

PÉRDIDA DE ETANOL AMINA EN LOS SISTEMAS EA-H₂O-AIRE Y EA-H₂O-O₂

Jaime MORENO ALCÁNTARA^{1,2*}, Rosa Hilda CHÁVEZ TORRES¹, Arturo COLÍN CRUZ² y
Thelma Beatriz PAVÓN SILVA²

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Carretera Federal México Toluca km 36.5, Ocoyoacac, Estado de México, México, C.P. 52750

² Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química. Paseo Colón esquina Paseo Tollocan, Toluca, Estado de México, México, C.P. 50120

*Autor para correspondencia: jaime.moreno@inin.gob.mx

(Recibido febrero 2014; aceptado enero 2015)

Palabras clave: captura de dióxido de carbono, absorción química

RESUMEN

Se evaluaron los sistemas EA-H₂O-aire y EA-H₂O-O₂ con el objetivo de establecer la contribución del aire y del O₂ en ausencia de CO₂ en la pérdida de etanol amina (EA) en una solución acuosa al 30 % para el proceso de captura de CO₂. Los experimentos se realizaron con suministro de aire y de O₂ a temperatura ambiente durante 16 h registrando cada 2 h el pH, la temperatura y la concentración de EA. La pérdida de EA en el sistema EA-H₂O-aire ocurrió durante las dos primeras horas, siendo mayor a flujos bajos en comparación con flujos altos. Con un flujo de 11.27 mL/s se perdió en promedio 10.5 %, mientras que con un flujo de 35.14 mL/s la pérdida fue de 2.44 %. La pérdida de EA disminuyó a medida que se incrementó el flujo de aire sin depender de los tiempos de suministro. La pérdida de EA en el sistema EA-H₂O-O₂ no fue significativa cuando el oxígeno se alimentó 16 h en los flujos estudiados.

Key words: CO₂ capture, chemical absorption

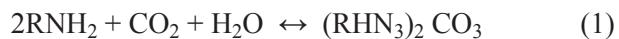
ABSTRACT

EA-H₂O-Air and EA H₂O-O₂ systems were evaluated in order to establish the contribution of air and O₂ in the absence of CO₂ in the loss of ethanolamine (EA) in an aqueous solution of 30 % for the CO₂ capture process. Experiments were performed with air supply flows and O₂ at room temperature for 16 h, every 2 h; pH, temperature and concentration of EA were recorded. EA loss in the EA-H₂O-air system occurred in the first two hours, being higher at low flows compared to high flows. With a flow of 11.27 mL/s was lost on average 10.5 %, whereas with a flow of 35.14 mL/s loss was 2.44 %. EA loss decreased as the air flow is increased, without depending on air supply times. EA loss in the EA-H₂O-O₂ system was not significant when oxygen was fed 16 h in the flows studied.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del planeta es particularmente grave en lo que se refiere a la atmósfera, ya que no sólo afecta en forma directa a la salud de los seres vivos, sino que adicionalmente ha alterado las condiciones ambientales y climáticas (efecto invernadero). De acuerdo con Wang *et al.* (2011) el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) menciona que las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera se han incrementado a partir de 1860, de 280 ppm a 316 ppm en 1958, y en 2005 se llegó al valor de 369 ppm. Por otro lado Yu *et al.* (2012) mencionan que en 2012 la concentración de CO_2 en la atmósfera fue de aproximadamente 400 ppm y con base en ello predicen que en caso de no tomar acciones que minimicen y controlen las emisiones a la atmósfera, la concentración global de CO_2 en 2100 será de 750 ppm. Al respecto el Panel Inter Gubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés; 2005), así como Abu-Khader (2006) argumentan que entre las principales opciones para mitigar y estabilizar las concentraciones atmosféricas del CO_2 está el proceso de su captura. Existen tres métodos para capturar el CO_2 generado por la quema de un combustible fósil primario (carbón, gas natural o petróleo), por la biomasa o por una mezcla de estos combustibles: 1) los sistemas de combustión oxígeno-combustible, 2) los sistemas de captación previa a la combustión y 3) Los sistemas de captación posterior a la combustión. Las distintas tecnologías de captura pueden ser utilizadas en las opciones comentadas, siendo la concentración y la presión parcial de CO_2 en el gas, los parámetros que justifiquen en mayor medida el empleo de una u otra opción.

