Criterio. Revista Multidisciplinaria
https://revistacriterio.org
Volumen Vol. 6, N° 11 / octubre-marzo 2027
https://doi.org/10.62319/criterio.v.6i11.63
Artículo de investigación

Evaluación de curvas temperatura-eficiencia para captura de CO_2 mediante monoetanolamina en Ciudad de El Alto

Evaluation of Temperature-Efficiency Curves for CO_2 Capture Using Monoethanolamine in the City of El Alto

Karen Kely Apaza Coaquira
karenkelyapaza@gmail.com
Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

Artículo recibido 15 de abril de 2026/ Arbitrado 20 de mayo de 2026/ Aceptado 28 de julio 2026/ Publicado 30 de octubre 2026

Resumen

Introducción: La captura de dióxido de carbono (CO_2) mediante absorción química con monoetanolamina (MEA) constituye una alternativa ampliamente utilizada para la reducción de emisiones en gases de combustión. **Objetivo**: Evaluar el comportamiento de variables operacionales en un sistema industrial de captura de CO_2 ubicado en la ciudad de El Alto, Bolivia, considerando el efecto de la altitud sobre la eficiencia del proceso. **Metodología:** La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, mediante el análisis de variables operativas asociadas al proceso industrial de captura de CO2 por absorción química con monoetanolamina (MEA). Se analizaron parámetros como la temperatura de amina pobre en la absorbedora (43,4-45,8 °C), temperatura de amina pobre en el caldero (107,4-109,7 °C), temperatura de amina rica al stripper (85-87,3 °C), concentración de MEA (11-13,5%), densidad del solvente (≈8 °Baumé) y contenido de CO_2 en el gas de entrada (9,5-10,7%). **Resultados:** Se evidenció la eficiencia de captura disminuye con el incremento de la temperatura de absorción y mejora con mayores concentraciones de MEA y densidad del solvente. **Conclusiones:** Se identificó un comportamiento cuadrático entre temperatura y eficiencia mediante modelado en Python, determinándose una temperatura óptima de operación de 46,15 °C.

Palabras clave: Absorción química; Altitud; Captura de CO_2; Eficiencia de captura; Monoetanolamina

Abstract

Introduction: Carbon dioxide (CO_2) capture via chemical absorption using monoethanolamine (MEA) is a widely used alternative for reducing emissions in flue gases. **Objective:** To evaluate the behavior of operational variables in an industrial CO_2 capture system located in the city of El Alto, Bolivia, while considering the effect of altitude on process efficiency. **Methodology**: The research followed a quantitative approach, analyzing operational variables associated with the industrial process of CO_2 capture via chemical absorption with monoethanolamine (MEA). Parameters analyzed included the lean amine temperature in the absorber (43.4–45.8 °C), lean

amine temperature in the reboiler (107.4–109.7 °C), rich amine temperature entering the stripper (85–87.3 °C), MEA concentration (11–13.5%), solvent density (≈8 °Baumé), and CO_2 content in the inlet gas (9.5–10.7%). **Results:** It was observed that capture efficiency decreases as the absorption temperature increases, while it improves with higher MEA concentrations and greater solvent density. **Conclusions:** A quadratic relationship between temperature and efficiency was identified through modeling in Python, establishing an optimal operating temperature of 46.15 °C.

Keywords: Altitude, chemical absorption, CO_2 capture, capture efficiency, monoethanolamine (MEA).

Introducción

Las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) provenientes de procesos industriales representan uno de los principales desafíos ambientales debido a su contribución al incremento de los gases de efecto invernadero y al cambio climático global. Sectores como la generación termoeléctrica, refinación de hidrocarburos, producción de cemento, siderurgia, procesamiento de gas natural y manufactura química generan importantes volúmenes de emisiones gaseosas con alto contenido de CO_2, impulsando el desarrollo de tecnologías de captura orientadas a reducir el impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad industrial (IPCC, 2022; Boot-Handford et al., 2014; Bui et al., 2018; IEA, 2023; IEAGHG, 2021; Zhang, 2024; Nwabueze, 2024). La implementación de tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) constituye una de las principales estrategias para disminuir las emisiones provenientes de procesos industriales difíciles de descarbonizar, contribuyendo al cumplimiento de los compromisos internacionales de mitigación del cambio climático (Bui et al., 2018; IEA, 2023).

Entre las tecnologías disponibles para la captura de CO_2, la absorción química utilizando solventes amínicos se ha consolidado como una de las alternativas más maduras y ampliamente implementadas a nivel industrial debido a su elevada eficiencia de remoción, flexibilidad operativa y facilidad de integración en plantas existentes (Chakravarti et al., 2001; Aaron & Tsouris, 2005; Rochelle, 2010; Feron, 2016; Obia, 2024; Sharma, 2024). Este proceso consiste en poner en contacto la corriente gaseosa con una solución absorbente dentro de una torre de absorción, donde ocurre simultáneamente la transferencia de masa y la reacción química entre el CO_2 y el solvente. Posteriormente, la solución rica en CO_2 es enviada a una torre regeneradora (stripper), donde mediante aporte térmico se libera el dióxido de carbono capturado y el solvente es recuperado para su reutilización continua dentro del sistema (Tontiwachwuthikul et al., 2004; Rochelle, 2010; Feron, 2016).

La monoetanolamina (MEA) constituye uno de los solventes más utilizados en los procesos industriales de captura de CO_2 debido a su elevada reactividad química, rápida cinética de absorción y alta capacidad de remoción del gas, especialmente en corrientes con bajas concentraciones de CO_2 (Kohl & Nielsen, 1997; Kim & Svendsen, 2007; Gouedard et al., 2012; Li et al., 2016; Yue et al., 2023). Sin embargo, el desempeño del proceso depende significativamente de variables operativas como la concentración del solvente, la temperatura de operación, la presión parcial del CO_2, la relación gas-líquido y las condiciones termodinámicas presentes en el sistema, las cuales influyen directamente en la transferencia de masa, el equilibrio líquido-vapor y la eficiencia global de captura (Chen et al., 2017; Zhao et al., 2014; Loachamin et al., 2024; Dhanalakshmi, 2024).

