



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Diseño de un Sistema de Captura de CO₂ para
la Reducción de Gases de Efecto Invernadero.**

presentada por
Ing. Ildester Sánchez Ruiz

como requisito para la obtención del grado de
Maestra en Ciencias de la Ingeniería

Directora de tesis
Dra. Marisol Cervantes Bobadilla

Codirector de tesis
Dr. Jarniel García Morales

Cuernavaca, Morelos, México. Febrero de 2026



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLOGÍA
NACIONAL DE MÉXICO



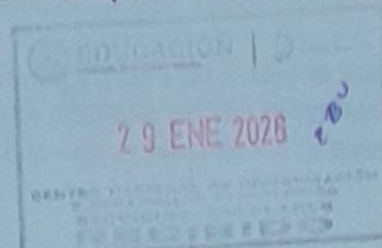
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Coordinación de Ciencias de la Ingeniería

Cuernavaca, Mor., 22/ enero/2026

OFICIO No. MCI/004/2026
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

Asunto: **Aceptación de documento de tesis**

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE



Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la estudiante **Ildester Sánchez Ruiz**, con número de control **M24CE015**, de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado **DISEÑO DE UN SISTEMA DE CAPTURA DE CO2 PARA LA REDUCCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO** y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DRA. MARISOL CERVANTES BOBADILLA
Director de tesis

DR. JARNIEL GARCÍA MORALES
Codirectora de Tesis

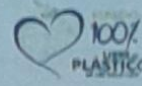
DR. JESÚS ARCE LANDA
Revisor 1

DR. RODOLFO AMALIO VARGAS MÉNDEZ
Revisor 2

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante
JAL/ang

SEP TecNM CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
RECIBIDO
29 ENE 2026
cm7
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



2026
año de
Margarita
Maza

Apatzingán 212, Palmira, 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770
e-mail: coord.ingenieria@cenidet.tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLOGÍA
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor., 28/enero/2026

Oficio No. SAC/027/2026

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ILDESTER SÁNCHEZ RUIZ
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "DISEÑO DE UN SISTEMA DE CAPTURA DE CO₂ PARA LA REDUCCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

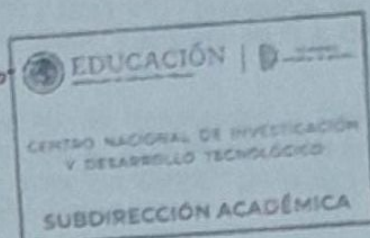
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica.

"Conocimiento y Tecnología al servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Coordinación de Ciencias de la Ingeniería
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2026
año de
Margarita
Maza

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4106.
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

RESUMEN

El aumento sostenido de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) asociadas a actividades humanas ha impulsado el desarrollo de tecnologías orientadas a su mitigación, particularmente en fuentes estacionarias ubicadas en entornos urbanos. En este trabajo se presenta el diseño y evaluación, mediante simulación, de un sistema de captura de CO_2 aplicable a pequeña y mediana escala, con énfasis en su posible aplicación en crematorios alimentados con gas natural.

Como parte del análisis contextual, se retoman estudios recientes que muestran un incremento en el uso de la cremación en zonas metropolitanas, lo que ha derivado en una mayor operación de crematorios y, en consecuencia, en un aumento de emisiones de CO_2 de carácter localizado. Aunque estas emisiones son menores en comparación con otros sectores industriales, su concentración espacial las convierte en un objetivo pertinente para la aplicación de estrategias de captura post-combustión.

A partir de una revisión del estado del arte sobre tecnologías de captura de CO_2 , se seleccionó la absorción química con aminas como la alternativa más adecuada para este tipo de fuentes. El sistema propuesto se modeló en el software Aspen Plus e integra una columna de absorción y una columna de desorción, utilizando metildietanolamina (MDEA) como solvente, debido a su selectividad hacia el CO_2 y a sus menores requerimientos energéticos de regeneración.

Los resultados de la simulación muestran una remoción de CO_2 del 97.1 % en la etapa de absorción y una eficiencia de desorción del 96.2 %, lo que confirma la regeneración efectiva del solvente y la viabilidad técnica del sistema bajo las condiciones evaluadas. El desarrollo de este tipo de sistemas contribuye al análisis de alternativas tecnológicas para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente aquellos relacionados con la acción por el clima, la salud y bienestar en entornos urbanos y el desarrollo de tecnologías orientadas a una industria más sostenible.

ABSTRACT

The sustained increase in carbon dioxide (CO_2) emissions associated with human activities has driven the development of technologies aimed at mitigating them, particularly from stationary sources located in urban environments. This paper presents the design and evaluation, through simulation, of a CO_2 capture system applicable to small and medium scales, with an emphasis on its potential application in crematories fueled by natural gas.

As part of the contextual analysis, recent studies are reviewed that show an increase in the use of cremation in metropolitan areas, which has led to a greater operation of crematories and, consequently, an increase in localized CO_2 emissions. Although these emissions are lower compared to other industrial sectors, their spatial concentration makes them a relevant target for the application of post-combustion capture strategies.

Based on a review of the state of the art in CO_2 capture technologies, chemical absorption with amines was selected as the most suitable alternative for this type of source. The proposed system was modeled using Aspen Plus software and integrates an absorption column and a desorption column, using methyldiethanolamine (MDEA) as the solvent due to its selectivity for CO_2 and its lower energy regeneration requirements.

The simulation results show a CO_2 removal of 97.1 % in the absorption stage and a desorption efficiency of 96.2 %, confirming the effective regeneration of the solvent and the technical viability of the system under the evaluated conditions. The development of this type of system contributes to the analysis of technological alternatives for reducing greenhouse gas emissions, in accordance with the Sustainable Development Goals, particularly those related to climate action, health and well-being in urban environments, and the development of technologies geared toward a more sustainable industry.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis a

Mis amadas hijas, ustedes son el motor impulsor de mi superación y me han dado la fuerza para vencer todos los desafíos y llegar hasta aquí.

Mis queridos padres por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y sus sacrificios. Gracias por ser parte de mi inspiración y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. Esta tesis es un reflejo de todo lo que he aprendido de ustedes y un pequeño homenaje a su dedicación y cariño.

Mis estimados asesores, por su orientación, paciencia y sabiduría. Gracias por compartir sus conocimientos y por guiarme a lo largo de este camino.

Sus consejos y enseñanzas han sido fundamentales para la realización de este trabajo. Su compromiso y profesionalismo han sido un ejemplo a seguir y una fuente constante de motivación. Esta tesis no habría sido posible sin su valioso apoyo.

AGRADECIMIENTOS

A mis hijas,

Por su amor, apoyo incondicional y por ser la fuerza que me impulsa cada día.

A mis padres,

Por su amor, apoyo incondicional y por creer siempre en mí. Su confianza ha sido mi principal motivación para alcanzar mis metas. Gracias por enseñarme la importancia del esfuerzo y la dedicación.

A SECIHTI,

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, por el apoyo económico brindado durante la realización de mis estudios de maestría.

Al Tecnológico Nacional de México y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,

Por el apoyo institucional brindado para el desarrollo de este trabajo.

A mis directores de tesis la Dra. Marisol Cervantes Bobadilla y el Dr. Jarniel García Morales,

Por su orientación y consejos que me ayudaron a concluir esta etapa.

A los miembros de mi comité revisor, El Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez y el Dr. Jesús Arce Landa,

Por sus comentarios y recomendaciones que me sirvieron para mejorar la calidad de mi trabajo.

A mis amigos,

Por estar siempre a mi lado, en los buenos y malos momentos. Gracias por su compañía, por los momentos de distracción y por ser un pilar fundamental en mi vida. Su amistad ha sido esencial en este proceso. Gracias por estar.