De acuerdo con Supap *et al.* (2001), Strazisar *et al.* (2003), Goff y Rochelle (2004), Bello e Idem (2006), Uyanga e Idem (2007), You *et al.* (2008), Rochelle *et al.* (2011) y Vavelstad *et al.* (2011), la tecnología para separar CO_2 de los sistemas de captura posterior a la combustión (gases de chimenea) mediante absorción química utilizando alanol aminas se ha desarrollado y aplicado durante décadas. De manera general, el método consiste en exponer el flujo de gas en una columna absorbedora con una amina en solución (etanol amina, 2,2' imino dietanol, bis,2-hidroxietil metil amina, o bis,2-propanol amina, entre otras). El CO_2 es capturado o retenido de acuerdo con la ecuación (1), la amina (base débil) reacciona con el CO_2 (ácido débil) para formar una sal soluble (carbamato), la reacción es reversible al aumentar la temperatura del proceso en una columna de desadsorción para liberar el CO_2 .



La etanol amina (EA) es la amina más utilizada debido a su bajo costo en el mercado y a su fácil recuperación, además de que su grupo hidroxilo contribuye a reducir la presión de vapor de tal modo que aumenta su solubilidad en el agua y la alcalinidad del grupo amino la hace reaccionar rápidamente con el CO_2 . En consecuencia hay una buena captación de CO_2 (Bello e Idem 2005, Uyanga e Idem 2007, Lee *et al.* 2008, Delfort *et al.* 2011, Lepaumier *et al.* 2011 y Voice y Rochelle 2011). En condiciones ideales, la amina no sufriría degradación alguna y se podría reciclar en su totalidad en el proceso, sin embargo en condiciones reales está expuesta a varios tipos de degradación (Goff y Rochelle 2004), principalmente la térmica y la oxidativa. La degradación térmica ocurre normalmente a temperaturas mayores de 200 °C, por lo que para este trabajo no se considera significativa, contrario a la degradación oxidativa que será de gran importancia. Chapel *et al.* (1999) mencionan que la acción oxidante del O_2 ocasiona la degradación, la pérdida y el agotamiento de la EA y que en condiciones normales de operación sus concentraciones oscilan entre 15 y 20 % en peso. En dichas concentraciones se presentan problemas de corrosión y baja eficiencia de captura, por ello es necesario adicionar constantemente cantidades de EA que permitan superar estos valores. De acuerdo con Bello e Idem (2005), Idem *et al.* (2006), Uyanga e Idem (2007), Lee *et al.* (2008), Chanchey *et al.* (2011), así como Closmann y Rochelle (2011) la pérdida y degradación de la EA se acentúa cuando en los gases de combustión se tienen mezclas de como el O_2 en 4 %, CO_2 15 %, N_2 79 %, así como pequeñas cantidades de otros gases como el CO , SO_x , NO_x y cenizas formadas principalmente por óxidos inorgánicos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , Na_2O , MgO , K_2O y P_2O_5), como es el caso de una central eléctrica.

Investigadores como Chi y Rochelle (2002), Goff y Rochelle (2004), Bello e Idem (2005), Abu-Khader (2006), Bello e Idem (2006), Idem *et al.* (2006), Tobiesen *et al.* (2007), Uyanga e Idem (2007), Chanchey *et al.* (2011), Rochelle *et al.* (2011) y Vavelstad *et al.* (2011), mencionan que la captura de CO_2 de gases de combustión con EA es un proceso factible de aplicarse en las centrales eléctricas y refinerías. Sin embargo hay algunos obstáculos a tomar en cuenta y que deben resolverse, como lo es la pérdida de EA producto de las primeras reacciones de oxidación, lo que genera como consecuencia una disminución de la cantidad

de EA y por consiguiente menor eficiencia en la captura del CO₂.

Hay tres razones fundamentales para evitar o minimizar la degradación y la pérdida de la EA (Delfort *et al.* 2011 y Vevelstad *et al.* 2011):

1. Dado que la EA se degrada, es necesario reemplazarla para mantener la misma capacidad de captura, lo que representa un costo significativo, aproximadamente 10 % del costo total del proceso de captura de CO₂ (Voice y Rochelle 2011), 2. Como resultado de la degradación de la EA se generan algunos compuestos químicos volátiles como el NH₃, que es tóxico para el ambiente y su disposición final o tratamiento representa un nuevo costo y 3. Algunos productos de la degradación de la EA, como por ejemplo algunos ácidos carboxílicos, ocasionan problemas de corrosión al equipo.