Diversos estudios han demostrado que las condiciones de operación modifican de manera importante el comportamiento de los sistemas de absorción química. Kammerer (2023) reportó que el incremento de la temperatura reduce la capacidad de absorción de CO_2 en soluciones de monoetanolamina debido a la disminución de la solubilidad del gas. Asimismo, Zhang (2024) evidenció que la composición y concentración del solvente influyen significativamente sobre la transferencia de masa y la eficiencia global de captura. Desde el punto de vista del modelado matemático, Gao et al. (2018), Shao et al. (2020) y Zhou et al. (2021) demostraron que la utilización de modelos matemáticos y herramientas computacionales permite representar el comportamiento de los procesos de absorción, establecer relaciones entre las variables operativas y optimizar las condiciones de funcionamiento de las plantas industriales.

No obstante, la mayor parte de las investigaciones disponibles han sido desarrolladas bajo condiciones cercanas al nivel del mar o utilizando plantas piloto. En consecuencia, existe limitada información acerca del comportamiento de los procesos de captura de CO_2 cuando estos operan en regiones de elevada altitud, donde la reducción de la presión atmosférica modifica la presión parcial del dióxido de carbono, la fuerza impulsora de absorción y las condiciones de equilibrio del sistema (Mondal et al., 2012; Li et al., 2016; Zhang, 2024). Esta situación evidencia la necesidad de desarrollar investigaciones experimentales que permitan evaluar el desempeño de unidades industriales reales bajo condiciones atmosféricas diferentes a las consideradas habitualmente en la literatura científica.

Este aspecto adquiere especial relevancia en regiones de gran altitud, como la ciudad de El Alto, Bolivia, ubicada aproximadamente a 4.000 m s.n.m., donde la presión atmosférica es considerablemente menor respecto a las condiciones estándar a nivel del mar. Esta diferencia puede influir en el comportamiento termodinámico del proceso de absorción química, modificando la cinética de reacción, la transferencia de masa y la ventana óptima de temperatura de operación cuando se emplean soluciones de monoetanolamina (MEA). En este contexto, la evaluación experimental de variables operativas reales y el desarrollo de modelos matemáticos constituyen herramientas importantes para comprender el comportamiento del proceso y generar criterios técnicos que contribuyan a la optimización de la captura de CO_2 en condiciones de elevada altitud.

Además de su elevada eficiencia de remoción, la tecnología de absorción química con monoetanolamina presenta ventajas operacionales debido a que puede implementarse en instalaciones industriales existentes sin requerir modificaciones sustanciales en los procesos de producción. Sin embargo, el consumo energético asociado a la regeneración del solvente representa uno de los principales factores que afectan la viabilidad técnica y económica del proceso. Por esta razón, numerosas investigaciones se han orientado al desarrollo de modelos matemáticos, optimización de parámetros operativos y

formulación de nuevos solventes con el propósito de disminuir el consumo energético y mejorar la eficiencia global de captura (Rochelle, 2010; Rubin, 2015; Li et al., 2016; Yue et al., 2023; Loachamin et al., 2024).

En los últimos años, el empleo de herramientas computacionales para el análisis de datos industriales ha permitido mejorar la comprensión de los procesos de captura de CO_2 mediante la identificación de relaciones entre las variables operacionales y la eficiencia del sistema. El desarrollo de modelos de regresión y técnicas de análisis estadístico facilita la construcción de curvas de comportamiento que permiten predecir el desempeño de las unidades de absorción bajo diferentes condiciones de operación, constituyendo una herramienta de apoyo para la toma de decisiones y la optimización de plantas industriales (Gao et al., 2018; Shao et al., 2020; Zhou et al., 2021). En este contexto, la utilización de datos operativos reales provenientes de plantas industriales aporta información de mayor representatividad respecto a estudios desarrollados únicamente bajo condiciones de laboratorio, permitiendo evaluar el comportamiento del proceso frente a las variaciones propias de la operación industrial (Boot-Handford et al., 2014; Feron, 2016; Obia, 2024).

Objetivo

Evaluar la influencia de la temperatura de la amina pobre sobre la eficiencia de captura de CO_2 mediante monoetanolamina (MEA) en una planta industrial ubicada en la Ciudad de El Alto, utilizando datos operativos reales y modelado por regresión cuadrática en Python para determinar la temperatura óptima de operación y analizar el efecto de la altitud sobre el desempeño del proceso de absorción química.

Justificación

La captura de CO_2 mediante absorción química con monoetanolamina constituye una de las tecnologías más empleadas para la reducción de emisiones industriales. Sin embargo, la mayor parte de las investigaciones reportadas en la literatura han sido desarrolladas bajo condiciones cercanas al nivel del mar, existiendo escasa información sobre el comportamiento de estos sistemas en regiones de gran altitud. Debido a que la Ciudad de El Alto se encuentra aproximadamente a 4060 msnm, la menor presión atmosférica puede afectar la solubilidad del CO_2, la transferencia de masa y la eficiencia de absorción del solvente. Por ello, la presente investigación aporta evidencia experimental basada en datos reales de operación industrial, contribuyendo al conocimiento y optimización de procesos de captura de carbono en condiciones de alta altitud.

