MEA la solución alcanza los 40°C [26, 17, 30, 31]. La solución absorbente utilizada en los experimentos de absorción se preparan previamente en el laboratorio de control de procesos, posteriormente alimente la columna de absorción de dicha solución con un flujo constante de aire para asegurar que toda la cantidad de solución absorbente se encuentra únicamente en la sección empacada y no en las tuberías de las corrientes de la parte inferior de la columna, con este procedimiento la solución se enfría debido a la corriente de aire que se requiere para cargar la columna y por esta razón la columna opera a la temperatura en el tiempo cero del experimento.

3.3.5 Flujo de la solución absorbente

Para el flujo de la solución absorbente se desarrolló una metodología para determinar el valor de esta variable con el objetivo de asegurar la saturación de la solución y el mayor porcentaje de absorción de CO₂. Varios estudios principalmente de simulación

de los procesos post combustión hacen referencia que llevan a cabo sus simulaciones logrando una captura del 85% [20], 90% del CO₂ de la corriente gaseosa [21] .

La Figura 3.3.5 muestra los principales pasos de la metodología para el alcance de los objetivos

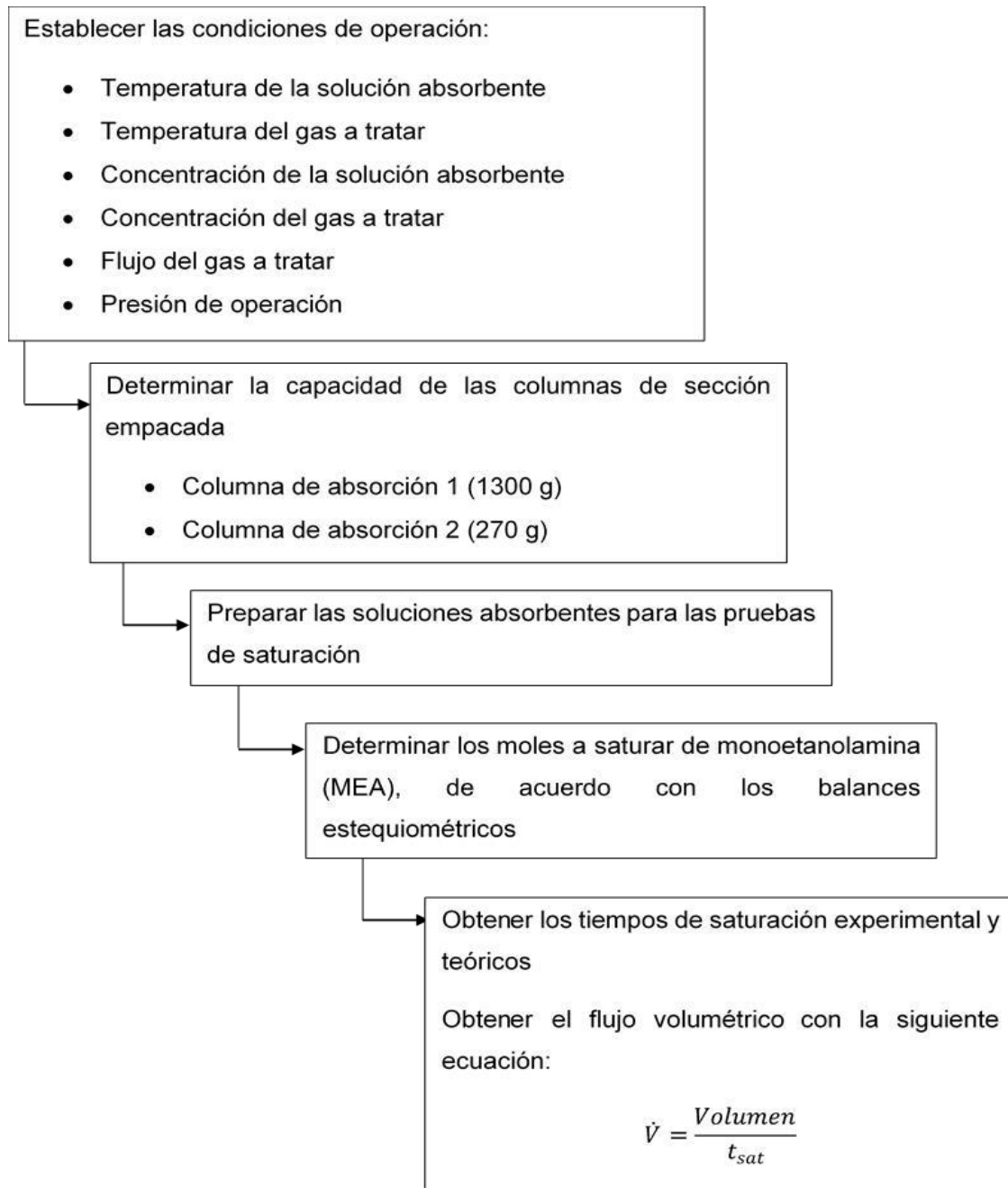


FIGURA 3.3.5 DIAGRAMA DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA EL FLUJO DE LA SOLUCIÓN ABSORBENTE

4 Resultados

4.1 Determinación experimental de flujo volumétrico

El flujo volumétrico de la solución absorbente es una de las variables de proceso que se tiene que establecer para la operación del sistema de absorción continuo en estado estacionario.

En este trabajo dicha variable se determinó mediante una metodología experimental con el objetivo de establecer el caudal que asegura una máxima absorción de CO_2 en la columna empacada de absorción, para ello es importante recordar que el CO_2 se pone a contracorriente con la MEA a cierta concentración y que una manera de asegurar que los moles de CO_2 están siendo absorbidos por el CO_2 es por la energía que se libera durante el proceso, entonces un aumento en el incremento de temperatura de la solución absorbente y de los gases a la salida nos indica que la absorción se está llevando a cabo, sin embargo cuando la temperatura comienza a descender nos indica que la absorción ya no se está llevando a cabo, lo cual indica que ya no hay moles de MEA que puedan absorber el CO_2 .

Otra manera de saber que ya no se está llevando a cabo el proceso de absorción es cuando el analizador en la corriente de salida de gases comienza a detectar presencia de CO_2 indicando que ya no hay moléculas de MEA que puedan absorberlo.

La metodología consiste en determinar el tiempo en el que se alcanza el máximo incremento de temperatura de la solución absorbente mediante pruebas de saturación haciendo pasar un flujo continuo de gas a una concentración conocida de CO_2 a través de una columna de absorción empacada con solución absorbente (monoetanolamina-agua) a una concentración conocida, dicho tiempo t_{sat} se utiliza para calcular el flujo volumétrico \dot{v} de acuerdo a la ecuación 4.1 donde v es el volumen de la solución absorbente utilizado para la prueba de saturación.

$$\dot{v} = \frac{v}{t_{sat}} \quad ec. 4.1$$

Los volúmenes de la solución absorbente utilizados para las pruebas se determinaron llenando la sección empacada de las columnas de absorción con dicha solución y con un flujo constante de aire igual al flujo total al que se realizarían las pruebas de saturación. La Tabla 4.1 muestra las condiciones de operación para las pruebas de saturación, mismas que fueron establecidas en la sección 3.3 de este trabajo, así como las características de las columnas de absorción empacadas que fueron utilizadas para la experimentación.

TABLA 4.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA LAS PRUEBAS DE SATURACIÓN

Variable	Cantidad
Presión	0.8 atm
Diámetro	0.08 m
Tipo de empaque	$\frac{1}{2}$ monturas berl <i>in</i> Cerámica
Altura de sección empacada	0.66 m y 0.12 m
Flujo de gas	16, 5.8 y 5.7 L/min
Concentración de CO_2	12.28 % vol y 5.17%
Concentración de solución absorbente	10, 15, 20, 25 y 30 %
Temperatura flujo de gas	24°C
Temperatura de la solución	24°C
Concentración de CO_2 en la solución absorbente de entrada	$0 \text{ mol}_{CO_2} / \text{ mol}_{MEA}$
Concentración de CO_2 en la solución absorbente en la salida	$0.5 \text{ mol}_{CO_2} / \text{ mol}_{MEA}$

Posteriormente se realizó la prueba en continuo bajo las mismas condiciones de operación y con este flujo calculo bajo la hipótesis que se tiene que mantener el incremento máximo de temperatura asegurando así la máxima absorción el CO_2 .

En la Figura 4.1 se muestra los resultados para la validación de esta metodología experimental, para la prueba al 30 % en peso de MEA, cargando la columna con 1.3kg de solución absorbente y un flujo de gas 16 L/min con una concentración de CO_2 de 12.28 vol. %, calculando un error relativo los incrementos de temperatura máxima tanto para la prueba de saturación y el proceso continuo de 0.03.