Supap *et al.* (2001) y Bello e Idem (2006) afirman que para comprender y prevenir la degradación de la EA así como para evitar la formación de los productos no deseados es necesario realizar estudios que involucren la participación de cada uno de los gases del sistema de captura, la identificación de los productos formados, la estequiométrica y la cinética de los mecanismos de reacción en la formación de productos y en la degradación de la EA, además de controlar parámetros como la concentración de EA, de O₂ y de CO₂.

En el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ, México) se está realizando investigación sistematizada en función de algunas variables del proceso de captura de CO₂. El objetivo es determinar la cantidad de EA que reacciona con el aire y con el O₂ en los sistemas EA-H₂O-Aire y EA-H₂O-O₂ a diferentes flujos de alimentación en ausencia de CO₂. Lo anterior con la intención de eliminar su influencia y poder asegurar que la pérdida de EA se deba únicamente a su interacción con el aire o con el O₂, así como determinar la cantidad que no participará en el proceso de captura.

Vale la pena enfatizar que al resolver o minimizar la pérdida o degradación de la EA se tendrían grandes logros como poder reciclar toda o parte de ella, evitar la contaminación del ambiente con productos tóxicos y eliminar los costos de tratamiento de los mismos, así como disminuir la corrosión del equipo. Con lo anterior se reducirían los costos de operación y se podría asegurar que el proceso de captura sea más viable económicamente. La captura de CO₂ en gases de combustión usando como solvente EA pretende formar parte de una de las opciones de la cartera de

medidas para mitigar el cambio climático, tecnología en la que México puede sumarse y cubrir en parte los compromisos del Protocolo de Kyoto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Previo al desarrollo experimental se realizó:

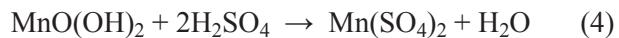
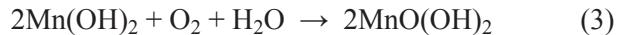
1. La calibración de los instrumentos de suministro de aire y de O₂, mediante la técnica de la burbuja que se forma por la introducción del aire o de cualquier otro gas en un líquido con fundamento en el tiempo que tarda la burbuja en fluir un determinado volumen de gas por unidad de tiempo (mL/s).

2. La determinación del punto de saturación de O₂ disuelto (O₂D) en agua bajo las condiciones atmosféricas de Salazar, Estado de México, presión de 523 mm de Hg y 2950 msnm y 15 °C, alimentando aire con una compresora Gast Modelo DOA-P109-FB a flujo constante de 11.27 mL/s durante 10, 15, 30, 45 y 60 min a 500 mL de H₂O destilada libre de O₂. El agua libre de O₂ se preparó al hervir agua destilada durante 2 min en un matraz de Florencia, que se tapó holgadamente con un vaso pequeño invertido sobre el cuello del matraz. Posteriormente se redujo la temperatura con agua fría hasta alcanzar la del ambiente, el matraz se selló herméticamente para evitar la redisolución del O₂ del aire. El agua preparada no está del todo libre de O₂ por lo que se cuantificó el O₂ disuelto residual (O₂R). El O₂R y el O₂D se determinaron de acuerdo con el proyecto de la norma oficial mexicana PROY-NMX-AA-012/1-SCFI-209 (Secretaría de Economía 2010) utilizado comúnmente en el análisis de agua. Este método se basa en la oxidación del ión manganeso a ión mangánico (Mn²⁺—Mn⁴⁺) provocada por el O₂D en medio fuertemente alcalino. Al acidificar la solución en presencia de un yoduro (I⁻), el ión mangánico oxida al yoduro y libera yodo (I₂) en una cantidad equivalente al oxígeno que existía originalmente (concentración de O₂D). De acuerdo con las siguientes ecuaciones:

En caso de ausencia de O₂D la reacción es:



En caso de presencia de O₂D se presentan las reacciones:





Finalmente: concentración de I_2 = concentración de O_2

El yodo libre se cuantifica con una solución de tiosulfato de sodio valorada. Los cálculos para determinar el O_2D se realizaron con la ecuación (6), el valor calculado incluye al O_2R (del agua libre de oxígeno).

$$\text{mg/L de O}_2 = a (\text{N}) 8000/b \quad (6)$$

En donde:

a = mL gastados de tiosulfato de sodio

N = Normalidad del tiosulfato de sodio (0.025)

b = volumen de la muestra (98.7 mL)