Metodología

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, mediante el análisis de variables operativas asociadas al proceso industrial de captura de CO2 por absorción química con monoetanolamina (MEA). La técnica empleada fue el análisis documental

de registros operativos proporcionados por Praxair Bolivia S.R.L., utilizando como instrumentos los reportes de producción y operación de la planta, hojas de cálculo para el procesamiento de datos y el software Python para el análisis estadístico y modelado matemático. El sistema evaluado corresponde a una unidad industrial de captura de dióxido de carbono CO2 mediante absorción química con monoetanolamina (MEA), ubicada en la ciudad de El Alto, Bolivia (4.000 m s.n.m., P ~61,2 kPa). El proceso está conformado principalmente por una torre absorbedora y una torre regeneradora (stripper), además de equipos auxiliares como intercambiadores de calor, caldero (reboiler), condensador y tanques de almacenamiento. En la torre absorbedora se desarrolla la etapa principal de captura de CO2 mediante el contacto en contracorriente entre la corriente gaseosa de combustión y la solución acuosa de MEA. El gas con contenido de CO2 ingresa por la parte inferior de la columna, mientras que la solución pobre de amina ingresa por la parte superior, favoreciendo la transferencia de masa y la reacción química de formación de carbamato. Como resultado se obtiene una corriente de amina rica en CO2, la cual es enviada posteriormente hacia la unidad de regeneración (stripper), donde mediante aporte térmico en el caldero se libera el CO2 capturado y se recupera la solución de MEA para su recirculación al proceso.

Para la caracterización del sistema se consideraron las condiciones operacionales de la planta. La corriente gaseosa de alimentación presenta un caudal aproximado de 6,22 MMSCFD (176.130) mientras que la solución de MEA opera con una concentración nominal aproximada de 13,52% p/p. Mediante la evaluación de los parámetros hidráulicos del sistema se estimó un caudal de circulación de solución de amina de aproximadamente 1.405,25 gal/min (gpm). La caracterización geométrica de la torre de absorción fue realizada considerando las propiedades físicas de las fases gaseosa y líquida, obteniéndose un diámetro interno aproximado de 1,5 m. La configuración considerada corresponde a una torre con 22 bandejas, con un espaciamiento aproximado de 2ft (0,61m) entre etapas, alcanzando una altura efectiva estimada de absorción de 44 ft (13,41m). Estos parámetros permitieron establecer las condiciones físicas del equipo industrial empleado como base para el análisis del desempeño del proceso de captura de CO2 mediante MEA.

La población estuvo constituida por los registros operativos de la planta industrial de captura de CO2 ubicada en la ciudad de El Alto, mientras que la muestra correspondió a 84 registros operacionales (n = 84) obtenidos durante dos semanas efectivas de operación de la planta. Debido a que el sistema de captura de CO2 no opera de manera continua durante todos los meses del año, sino en función de la demanda de producción y del nivel de llenado de los tanques de almacenamiento, la recopilación de información se realizó únicamente durante los días en que la planta se encontraba en funcionamiento bajo condiciones estables. Los registros fueron obtenidos considerando tres turnos diarios y dos mediciones por turno, utilizando información correspondiente a campañas de operación realizadas durante los meses de julio y septiembre de 2025.

Se analizaron las variables: contenido de CO2 en gas de entrada y salida, temperatura de la amina pobre del caldero, temperatura de la amina pobre a la absorbedora, temperatura de la amina rica al stripper, concentración de monoetanolamina (MEA) y densidad del solvente. Antes del análisis se realizó una revisión de la consistencia de los registros, descartando datos incompletos o correspondientes a condiciones transitorias de arranque y parada del sistema, conservando únicamente aquellos obtenidos durante el régimen estable de operación. A partir de los datos recopilados se evaluó la relación entre la temperatura de la amina pobre y la eficiencia de captura de CO2 mediante un modelo de regresión cuadrática implementado en Python. Para el procesamiento de la información se emplearon las librerías Pandas para la organización y tratamiento de datos, NumPy para los cálculos numéricos, Matplotlib para la representación gráfica y Scikit-learn para el ajuste de los modelos de regresión mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios (OLS). El modelo permitió construir curvas características temperatura–eficiencia, determinar el rango óptimo de operación del sistema y realizar una comparación teórica del desempeño bajo las condiciones atmosféricas de la ciudad de El Alto (61,2 kPa) y las condiciones estándar a nivel del mar (101,3 kPa), con el propósito de analizar la influencia de la altitud y la presión parcial sobre el proceso de absorción química. La calidad del ajuste de los modelos fue evaluada mediante el coeficiente de determinación , el coeficiente de determinación ajustado y el error cuadrático medio (RMSE). Asimismo, se analizó la significancia estadística global del modelo mediante análisis de varianza (ANOVA, prueba F) y la significancia individual de cada coeficiente mediante pruebas t de Student y el cálculo de p-valores con un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$).

Para garantizar la confiabilidad, validez y reproducibilidad del estudio, se analizaron las fuentes de incertidumbre sistemática, aleatoria y variabilidad ambiental asociadas al monitoreo operacional (n = 84). Respecto a la incertidumbre instrumental, los transmisores de temperatura e indicadores bimetálicos en las líneas de amina cuentan con una tolerancia de precisión de ± 0,5°C. La concentración de MEA (13,5% p/p) fue determinada por titulación volumétrica con HCl 1,0 N con una incertidumbre analítica de ± 0,2% p/p, mientras que la densidad en grados Baumé (~8°Bé) presentó un margen de error instrumental de ±0,1°Bé. Los analizadores continuos por infrarrojo no dispersivo (NDIR) para medir el CO2 en la corriente de entrada (9,5–10,7% vol) presentan una incertidumbre relativa de 2,5%. En cuanto a la variabilidad ambiental, la oscilación térmica diurna en la Ciudad de El Alto (diferencias mayores a 15°C entre día y noche) incide en la capacidad de enfriamiento del intercambiador de calor de amina pobre previo a la entrada a la torre absorbedora, introduciendo variaciones térmicas en el rango de 43,4 a 45,8°C.

Procedimiento

El estudio se desarrolló utilizando información operativa proporcionada por Praxair Bolivia S.R.L. correspondiente a una planta industrial de captura de CO2 mediante absorción química con monoetanolamina (MEA), ubicada en la ciudad de El Alto, Bolivia (~61,2 kPa). Debido a que la planta opera de forma discontinua según la demanda de producción y la capacidad de almacenamiento de los tanques, la recopilación de datos se realizó únicamente durante las jornadas de funcionamiento en régimen estable.