A mis compañeros,

Gracias por todos los momentos compartidos y por hacer de mi estancia en el CENIDET una grata experiencia.

A mis profesores,

Por su guía, enseñanzas y paciencia a lo largo de mi formación académica. Gracias por compartir sus conocimientos y por motivarme a ser mejor cada día. Su dedicación y compromiso han sido fundamentales para mi crecimiento profesional y personal.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Antecedentes	13
1.2. Objetivos	14
1.2.1. Objetivo General	14
1.2.2. Objetivos Específicos	14
1.3. Metas	14
1.4. Justificación	14
1.5. Problemática	15
1.6. Metodología de solución	16
1.7. Preguntas de investigación	17
1.8. Alcance	17
1.9. Aportación	17
1.10. Organización del documento	18
2. ESTADO DEL ARTE	19
2.1. Artículos encontrados en la literatura	19
2.2. Tecnologías y materiales de captura y almacenamiento de CO ₂	20
2.2.1. Clasificaciones Generales de Tecnologías de Captura de CO ₂	20
2.2.2. Absorción Química y Solventes (Aminas, MDEA, MEA)	20
2.2.3. Membranas y Nanotecnologías	25
2.2.4. Adsorción y Materiales Carbonosos	26
2.2.5. Captura Directa del Aire (DAC) y Biológica	27
2.2.6. Materiales Innovadores y Adsorbentes Específicos	29
2.3. Fuentes de emisión de CO ₂	31
2.3.1. Restaurantes	31
2.3.2. Crematorios	34
3. MARCO TEÓRICO	40
3.1. Tecnologías de Captura de CO ₂	40
3.1.1. Captura de CO ₂ en pre-combustión	40
3.1.2. Captura de CO ₂ en post-combustión	41
3.1.3. Captura de CO ₂ en oxidación	41
3.2. Utilización de CO ₂	42
3.3. Emisiones de CO ₂	44
3.4. Funcionamiento del Absorbedor, Desorbedor. Uso de MDEA	51
3.4.1. Absorbedor - Desorbedor (columna de desorción o regeneración)	51
3.4.2. Uso de MDEA (Metildietanolamina)	52
3.4.3. Software Aspen Plus	53

4. CASO DE ESTUDIO	56
4.1. Método de Diseño	58
5. DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CAPTURA DE CO₂	64
5.1. Modelado del proceso en Aspen Plus	64
5.2. Limitantes del sistema y modelo	68
6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	70
6.1. Simulaciones realizadas	70
6.2. Gráficos de funcionamiento interno Absorbedor	93
6.3. Gráficos de funcionamiento interno del Desorbedor	98
6.4. Principales resultados	101
6.5. Análisis del Sistema	102
6.5.1. Ventajas del sistema	102
6.5.2. Desventajas del sistema	102
6.6. Validación práctica	102
7. CONCLUSIONES	104
8. ANEXOS	105
9. BIBLIOGRAFÍA	113

Índice de figuras

1.	<i>Metodología para el cumplimiento de los objetivos.</i>	16
2.	Diagrama de un sistema de adsorción, www.researchgate.net	23
3.	Tecnología de membrana	26
4.	<i>Esquema Pre-combustión.</i>	41
5.	<i>Esquema Post-combustión.</i>	41
6.	<i>Esquema Oxidación.</i>	42
7.	<i>Esquema general de la absorción de CO₂.</i> Fuente: Robertson, 2007	50
8.	<i>Funciones principales del Aspen Plus.</i>	54
9.	<i>Esquema del Sistema de Captura de CO₂.</i>	60
10.	<i>Configuración de la columna de Absorción.</i>	65
11.	<i>Configuración de la columna de Desorción.</i>	66
12.	<i>Esquema del Sistema de Captura de CO₂ en Aspen Plus.</i>	68
13.	Configuración y Resultados de la Simulación 1.	72
14.	Configuración y Resultados de la Simulación 2.	74
15.	Configuración y Resultados de la Simulación 3.	76
16.	Configuración y Resultados de la Simulación 4.	78
17.	Configuración y Resultados de la Simulación 5.	80
18.	Configuración y Resultados de la Simulación 6.	82
19.	Configuración y Resultados de la Simulación 7.	84
20.	Configuración y Resultados de la Simulación 8.	86
21.	Configuración y Resultados de la Simulación 9.	88
22.	Configuración y Resultados de la Simulación 10.	90
23.	<i>Resultado de las reacciones de absorción en Aspen Plus.</i>	92
24.	<i>Captura de CO₂ vs Etapas.</i>	93
25.	Gráficos resultados de las etapas 2 a la 9 del Absorbedor.	94
26.	Gráficos resultados de las etapas 9 a la 15 del Absorbedor.	94
27.	Gráficos resultados de las etapas 16 a la 22 del Absorbedor.	94
28.	Gráficos resultados de las etapas 23 a la 29 del Absorbedor.	95
29.	Gráficos resultados de las etapas 30 a la 36 del Absorbedor.	95
30.	Gráficos resultados de las etapas 37 a la 39 del Absorbedor.	95
31.	<i>Resultado de la desorción de Aspen Plus.</i>	97
32.	<i>Composición de CO₂ (vapor) en las 30 etapas de la columna de desorción.</i>	98
33.	Gráficos resultados de las etapas 2 a la 8 del Desorbedor.	99
34.	Gráficos resultados de las etapas 9 a la 15 del Desorbedor.	99
35.	Gráficos resultados de las etapas 16 a la 22 del Desorbedor.	100
36.	Gráficos resultados de las etapas 23 a la 29 del Desorbedor.	100

Índice de cuadros

1.	Dimensiones y áreas de aplicación de los artículos revisados en la Literatura. .	21
2.	Dimensiones y áreas de aplicación de los artículos revisados en la Literatura (cont.).	22
3.	Comparación de Métodos de captura de CO ₂	32
4.	Ventajas y Desventajas de los Procesos de captura de CO ₂	43
5.	Ventajas y Desventajas de los Materiales para la captura de CO ₂	44
6.	Clasificación según cantidad de emisiones.	46
7.	Límites máximos permisibles de contaminantes.	47
8.	Nivel Máximo Permisible de emisión según el combustible.	47
9.	Valores límite de CO en el aire ambiente.	48
10.	Requerimientos de suficiencia de datos.	48
11.	Total de cremaciones por año.	50
12.	Resumen de funcionamiento.	53
13.	Resumen de dimensiones Absorbedor (Sainz, A. 2022).	58
14.	Resumen de dimensiones Desorbedor.	58
15.	Resultado de 10 simulaciones de captura de CO ₂	71
16.	Resultado de la simulación del Absorbedor.	91

1. INTRODUCCIÓN

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD) celebrada en Río de Janeiro, Brasil, en 1992 (UNCED, 1992) marcó el inicio de la atención global al cambio climático. Según la Secretaría de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNCCS, 2009), el aumento de los niveles de CO₂ desencadena una serie de transformaciones en los patrones climáticos, incluyendo alteraciones en las precipitaciones, el calor, el aumento de las temperaturas y la acidificación de los océanos. El 25 de septiembre de 2015, los líderes mundiales adoptaron un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible conocida como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) donde cada objetivo (ODS 1: Fin de la pobreza, ODS 2: Hambre cero, ODS 3: Salud y bienestar, ODS 4: Educación de calidad, ODS 5: Igualdad de género, ODS 6: Agua limpia y saneamiento, ODS 7: Energía asequible y no contaminante, ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico, ODS 9: Industria, innovación e infraestructura, ODS 10: Reducción de las desigualdades, ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles, ODS 12: Producción y consumo responsables, ODS 13: Acción por el clima, ODS 14: Vida submarina, ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres, ODS 16: Paz, justicia e instituciones sólidas, ODS 17: Alianzas para lograr los objetivos) tiene metas específicas planificadas a ser alcanzadas en los próximos 15 años (ONU, 2015). Un punto de inflexión histórico en la lucha contra el cambio climático fue el Acuerdo de París de 2016 (UNFCCC, 2015), en el cual México, junto con líderes de 195 naciones, se comprometió a combatir sus efectos perjudiciales. Según este acuerdo, el objetivo es limitar el calentamiento global a 2 °C por debajo de los niveles preindustriales para finales de siglo.