Cabe destacar que históricamente la EA al 30 % en solución acuosa se ha usado como estándar en la evaluación de la captura de CO_2 de los gases de combustión debido a su capacidad de absorción de aproximadamente 50 % y a que en esta concentración se limita su viscosidad y su potencial de corrosión en los equipos convencionales de las plantas de captura (Bello e Idem 2005, Delfor *et al.* 2011 y Rochelle *et al.* 2011). Es por ello que en el presente trabajo se emplea la EA al 30 % en solución acuosa. Por otro lado, al considerar que la concentración máxima de O_2D en el agua en las condiciones experimentales de Salazar Estado de México es de 6.9 mg/L, entonces el O_2D que se alimenta por aireación al sistema EA- H_2O debe de tener valores inferiores a 6.9 mg/L. Es decir flujos entre 11.27 y 41.11 mL/s (**Cuadro I**) y para poder comparar los resultados, los flujos de oxígeno deben de ser similares a los flujos de aire.

Bajo estas consideraciones, los experimentos se realizaron en los sistemas EA- H_2O -Aire y EA- H_2O - O_2 . En un matraz de tres bocas (Sigma Aldrich) se colocó la EA a una concentración de 99 % en solución acuosa a una temperatura de 13 °C y un pH de 14 unidades para preparar la solución madre al 30 % (5N). Posteriormente se le incrementó la temperatura a esta solución hasta alcanzar los 26 °C y un pH de 12 unidades. La EA al 30 % se tituló inmediatamente con HCl 5N valorado. De la misma manera se preparó la EA para realizar cuatro experimentos con flujos de aire de 11.27, 17.24, 23.21 y 35.14 mL/s y cuatro experimentos con flujos de O_2 de 12.42, 17.09, 22.09 y 26.84 mL/s, a través de un flujómetro Ficher y Porter 10A3665A. Cada uno de los procesos se realizaron con un flujómetro Gilmont tipo flotador, No. de serie 57111-57115, a temperatura

ambiente durante 16 h, tiempo promedio en el que los experimentos alcanzaron la temperatura ambiente. Los registros de pH, temperatura y concentración de EA se efectuaron cada 2 h.

Para determinar diferencias significativas entre los cuatro procesos se llevó a cabo un análisis de varianza y un análisis de comparación múltiple (diferencia mínima significativa), ambos a un nivel de confiabilidad del 95%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Punto de saturación del O_2D por aireación

El oxígeno disuelto residual (O_2R) en el agua libre de oxígeno fue de 1.75 mg/L. Con aireación constante de 11.27 mL/s, el oxígeno disuelto (O_2D) fue de 6.09 y 6.83 mg/L a los 10 y 15 min respectivamente. Para los 30, 45 y 60 min se tuvo un valor constante de 6.90 mg/L, lo que indica que bajo las condiciones experimentales de Salazar, México, la concentración máxima de O_2D por aireación en agua es del valor constante mencionado.

Alimentación de O_2D por aireación

En el **Cuadro I** se presenta el O_2D que se alimenta a flujo variable (11.27, 17.24, 23.21, 29.17, 35.14 y 41.11 mL/s) y tiempo constante (10 min). El O_2D alimentado se obtuvo de la diferencia entre el O_2R y el oxígeno disuelto de la muestra (O_2DM). Se apreció un valor mínimo de 3.33 mg/L y un máximo de 4.0 mg/L, el promedio fue de 3.6 mg/L durante los 10 min, por lo que para fines prácticos se determinó que la alimentación del O_2D es independiente del flujo del aire y se alimentó a razón de 0.36 mg/L por min.

CUADRO I. OXÍGENO DISUELTO ALIMENTADO POR AIREACIÓN DURANTE 10 MIN CON FLUJOS VARIABLES A LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DE SALAZAR, MÉXICO

Aire (mL/s)	[O_2R] (mg/L)	[O_2DM] (mg/L)	[O_2D] (mg/L)
11.27	2.30	5.75	3.45
17.24	2.55	5.88	3.33
23.21	2.55	6.09	3.54
29.17	2.57	6.09	3.52
35.14	2.57	6.36	3.79
41.11	2.09	6.09	4.00

O_2R = oxígeno disuelto residual, O_2DM = oxígeno disuelto de la muestra y O_2D = oxígeno disuelto alimentado por aireación

CUADRO II. OXÍGENO DISUELTO ALIMENTADO A TIEMPO CONSTANTE (10 MIN) Y FLUJOS VARIABLES DE OXÍGENO A LAS CONDICIONES DE SALAZAR, ESTADO DE MÉXICO