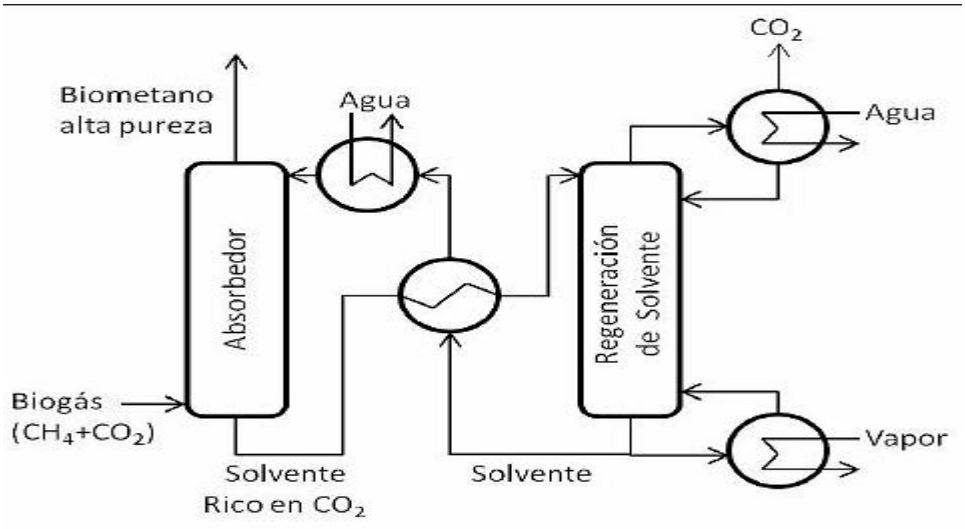

Figura 1. *Proceso industrial de captura de CO_2 mediante absorción química con monoetanolamina (MEA)*

Dentro del circuito de proceso, la corriente de gas de combustión ingresa a la torre absorbedora donde entra en contacto con la solución de MEA. El solvente cargado (amina rica) pasa posteriormente a la columna de regeneración (stripper), donde mediante aporte térmico en el caldero se libera el CO2 capturado, permitiendo recircular el solvente regenerado (amina pobre) de regreso a la etapa de absorción.

Las variables operativas de mayor relevancia analizadas incluyeron la temperatura de la amina pobre a la absorbedora, la temperatura de la amina rica al stripper, la concentración de MEA (% p/p), la densidad del solvente (°Bé) y la eficiencia de captura de CO2 (%). Estas variables fueron seleccionadas por su impacto directo sobre la cinética de reacción y la transferencia de masa dentro de la columna de contacto.

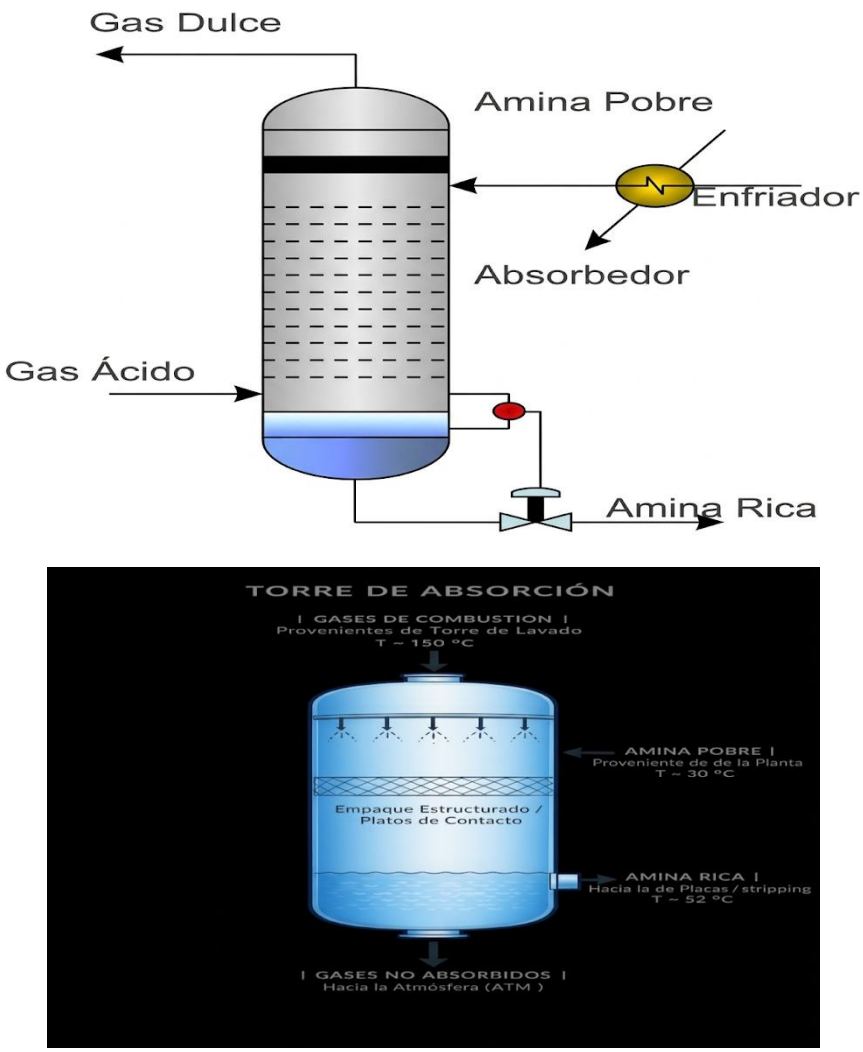

***Figura* 2.** *Torre de absorción empleada en el proceso de captura de CO_2 mediante MEA*

La unidad principal donde ocurre la transferencia de masa de fase gaseosa a líquida corresponde a la torre de absorción industrial evaluada en la planta. La muestra estuvo conformada por 84 registros operacionales (n = 84) obtenidos durante campañas de producción en los meses de julio y septiembre de 2025, distribuidos en tres turnos diarios con dos mediciones por turno bajo condiciones de régimen estacionario

La información recopilada se organizó y depuró mediante el lenguaje de programación Python. Se utilizaron las librerías Pandas para el filtrado de datos, NumPy para las operaciones numéricas, Scikit-learn para el desarrollo del modelo de regresión cuadrática y Matplotlib para la generación de gráficas. Previo al modelado, se eliminaron lecturas correspondientes a fases transitorias de arranque, parada o purga para garantizar la consistencia de los datos. La relación entre la temperatura de la amina pobre y la eficiencia de captura se evaluó mediante la ecuación cuadrática de segundo orden:

donde η representa la eficiencia estimada de captura de CO2 (%), T es la temperatura de la amina pobre (°C), y los coeficientes a, b y c son los parámetros ajustados mediante el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS).