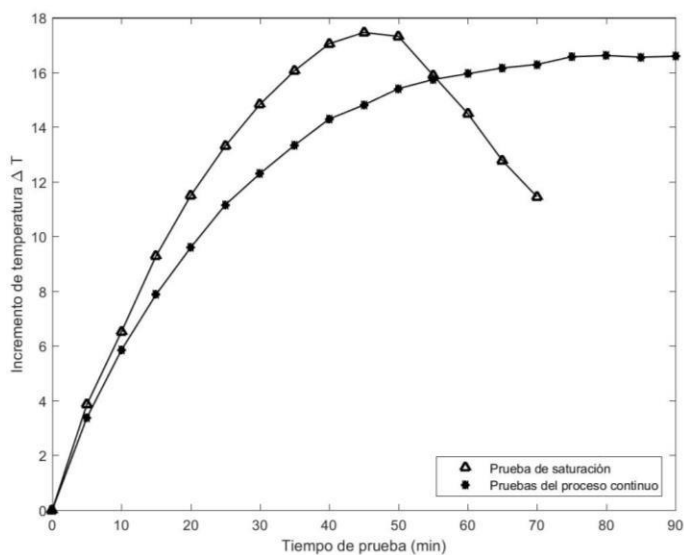


FIGURA 4.1. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL (MEA 30% WT)

El proceso que se tiene para que la solución sea absorbida se realizaron dos pruebas a una misma concentración y condiciones de operación con el fin de observar, conocer y realizar una comparación de la metodología propuesta.

El proceso de absorción se llevó a cabo a contracorriente y se puede observar un incremento de temperatura en la solución absorbente y en la corriente gaseosa. Cuando la temperatura deja de incrementar y comienza a descender, la solución se ha saturado, indicando la reacción de todos los moles de MEA que se encuentran en la solución.

El tiempo en el que se alcanzó la saturación fue utilizado para calcular el flujo volumétrico de la solución absorbente para las pruebas continuas de absorción. Las pruebas en continuo con los flujos volumétricos establecidos mantendrán el incremento de temperatura constante durante la prueba indicando que se alcanzó el estado estacionario.

4.2 Pruebas de saturación 1

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas de saturación a diferentes concentraciones y cargas de solución absorbente.

El apéndice A muestra la metodología experimental para la obtención de los siguientes resultados mientras que el apéndice B de este trabajo especifica cómo se prepararon las soluciones para las pruebas de saturación.

En la Figura 4.2 se muestra la saturación de la solución absorbente, es notable como la concentración de CO_2 alcanza la concentración inicial de CO_2 asumiendo que ya no hay más moléculas de MEA que absorban CO_2 , para ambas pruebas el tiempo de saturación es mayor cuando la solución está más concentrada. Los resultados mostraron que fue posible alcanzar la carga límite.

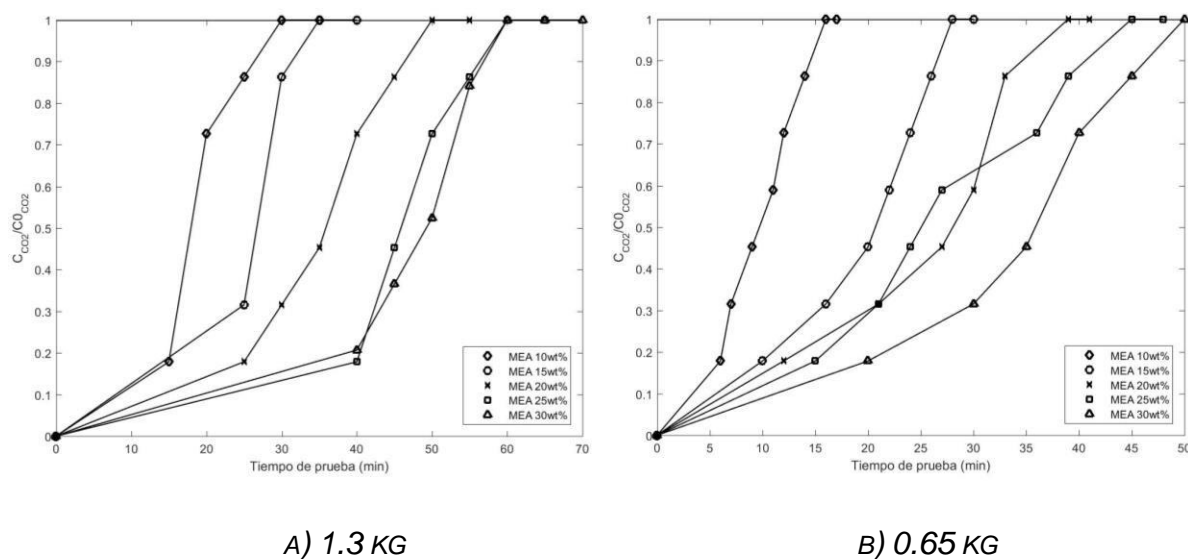
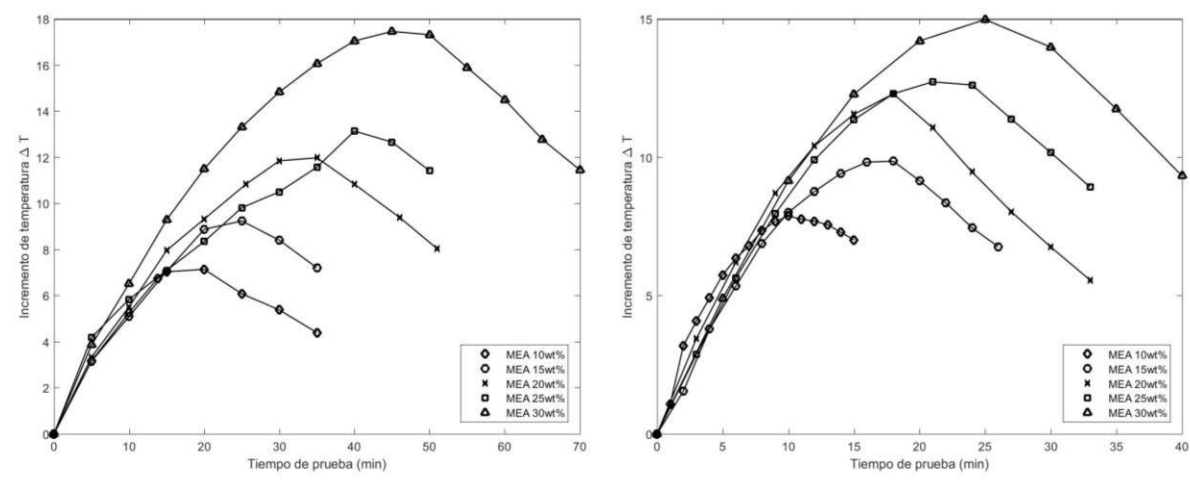


FIGURA 4.2 SATURACIÓN DE LA SOLUCIÓN ABSORBENTE A) 1.3 KG B) 0.65 KG

Los aumentos de temperatura se muestran en la Figura 4.2.1 a diferentes concentraciones de la solución absorbente, a) para las pruebas con 1.3 kg de solución absorbente y b) para las pruebas con 0.650 kg de solución absorbente.

Cuando la MEA entra en contacto con el CO₂ ocurre una reacción exotérmica, cuando la solución está concentrada la energía liberada es mayor, esto se nota con un incremento de temperatura mayor.

En las siguientes figuras se puede observar el tiempo en el que se alcanza el máximo incremento de temperatura de la solución absorbente, estos tiempos de saturación se utilizaron para calcular los flujos volumétricos para las pruebas en continuo lo cual se muestran en la Tabla 4.2



A) 1.3 KG

B) 0.65 KG

FIGURA 4.2.1 INCREMENTO DE LA TEMPERATURA DE LA SOLUCIÓN ABSORBENTE EN COLUMNA 1, A 1.300 KG Y 0.650 KG

TABLA 4.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE SATURACIÓN EN LA COLUMNA 1 (16 L/MIN DE FLUJO DE GAS A 12.28 % VOL. CO₂)

Cantidad de solución absorbente (kg)	Concentración solución absorbente (%wt.)	ΔT_{max} de solución absorbente °C	Tiempo de saturación t_{sat} (min)
1.30	10	7.00	20
	15	9.30	25
	20	12.00	35
	25	13.30	40
	30	17.80	45
0.650	10	8.00	10
	15	9.80	18
	20	12.00	18
	25	12.50	21
	30	15.00	25

4.2.1 Tiempos de saturación teóricos

La saturación de la solución ocurre cuando se alcanza la carga máxima de 0.5 (mol-CO₂ / mol-MEA) de acuerdo con la reacción estequiométrica:



Para el cálculo analítico de los tiempos de saturación de cada solución de MEA se implementó la Ec. 4.2, donde m_{MEA} (kg) es la cantidad total de MEA, P (kPa) es la presión de operación T (K) es la temperatura de la corriente gaseosa y \dot{v}_{CO_2} (L /min)

es el flujo de CO₂ en la corriente gaseosa. La expresión matemática de esta resulta de una combinación de la estequiometría de la reacción, de la ecuación de continuidad y la consideración de gases ideales.

$$t_{sat} = \frac{67.17 m_{MEAT_{gas}}}{P\dot{v}_{CO_2}} \quad ec. 4.2$$

Los tiempos de saturación experimentales se compararon con los tiempos analíticos obtenidos por la estequiometría de la reacción y con el flujo de CO₂ en la corriente de gas. Estos resultados se muestran en la Tabla 4.2.2 con la magnitud del error relativo, es importante mencionar que los tiempos experimentales se tomaron cada 5 minutos y que el error podría disminuir aún más si el seguimiento fuera por menos tiempo.

En el Apéndice C se muestra el procedimiento para el cálculo analítico del tiempo de saturación.