Oxígeno (mL/s)	[O ₂ R] (mg/L)	[O ₂ DM] (mg/L)	[O ₂ D] (mg/L)
12.42	3.74	25.43	21.69
12.98	3.74	25.02	21.28
17.09	3.74	27.15	23.41
22.09	3.74	27.65	23.91
26.84	3.74	27.35	23.61

O₂R = oxígeno disuelto residual, O₂DM = oxígeno disuelto de la muestra y O₂D = oxígeno disuelto alimentado por aireación

Alimentación de O₂D por oxigenación

En el **cuadro II** se presenta la cantidad de O₂D que se alimenta por oxigenación a flujo variable (12.42, 12.98, 17.09, 22.09 y 26.84 mL/s) y tiempo constante (10 min). Se obtuvo un valor mínimo de 21.27 mg/L y un máximo de 23.91 mg/L, el promedio fue de 22.77 mg/L durante los 10 min, por lo que se determinó que la alimentación del O₂D es independiente del flujo y se alimentó a razón de 2.27 mg/L por min.

Pérdida de EA en el sistema EA-H₂O-aire a temperatura ambiente

En el **cuadro III** y en la **figura 1** se presentan los valores de la pérdida de EA en función del flujo de aire (con alimentación de O₂D de 0.36 mg/L por min) respecto al tiempo. Se observó que la pérdida de EA ocurrió durante las dos primeras horas siendo mayor a flujos bajos (11.27 y 17.24 mL/s) en comparación con los

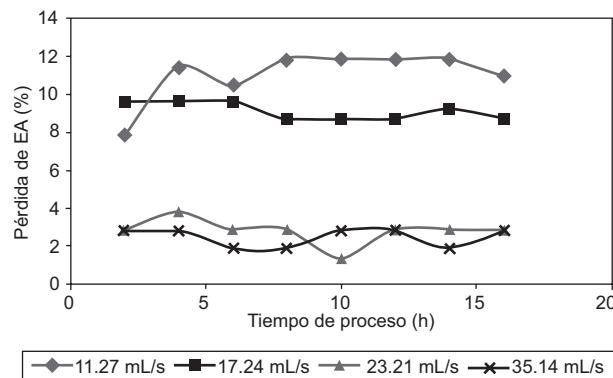


Fig. 1. Pérdida de etanol amina (EA) con 4 diferentes flujos de aire (mL/s) en función del tiempo

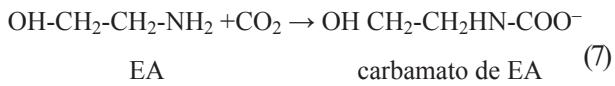
flujos altos (23.21 y 35.14 mL/s). Por ejemplo, con el flujo de 11.27 mL/s se perdió en promedio 10.98 %, mientras que con el de 35.14 mL/s la pérdida fue de 2.46 %. Lo que indica que a flujos bajos hay mayor interacción o choque de las moléculas del aire con las moléculas de la EA y que parte de la energía cinética de las moléculas del aire se convierte en energía vibracional. Esto sucede al romperse los enlaces químicos de la molécula de EA, con lo que da inicio su degradación o pérdida. La situación anterior no ocurre a flujos altos ya que aún cuando las moléculas del aire tienen una energía cinética mayor es necesario que interaccionen o choquen con la EA, lo que no sucede porque en este caso el tiempo de contacto es corto.

La pérdida de EA se explica como una consecuencia de las reacciones instantáneas que se llevan a cabo en el equilibrio del sistema EA-H₂O-aire (ecuación 7) entre la EA con alguno de los componentes del aire como el CO₂ o el O₂ para formar el carbamato de

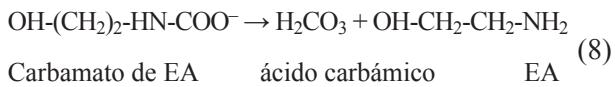
CUADRO III. PÉRDIDA DE ETANOL AMINA EN FUNCIÓN DE LOS TIEMPOS DE ALIMENTACIÓN Y DE LOS FLUJOS DE AIRE

Tiempo (h)	Aire (mL/s)							
	11.27		17.24		23.21		35.14	
	(°C)	Pérdida (%)	(°C)	Pérdida (%)	(°C)	Pérdida (%)	(°C)	Pérdida (%)
2	26	7.8	22	9.6	26	2.9	22	2.8
4	17	11.4	18	9.6	17	3.8	21	2.8
6	14	10.5	17	9.6	14	2.9	17	1.9
8	14	11.8	11	8.7	12	2.9	14	1.9
10	12	11.8	11	8.7	11	1.4	14	2.8
12	11	11.8	11	8.7	11	2.9	12	2.8
14	11	11.8	9	9.2	10	2.9	10	1.9
16	10	11.0	8	8.7	10	2.9	10	2.8

EA, de acuerdo con Lawal *et al.* (2005) y Lepaumier *et al.* (2011).