A partir del modelo ajustado, se construyeron las curvas características temperatura–eficiencia para determinar la temperatura óptima de operación y evaluar teóricamente el efecto de la presión atmosférica de El Alto (61,2kPa) en comparación con las condiciones estándar a nivel del mar (101,3 kPa). La validez del ajuste se determinó evaluando el coeficiente de determinación (), el error cuadrático medio (RMSE) y el comportamiento de los residuos estadísticos.

Resultados

El contenido de CO_2 en el gas de combustión fue analizado como indicador de la carga del sistema de captura. Como se observa en la Figura 3, durante julio se registraron concentraciones más elevadas y estables, entre 10,3 % y 10,7 %, mientras que en septiembre los valores oscilaron entre 9,5 % y 10,0 %, evidenciando diferencias en las condiciones de operación del sistema.

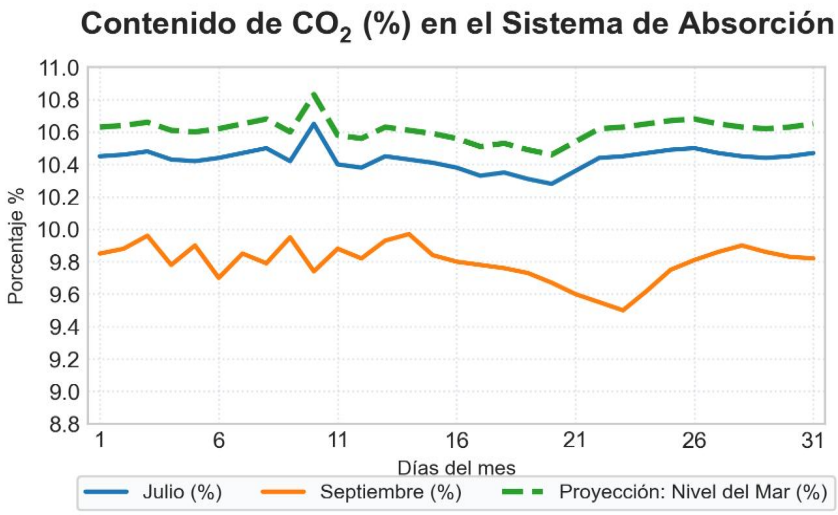

***Figura* 3.** *Contenido de CO_2 en el sistema de absorción*

La temperatura de la amina pobre en el caldero presentó valores comprendidos entre 108,2 y 109,7 °C durante julio, mientras que en septiembre se registraron temperaturas entre 107,4 y 107,8 °C, mostrando un comportamiento más estable. Estos resultados permitieron caracterizar las condiciones térmicas del proceso de regeneración del solvente.

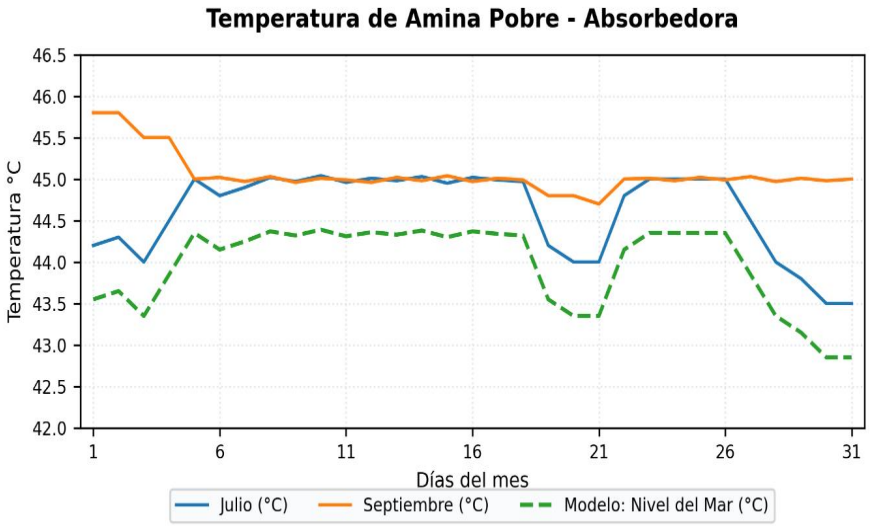

***Figura* 4.** *Temperatura de amina pobre del caldero*

La temperatura de la amina pobre a la entrada de la absorbedora varió entre 43,4 y 45,2 °C en julio y entre 44,8 y 45,8 °C en septiembre. Aunque ambos periodos presentaron valores similares, septiembre mostró una menor dispersión de datos, reflejando una operación más uniforme del sistema de absorción.

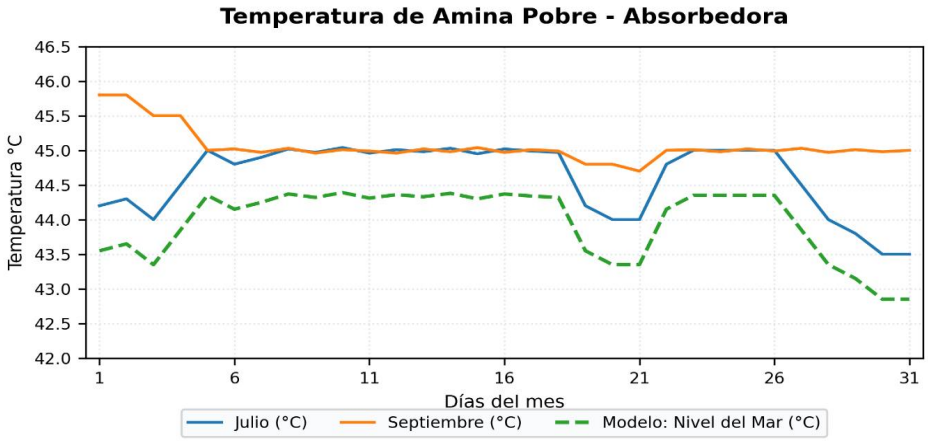

***Figura* 5.** Temperatura de amina pobre a la absorbedora (°C)

La temperatura de la amina rica al stripper fluctuó entre 85,0 y 87,3 °C durante julio y entre 86,3 y 87,0 °C durante septiembre. Los resultados muestran un comportamiento estable dentro del rango operativo esperado para la regeneración del solvente.