TABLA 4.2.2 RESULTADOS DE TIEMPOS DE SATURACIÓN CALCULADOS EN LA COLUMNA 1 (16 L/MIN DE FLUJO DE GAS A 12.28 % DE CO₂)

Cantidad de solución absorbente (kg)	Concentración solución absorbente (%wt.)	t_{sat} Analítico (min)	t_{sat} Experimental (min)	Error relativo
1.30	10	20	15.93	0.26
	15	25	23.90	0.05
	20	35	31.87	0.10
	25	40	39.83	0.00
	30	45	47.80	0.06
0.650	10	10	7.97	0.26
	15	18	11.95	0.51
	20	18	15.93	0.13
	25	21	19.92	0.05
	30	25	23.90	0.05

4.2.2 Flujo de la solución absorbente

Para establecer el flujo de trabajo para la solución absorbente se procedió a calcular el flujo volumétrico mediante la ecuación de continuidad, la Tabla 4.2.2.1 muestra los flujos volumétricos, máscicos y molares con respecto al incremento máximo de temperatura para cada experimentación, en donde se analiza un comportamiento inverso entre el flujo con respecto al incremento de la temperatura, se puede observar que, al disminuir el flujo de la solución absorbente, la temperatura de esta aumenta. Hay que tomar en cuenta que los flujos resultan de los tiempos de saturación donde se alcanzan estas máximas temperaturas, si esos tiempos son grandes entonces el flujo es pequeño y los tiempos más grandes corresponden a los mayores incrementos de temperatura.

TABLA 4.2.2.1 CONCENTRACIÓN DE LA SOLUCIÓN ABSORBENTE Y FLUJOS

Cantidad de solución absorbente (kg)	Concentración solución absorbente (%wt.)	ΔT_{max} de solución absorbente (°C)	$\frac{L}{g}$ ($\frac{g}{min}$)	$\frac{L}{mol}$ ($\frac{min}{mol}$)
1.30	10	7.00	65.00	3.36
	15	9.30	52.00	2.58
	20	12.00	37.14	1.77
	25	13.30	32.50	1.49
	30	17.80	28.89	1.27
0.650	10	8.00	65.00	3.36
	15	9.80	36.11	1.79
	20	12.00	36.11	1.72
	25	12.50	30.95	1.42
	30	15.00	26.00	1.14

4.3 Relaciones de flujo L/G

Para las diferentes concentraciones de MEA en la columna de absorción 1 se llevaron a cabo las pruebas a diferentes cantidades de solución absorbente 1.3 kg y 0.65 kg, obteniendo relaciones de flujo (L/G) para cada concentración de MEA. La Tabla 4.3 muestra los resultados de las relaciones de flujo (L/G) obtenidas para cada experimento, recordando que el flujo de la corriente gaseosa fue un valor constante para todas las pruebas igual a 16 LPM.

En los resultados se puede observar que a una relación de flujo pequeña el ΔT_{max} es más grande. La Figura 4.3 muestra que para cada cantidad de solución absorbente el aumento de temperatura en función de la relación de flujo (L/G) es casi el mismo, con esto podemos decir que el aumento de temperatura es solo una función de (L/G) y no de la concentración de la MEA.

TABLA 4.3 INCREMENTO DE TEMPERATURA EN FUNCIÓN DE LAS RELACIONES DE FLUJOS L/G (16 L/MIN DE FLUJO DE GAS A 12.28 %VOL. CO₂)

Cantidad de solución absorbente (kg)	Concentración solución absorbente (%wt.)	ΔT_{max} de solución absorbente(°C)	$\frac{L}{G}$ (\dot{m}/\dot{m})	$\frac{L}{G}$ (\dot{n}/\dot{n})
1.30	10	7.00	4.03	6.28
	15	9.30	3.23	4.83
	20	12.00	2.3	3.32
	25	13.30	2.01	2.78
	30	17.80	1.79	2.37
0.650	10	8.00	4.03	6.28
	15	9.80	2.88	3.36
	20	12.00	2.24	3.23
	25	12.50	1.92	2.65
	30	15.00	1.61	2.13

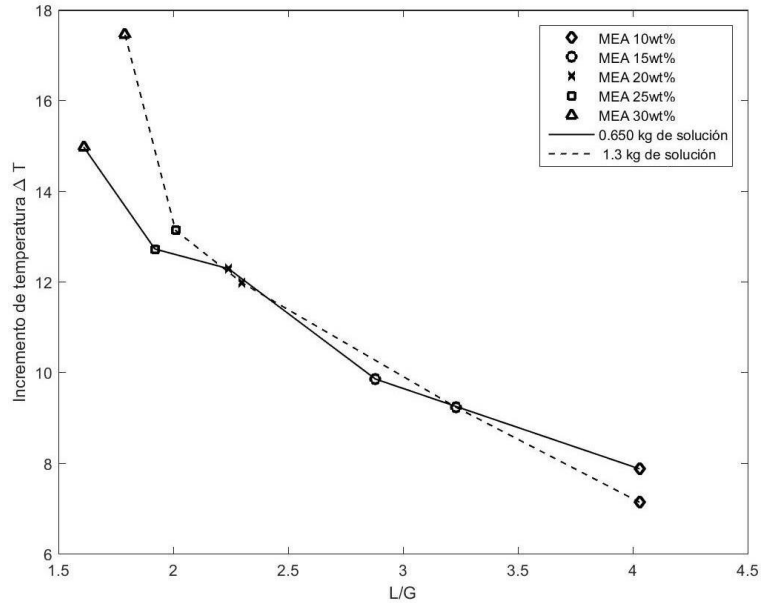


FIGURA 4.3. INCREMENTO DE LA TEMPERATURA DE LA RELACIÓN DE FLUJOS L/G

Existen varias publicaciones que presentan las simulaciones del proceso de captura de CO₂ postcombustión, si queremos conocer el aumento de temperatura en la solución absorbente en este proceso se calcula un ΔT entre las corrientes líquidas en la unidad de absorción. [19]

Para verificar esta metodología y extrapolarla a escala industrial, se consultaron publicaciones en las mismas condiciones operativas de este estudio [19,20] concentración de CO₂ en los gases de combustión, concentración de la solución de MEA, alimentación de líquido libre de CO₂ y relación de caudal (L / G), y poder comparar los incrementos de temperatura en sus simulaciones con este trabajo.

la Tabla 4.3.1 muestra un error relativo muy bajo para una comparación dando confiabilidad a esta metodología para predecir el aumento de temperatura. En la misma Tabla puede ver los resultados de otra referencia que fue imposible comparar sus resultados con los nuestros debido a la diferencia en la relación de flujo (L / G), pero puede notar el comportamiento de la relación de velocidad más alta (L / G).

TABLA 4.3.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

<i>Prueba</i>	$\frac{L}{G}$	ΔT_{max} de solución absorbente
30 % wt MEA	1.79	17.80
Literatura [32]	1.81	18.30

4.4 Pruebas de saturación 2

Resultados columna de absorción 2

En el laboratorio de operaciones unitarias de la FCQel perteneciente a la UAEM se imparte la asignatura de laboratorio de ingeniería química que tienen como objetivo llevar a la práctica los conceptos teóricos de la asignatura de procesos de separación 2 lo cual se tiene como unidad de aprendizaje el tema de Absorción.

Los laboratorios de ingeniería química en diversas universidades se cuentan con equipos a escala piloto para desarrollar sus prácticas de laboratorio sin excepción el LOU cuenta con una columna de absorción a escala piloto y de reciente adquisición una columna de menor escala, con dimensiones a un 0.5 menor que la columna a escala piloto.

El laboratorio de operaciones unitarias tiene el propósito de contar con equipos a menor escala para disminuir el impacto ambiental en la generación de residuos, ya que varios de los equipos en los laboratorios del LOU operan como procesos continuos implicando una gasta considerable de reactivos y como se mencionó antes una alta generación de residuos químicos.

La presente sección de resultados muestra los tiempos de saturación y la ΔT_{max} de solución absorbente para las pruebas realizadas en esta columna de absorción empacada 2.

Es importante mencionar que se realizaron pruebas simulando dos concentraciones de CO_2 una correspondiente a las termoeléctricas de carbón 12.28 % vol CO_2 , como en las pruebas anteriores y otra concentración simulando una central de gas natural 5.17% vol. CO_2 . Se produce una absorción química exotérmica, los moles de MEA en 0,27 kg de solución absorbente reaccionan con el flujo continuo de CO_2 , aumentando la temperatura de los fluidos.

La saturación de la solución absorbente se puede ver al alcanzar un aumento máximo de temperatura y su disminución inmediata, lo que indica que no hay más moles de MEA para la reacción.

Las Figuras 4.4.1 y 4.4.2 muestran el perfil del aumento de temperatura para las pruebas de saturación en la solución de MEA (a) y corriente de gas (b), estos incrementos de temperatura se obtienen del monitoreo cada 2 minutos tomando el tiempo cero como temperatura de referencia.