Es importante observar que el contenido de CO_2 en el aire es de 0.03 % por lo que con la alimentación del aire se suministra también CO_2 en esta proporción. Así también el oxígeno, otro de los componentes del aire en un 21 %, puede reaccionar con el C de los componentes del aire o bien con compuestos del sistema EA- H_2O -aire que lo contengan para generar CO_2 y éste reaccionar con la EA para formar el carbamato de EA. En el **cuadro III** y en la **figura 1** se observa que al aumentar el tiempo de proceso, la concentración de EA se comportó de manera inesperada ya que en algunos casos en lugar de ser menor se incrementó. Al respecto es importante mencionar que da Silva y Svendsen (2007) así como Aronu *et al.* (2011) mencionan que en el sistema EA- H_2O -aire una de las reacciones instantáneas es la reconversión o hidrólisis del carbamato de EA para generar una molécula de ácido carbónico y otra de EA (ecuación 8), lo que explica el aumento de EA en pequeñas cantidades en el sistema estudiado.



La pérdida de EA en el sistema EA- H_2O -aire se realizó durante las primeras 2 h, principalmente a flujos entre 11.27 y 17.24 mL/s y disminuyó a medida que el flujo se incrementó sin influencia de los tiempos de alimentación.

En los procesos experimentales la temperatura máxima de la reacción fue de 22 °C o de 26 °C (**Cuadro III**) y se mantuvo constante durante las primeras 2 h, tiempo en el que se llevan a cabo las principales reacciones químicas, para después descender lentamente hasta alcanzar la temperatura del ambiente y provocar la disminución paulatina de las reacciones químicas.

El cambio del pH de 14 a 12 unidades se debe principalmente a la reacción del H_2O con el CO_2 del aire para formar el ácido carbónico. Sin embargo no presentó variación alguna en los experimentos y se mantuvo en 12 unidades, lo que indica, de acuerdo con da Silva y Hallvard (2007), que se favorece la reacción reversible del carbamato de EA hacia la formación de EA y CO_2 .

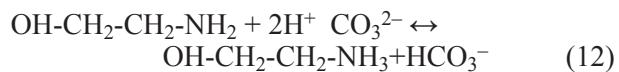
El ácido carbónico por ser un ácido diprótico se disocia en dos etapas de acuerdo con las ecuaciones 9 y 10.



Asimismo, la constante de ionización de la ecuación 9 es mayor que la de la ecuación 10 ya que es más sencillo quitar un ion H^+ de una molécula neutra que quitar otro H^+ de un ion cargado negativamente derivado de la misma molécula. La ionización completa del ácido carbónico está dada por la ecuación 11.



La ionización del ácido carbónico en el agua es muy limitada debido a que es un ácido débil, inclusive en la primera etapa de ionización, lo que da como resultado una producción pobre de H^+ que podrían reaccionar con la EA como en la ecuación (12). Sin embargo, dada la baja cantidad de H^+ es poco probable que esto ocurra.



Pérdida de EA en el sistema EA- H_2O - O_2 a temperatura ambiente

En el **cuadro IV** se presenta la pérdida de la EA a diferentes flujos de O_2 (con alimentación de O_2D de 2.27 mg/L por min) en función del tiempo. Contrario a lo que se esperaba por el fuerte poder oxidante del O_2 , la pérdida de EA no fue significativa. En tres de los experimentos estuvo entre el 1 y el 2 %, mientras que en otro experimento no hubo pérdida alguna. Además, la baja solubilidad del O_2 gaseoso en el agua (0.030 L/kg) le impide participar significativamente en las reacciones químicas.

Análisis estadístico

En la **figura 1** se observa la pérdida de EA en los cuatro diferentes flujos de aire en función del tiempo. Del análisis de varianza se concluye que existe una diferencia significativa en la pérdida de EA entre los procesos en donde el aire se alimentó a una razón de 11.27 y 17.24 mL/s, mientras que entre los procesos con alimentación de 23.21 y de 35.14 mL/s no existe diferencia significativa.