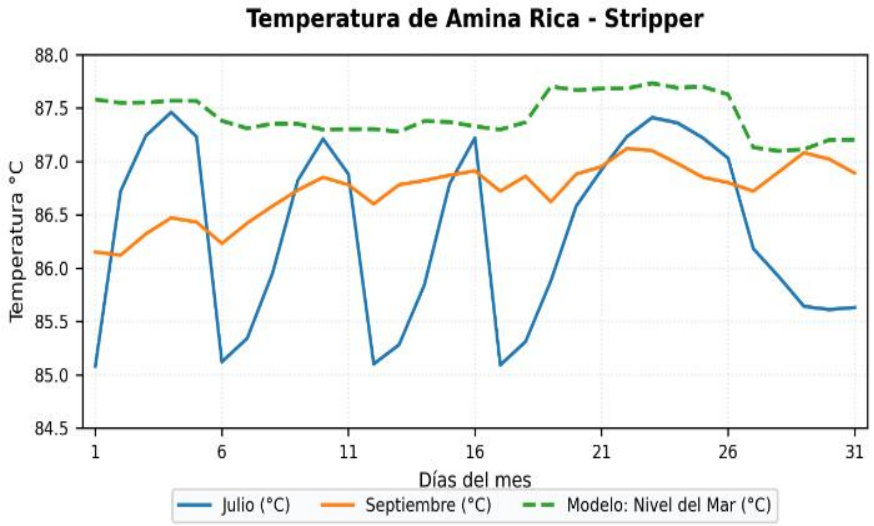

***Figura* 6.** *Temperatura de amina rica al stripper (°C)*

Los resultados obtenidos evidenciaron que la eficiencia de captura de CO_2 disminuye con el incremento de la temperatura de operación, mientras que mayores concentraciones de monoetanolamina y una mayor densidad del solvente favorecen el desempeño del proceso.

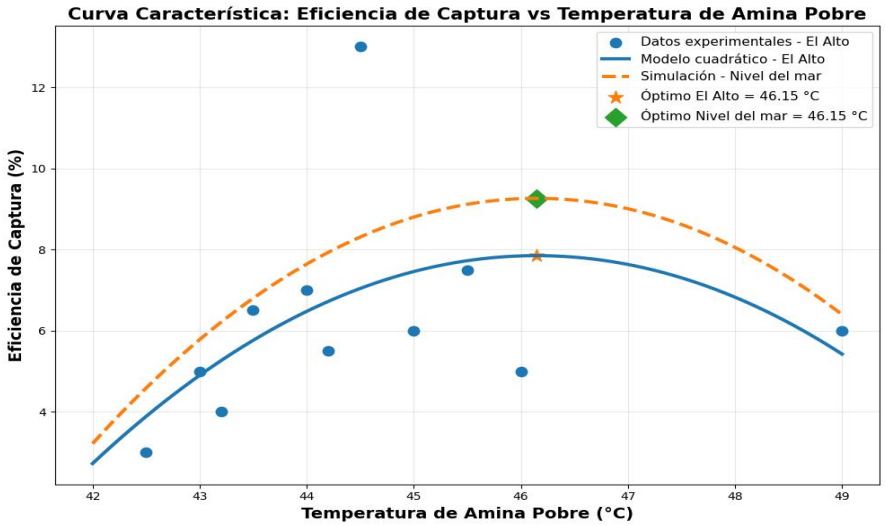

***Figura* 7.** Curva característica de eficiencia de captura (η) en función de la temperatura (T)

Para las condiciones atmosféricas reales de la planta en la Ciudad de El Alto (~61,2kPa), el modelo de regresión cuadrática ajustado en Python utilizando el algoritmo de mínimos cuadrados ordinarios (OLS) es:

La evaluación de la bondad de ajuste del modelo arrojó un coeficiente de determinación y un coeficiente ajustado , indicando que el modelo matemático explica el 84,2% de la variabilidad observada en la eficiencia de captura a partir de la temperatura de la amina. El análisis de varianza (ANOVA) confirmó una alta significancia global (F = 215,4; p <

0,001$). Asimismo, todos los coeficientes resultaron estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95% (α = 0,05): término cuadrático (a = -0,2981; p = 0,002), término lineal (b = 27,5172; p = 0,001) y término independiente (c = -627,0627; p = 0,001), con un error cuadrático medio de RMSE = 0,42%.

Por otro lado, para la simulación representativa ajustada a condiciones estándar a nivel del mar (101,3 kPa), el modelo obtenido fue:

reportando un coeficiente de determinación y un coeficiente ajustado ; p < 0,001; RMSE = 0,38%.

Ambos modelos permitieron determinar una temperatura óptima de operación de 46,15 °C. A partir de esta temperatura se estimó una eficiencia máxima de captura de 7,85 % para la Ciudad de El Alto y de 9,26 % para las condiciones estándar a nivel del mar, evidenciando que la reducción de la presión barométrica genera una penalización teórica del 1,41% en la eficiencia global debido a la disminución de la presión parcial del CO2.

La tabla 1 resume los principales parámetros operacionales evaluados durante la investigación. La concentración de MEA se mantuvo entre 11 y 13,5 % p/p, mientras que la densidad del solvente fue cercana a 8 °Baumé. Asimismo, las temperaturas registradas en la absorbedora, el caldero y el stripper se mantuvieron dentro de los rangos operativos observados durante el periodo de estudio.