La Figura 4.4.1 muestra la saturación con un flujo controlado de Gas a 5.17 vol. % De CO_2 , mientras que la Figura 4.4.2 a 12.28 vol. % CO_2 por cada concentración de MEA (10, 15, 20, 25 y 30% en peso)

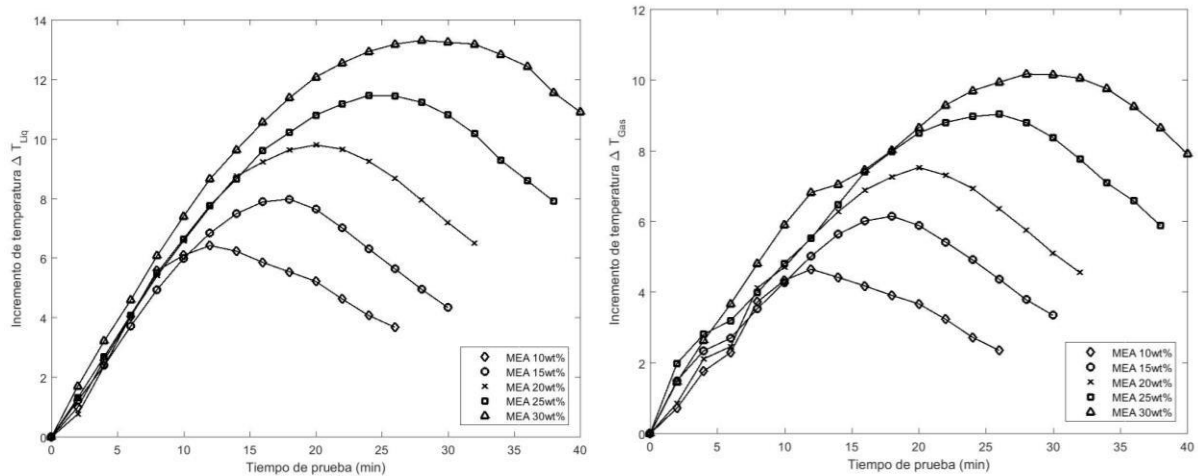


FIGURA 4.4.1 SATURACIÓN DE LA SOLUCIÓN MEA CON 12.28 VOL. % CO_2 A) SOLUCIÓN ABSORBENTE B) CORRIENTE GASEOSA

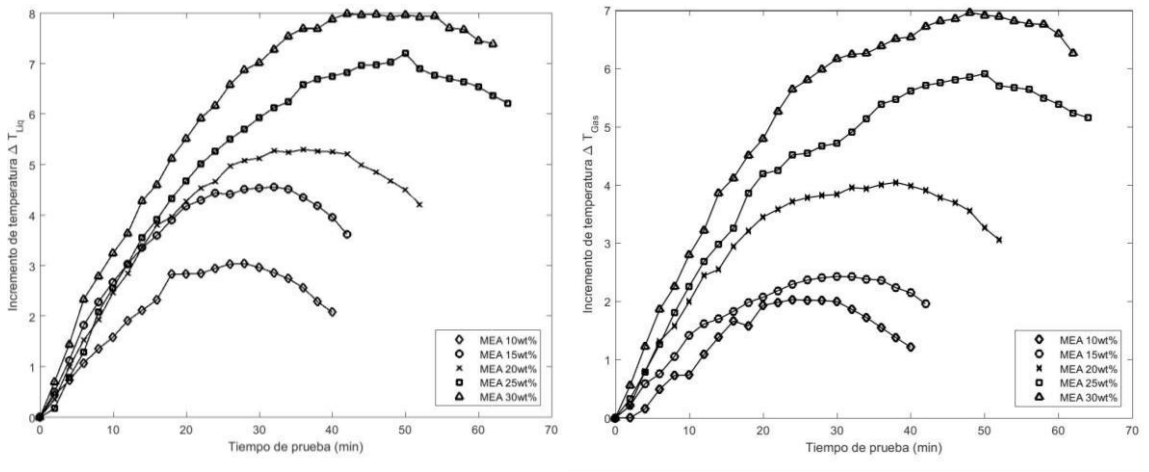


FIGURA 4.4.2 SATURACIÓN DE LA SOLUCIÓN MEA CON 5.17 VOL. % CO_2 A) SOLUCIÓN ABSORBENTE B) CORRIENTE GASEOSA

Las pruebas con flujo de CO_2 concentrado muestran los mayores aumentos de temperatura en tiempos más cortos, mientras que para el flujo de CO_2 diluido, hubo aumentos de temperatura bajos en tiempos más largos. Se produce una reacción exotérmica a partir del tiempo cero hay un aumento de la temperatura de cada fluido con respecto a su temperatura inicial.

La temperatura después de alcanzar una temperatura máxima comienza a disminuir, reflejando que la solución de MEA ya está saturada. Sin moles de MEA el CO_2 no reacciona y comienza a detectarse en la corriente 5. La monoetanolamina es una sustancia cara que hay que explotar al máximo, para ello es importante asegurarse de saturar todas las moléculas presentes, teniendo control del tiempo de contacto entre la MEA y CO_2 , para mantener la máxima eliminación de CO_2 . [33]

En este trabajo, se consideró tiempo de saturación a aquel en el que se alcanza la temperatura máxima en la solución de MEA. La Tabla 4.4.1 muestra los resultados de los tiempos de saturación calculados con la ecuación. 4.2 y los tiempos experimentales a la temperatura máxima alcanzando la saturación de la solución MEA.

Los tiempos de saturación se pueden estimar con la ecuación 4.1 para los gases de CO₂ concentrados de la combustión de carbón, mientras que para el gas natural existen discrepancias considerables a medida que aumenta la concentración de MEA.

Cabe mencionar que los tiempos monitoreados en el experimento fueron cada 2 minutos y que la temperatura máxima en las pruebas podría ser un minuto antes o un minuto después del registrado, de modo que se pudieran obtener resultados más cercanos al cálculo analítico.

TABLA 4.4.1 TIEMPOS DE SATURACIÓN DE LA SOLUCIÓN ABSORBENTE

<i>MEA (wt%)</i>	12.28 %vol CO₂		5.1 %vol CO₂	
	<i>t_{sat}</i> <i>Analítico</i>	<i>t_{sat}</i> <i>Experimental</i>	<i>t_{sat}</i> <i>Analítico</i>	<i>t_{sat}</i> <i>Experimental</i>
10	9.46	12	22.08	26
15	14.19	18	33.12	32
20	18.92	20	44.15	32
25	23.65	26	55.19	42
30	28.39	30	66.23	50

4.5 Pruebas continuas de absorción

Los resultados de las pruebas continuas se muestran en las Figuras 4.5.1 y 4.5.2. Las pruebas se realizaron en las mismas condiciones de operación, pero con un flujo continuo controlado de la solución absorbente. La Figura 4.5.1 muestra el resultado de la prueba continua para la solución de MEA al 30% en peso, donde se esperaba un aumento máximo de temperatura igual a la prueba de saturación, el ΔT_{max} que se obtuvo fue ligeramente mayor que el de la prueba de saturación.

La Figura 4.5.1 muestra el perfil de la temperatura de la solución absorbente para pruebas al 12.28 vol. % CO_2 que fueron las que tuvieron mejores resultados de tiempos de saturación según la Tabla 4.4..1

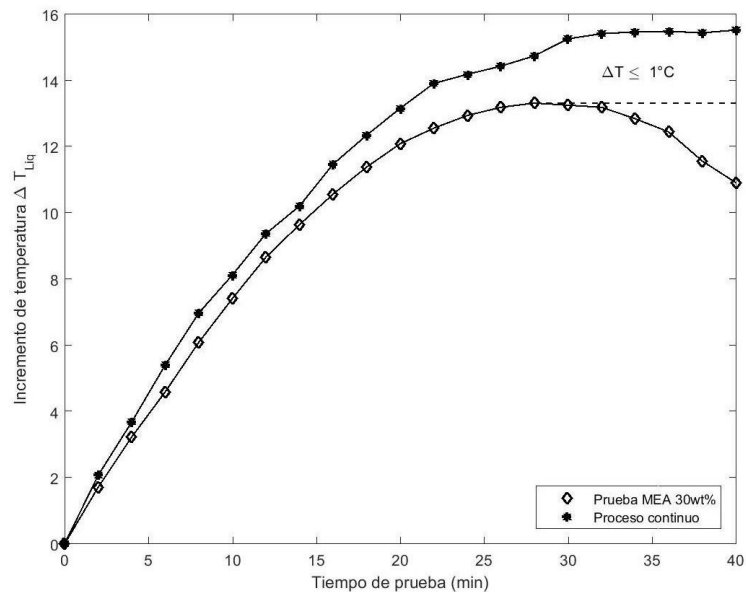


FIGURA 4.5.1 COMPARACIÓN DEL INCREMENTO DE TEMPERATURA DE LA PRUEBA DE SATURACIÓN Y LA PRUEBA EN CONTINUO PARA UNA SOLUCIÓN ABSORBENTE AL 30 WT% MEA PARA TRATAR UN FLUJO GASEOSO AL 12.28 % VOL. CO_2

Para cada concentración de MEA se alcanzó el estado estacionario y los resultados se presentan hasta el minuto 40 de las pruebas. Es importante mencionar que se esperaba mantener el aumento máximo de temperatura controlando el tiempo de contacto de ambos fluidos dentro de la columna de absorción, sin embargo, en pruebas continuas se puede ver un $\Delta T \leq 1^\circ \text{C}$ con respecto a las temperaturas de las pruebas de saturación para cada concentración de MEA.