Durante el Acuerdo de París México se comprometió a reducir sus emisiones de CO₂ en un 22 % para el año 2030 en comparación con un escenario de emisiones inalteradas, con una meta adicional condicionada de reducir las emisiones en un 36 % para el mismo año, sujeto a recibir apoyos internacionales adecuados. Además, México se comprometió a incrementar la contribución de energías limpias (renovables y nuclear) en su matriz energética al 35 % para 2024 y al 50 % para 2050. Asimismo, se propuso reducir la intensidad de carbono de su economía en un 40 % para 2030 con respecto a los niveles de 2013.

Un avance clave hacia la implementación efectiva del Acuerdo de París fue la aprobación del Reglamento del Acuerdo de París (Katowice Rulebook) durante la Cumbre del Clima de Katowice (COP-24). Para alcanzar el objetivo más ambicioso de limitar el calentamiento a 1.5 °C para finales de siglo, el Panel Internacional sobre el Cambio Climático (IPCC) sugiere que las emisiones de CO₂ deberían mantenerse entre 25-30 Gt CO₂ por año, considerablemente por debajo de los niveles actuales de 52-58 Gt CO₂ por año. El último hito en la agenda climática internacional fue la COP-26 celebrada en Glasgow, Reino Unido, en noviembre de 2021, donde se llegó a un acuerdo para revisar y discutir

el estado actual del cambio climático.

La investigación propone abordar esta problemática desarrollando y caracterizando en simulación un dispositivo de captura de CO₂. El diseño y caracterización de dispositivos para capturar CO₂ aborda desafíos prioritarios en México, como la mitigación del cambio climático, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la promoción de prácticas sostenibles. Al lograr este objetivo, se espera contribuir al avance en tecnologías de mitigación del cambio climático y promover prácticas sostenibles en la gestión de emisiones de GEI, con impactos positivos tanto a nivel local como global.

1.1. Antecedentes

La problemática del cambio climático ha impulsado múltiples investigaciones enfocadas en la captura y reducción de emisiones de CO₂, uno de los principales GEI. Diversos estudios han abordado el desarrollo de tecnologías y dispositivos para la captura de CO₂, especialmente en el ámbito industrial.

La cremación es un proceso que ha incrementado su uso a nivel mundial como una alternativa a los entierros tradicionales, sin embargo, también representa una fuente significativa de emisiones contaminantes a la atmósfera. Estudios recientes indican que la cremación de un solo cuerpo puede generar entre 27 y 242 kg de CO₂, dependiendo de las condiciones y tecnologías empleadas Benavides, S. et al. 2021; Little, B. 2019; Hernández, S. 2020. En ciudades con alta densidad poblacional, como la Ciudad de México, el aumento en la cantidad de cremaciones —especialmente durante la pandemia de COVID-19— ha incrementado considerablemente las emisiones de gases contaminantes, incluyendo CO₂, mercurio, plomo, dioxinas, furanos y partículas finas PM_{2.5} Hernández, J. 2019; Benavides, S. et al. 2021.

A pesar de que algunos crematorios cuentan con sistemas de filtrado para metales pesados y partículas, estos no neutralizan el CO₂ generado, que es el principal gas de efecto invernadero emitido en el proceso Little, B. 2019. Además, gran parte de los crematorios en México y otros países operan con tecnologías obsoletas que no cumplen con los estándares ambientales actuales, lo que agrava el impacto ambiental y la salud pública en las comunidades cercanas.

Estos antecedentes evidencian la necesidad urgente de desarrollar tecnologías y dispositivos que permitan capturar y reducir las emisiones de CO₂ en crematorios, especialmente en zonas urbanas, para mitigar su contribución al cambio climático y mejorar la calidad del aire local.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Diseñar un dispositivo para la captura de CO_2 que sea aplicable en pequeña y mediana escala para minimizar los GEI mediante simulación.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Investigar y caracterizar los diferentes métodos, materiales y dispositivos de captura de CO_2 con el fin de determinar los adecuados para nuestro diseño.
- Determinar las dimensiones y variables adecuadas para el dispositivo en pequeña y mediana escala mediante investigación realizada.
- Diseñar un dispositivo para la captura de CO_2 en pequeña y mediana escala mediante simulación.
- Evaluar el sistema para la captura de CO_2 en pequeña y mediana escala en simulación.

1.3. Metas

La investigación se enfoca en el desarrollo y caracterización de un dispositivo para la captura de CO_2 , diseñado para su implementación a pequeña y mediana escala. Se busca maximizar la capacidad de captura del dispositivo, minimizando los costos operativos y de mantenimiento asociados. Este proceso se llevará a cabo a través de simulaciones especializadas, las cuales permitirán modelar el comportamiento del dispositivo en diversas condiciones operativas y validar su eficacia teórica.

1.4. Justificación

La creciente concentración de CO_2 en la atmósfera es uno de los principales motores del cambio climático global, afectando de manera significativa los sistemas naturales y la calidad de vida humana. Aunque el CO_2 es un gas natural y esencial para procesos vitales como la fotosíntesis, su exceso debido a actividades humanas, especialmente la quema de combustibles fósiles y procesos industriales, ha provocado un aumento acelerado en el efecto invernadero, contribuyendo al calentamiento planetario y a fenómenos climáticos extremos.

En este contexto, la captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) surge como una tecnología crucial para mitigar estas emisiones, permitiendo capturar el CO_2 directamente de fuentes industriales o incluso del aire ambiente, y evitar que llegue a la atmósfera. La relevancia de abordar este tema radica en que, para cumplir con los

objetivos internacionales de reducción de emisiones, como reducir a la mitad las emisiones globales de CO₂ para 2030 y alcanzar la neutralidad de carbono para 2050, la CCUS es una herramienta indispensable, complementaria a la transición hacia energías renovables y la eficiencia energética.

El estudio de tecnologías de captura de CO₂ es importante porque permite optimizar procesos y materiales que incrementen la eficiencia y reduzcan los costos operativos, facilitando su implementación a gran escala. Además, la investigación en este campo contribuye a superar barreras técnicas, económicas y sociales que limitan la adopción masiva de estas soluciones. La contribución esperada de estos estudios es generar conocimiento que permita diseñar dispositivos y sistemas más efectivos y sostenibles, acelerar el despliegue de proyectos y apoyar políticas orientadas a la mitigación del cambio climático.

El impacto ambiental de la captura de CO₂ es significativo, ya que puede evitar miles de toneladas de emisiones anuales, reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuir la contaminación atmosférica asociada. Sin embargo, también es necesario considerar el consumo energético y la gestión adecuada de materiales para minimizar impactos secundarios. Por ello, la investigación continua es fundamental para mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad de estas tecnologías, garantizando que su implementación sea ambientalmente beneficiosa y económicamente viable.

En resumen, el estudio de la captura de CO₂ es una respuesta estratégica y urgente frente a la crisis climática global, con un potencial considerable para contribuir a la reducción de emisiones, proteger los ecosistemas y promover un desarrollo sostenible a nivel mundial.