El análisis de series múltiples indicó que hubo una diferencia significativa únicamente en el par

CUADRO IV. PÉRDIDA DE ETANOL AMINA EN FUNCIÓN DE LOS TIEMPOS DE ALIMENTACIÓN Y DE LOS FLUJOS DE OXÍGENO

Tiempo (h)	Oxígeno (mL/s)							
	12.42		17.09		22.09		26.84	
	(°C)	Pérdida (%)	(°C)	Pérdida (%)	(°C)	Pérdida (%)	(°C)	Pérdida (%)
2	25	0	23	0	25	0	25	0
4	21	1	22	2	22	1	22	0
6	18	1	20	0	21	2	20	0
8	17	2	17	0	20	0	19	0
10	16	0	17	0	19	1	18	0
12	15	0	16	0	18	0	17	0
14	14	0	15	0	17	0	16	0
16	14	2	13	0	15	0	15	0

en donde la alimentación del aire fue de 23.21 y de 35.14 mL/s.

CONCLUSIONES

1. La pérdida de EA en solución acuosa al 30 % en el sistema EA-H₂O-aire se realizó durante las dos primeras horas. Esta pérdida fue mayor a flujos bajos en comparación con los flujos altos. A un flujo de 11.27 mL/s se perdió en promedio el 10.5 %, mientras que con flujo de 35.14 mL/s la pérdida fue del 2.44 %.

2. La pérdida de EA en solución acuosa al 30 % en el sistema EA-H₂O-aire fue menor a medida que el flujo de aire fue en aumento, sin depender de los tiempos de alimentación.

3. La pérdida de EA se explica como consecuencia de las reacciones instantáneas que se llevan a cabo en el equilibrio del sistema EA-H₂O-aire entre la EA con alguno de los componentes del aire como son el CO₂ y el O₂.

4. La pérdida de EA en solución acuosa al 30 % en el sistema EA-H₂O-O₂ no fue significativa al alimentar con oxígeno por 16 h a los flujos de 12.42, 17.09, 22.09 y 26.84 mL/s.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo proporcionado para la realización de la investigación dentro de las actividades del proyecto SEP-CONACyT CB82987 "Evaluación de la eficacia del proceso de captación de CO₂ mediante absorción química con la monoetanol amina".

REFERENCIAS

- Abu-Khader M. (2006). Recent progress in CO₂ capture/sequestration: A review. *Energ. Source. Part A* 28, 1261-1279.
- Aronu U., Gondal S., Heseen E., Warberg T., Hartono A., Hoff K. y Svendsen H. (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. *Chem. Eng. Sci.* 66, 6393-6406.
- Bello A. e Idem R. (2005). Pathways for the formation of products of the oxidative degradation of CO₂ loaded concentrated aqueous monoethanolamine solutions during CO₂ absorption from flue gases. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44, 945-969.
- Bello A. e Idem R. (2006). Comprehensive study of the kinetics of the oxidative degradation of CO₂ loaded and concentrated aqueous monoethanolamine (MEA) with and without sodium metavanadate during CO₂ absorption from flue gases. *Ind. Eng. Chem. Res.* 45, 2569-2579.
- Closmann F. y Rochelle G. (2011). Degradation of aqueous ethyldiethanolamine by temperature and oxygen cycling. *Energy Procedia* 4, 23-28.
- Chanchey A., Saiwan C., Supap T., Idem R. y Tontiwachwuthikul P. (2011). Off gas emission in CO₂ capture process using aqueous monoethanolamine solution. *Energy Procedia* 4, 504-511.
- Chapel D., Ernest J. y Mariz C. (1999). Recovery of CO₂ from flue gases: commercial trends. *Memorias de la Canadian Society of Chemical Engineers Annual Meeting*, Saskatoon Saskatchewan, Canadá del 4 al 6 de octubre, 16 pp.
- Chi S. y Rochelle G. (2002). Oxidative degradation of monoethanolamine *Ind. Eng. Chem. Res.* 41, 4178-4186.