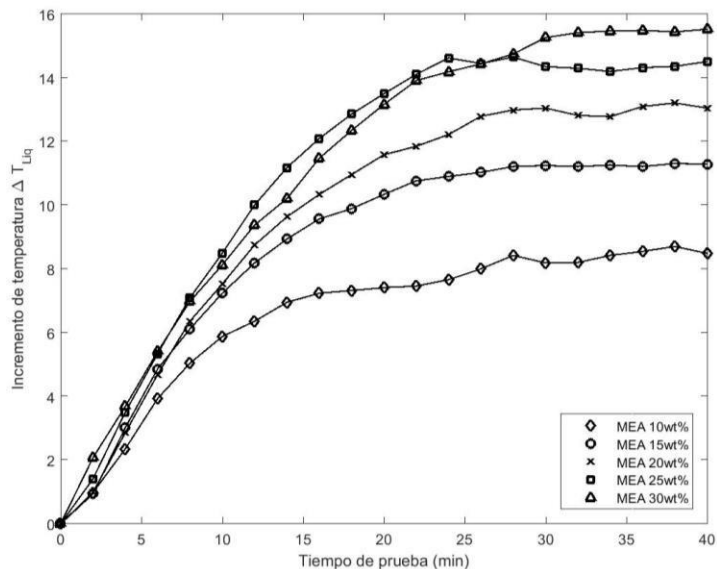


FIGURA 4.5.2 PRUEBAS EN CONTINUO CON 12.28 %VOL. CO_2

4.6 Caracterización de la solución absorbente

Las soluciones poseen una serie de propiedades que las caracterizan, las propiedades físicas de la solución son diferentes a las del solvente puro. Sus componentes no pueden separarse por métodos físicos, estos solo pueden separarse por procesos de separación que incluyan el transporte de materia y energía.

En una disolución, tanto el soluto como el solvente interactúan a nivel de sus componentes más pequeños (moléculas, iones), esto explica el carácter homogéneo de las soluciones y la imposibilidad de separar sus componentes por métodos mecánicos. En este trabajo es importante tener caracterizada la solución absorbente cuando se encuentra libre de CO_2 y cuando se encuentra saturada de CO_2 .

Las pruebas fisicoquímicas para asegurar la saturación de la solución absorbente se determinaron en condiciones ambientales de 0.79 atm y 293.15 o 297.15 K. Fueron:

- Densidad
- Viscosidad
- Índice de refracción

4.6.1 Densidad

Propiedad que tienen los cuerpos en tener cierta masa en cierto volumen.

La propiedad de densidad fue medida para cada solución absorbente a las diferentes concentraciones, utilizando una balanza digital y matraces de aforar de 10 mL. El procedimiento experimental consistió en tarar un matraz de 10 mL, aforar con la solución absorbente hasta 10 mL, registrar el peso y obtener la densidad de la sustancia. Este procedimiento se repitió para cada sustancia a las diferentes concentraciones de en peso de MEA (10, 15, 20, 25 y 30% wt) libres y saturadas de CO_2 . La Figura 4.6.1.2 muestra el comportamiento lineal de esta propiedad fisicoquímica para las soluciones absorbente en la misma figura se muestra el ajuste para cada comportamiento lineal.

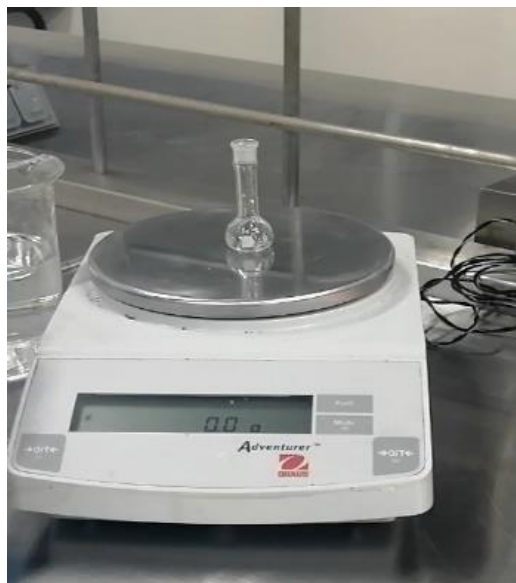


FIGURA 4.6.1.1 MEDICIÓN DE DENSIDAD (BALANZA ANALÍTICA MODELO DE PRECISIÓN JF2204 ADVENTURER)

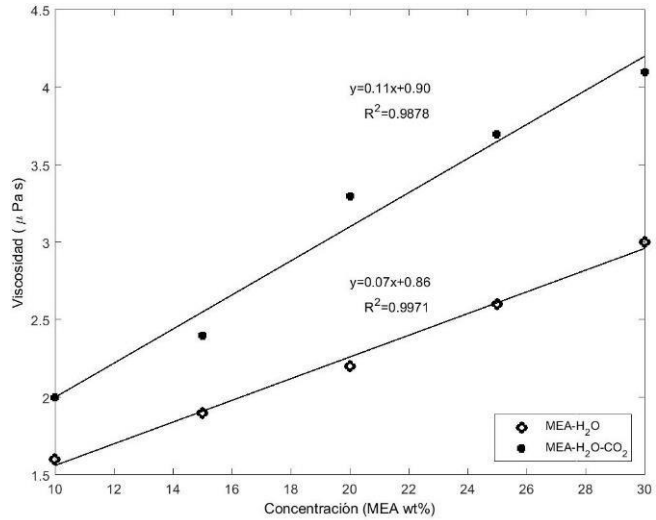


FIGURA 4.6.1.2 COMPORTAMIENTO DE LA DENSIDAD

4.6.2 Viscosidad

Es una medida de la resistencia de un líquido a su fluidez y deformación.

El instrumento utilizado para determinar la viscosidad de las soluciones absorbentes libres y saturadas de CO₂ a las diferentes concentraciones fue un viscosímetro rotacional. Se requiere un litro de la solución en un vaso de precipitado de 1 L. La viscosidad se midió a RPM. La Figura 4.6.2. muestra el comportamiento lineal de la solución libre de CO₂ y saturada de CO₂, así como el ajuste correspondiente.



FIGURA 4.6.2.1 VISCOSÍMETRO ROTACIONAL (BAUSCH & LOMB, NDJ-8S ROTATIONAL VISCOMETER)

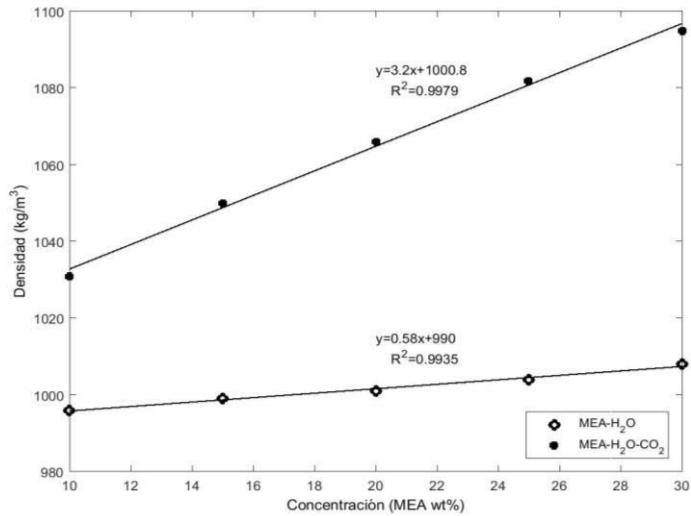


FIGURA 4.6.2.2 COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD

4.6.3 Índice de refracción

Bajo condiciones controladas de medida, es una propiedad constante para un medio y permite determinar la pureza de una sustancia o cuantificar un determinado compuesto en mezclas binarias de constituyentes conocidos.

Se lleva a cabo por medio de refractómetros, que son aparatos ópticos de precisión, pero de sencillo principio operativo y manejo, basados en el concepto de ángulo límite, que es el mayor ángulo de incidencia de un rayo luminoso en una gema, que permite la refracción del rayo. Si el ángulo de incidencia es mayor que el límite, se produce una reflexión.



FIGURA 4.6.3.1 REFRACTÓMETRO (ATAGO NAR-T3)

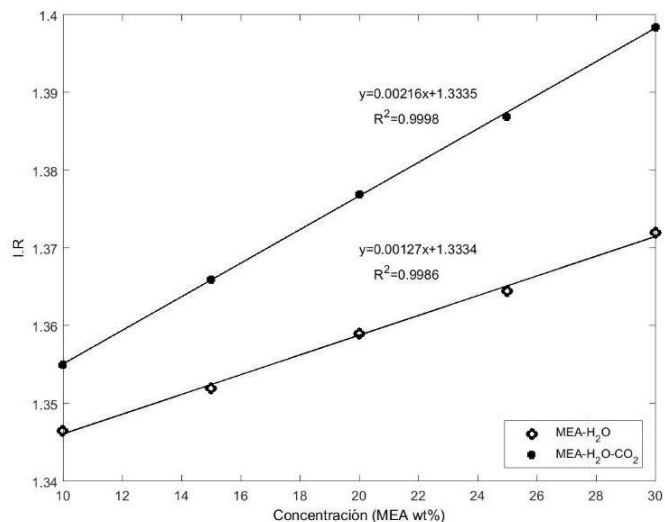


FIGURA 4.6.3.2 COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN

La Figura 4.6.3.2 muestra el comportamiento del índice de refracción para las soluciones absorbente

Los resultados para las soluciones libres de CO₂ y las soluciones de MEA saturadas con CO₂ se muestran en la Tabla 4.6.3 Para cada propiedad física, se muestra un aumento al saturar las soluciones de MEA. Para soluciones de MEA libres de CO₂, se ha informado en la literatura para soluciones concentradas de 0 a 100% en peso. % MEA.