1.5. Problemática

El cambio climático es una de las mayores amenazas globales, con efectos graves como el aumento de las temperaturas, cambios en los patrones climáticos y eventos climáticos extremos. Las crecientes emisiones de CO₂ a la atmósfera, principalmente debido a la producción industrial, son una de las principales causas del calentamiento global. Estos GEI contribuyen a la degradación ambiental, afectando los ecosistemas y la vida en el planeta.

A pesar de los avances en tecnologías para la captura y almacenamiento de CO₂, persisten desafíos significativos en su implementación, especialmente a pequeña y mediana escala. Los métodos actuales suelen ser costosos y requieren grandes cantidades de energía, lo que limita su adopción en diversos sectores industriales. La falta de dispositivos adecuados para estas escalas impide una reducción efectiva de las emisiones de CO₂, agravando el problema del cambio climático.

1.6. Metodología de solución

La metodología, figura 1, está diseñada para guiar el desarrollo y mejora de captadores de CO₂ mediante un proceso estructurado que abarca desde la revisión de literatura hasta el análisis de resultados en simulación. Se inicia con la identificación y clasificación de materiales y métodos basados en un estado del arte, seguido por la caracterización y diseño del dispositivo en un entorno de simulación especializado. Finalmente, se validan y analizan los resultados obtenidos para fundamentar decisiones que permitan mejorar la eficiencia y aplicabilidad del captador de CO₂ en su uso específico, según se muestra en la Figura 1.

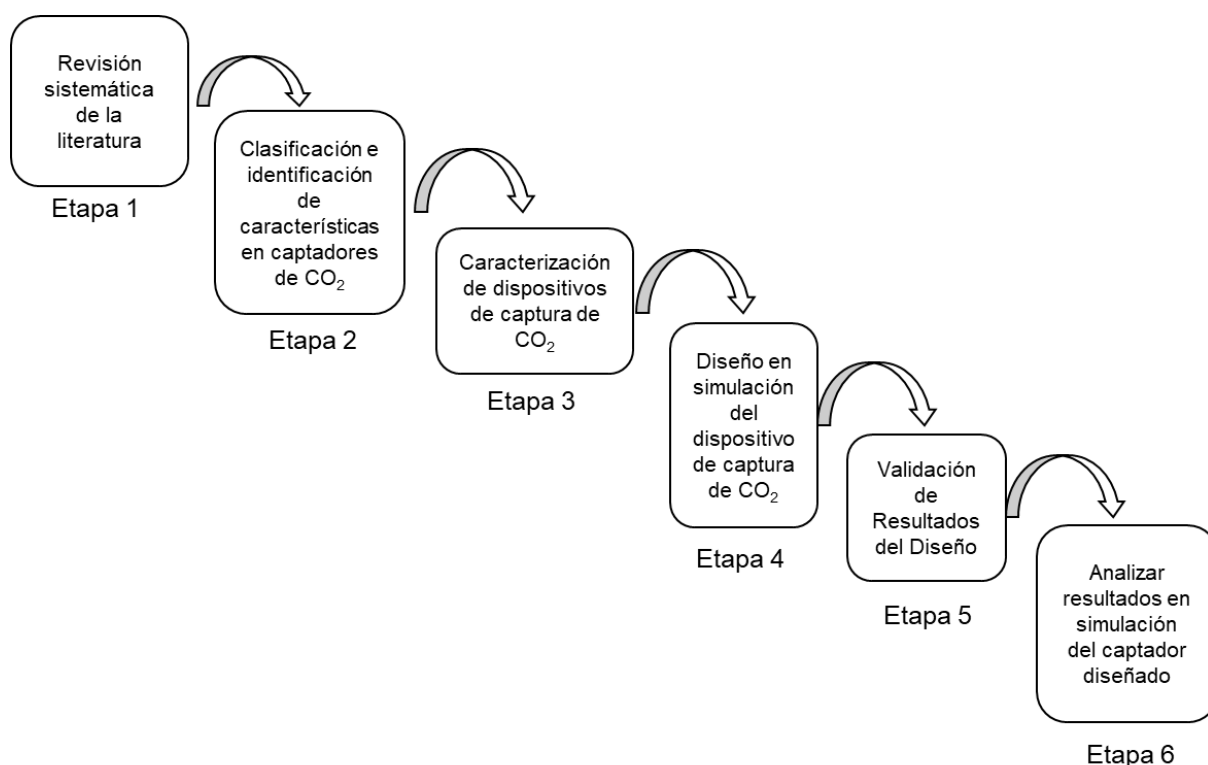


Figura 1: Metodología para el cumplimiento de los objetivos.

Etapa 1 - Revisión sistemática de la literatura: Esta actividad consiste en la realización del estado del arte de captadores de CO₂ (materiales, métodos, aplicaciones).

Etapa 2 - Clasificación e identificación de características en captadores de CO₂: Esta actividad consiste en la elección de métodos y materiales adecuados para el diseño.

Etapa 3 - Caracterización de dispositivos de captura de CO₂: Esta actividad consiste en definir parámetros necesarios para la caracterización del dispositivo de captura de acuerdo con la aplicación/ uso que se le dará.

Etapa 4 - Diseño en simulación del dispositivo de captura de CO₂: Esta actividad consiste en diseñar un captador de CO₂ en un programa especializado.

Etapa 5 – Validación de resultados del diseño: Esta actividad consiste en la validación de los resultados de la aplicación del diseño.

Etapa 6 - Analizar resultados en simulación del captador diseñado: Esta actividad consiste en analizar los resultados validados y tomar decisiones sobre el proceder.

1.7. Preguntas de investigación

Se plantean las siguientes preguntas de investigación para guiar el diseño y caracterización de dispositivos para la captura de CO₂:

¿Cuáles son los principales factores que afectan la capacidad de captura de CO₂ en dispositivos de pequeña y mediana escala?

¿Qué materiales y diseños de dispositivos ofrecen el mejor rendimiento en términos de capacidad de captura de CO₂ y costos operativos?

¿En qué medida impactan estos dispositivos en el Medio Ambiente?

1.8. Alcance

El estudio se enfocará en el desarrollo de un prototipo virtual del dispositivo de captura de CO₂, considerando aspectos como la selección de materiales, el diseño y los procesos de captura de CO₂. Se llevarán a cabo simulaciones para evaluar el rendimiento del dispositivo en términos de eficiencia de captura y viabilidad económica. Sin embargo, el alcance de la investigación se limitará a la fase de diseño y caracterización en simulación, sin incluir la fabricación ni la implementación práctica del dispositivo en un entorno real.

1.9. Aportación

1. Se presenta una simulación detallada de un sistema de captura de CO₂ enfocado en crematorios, un sector cuyas emisiones han sido poco exploradas en la literatura científica, aportando un estudio en esta área específica..
2. Se evalúa el uso de MDEA como el solvente adecuado, fortaleciendo su viabilidad tanto técnica frente a otras aminas comunes empleadas, lo que respalda su elección en procesos de captura.
3. Se identifican las limitaciones presentes en el modelo actual, lo cual abre la puerta para futuras mejoras, tales como la incorporación de contaminantes adicionales como NO_x, SO_x, y partículas, así como la consideración de la degradación progresiva del absorbente.
4. Permite evaluar diversas condiciones operativas con el objetivo de maximizar los resultados del proceso, ofreciendo flexibilidad para ajustes y mejoras continuas.