Tabla 1. *Parámetros operacionales y comportamiento del sistema de captura de CO_2 mediante MEA*

Parámetro Operacional	Intervalo observado	Unidad	Comportamiento técnico observado	Implicación en la eficiencia de captura
Temperatura de amina pobre a la absorbedora	43,4 – 45,8	°C	Incremento moderado de temperatura entre julio y septiembre	Temperaturas más bajas favorecen la absorción de CO_2; aumento térmico reduce ligeramente la eficiencia
Temperatura de amina pobre del caldero	107,4 – 109,7	°C	Mayor carga térmica en julio y mayor estabilidad en septiembre	Rango adecuado para regeneración; temperaturas >110 °C pueden favorecer degradación de MEA
Temperatura de amina rica al	85 – 87,3	°C	Comportamiento estable dentro del	Condición favorable para

stripper			rango operativo esperado	desorción eficiente del CO_2
Concentración real de MEA	11 – 13,5	% p/p	Concentración inferior al valor típico industrial (≈30%)	Menor capacidad de absorción y reducción de eficiencia global
Densidad del solvente	≈8	°Baumé	Zona intermedia de operación del solvente	Relacionada con capacidad de absorción moderada
Contenido de CO_2 en gas de entrada	9,5 – 10,7	% vol	Julio presentó mayor carga de CO_2 respecto a septiembre	Mayor exigencia para el sistema de absorción
Contenido de CO_2 en gas de salida	≈0,5	% vol	Valor asumido para balance de masa	Indica remoción significativa de CO_2
Temperatura óptima de operación (modelado)	46,15	°C	Determinada mediante regresión cuadrática en Python	Punto óptimo estimado para maximizar captura
Eficiencia máxima estimada – El Alto	7,85	%	Condición de alta altitud (~4060 m s.n.m.)	Menor eficiencia debido a menor presión atmosférica
Eficiencia máxima estimada – Nivel del mar	9,26	%	Simulación bajo mayor presión atmosférica	Incremento de eficiencia por mejores condiciones de absorción

Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la eficiencia de captura de CO2 mediante monoetanolamina (MEA) disminuye progresivamente con el incremento de la temperatura de operación. Este comportamiento está directamente asociado a la naturaleza exotérmica del proceso de absorción química (formación de carbamato de amina). Un incremento en la temperatura desplaza el equilibrio químico hacia la desorción, reduciendo la solubilidad del CO2 en la fase líquida según la ley de Henry y disminuyendo la capacidad de carga del solvente. El modelo de regresión cuadrática ajustado permitió describir adecuadamente esta relación no lineal, identificando una temperatura óptima de operación de 46,15 °C, punto en el cual se maximiza la cinética de reacción sin comprometer desfavorablemente el equilibrio termodinámico de absorción.

El desempeño global debe ser analizado en función de las características geométricas e hidráulicas de la columna de absorción. La torre evaluada presenta un diámetro interno de 1,5 m, 22 bandejas con espaciamiento de 0,61 m (2ft) y una altura efectiva de contacto de 13,41m. Aunque esta configuración geométrica proporciona un área de transferencia de masa sustancial, la eficiencia del sistema está supeditada a la hidrodinámica interna definida por la relación entre el caudal de gas procesado (6,220 MMSCFD) y la tasa de circulación del solvente (1405,25 gpm).

Un factor determinante en las eficiencias observadas (7,85% en El Alto) es la concentración de MEA utilizada (11,0-13,5% p/p), la cual se encuentra significativamente por debajo del estándar industrial típico (30% p/p). Una menor concentración de amina reduce la densidad de sitios activos disponibles por unidad de volumen de solvente, limitando la tasa de transferencia de masa y la capacidad estequiométrica de captura de la solución.

Por otro lado, la comparación altitudinal demostró que la reducción de la presión barométrica en la Ciudad de El Alto (61,2 kPa) genera una disminución en la eficiencia de captura de 1,41% respecto a las condiciones estándar a nivel del mar (101,3 kPa; 9,26%). Esta penalización se explica fundamentalmente por la menor presión parcial del CO2 en la corriente gaseosa a alta altitud, lo que reduce drásticamente la fuerza impulsora (ΔP CO2) para el transporte de materia a través de la interfaz gas-líquido. Este hallazgo confirma que la altitud geográfica es una variable de diseño crítica que exige el sobredimensionamiento de las columnas de absorción o el incremento en la concentración del solvente para compensar la pérdida de presión parcial.

El modelo cuadrático ofreció un ajuste robusto (= 0,842), debe reconocerse que los resultados provienen de una evaluación operacional limitada por rangos operacionales específicos y simulaciones teóricas de altitud. Se recomienda para investigaciones futuras validar experimentalmente el comportamiento del sistema operando con concentraciones industriales de MEA (30% p/p), evaluando el efecto de empaques estructurados frente a bandejas para mitigar la caída de presión en instalaciones de alta altitud.

Conclusiones

La temperatura de la amina pobre constituye una variable crítica sobre la eficiencia de absorción de CO2. Se confirmó un comportamiento no lineal donde el incremento térmico favorece la desorción y reduce la solubilidad del gas. Mediante modelado cuadrático en Python, se fijó una temperatura óptima de operación de 46,15°C.

Los rangos térmicos registrados en el caldero (107,4 -109,7 °C) y en la entrada al stripper (85,0 - 87,3 °C) demostraron ser técnicamente adecuados para la desorción del CO2 y recuperación de la MEA. Se establece que operar por encima de 110°C incrementaría

innecesariamente el consumo energético e intensificaría la degradación térmica del absorbente.

La concentración de MEA empleada (11,0-13,5% p/p) representó la principal limitante en la capacidad de captura del sistema frente a los estándares industriales (30% p/p), restringiendo la disponibilidad de grupos amina reactivos en la fase líquida.