Teniendo comportamientos no lineales de densidad y viscosidad, sin embargo, para concentraciones por debajo del 30% en peso de MEA se puede considerar lineal de acuerdo con los gráficos presentados. [34]

TABLA 4..6.3 PROPIEDADES FÍSICAS

MEA (wt%)		Densidad (kg/m³)	Viscosidad (mPa * s)	Índice de refracción
10	<i>Libre de CO₂</i>	996	1.6	1.3465
	<i>Saturada de CO₂</i>	1031	2.0	1.3550
15	<i>Libre de CO₂</i>	999	1.9	1.3520
	<i>Saturada de CO₂</i>	1050	2.4	1.3660
20	<i>Libre de CO₂</i>	1001	2.2	1.3590
	<i>Saturada de CO₂</i>	1066	3.3	1.3770
25	<i>Libre de CO₂</i>	1004	2.6	1.3645
	<i>Saturada de CO₂</i>	1082	3.7	1.3870
30	<i>Libre de CO₂</i>	1008	2.9	1.3720
	<i>Saturada de CO₂</i>	1095	4.1	1.3985

5 *Conclusiones y Recomendaciones*

El presente trabajo se desarrolló una metodología experimental para mantener la saturación en la solución absorbente para un proceso de captura de CO₂ postcombustión que estaría relacionado con el aumento de temperatura ΔT en la solución hasta alcanzar una temperatura máxima ΔT_{max} .

La solución absorbente fue monoetanolamina a diferentes concentraciones (10, 15, 20, 25 y 30% en peso), la concentración de CO₂ simulada en el experimento fue para centrales eléctricas de gas natural y carbón de 5.17 y 12.28% en volumen de CO₂ respectivamente.

Se presento una expresión matemática que calcula el tiempo de saturación de la solución que es confiable para soluciones saturadas con corrientes de gas al 12.28% en volumen de CO₂.

Una de las principales características de esta metodología fue considerar el tiempo de saturación obtenido experimentalmente como el tiempo de residencia para cálculo de caudal a pruebas continuas.

Los resultados de las pruebas de absorción continua verificaron que la solución se puede mantener saturada, alcanzando el estado estacionario del aumento máximo de temperatura para cada concentración de MEA. Los aumentos de temperatura en las pruebas continuas y las pruebas de saturación tuvieron una desviación de $\Delta T \leq 1^\circ \text{C}$.

Una vez determinado el flujo volumétrico mediante la metodología experimental, se obtuvieron en su totalidad las condiciones de operación de las columnas de absorción 1 y 2 del LOU, mismas que se resumen en la Tabla 5.1

TABLA 5.1 CONCLUSIONES

Masa Solución (kg)	Flujo del gas (L/min)	Concentración CO ₂ (vol. %)	Flujo de solución (mL/min)	Concentración MEA (w/w. %)
1.300	16	12.28	81.60	10
			54.40	15
			40.80	20
			32.80	25
			27.20	30
0.650	16	12.28	81.60	10
			54.40	15
			40.80	20
			32.80	25
			27.20	30
0.270	5.17	5.17	13.60	10
			8.80	15
			6.40	20
			5.60	25
			4.80	30
0.270	5.17	12.28	28.80	10
			19.20	15
			14.40	20
			12.00	25
			9.60	30

Debido a la importancia de caracterizar las soluciones absorbentes y conocer si se alcanza la saturación de la solución, se realizaron mediciones de propiedades físicas como densidad, viscosidad e índice de refracción para soluciones de MEA saturadas y libres de CO₂ a concentraciones inferiores al 30% en peso.

RECOMENDACIONES (TRABAJO FUTURO)

- Verificar experimentalmente las pruebas en continuo en la columna de absorción a escala piloto para las concentraciones que hacen falta.
- Continuar con la simulación experimental de la captura de CO₂ para centrales de carbón y gas natural acoplado al sistema de absorción el sistema de desorción, y trabajar bajo las mismas condiciones de operación.
- Establecer el flujo de vapor requerido para desorber la solución absorbente proveniente del proceso de absorción.
- Operar el proceso continuo de captura de CO₂ (absorción-desorción)

Apéndice A

Metodología experimental “Pruebas de saturación”

- 1- Revisar que las válvulas de la torre de absorción estén cerradas.
- 2- Encender el compresor, marcando “x” flujo de aire.
- 3- Encender la bomba peristáltica y comenzar a llenar la torre de absorción a un flujo “x” L/ min.
- 4- Medir la temperatura $t = 0$.
- 5- Abrir el tanque de CO_2 .
- 6- Una vez llena la torre de absorción se ajustan los flujómetros a “x” flujo de aire y “x” flujo de CO_2 , ya que la prueba experimental se realizó a distintas concentraciones tanto de MEA como de CO_2 .
- 7- Se mide la temperatura en rangos de 5 min.
- 8- A partir de un tiempo de 0 min aproximadamente se comienza a medir con el analizador de gases la cantidad que se está absorbiendo.
- 9- Registrar resultados (temperatura y analizador de gases).
- 10-Una vez que el analizador mantiene constante su resultado, se apaga.
- 11-Cerrar el flujo de CO_2 y se mantiene el flujo de aire.
- 12- Abrir la válvula del flujo de salida.
- 13- Vaciar la torre y colocar la mezcla en un tanque de almacenamiento.
- 14-Cerrar el flujo de aire y válvulas.
- 15- Analizar los resultados obtenidos.

Apéndice B

Preparación de la solución

La concentración en la solución de MEA-Agua es un factor que se tomara en cuenta para determinar los moles que se absorben y el tiempo que deberá tardar la prueba. Para calcular su valor se emplea la siguiente ecuación:

$$W "A" = (\% \text{ concentración}) (\text{masa de disolución})$$

De acuerdo con pruebas realizadas en blanco se sabe que la columna de absorción del Laboratorio de Operaciones Unitarias donde se realizaron las pruebas experimentales tiene una capacidad de 270 g de masa del soluto, por lo tanto:

- Se requiere una solución al 10 % MEA ,90% Agua.

$$W \text{ MEA} = (0.10) (270 \text{ g})$$

$$W \text{ MEA} = 27 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

$$W \text{ Agua} = (0.90)(270 \text{ g})$$

$$W \text{ Agua} = 243 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

$$W_{\text{mezcla}} = W A + W B$$

$$W_{\text{mezcla}} = 27 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{MEA} + 243 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{de Agua}$$

$$W_{\text{mezcla}} = 270 \text{ g}$$

El peso total de la mezcla siempre deberá ser el mismo (270 g) lo que varía es el peso de los compuestos, ya que cambian dependiendo la concentración que se requiera (10%, 15%, 20%, 25% o 30%).

Apéndice C

Cálculo analítico del tiempo de saturación

Para este tipo de procedimiento es necesario obtener el número de moles de MEA y CO_2 que se encuentran en la solución. Para ello es necesario lo siguiente:

- Para conocer el número de Moles de MEA que se encuentran en la solución se conoce la concentración de la solución, es decir, se tiene una concentración del 10% w/w de MEA en 1300 g y se conoce el peso molecular de MEA.

Para conocer la equivalencia del % en peso es necesario multiplicarlo:

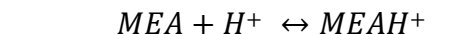
$$1300 \text{ g} * 0.10 = 130 \text{ g}$$

Para conocer los moles que existen de MEA es necesario dividir la masa de MEA entre el peso molecular:

Peso molecular MEA = 61.08 g/mol

$$\frac{130 \text{ g}}{61.08 \text{ g/mol}} = 2.1283562540 \text{ mol MEA}$$

- Para obtener los moles de CO_2 se conoce la reacción:



Por lo tanto:

Por cada mol de CO_2 se absorben 2 de MEA.

$$\frac{2.1283562540 \text{ mol MEA}}{2} = 1.064178127 \text{ mol abs de } CO_2$$

Para el cálculo de los flujos será necesario utilizar la ecuación de los *Gases ideales*, formula que se encuentra en la bibliografía tradicional que data de varias décadas atrás y se basa en la ley de Boyle, la de Gay- Lussac, la de Charles y la ley de Avogadro [9]

$$PV = \eta RT$$

Con esta ecuación se calculará el número de moles que será necesario para la prueba, tomando en cuenta los siguientes factores:

- **P**=Presión atmosférica del lugar en donde se realiza la prueba, en este caso se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, ubicada en Chamilpa (Cuernavaca, Morelos).
- **V**=Volumen en este caso como se habla de la ecuación de gases ideales se refiere al volumen de CO₂ en LPM.
- **η** =Numero de moles, es el valor que queremos conocer, por lo tanto, se debe despejar de la ecuación general de gases ideales.
- **R**=Es la constante de los gases ideales, existen diferentes, pero para este caso se eligió la más adecuada dependiendo de las unidades que se tienen y al proceso que se lleve a cabo.
- **T**=Temperatura a la que se encuentra en el lugar en Kelvin.