1.10. Organización del documento

La estructura del presente documento está diseñada de forma concisa para la fácil ubicación de los temas. En la Sección 1, Introducción, se explica la propuesta de solución. En la Sección 2 se habla sobre el estudio del estado del arte. En la Sección 3 se presenta el marco teórico donde se abordan las cuestiones relacionadas con el sistema, así como el modo en el que opera teóricamente el software. En la Sección 4 se trata el caso del estudio, donde se definen las características de la industria seleccionada. En la Sección 5 ya se definen los escenarios y las características de diseño del sistema para la simulación. En la Sección 6 se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones y se realiza un estudio comparativo entre cada escenario para determinar el sistema más efectivo y factible. Luego de presentan las conclusiones de este estudio, cumpliendo con los objetivos y dando respuesta a las preguntas de investigación, posteriormente se presentan algunos anexos y luego la bibliografía utilizada.

2. ESTADO DEL ARTE

Se presenta una revisión exhaustiva de tecnologías y materiales para captura y almacenamiento de CO₂, incluyendo absorción química (aminas como MDEA), membranas, adsorbentes sólidos y tecnologías biológicas. Se analizan ventajas, limitaciones y aplicaciones industriales, con especial énfasis en emisiones de sectores como restaurantes y crematorios. Se describen normativas ambientales, impactos sociales y avances científicos, proporcionando una base sólida para fundamentar el diseño del dispositivo de captura.

2.1. Artículos encontrados en la literatura

Los artículos recopilados abordan de manera exhaustiva diferentes aspectos relacionados con la captura de CO₂. En primera instancia, se analizan las investigaciones y tecnologías actuales, que incluyen desde los métodos químicos clásicos como la absorción con aminas (MEA, MDEA) hasta innovaciones en membranas y nanotecnologías aplicadas a la captura de este gas. En segundo lugar, se examinan los materiales adsorbentes, con especial atención a aquellos basados en carbono, celulosa, polímeros funcionalizados, alúmina y grafeno, destacándose tanto sus potenciales eficiencias como algunas limitaciones inherentes. Asimismo, se presentan diversos procesos y métodos de captura, que abarcan técnicas físicas, químicas y biológicas, evaluando sus ventajas y desventajas a niveles técnicos y energéticos, desde experimentales hasta aplicaciones industriales. En cuanto a aplicaciones industriales e impactos ambientales, los trabajos referencian sectores clave como la industria cementera, térmica, crematorios y restaurantes, cuantificando las emisiones contaminantes generadas y evaluando distintas estrategias para su mitigación. Finalmente, los estudios también consideran el impacto social y normativo, analizando políticas ambientales, el cumplimiento de normativas, la percepción pública y los riesgos ambientales, así como las estrategias orientadas a la sostenibilidad y a la mejora del impacto ambiental junto con la salud pública.

Los Cuadros 1 y 2, presenta una síntesis de artículos que abarcan una amplia variedad de escalas, desde ensayos de laboratorio hasta proyectos industriales y megaproyectos. Las áreas de aplicación comprenden plantas termoeléctricas, cementeras, captura directa de aire, industrias químicas, así como sectores urbanos como crematorios y restaurantes con impacto ambiental local. Los materiales empleados reflejan la diversidad del campo, incluyendo adsorbentes sólidos, membranas, polímeros, nanoestructuras y procesos termodinámicos y químicos. La bibliografía seleccionada garantiza una visión actualizada, con publicaciones que van desde 2019 hasta 2024, integrando investigación académica rigurosa, simulaciones, estudios de caso y experiencia industrial. Se consideran tanto estudios teóricos como prácticos, haciendo énfasis en la eficiencia energética, el impacto ambiental y la viabilidad de implementación, abordando aspectos técnicos, sociales y regulatorios. Asimismo, la inclusión de proyectos reales y normativas contribuye a contextualizar el

estado del arte en relación con los retos y avances en la captura de CO₂.

2.2. Tecnologías y materiales de captura y almacenamiento de CO₂

2.2.1. Clasificaciones Generales de Tecnologías de Captura de CO₂

En la actualidad, existen tres principales orientaciones de investigación para tecnologías de captura de CO₂; la primera es la tecnología de captura química de absorción de CO₂, que maneja soluciones o adsorbentes, las que comúnmente utilizan alcalinos, óxidos, aminoácidos, carbón activado, materiales estructurales organometálicos, entre otros. El segundo tipo es la tecnología de captura biológica, en la que se maneja organismos vivos como algas para la fotosíntesis que convierte dióxido de carbono en materia orgánica y el tercer tipo es la tecnología de separación por membrana, que utiliza materiales de membrana especiales para separar el dióxido de carbono mediante permeación y adsorción selectiva, los que comúnmente utilizados incluyen membranas poliméricas (Xu, J, 2023).

La tecnología de captura de carbono es clasificada en tres enfoques: pre-combustión, post-combustión y oxidación, en los que la primera se utiliza a nivel mundial y como técnica, aísla el CO₂ de los gases de combustión mediante la absorción, la adsorción, los bucles químicos o las membranas (Peres, C; et al., 2022).

Otras de las tecnologías monitoreadas por los especialistas respecto a la captura de CO₂ son: la separación por oxidación, las membranas de separación, el lazo de calcio, el lazo químico, la separación directa y los ciclos supercríticos de potencia con CO₂ según IEA (2021).

2.2.2. Absorción Química y Solventes (Aminas, MDEA, MEA)

Según Puentes, L., Velandia, L., (2024) en los procesos de adsorción, Figura 2, para captura de CO₂, existe una amplia variedad de sorbentes disponibles tanto en el mercado como en fase de desarrollo, entre los que se encuentran los carbones activados, zeolitas, estructuras organometálicas (MOF) y estructuras orgánicas covalentes (COF) (Darunte et al., 2019).

Serrano Vasco (2024) realizó un estudio comparativo sobre tecnologías de descarbonización, concluyendo que la absorción con aminas es la más adecuada para capturar grandes caudales de gas por su alta selectividad y resiliencia frente a condiciones extremas. Identifica beneficios como la reducción significativa de emisiones de CO₂, la mejora de la calidad del aire, la promoción de tecnologías sostenibles y la generación de sistemas industriales más resilientes.

Mesa Niño y Rodríguez Montes (2023) llevaron a cabo un análisis técnico, económico y ambiental sobre la absorción química de CO₂ usando aminas y amoníaco, destacando a la

Cuadro 1: Dimensiones y áreas de aplicación de los artículos revisados en la Literatura.

Ref.	Título	Año	Fuentes de energía	Aplicación	Dimensión del sistema
Liu, C. et al.	Proceso de absorción de CO ₂ por circulación de múltiples etapas (MSC)	2024	Energía eléctrica para bombas.	Plantas industriales de captura química.	Industrial, planta de escala
Leiqing, H. et al.	Nanotecnologías en membranas para captura de CO ₂	2024	Varios (ALD, CVD, plasma, etc.)	Mejoras en membranas para captura de gases.	Laboratorio a piloto
Madeira, L. y otros.	Captura y almacenamiento de carbono (CAC) con cartuchos alcalinos y aminas	2024	Química (disolventes)	Fuentes industriales de CO ₂	Industrial
Das, D. y otros.	Revisión de procesos de captura de CO ₂ y materiales adsorbentes.	2023	Criogénico, químico	Plantas termoeléctricas y gasificación.	Laboratorio industrial
Quan, C. y otros.	Materiales de carbono basados en biomasa para captura de CO ₂	2023	Biomasa (renovable)	Desarrollo de materiales adsorbentes.	Laboratorio
Mohd, H. y otros.	Tecnologías prometedoras de reducción de emisiones en la industria cementera	2023	Varios químicos	Industria cementera	Industrial
Gautam, A. y otros.	Análisis tecnologías de captura pre y post combustión para plantas eléctricas.	2023	Físico-química, biológica	Plantas termoeléctricas, microalgas.	Industrial
Khan, S. y otros.	Uso de bombas intermitentes para captura directa de aire.	2023	Energía eléctrica	Captura directa de aire (DAC).	Piloto
Maniarasu, R. y otros.	Simulación de adsorción de CO ₂ en carbón activado.	2022	Carbón activado	Procesos experimentales de captura.	Laboratorio
Huang, S. y otros.	Membranas de grafeno para captura y separación de CO ₂	2021	Procesos físicos (membranas).	Captura molecular, membranas de alta permeabilidad.	Laboratorio con vistas industriales
Zhang, M. y otros.	Adsorbentes celulósicos porosos para captura de CO ₂	2024	Biomasa sostenible.	Adsorbentes para captura sustentable.	Laboratorio a escala piloto.