- da Silva E. y Svendsen H. (2007). Computational chemistry study of reactions, equilibrium and kinetics of chemical CO₂ absorption. *Int. J. Greenh. Gascon.* I, 151-157.
- Delfor B., Carrette P. y Bonnard L. (2011). MEA 40 % with improved oxidative stability for CO₂ capture in post-combustion. *Energy Procedia* 4, 9-14.
- Goff G. y Rochelle G (2004). Monoethanolamine degradation: O₂ mass transfer effects under CO₂ capture conditions. *Ind. Eng. Chem. Res.* 43, 6400-6408.
- Idem R., Wilson M., Tontiwachwuthikul P., Chakma A., Veawab A., Aroonwilas A. y Gelowitz D. (2006). Pilot plant studies of the CO₂ performance of aqueous MEA and mixed MEA/MDA solvents at the University of Regina CO₂ capture technology development plant and the boundary dam CO₂ capture demonstration plant. *Ind. Eng. Chem. Res.* 45, 2414-2420.
- Lawal O., Bello A. e Idem R. (2005). The role of methyl diethanolamine (MDEA) in preventing the oxidative degradation of CO₂ loaded and concentrated aqueous monoethanolamine (MEA)-MDEA blends during CO₂ absorption from flue gases. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44, 1874-1896.
- Lee S., Filburn T., Gray M., Park J. y Song H. (2008). Screening test of solid amine sorbents for CO₂ capture. *Ind. Eng. Chem. Res.* 47, 7419-7423.
- Lepaumier H., da Silva E., Einbu A., Grimstvedt A., Knudsen J., Zahlsen K. y Svendsen H. (2011). Comparison of MEA degradation in pilot-scale with lab-scale experiments. *Energy Procedia* 4, 1652-1659.
- Panel Inter Gubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (2005) Informe especial “La captación y almacenamiento de dióxido de carbono” Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico. Reunión del Grupo de Trabajo III (Mitigación del Cambio Climático) del IPCC, Montreal Canadá, del 22 al 24 de septiembre. Editorial Cambridge University Press, 57 pp. ISBN 92-9169-319-7. [en línea]. https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_sp.pdf.
- Rochelle G., Chen E., Freeman S., Van D., Xu Q. y Voice A. (2011). Aqueous piperazine as the new Standard for CO₂ capture technology. *Chem. Eng.* J. 171, 725-733.
- Secretaría de Economía (2010). Proyecto de norma oficial mexicana, Proy-NMX-AA-012/1-SCFI-2009. Análisis de agua-determinación del oxígeno disuelto -método de prueba- parte 1-método iodometrónico. Dirección General de Normas. Diario Oficial de la Federación, México D.F. 12 de julio 2010.
- Strazisar B., Anderson R. y White C. (2003). Degradation pathway for monoethanolamine in a CO₂ capture facility. *Energy and Fuels* 17, 1034-1039.
- Supap T., Idem R., Veawab A., Aroonwilas A., Tontiwachwuthikul P., Chakma A. y Kybett B. (2001). Kinetics of the oxidative degradation of aqueous monoethanolamine in a flue gas treating unit. *Ind. Eng. Chem. Res.* 40, 3445-3450.
- Tobiesen F., Svendsen H. y Mejell T. (2007). Modeling of blast furnace CO₂ capture using amine absorbents. *Ind. Eng. Chem. Res.* 46, 7811-7819.
- Uyanga I. e Idem R. (2007). Studies of SO₂ and O₂ induced degradation of aqueous MEA during CO₂ capture from power plant flue gas streams. *Ind. Eng. Chem. Res.* 46, 2558-2566.
- Vevelstad S., Haugmo I., da Silva E. y Svendsen H. (2011). Degradation of MEA; a theoretical study. *Energy Procedia* 4, 1608-1615.
- Voice A. y Rochelle G. (2011). Oxidation of amines at absorber conditions for CO₂ capture from flue gas. *Energy Procedia* 4, 171-178.
- Wang M., Lawal A., Stephenson P., Sidders J. y Ramshaw C. (2011). Post combustion CO₂ capture with chemical absorption: A state-of-the-art review. *Chem. Eng. Res. Des.* 89, 1609-1624.
- You J., Park H., Yang S., Hong W., Shin W., Kang J., Bok K. y Kim J. (2008). Influence of additives including amine and hydroxyl groups on aqueous ammonia absorbent for CO₂ capture. *J. Phys. Chem. B.* 112, 4323-4328.
- Yu C., Cheng H. y Tan Ch. (2012). CO₂ capture by alkanolamine solutions containing diethylenetriamine and piperazine in a rotating packed bed. *Int. J. Greenh. Gascon.* 9, 136-147.