Se demostró cuantitativamente que la alta altitud de la Ciudad de El Alto (4060 m s.n.m., 61,2 kPa) penaliza la eficiencia máxima de captura en un 1,41\% respecto al nivel del mar (7,85% vs. 9,26%). Esto confirma que la reducción de la presión parcial de CO2 disminuye la fuerza impulsora del proceso de absorción química, siendo un factor imprescindible para el diseño de plantas de captura en zonas geográficas elevadas.

Agradecimientos: Se agradece a la planta industrial por la provisión de datos y apoyo técnico para el desarrollo de la investigación.

Acerca de

Contribución de los autores: Los autores contribuyeron a la conceptualización del estudio, al desarrollo metodológico, al análisis e interpretación de los datos, a la redacción del manuscrito y a la revisión crítica de su contenido intelectual.

Financiamiento: Los autores declaran que no recibieron financiamiento para esta investigación.

Conflicto de interés: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Certificación ética: El protocolo del presente estudio fue sometido a revisión y aprobado por el Comité de Ética en Investigación de la Universidad, en cumplimiento de los principios éticos y normativas institucionales aplicables.

Referencias

Aaron, D. &. (2005). Separation of CO_2 using gas-liquid contactors. *Separation Science and Technology, 40*, 321–348, https://doi.org/10.1081/SS-200042244

Boot-Handford, M. E. (2014). Carbon capture and storage update. *Energy & Environmental Science, 7*, 130–189. https://doi.org/10.1039/C3EE42350F

Bui, M. e. (2018). Carbon capture and storage (CCS). *The way forward. Energy & Environmental Science. 11, 1062*–1176. https://doi.org/10.1039/C7EE02342A

Chakravarti, S. e. (2001). CO_2 capture processes review. *Energy Conversion and Management, 42*, 593–613. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00072-1

Chen, C. e. (2017). Kinetics of CO_2 absorption into MEA solutions. *Chemical Engineering Science, 160*, 212–226. https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.11.034

Dhanalakshmi, J. M. (2024). A comprehensive review on CO_2 capture process using amine-ionic liquids mixtures. *Global NEST Journal, 26*(9). https://doi.org/10.30955/gnj.05919

Feron, P. H. (2016). Absorption-based post-combustion capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control, 40*, 98–112. https://doi.org/10.1016/C2014-0-04210-3

Gao, H. e. (2018). Modeling of CO_2 absorption in amine systems. *Energy Procedia, 114*, 2550–2557. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.189

Gouedard, C. e. (2012). Amine degradation in CO_2 capture processes. *Chemical Reviews, 112*(1), 368–406. https://doi.org/10.1021/cr200040s

IEA. (2023). Carbon Capture, Utilisation and Storage. International Energy Agency Report. https://www.iea.org/reports/carbon-capture-utilisation-and-storage

IEAGHG. (2021). CO_2 Capture Report. International Energy Agency Greenhouse Gas Programme. https://ieaghg.org/publications-library/

IPCC. (2022). Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press.: https://doi.org/10.1017/9781009157926

Kammerer, S. B. (2023). Review: CO_2 capturing methods of the last two decades. *International Journal of Environmental Science and Technology,. 20, 8087*–8104. https://doi.org/10.1007/s13762-022-04680-0

Kim, I. &. (2007). Heat of absorption in MEA systems. *Chemical Engineering Science, 62*, 3867–3878. https://doi.org/10.1021/ie0616489

Kohl, A. L. (1997). Gas Purification (5th ed.). Gulf Publishing. https://www.elsevier.com/books/gas-purification/kohl/978-0-88415-220-0

Li, K. e. (2016). Solvent-based CO_2 capture technologies. *Applied Energy, 173*, 16–38. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.044

Loachamin, D. C.-C. (2024). Amine-based solvents and additives to improve the CO_2 capture processes. *A review. ChemEngineering, 8*(6), 129. https://doi.org/10.3390/chemengineering8060129

Mondal, M. K. (2012). Carbon dioxide capture using chemical absorption. *Energy, 40*, 1–18. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.042

Nwabueze, Q. A. (2024). Advancements in the application of CO_2 capture and utilization technologies: A comprehensive review. *Fuels, 5*(3), 508–532. https://doi.org/10.3390/fuels5030028

Obia, D. O. (2024). Review of recent process developments in the field of carbon dioxide (CO_2) capture from power plants flue gases and future perspectives. Philosophical Magazine. https://doi.org/10.1080/14786451.2024.2317137

Oexmann, J. &. (2010). Post-combustion CO_2 capture system analysis. *Energy Conversion and Management, 51*, 127–134. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.08.009

Rochelle, G. (2010). Capture by aqueous absortion: Summary of 1st quarterly progress reports. University of Texas, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.001

Rubin, E. S. (2015). The cost of CO_2 capture. *Energy Policy, 86*, 619–628. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.032

Shao, R. e. (2020). Advanced MEA-based CO_2 capture modeling. *Fuel, 278*, 118338, https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118338

Sharma, R. &. (2024). Post combustion carbon capture using chemical absorption: A short review. International Journal of Ambient Energy,. 45(1). https://doi.org/10.1080/01430750.2024.2360999

Sreenivasulu, B. e. (2015). Carbon capture technologies: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 50*, 469–481. doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.029

Tontiwachwuthikul, P. &. (2004). Process development for CO_2 capture using amines. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 43*, 7438–7447. https://doi.org/10.1021/ie049731k

Yue, M. B. (2023). Recent advances in amine-based CO_2 capture solvents. *9, 1221*–1238. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.019

Zhang, S. S. (2024). Recent advances, challenges, and perspectives on carbon capture. *Frontiers of Environmental Science & Engineering,. 18, 75*. https://doi.org/10.1007/s11783-024-1835-0

Zhao, L. e. (2014). CO_2 absorption mechanism in amine solutions. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 53*, 13993–14003. https://doi.org/10.1021/ie502169h

Zhou, Q. e. (2021). Optimization of amine-based CO_2 capture systems. *Journal of Cleaner Production, 278*, 123–135. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123135

Este artículo está bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0).