Cuadro 2: Dimensiones y áreas de aplicación de los artículos revisados en la Literatura (cont.).

Ref.	Título	Año	Fuentes de energía	Aplicación	Dimensión del sistema
Wang, S. y otros.	Adsorbentes de óxido de aluminio para captura directa de aire.	2024	Adsorbentes sólidos.	Captura directa de aire (DAC).	Laboratorio.
Mao, H.; Reimer, J.	Polímero melamina para captura de CO ₂ en chimeneas.	2022	Polímero.	Captura en chimeneas industriales.	Laboratorio.
Sánchez, y otros.	Estudios sobre emisiones contaminantes en crematorios: CO ₂ , NO _x , CO y partículas.	2023	Gas natural, propano, electricidad.	Medición y control de emisiones en crematorios.	Local-regional.
Ávila, J. y otros.	Evaluación de huella de carbono en cementerios y reducción mediante control automático.	2018	Gas natural, electricidad.	Reducción de emisiones en cementerios y crematorios.	Local-regional.
Benavides, S. y otros.	Incremento de emisiones por aumento de cremaciones durante COVID-19.	2022	Gas natural, propano.	Impacto ambiental regional de crematorios.	Local-regional.
Marchi, B. y otros.	Propuesta de recuperación térmica para impacto ambiental nulo en crematorios.	2023	Recuperación térmica, gas natural.	Mejora de eficiencia energética y reducción de emisiones.	Local-regional.
Hernández, S.	Evaluación de emisiones de contaminantes tóxicos y regulación normativa en crematorios.	2023	Gas natural, propano.	Control normativo y mitigación en crematorios.	Local-regional.
Lee, K.-H. y otros.	Simulación avanzada de eficiencia térmica y emisiones en crematorios ante aumento de demanda.	2019	Gas natural y energía eléctrica.	Optimización de procesos en infraestructura crematoria.	Local-regional.
Copeland, B.	Estimación global de emisiones de CO ₂ y NO _x en crematorios del Reino Unido.	2020	Gas natural.	Evaluación de emisiones nacionales y alternativas tecnológicas.	Nacional.

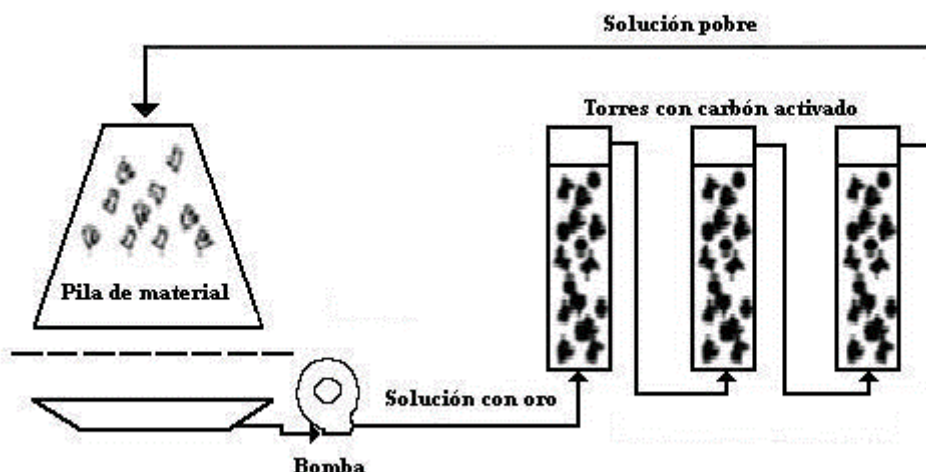


Figura 2: Diagrama de un sistema de adsorción, www.researchgate.net

MDEA por su baja corrosividad, estabilidad química y menor requerimiento energético de regeneración. Aunque su reacción con CO_2 es más lenta que la de la MEA, su rendimiento energético la convierte en una opción viable, especialmente cuando se combina con otras aminas.

De acuerdo con Rincón Ocampo y Mejía Díaz (2023), la captura de CO_2 mediante MEA se fundamenta en su capacidad para reaccionar químicamente con el gas, formando enlaces estables que facilitan su extracción. Este mecanismo es clave en la mitigación de emisiones en sectores como la generación de energía y el tratamiento de gases residuales. MEA logra eficiencias de captura de hasta 96.8% en torres de absorción simuladas; sin embargo, presenta limitaciones como alto consumo energético en la regeneración y pérdidas por evaporación. Por ello, se investigan solventes alternativos, como los líquidos iónicos, que ofrecen estabilidad térmica y menor demanda energética.

Por su parte, Sánchez Bas (2023) explica que la desorción es el proceso mediante el cual el CO_2 se libera de la solución de amina saturada al aplicar calor en una columna con relleno para maximizar el contacto entre fases. Las condiciones necesarias comprenden temperaturas entre 85 y 98°C y caudales de amina de 100 L/h. La eficiencia depende del equilibrio químico CO_2 -amina y de la pureza del gas tratado.

Para Borges, L. (2023), tanto la absorción como la adsorción son tecnologías consolidadas utilizadas en la industria para la separación de gases ácidos como el CO_2 . En ambos métodos, el paso más demandante energéticamente es la etapa de desorción, donde el CO_2 debe separarse del medio en el que fue retenido. La elección entre un absorbente físico o químico depende principalmente de la presión parcial del CO_2 en la corriente gaseosa. Para presiones parciales inferiores a 1 bar, se prefiere la absorción química con aminas primarias como la MEA, mientras que, para presiones entre 1 y 8 bar, son más adecuados

los absorbentes con aminas terciarias, como la MDEA.

Fang, M. et al. (2022). La absorción química es la tecnología más prometedora para la captura de CO₂ en fuentes estacionarias como plantas de carbón. Su eficacia se basa en la solubilidad del CO₂, la transferencia de masa y reacciones químicas. Se han estudiado diversos sistemas, incluyendo: Depuración con aminas, Procesos bifásicos, Absorción con amoníaco, Tecnologías con membranas. Se analizan los componentes clave (absorbentes, equipos e integración de procesos), así como los impactos ambientales y económicos del uso de aminas. También se describen aplicaciones industriales actuales y se proponen líneas futuras de investigación para optimizar esta tecnología.

Huang et al. (2022) destacan que la captura de CO₂ mediante líquidos iónicos se basa en la absorción del gas en una torre especializada, disolviéndose el CO₂ mientras el gas insoluble se libera. La desorción se realiza en un tanque de reducción de presión, separando el CO₂ del líquido y permitiendo reciclar el solvente. La eficiencia depende de propiedades como la densidad y capacidad calorífica del líquido iónico, además de las condiciones operativas. La oxidación puede mejorar la eficiencia energética del proceso.

Según Cao, L.; et al., (2022) en calderas de gas natural y centrales eléctricas de carbón, se emplea una técnica en la que previa separación a la combustión se asocia H₂ y CO para producir gas de síntesis, posteriormente, mediante reacciones químicas y reacciones de conversión adicionales se separa el CO₂.