De acuerdo con el proceso se requiere conocer el flujo molar, con esta ecuación se calculará el número de moles que será necesario para la prueba, tomando en cuenta los siguientes factores, Presión, Temperatura, R (constante de los gases, Volumen y η). Esta ecuación nos ira el flujo necesario para obtener los tiempos de saturación.

$$\eta = \frac{PV}{RT}$$

$$P = 0.8 \text{ atm}$$

$$T = 19^\circ \text{ (convertir a } ^\circ\text{K)} = 297.15 \text{ K}$$

$$\text{Factor de conversión} \rightarrow ^\circ\text{C} + 273.15 = ^\circ\text{K}$$

$$19 + 273.15 = 292.15 \text{ K}$$

$$V = 0.2 \text{ LPM } \text{CO}_2$$

$$R = 0.08205746 \left(\frac{\text{atm L}}{\text{mol K}} \right)$$

Flujo molar:

$$\eta = \left[\frac{(0.8 \text{ atm})(12.5 \text{ LPM})}{\text{atm L}} \right] = 0.0417134432 \left(\frac{\text{mol}}{\text{min}} \right)$$

$$(0.08205746 \text{ mol K})(292.15 \text{ K})$$

Por lo tanto, se sabe que por cada molécula de CO_2 reacciona una molécula de MEA, para obtener el tiempo de saturación es necesario dividir los moles de CO_2 absorbidos entre el flujo obtenido:

$$\frac{1.064178127}{0.0417134432} = 2.551163476 \text{ min}$$

Para la obtención de la temperatura de saturación es necesario utilizar la ecuación:

$$t_{sat} = \frac{67.17 m_{MEA} T_{Gas}}{P \psi_{\text{CO}_2}}$$

$$t_{sat} = \frac{(67.17 * 0.13 * 292.15)}{(0.8 * 12.5)} = 254.9773$$

Apéndice D

Cálculo de los caudales

El caudal (Q) es la cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo. Menos frecuentemente, se identifica con el flujo másico o masa que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

Para este tipo de pruebas se tuvo que calcular la densidad de la mezcla MEA-H₂O para poder obtener un volumen de flujo en una unidad de tiempo y así poder calcular los tiempos experimentales de las pruebas en continuo, así como su tiempo desaturación.

Para el cálculo la densidad:

$$\rho_{mezcla} = \rho_{MEA} \cdot X_{wMEA} + \rho_{H_2O} \cdot X_{wH_2O}$$

Se busca la densidad (ρ) de la MEA y del H₂O a la temperatura que se inicia la prueba (25°C) y X es la concentración de la prueba, es decir el por ciento tanto para MEA como para H₂O, considerando que la concentración total de la mezcla es de un 100%.

$$\rho_{MEA} = 1,012 \text{ g/cm}^3 \text{ a una temperatura de } 25^\circ\text{C} \text{ [35]}$$

$$\rho_{H_2O} = 997.13 \text{ g/cm}^3 \text{ a una temperatura de } 25^\circ\text{C} \text{ [35]}$$

Considerando una concentración del 10%

$$\rho_{mezcla} = \left[\left(1,012 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 0.10 \right) + \left(997.13 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 0.90 \right) \right]$$

$$\rho_{mezcla} = 897.51 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Las densidades serán diferentes de acuerdo con las concentraciones que se tienen.

Una vez obtenida la densidad de la mezcla se hace el cálculo del caudal, fue necesario el cálculo de la densidad para poder obtener las unidades de Q una unidad de volumen por unidad de tiempo.

Flujo de saturación

Para obtener este flujo se debe conocer el flujo total y el tiempo de saturación para sustituir en la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{\textit{flujo total}}{\textit{tiempo de saturación}}$$

Apéndice E

Metodología experimental “Pruebas en continuo”

- 1) Revisar que las válvulas de la torre de absorción estén cerradas.
- 2) Encender el compresor, marcando un flujo “x” de aire.
- 3) Encender la bomba peristáltica y comenzar a llenar la torre de absorción a un flujo “x” L/ min.
- 4) Medir la temperatura $t = 0$.
- 5) Abrir el tanque de CO_2 . una vez llena la torre de absorción se ajustan los flujómetros a “x” cantidad de aire y “x” cantidad de CO_2 , ya que la prueba experimental se realizó a distintas concentraciones tanto de MEA como de CO_2 .
- 6) Una vez llena la torre de absorción se ajustan los flujómetros a “x” cantidad de aire y “x” cantidad de CO_2 , ya que la prueba experimental se realizó a distintas concentraciones tanto de MEA como de CO_2 .
- 7) Al ser un proceso continuo se abrió la válvula de salida del líquido a “x” y se mantiene a un flujo de salida “x” (este debe mantenerse durante toda la prueba), la solución absorbida sale y se coloca en un tanque de almacenamiento.
- 8) A partir de un tiempo de 20 min aproximadamente medir con el analizador de gases la cantidad que se está absorbiendo.
- 9) Registrar los resultados (temperatura y analizados de gases).
- 10) Una vez que el analizador mantiene constante su resultado, se apaga el analizador.
- 11) Cerrar el flujo de CO_2 y mantener el flujo de aire.
- 12) Abrir la válvula del flujo de salida.
- 13) Vaciar la torre y colocar la mezcla en un tanque de almacenamiento.
- 14) Cerrar el flujo de aire y las válvulas.
- 15) Analizar resultados.

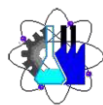
REFERENCIAS

- [1] (s.f.). Obtenido de Analisis de la Tecnologia del Aire: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4355/fichero/ANALISIS+DE+LA+TECNOLOGIA+DE+REDUCCION+EFFECTIVA+DE+EMISIONES+DE%252F3.+TECNOLOGIA+DE+CAPTURA+DE+CO2.pdf>
- [2] Ecologistas en acción. (2015). Obtenido de <https://www.ecologistasenaccion.org/7815/captura-y-almacenamiento-de-co2/>
- [3] OSCAR BARBOZA LIZANO. (2013). Obtenido de Revista de Cesla: <https://www.redalyc.org/pdf/2433/243329724003.pdf>
- [4] (1991). En J. C. Warren L.McCabe, *Operaciones Unitarias en Ingenieria Quimica* (pág. 1112). Madrid, España: EDIGRAFOS, S. A.
- [5] Ceballo, J. M. (s.f.). *Operaciones y Procesos* . Obtenido de Operaciones Unitarias : <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1313/course/section/1616/BLOQUE2-OyP.pdf>
- [6] (2007). En J. C. Warren L.McCabe, *Operaciones Unitarias en Ingenieria Quimica* (pág. 1211). México, D. F.: McGrawHill.
- [7] Perry, R. H. (2010 (9 Edición)). *PERRY'S INGENIERIA QUÍMICA (MANUAL III)*. Londres: Mc Graw Hill .
- [8] Skiba, Y. N. (s.f.). Conceptos basicos para la mecanica de fluidos . En Y. N. Skiba, *Introducción a la dinámica de fluidos* (págs. 1-49).
- [9] Richard M. Felder, R. W. (2004). *Principios elementales de los procesos químicos*. LIMUSA WILEY.
- [10] Mohammad R.M. Abu-Zahra, L. H. (2006). CO₂ capture from power plants Part I. A parametric study of the technical performance based to monoethanolamine. *ScienceDirect*, 10.

- [11] A. Chakma, A. M. (1995). COMPARISON OF CHEMICAL SOLVENTS FOR MITIGATING CO₂ EMISSIONS FROM COAL-FIRED POWER PLANTS. En *Heat Recovery Systems* (págs. 231-240). Great Britain: Elsevier Science.
- [12] Yu-Jeng Lin, D. S.-H.-S. (2011). Control Strategies for Flexible Operation of Power Plant with CO₂ Capture Plant. *Dept. of Chemical Engineering, National Tsing-Hua University, Hsin-Chu 30013, Taiwan*, 8.
- [13] Ralph H. Weiland, J. (1997). Optimized Gas Treating. Houston, Texas: Whitewater Lane.
- [14] Rochelle, S. F. (2003). Modeling of CO Capture by Aqueous Monoethanolamine. *AIChE Journal*, 11
- [15] Umberto Desideri*, A. P. (1999). Performance modelling of a carbon dioxide removal system for power plants. *ENERGY CONVERSION Y MANAGEMENT*, 17.
- [16] Ugochukwu E. Aronu, S. G.-W. (2011). Solubility of CO₂ in 15, 30, 45 and 60 mass% MEA from 40 to 120 °C and model representation using the extended UNIQUAC framework. *Chemical Engineering Science*, 15.
- [17] Cao, Y., He, B., Ding, G., Su, L., & Duan, Z. (2017). Energy and exergy investigation on two improved IGCC power plants with different CO₂ capture schemes. *Energy*, 140, 47-57.
- [18] Olaleye, A. K., & Wang, M. (2017). Conventional and advanced exergy analysis of post-combustion CO₂ capture based on chemical absorption integrated with supercritical coal-fired power plant. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 64, 246-256.
- [19] Dutta, R., Nord, L. O., & Bolland, O. (2017). Prospects of using equilibrium-based column models in dynamic process simulation of post-combustion CO₂ capture for coal-fired power plant. *Fuel*, 202, 85-97.