Según Shahid et al., (2021), el proceso de absorción química en columnas mediante aminas es ampliamente utilizado y reconocido para la captura de CO₂. Particularmente, la MDEA destaca debido a que presenta bajas emisiones fugitivas, un bajo requerimiento energético para la regeneración y elevada capacidad de absorción de CO₂. Además, este solvente es ideal para el procesamiento de gas natural, al lograr eliminar eficientemente el CO₂ en condiciones de alta presión y concentración, factores recurrentes en dicho sector industrial.

Antonini, C. et al. (2021) destacan que la MDEA, una amina terciaria, es ampliamente utilizada como solvente eficiente para la captura de CO₂, alcanzando niveles de purificación superiores al 99.4 %. Esta tecnología, aplicada en columnas de absorción, es una alternativa viable y rentable para la producción de hidrógeno limpio. La optimización de procesos y el uso de configuraciones avanzadas, como el flujo dividido, mejoran la eficiencia y reducen el consumo energético, favoreciendo la sostenibilidad ambiental y económica.

Según Gutiérrez, J. et. al. (2019) y Tirado, D. Umaña, L. (2021) la MDEA reacciona con el CO₂ mediante hidrólisis en lugar de carbamación, lo que reduce los requerimientos térmicos de regeneración. Mientras que la MEA consume entre 3.5 y 4.0 GJ/ton CO₂, sistemas con MDEA operan con 2.7–3.0 GJ/ton CO₂, una reducción del 20–25 % debido a la menor entalpía de reacción asociada a la formación de bicarbonatos. Además, la

MDEA requiere menores temperaturas de regeneración ($90\text{--}122^{\circ}\text{C}$ frente a $120\text{--}140^{\circ}\text{C}$ para la MEA), lo que permite el uso de vapor de baja presión y disminuye el desgaste de los equipos.

Bui, M., Mac Dowell, N. (2020) La captura y almacenamiento de carbono (CCS) es un conjunto de tecnologías que busca reducir las emisiones de CO_2 al capturarlo durante la combustión de combustibles fósiles y almacenarlo de forma segura en la litosfera, alineándose con los principios de la economía circular. Entre las principales tecnologías están: DAC, Bioenergía con captura de carbono (BECCS) y Reforestación y aforestación. Estas tecnologías, desarrolladas desde los años 30, ya se aplican comercialmente. En EE. UU. existen más de 7000 km de tuberías para CO_2 , y su inyección para recuperación mejorada de petróleo y en acuíferos salinos (como en el proyecto Sleipner desde 1996) es una práctica consolidada.

Aguillón, J. (2020) señala que las tecnologías de captura de CO_2 con aminas en climas cálidos y tropicales, una condición poco explorada hasta ahora, su estudio es fundamental para su implementación en México, donde la generación eléctrica representa una de las principales fuentes de emisiones de CO_2 .

Nakao, S. et al. (2019) describen la absorción como un proceso clave para la captura de CO_2 , basado en la disolución o reacción química del gas con un solvente líquido. Su eficiencia depende de la solubilidad y reactividad del absorbente, siendo las aminas las más utilizadas. Este método se aplica en industrias como la del gas natural, fertilizantes y en tecnologías de mitigación climática. Puede operar a altas presiones y temperaturas, lo que mejora su desempeño. Con el desarrollo de nuevos solventes, la absorción continuará siendo esencial para reducir emisiones y mejorar la eficiencia energética.

Ayala, E., Martínez, F. (2019) destacan que la absorción química con aminas y el ciclo calcinación-carbonatación son las tecnologías más desarrolladas y viables para captura de CO_2 . En estos procesos, el soluto reacciona químicamente con el solvente, y la absorción está regida por el equilibrio químico entre la presión parcial del gas y su solubilidad. Las alcanolaminas en solución acuosa son los absorbentes más comunes debido a su alta reactividad con el CO_2 , su bajo costo y la flexibilidad operativa. Su estructura, con un grupo hidroxilo y un grupo amino, favorece la solubilidad en agua y la captura eficiente de gases ácidos.

2.2.3. Membranas y Nanotecnologías

Dentro de las tecnologías de captura de CO_2 empleando membranas, comúnmente se utilizan membranas comerciales basadas en polímeros debido a su bajo costo, alta permeabilidad a los gases, alta selectividad, etc. Sin embargo, en Leiqing, H, et al., (2024) investigan las nanotecnologías (como la deposición de capas atómicas (ALD), deposición química de vapor (CVD), tratamiento con plasma, fluoración directa y tratamiento con

haz de iones/electrones) que se pueden emplear para modificar las superficies de membranas y mejorar el rendimiento de captura de CO_2 .

Las tecnologías de membranas representan una alternativa innovadora para la separación de CO_2 en mezclas de gases de combustión. Este método utiliza una delgada capa de material semipermeable que permite la separación del gas mediante una fuerza impulsora, como diferencias de presión, temperatura o potencial eléctrico entre ambos lados de la membrana. Durante el proceso, la corriente de alimentación se divide en dos flujos: uno permeado, que atraviesa la membrana, y otro retenido, que no lo hace (Dziejarski et al., 2023). La Figura 3 muestra una representación esquemática del proceso de captura de CO_2 mediante membranas.

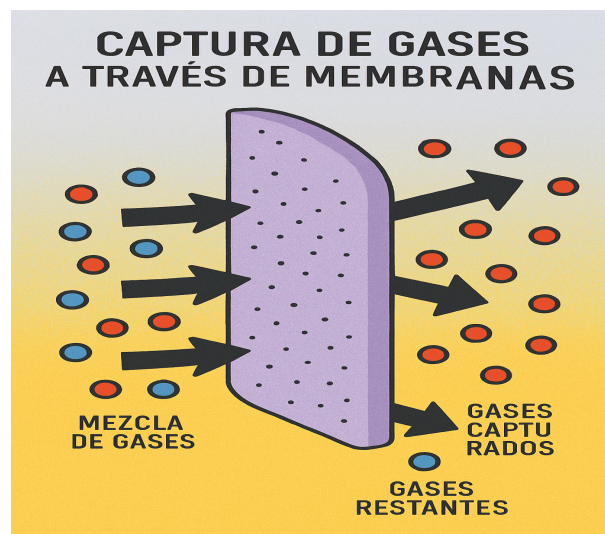


Figura 3: Tecnología de membrana

2.2.4. Adsorción y Materiales Carbonosos

En las aplicaciones industriales de captura de CO_2 , a base de disolventes, una de las primordiales barreras es el importante consumo de energía para la regeneración del absorbente. Una propuesta novedosa es el proceso de absorción de CO_2 por circulación de múltiples etapas (MSC) que efectuó una medida independiente en cada etapa, lo que trajo como resultado un superior rendimiento en la captura de CO_2 y la reducción de la regeneración de este (Liu, C, et al., 2024).

Algunas investigaciones recientes trabajan con materiales de carbono para la captura de CO_2 , la principal desventaja que presentan estos materiales es que se necesitan realizar modificaciones en los mismos con el fin de incrementar la capacidad de captura. En Quan, C; et al., (2023) realizan una revisión de los métodos de síntesis y modificación de materiales de carbono basados en biomasa y analiza los mecanismos de captura de CO_2 . Dentro de sus conclusiones encontraron que es crucial el enriquecimiento de los microporos y los sitios básicos para los materiales de carbono. La mayor parte de la investigación

sobre la adsorción de CO_2 por materiales de carbono se realiza sólo en el laboratorio puesto que el entorno de aplicación real es generalmente severo, por la humedad y la corrosión.