- [20] Freguia, S., & Rochelle, G. T. (2003). Modeling of CO₂ capture by aqueous monoethanolamine. *AIChE Journal*, 49(7), 1676-1686.
- [21] Olaleye, A. K., Wang, M., & Kelsall, G. (2015). Steady state simulation and exergy analysis of supercritical coal-fired power plant with CO₂ capture. *Fuel*, 151, 57-72.
- [22] Sánchez, J. A. (2006). Instrumentacion y control básico de procesos. Ediciones Diaz de Santos, S.A.
- [23] GUÍA AMBIENTAL PROYECTOS CARBOELÉCTRICOS. (2016). *UPMV*, 45.
- [24] INECC. (2016). Obtenido de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (GYCEI): <https://cambioclimatico.gob.mx/estadosymunicipios/Emisiones.html>
- [25] Luis, P. (2016). Use of monoethanolamine (MEA) for CO₂ capture in a global scenario: Consequences and alternatives. *Desalination*, 380, 93-99.
- [26] Gao, J., Yin, J., Zhu, F., Chen, X., Tong, M., Kang, W., ... & Lu, J. (2017). Postcombustion CO₂ capture using diethylenetriamine (DETA) solvent in a pilot-plant test bed compared to monoethanolamine (MEA) solvent. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(4), 1131-1138.
- [27] Krótki, A., Więclaw-Solny, L., Tatarczuk, A., Stec, M., Wilk, A., Śpiewak, D., & Spietz, T. (2016). Laboratory studies of post-combustion CO₂ capture by absorption with MEA and AMP solvents. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(2), 371-379.
- [28] Mazinani, S., Samsami, A., Jahanmiri, A., & Sardarian, A. (2011). Solubility (at low partial pressures), density, viscosity, and corrosion rate of carbon dioxide in blend solutions of monoethanolamine (MEA) and sodium glycinate (SG). *Journal of Chemical & Engineering Data*, 56(7), 3163-3168.
- [29] Ramezani, R., Mazinani, S., Di Felice, R., Darvishmanesh, S., & Van der Bruggen, B. (2017). Selection of blended absorbents for CO₂ capture from flue

- gas: CO₂ solubility, corrosion and absorption rate. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 62, 61-68
- [30] [15] Niegodajew, P., & Asendrych, D. (2016). Amine based CO₂ capture-CFD simulation of absorber performance. *Applied Mathematical Modelling*, 40(23-24), 10222-10237.
- [31] Yin, J., Gao, J., Tong, M., Chen, X., Kang, W., Zhou, Y., & Lu, J. (2017). CO₂ removal in a packed tower with two different fillers. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39(2), 219-224.
- [32] Kishimoto.A., K. Y. (2011). Exergy recuperative CO₂ gas separation in post-combustion capture.
- [33] Krupickza, R. ,(2015). Comparative study of CO₂ absorption in packed column using imidazolium base ionic liquids and MEA solution. *Separation and Purification Technology*.
- [34] Ju H. ElMoudir, W. A. (2018). Density, Viscosity, refractive index and electrical conductivity of degraded monoethanolamine solutions at standard temperatures.
- [35] Perry, J.H. (s.f.) *Perrys ingeniería Química .McGraw .-Hill*



Cuernavaca, Mor., a 12 de mayo de 2021

DR. JORGE AVELINO DOMÍNGUEZ PATIÑO
DRA. MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO
DRA. AMÉRICA MARÍA RAMÍREZ ARTEAGA
DR. JOSÉ LUIS GUTIÉRREZ DÍAZ
DR. FABIÁN JESÚS RENDÓN HERNÁNDEZ

P R E S E N T E

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de: **TESIS**

Titulado:

ANÁLISIS DE LAS VARIABLES DE UN PROCESO DE ABSORCIÓN PARA SU OPERACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO

Que presenta (el) o (la) **C. KARLA ANAHI ALTAMIRANO TLALI**

Del programa educativo de: **INGENIERÍA QUÍMICA**

A T E N T A M E N T E
Por una humanidad culta

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA

Se anexa firma electrónica

D I C T A M E N

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQeI
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTÁMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

VOTO	NOMBRE	FIRMA
	DR. JORGE AVELINO DOMÍNGUEZ PATIÑO	
	DRA. MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO	
	DRA. AMÉRICA MARÍA RAMÍREZ ARTEAGA	
	DR. JOSÉ LUIS GUTIÉRREZ DÍAZ	
	DR. FABIÁN JESÚS RENDÓN HERNÁNDEZ	

El voto del comité es aprobatorio, se anexan firmas electrónicas

VALH/fmg

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2021-05-13 16:42:17 | Firmante

PfkKQ0HqIRectZgGvyT1LS0klsFGicZjdL/+HE9kUzegllqHy67VCNbr226coLp84UULVZsjGV7mboLD3vPLvUOGvynAvHq+hNgQbzxXWPJx7J7i85IKUvBys6C8puGaal0SvBmJp
c+49O8iXfMLCu1j9dCIUQS4/Sp7VAZ1+YBlen0owZqURSpokbNiQMNgja27mAA51i27qVuvvLPbVvqY5tarhe3DyD0njFrxvIRTo84IK0xK10qUSrl2p0VqZim3McmwneN8qSBQdep
eeQF5esV63axqtxcEB54HEBm7nJ9lbsBxDDrZSZewlcR5YOA14EdWpFKEZp5Gz3Lqjmg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



I5AcO3

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/9tavF0TWc4s0EDATEHtBnGuVS5FfKcFv>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

JORGE AVELINO DOMINGUEZ PATIÑO | Fecha:2021-05-14 22:08:48 | Firmante

PAfq8zKQf0YolQMz+kzRG2Oq0V60e2wcT69BkGv5fqsLqZKqjTO2WJHyFCnpSrBHRvdYK82BE05Utqrx5mXcubXx4D7w9nblX26xHIQlk5gMHu5fGN+k5YJQEBy X8slbU104/k8zhtMLVKXJ7d0K4Xt2EIUZY3nBt6Vc2ldfGs7Crezz+CUttF75xWc3s6UiaPWtx//ijHIUWJ2OApLUQII7I7Qb2Q8wRLxpJW99DtWKgsXxdRqtRMFwBrP 24Al74RXwx9Z2TPI2mFII+7MXshCn93+XUyLHBzHolx3kP27OaMbo5XXQThsb4l3latjuuuLG1excANUIHMFbA==

MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO | Fecha:2021-05-17 16:25:41 | Firmante

firffw4/OhaeXlllvsnSmGDMG/TU4vVfVBMbvJ2VGhnSGJKLSK1kQ2MlCdZdiu7qNRza82u8GgXmRSSKI6Waza+7EtMV7wz0Yce+xYXIFxOkOTUXOCDB++Mc7pSsYGMqikFCrI10TdTU2BB26VFEE/Zfo70LJyr+q09pk250T44gEAzHKyWDFUxGn1YNc6duhrWKEJtPW3LW/7doBlrNo8lrzUHm/K1WCQwgeMEHsNwz0fDLJ3anqvmc5IAwF8JGR+SSHT0kDeWfVmnGILLeq7juOa0tMmRmpII35ryNtta3I5JbAHx0AVG7d3tJkh6mXxuL3u3Dpi+QDrnghRvA==

FABIAN JESUS RENDON HERNANDEZ | Fecha:2021-05-18 15:28:21 | Firmante

Zlapk7mYuGmH1XQITGgs54kPMrdsbxK6PDiPVepCADq1+1C+7sooZPCz6cHudqdd5ewZnbcuFDRp9qbEvwskdMR3V9evFw+rglAA1uVxunSVdq1KycwkYVMDTTNg2aDz2z9QDxrJiy1Jx0VUNDT+JiOPbxurKDKsN+YO9GkUrSKVJVNsrP0c7631KcE97yUm4MH6Z5P6IFygm0psfnP3Kd26mG6Mo1HtESh0jZU0yUw8aBydbT18tYp+w8yHnDDK62JfgJdFJ8ekAZm9GLMryPCQLVcKyxCNE+rexFzov3uVPE/88mqj1vbJEZDnT9FzfgPDM0w6qe3Y5w==

JOSE LUIS GUTIERREZ DIAZ | Fecha:2021-05-19 14:40:34 | Firmante

MIEQHZcRMyyWFNyxHZ+jx/wB2BDokpdqNjviz5I0Q/Otb6IR1BPS3VdoRgkKdabazqJot5ko0tv+ZiN81PibzsbGR0P1d6zjoN0FLnqe0fjqKXKhC4+L1wW 8ObPDSFIsK/CKRg5qftz4bl66bk2VTaTa7Yr9S+CBG2Wg7UyHEI+BE8jfxHC7nhrmWusomeAflcmzeTMQGD0I7f0rdNR4H7DYufnEOyVVZYXB0h43Se+erRip3k2btYpHmUg3aNLEtH2AMzo4tDFxWS6LNVb2gY4/GAhnWwcoezTLzFbCE/zH6Xy7VI+P+CXvphZqze+eKDYn9LgqOL8svZGWdang==

AMERICA MARIA RAMIREZ ARTEAGA | Fecha:2021-06-01 20:45:49 | Firmante

dODr3IDGw9lH6mxxV00Fj0sLDZl/FI2SMxgY5hPJUo8eEJ/640dDaXzQ9LQqm5FvDW6bJaRCzoEZjz1ZYExg9bNGBfJhUCoxOerZCp8nhxPa3wcl3AaGCoNGa3nkTMij1CVfM CcmgKsOSuGM3V9P06nU12++HijKTjulsjh7vR9s3m8+os1+OuOD353JrHt0YJJ0LY6U1ZZDFDZCPnVN++zE3x0Co8YPLzpjfMIAnJdC9O4UOfMdPznPJZG12dLb38gJY76py949dry//90rvZs0c744qwyetDDYfQN6ysYcJaAP94iieYx4K2eLafXG7bn817NOTy7liaw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



AQIW1g

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/efaGAHIKHdZNMNP9b74JiQDFpf678R78>