Maniarasu, R., et al., (2022) realiza un estudio de simulación para realizar mediciones de CO_2 por adsorción utilizando Aspen Adsorción V11 Activado donde utilizan el carbono como adsorbente potencial en la captura de CO_2 . Determinan la curva y el calor isostérico de adsorción donde los principales hallazgos se centran en que la adsorción se alcanza en un 64 % de CO_2 recuperado, siendo mayor al 90 % mol de pureza con un consumo energético de 4,6 GJ ton/ CO_2 para regeneración. Además, el carbón activado presenta una capacidad mayor de adsorción y selectividad de CO_2 que de N_2 , y la cantidad adsorbida en la superficie presenta una mejor dinámica de CO_2 . En la composición de CO_2 : N_2 , proporciona una composición con una mayor cantidad y eficiencia en la adsorción de CO_2 a causa de la buena selectividad del carbón activado con poros absorbentes.

2.2.5. Captura Directa del Aire (DAC) y Biológica

La Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC) y la Captura de carbono del aire (siglas en inglés DAC) son tecnologías que pueden contribuir a la neutralidad del carbono. La CAC ha sido ampliamente explorada con diferentes disolventes como soluciones alcalinas (óxido de calcio (CaO), solución de piperazina, soluciones alcalinas de Estroncio (Sr) y Bario (Ba), hidróxido de sodio (NaOH), alcoholes (metanol, etanol, 2-Propanol y otros)), disolventes a base de aminas (soluciones de dietanolamina) y aguas residuales alcalinas han sido probados para capturar CO_2 de fuentes industriales (Madeira, L, et al., 2024).

En Khan, S., et al., (2023) utilizan una bomba en el contactor para la captura de CO_2 que fue una parte sustancial de los requisitos de energía del contactor (75 %) lo que establece logros considerables en el ahorro de energía, acogiendo una operación intermitente para la bomba siendo evidente que la temperatura ejerce una influencia crucial sobre la captura de carbono junto a la concentración de la solución de captura jugando un papel importante en determinar las tasas de captura. Establecen un valor óptimo para la concentración de sorbente de 200 g/l. Es significativo que la implementación de un programa intermitente modo de operación con un ciclo de trabajo del 10 % de manera efectiva redujo el consumo de energía asociado con bombeando el fluido en un 85 %. Los resultados sugieren que la captura directa de aire, especialmente cuando se utiliza un sistema de base alcalina, es promisorio para mitigar el cambio climático como una estrategia eficaz y factible.

Terlouw, T, et al., (2021), presenta la Captura Directa de Carbono en el Aire (DACCS) como una tecnología emergente con potencial para eliminar enormes montos de CO_2 atmosférico. Destaca su eficiencia en países con suministro eléctrico bajo en carbono y el

uso de calor residual hasta en un 97 %. Los sistemas autónomos muestran una eficiencia de eliminación de gases de efecto invernadero (GEI) del 79 al 91 %, especialmente en áreas con alta irradiación solar. Se señala la importancia de seleccionar ubicaciones adecuadas para evitar emisiones netas de GEI en lugar de su eliminación.

Las tecnologías de captura de CO₂ a nivel industrial son el lavado con aminas, la oxidación, la captura directa, el circuito de calcio y la carbonatación mineral. En Mohd, H; et al., (2023) realizaron un estudio de las tecnologías más prometedoras para reducir las emisiones de CO₂ en la industria cementera, concluyeron que la carbonatación mineral es una de las tecnologías más efectivas para reducir las emisiones de CO₂, además, es mejor utilizar el agente extractor cloruro de amonio (NH₄Cl) para la captura de CO₂ en comparación con el Cloruro de hidrógeno (HCl), Ácido nítrico (HNO₃) y Ácido acético (CH₃COOH).

Actualmente, existen varios procesos industriales para la absorción de CO₂, como Kerr-McGee/AGG Lummus Crest (KMALC), Fluor EFG+, KM CDR, y procesos de amoníaco acuoso o enfriado y de absorción de álcalis, como muestra Salomone, F., et al., (2023), al utilizar un sistema Power-to-Gas (PtG) que produce 500 m³/h de Gas Natural Sintético (SNG), utilizando energía renovable de una planta de incineración de residuos (WI) y capturando CO₂ de los gases de combustión, reduciendo las emisiones de CO₂ en un 3,8 %. La configuración más eficiente (46,7 %) utiliza un sistema de captura de carbono post-combustión (PCC) con un disolvente y un electrolizador de membrana de electrolito polimérico (PEM). En contraste, la configuración menos eficiente (44,6 %) emplea otro disolvente y un electrolizador alcalino.

El estudio de Gautam, A., et al., (2023), analiza las principales tecnologías de captura de CO₂ (pre-combustión, post-combustión y oxidación) y sus condiciones de operación. Se examinan procesos industriales con disolventes físicos y metodologías como absorción, adsorción, membranas, separación criogénica y microalgas. Se destaca que los disolventes a base de alcanolaminas tienen una capacidad limitada de captura de CO₂ y requieren mucha energía para su regeneración. Los disolventes bifásicos, especialmente las mezclas de aminas, se consideran más eficientes, ofreciendo una reacción más rápida, mayor capacidad de absorción y menor energía de regeneración.

En Das, D, et al., (2023) se presenta una revisión exhaustiva de los procesos de captura de CO₂, su separación y utilización. Además, se centra en los diferentes materiales adsorbentes con alta selectividad y alta capacidad de captura. Llegando a la conclusión de que el proceso de destilación criogénica (el gas de combustión que contiene CO₂ se enfría a la temperatura de sublimación (-100 a -135°C) y luego se solidifica). Este CO₂ es separado de los gases ligeros y comprimido a una alta presión (100 a 200 veces la presión atmosférica) y su rescate puede alcanzar el 90-95 % del gas de combustión. Dado que este proceso es llevado a cabo a temperaturas extremadamente bajas con una alta presión, se estima un gasto energético de 600-660 kWh por cada tonelada de CO₂ rescatado en forma

líquida lo que favorece su transporte para lo que se utilizan bombas lo que es conveniente para un alto contenido de CO_2 .

En la industria cementera, Turrado Fernández (2019) señala que se aplican técnicas como los ciclos de carbonatación–calcinación con CaO , el uso de reactores de lecho fluidizado y sistemas de recirculación de gases. Estas estrategias buscan mejorar la reactividad de los sorbentes y validar modelos de simulación en planta piloto, promoviendo la sostenibilidad del proceso.

Moreno Sanz (2019) analizó diversos sistemas de captura aplicados a ciclos combinados: absorción, adsorción, membranas, oxidación, recirculación de gases, humidificación de gases de turbina y ciclos suplementarios de combustión. Concluye que estas tecnologías son una vía prometedora para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, aunque requieren cooperación internacional e investigación constante para superar barreras económicas y técnicas.

2.2.6. Materiales Innovadores y Adsorbentes Específicos

Los adsorbentes a base de celulosa son fáciles de preparar según establece Zhang, M., et. al., (2024) ya que poseen un rendimiento superior, bajo costo y son adecuados para la producción industrial a gran escala. En la adsorción y separación de CO_2 tiene la ventaja de una gran capacidad de adsorción, alta selectividad y estructura estable el material de carbono poroso a base de celulosa que es un adsorbente ideal para la captura de CO_2 . Si es comparado con otros materiales (zeolitas, estructuras metal-orgánicas y polímeros porosos) el carbono poroso a base de celulosa posee una capacidad de adsorción baja, lo que frena su eficiencia en la captura de CO_2 . Si la estructura molecular de la celulosa es modificada, y se optimizan los parámetros de carbonización y activación junto a otras estrategias, y se introducen abundantes ultramicroporos y heteroátomos en el carbono poroso, el resultado en la adsorción y separación del carbono poroso a base de celulosa se mejorará de manera efectiva.

Un nuevo adsorbente con eficiencia en la adsorción de CO_2 es la alúmina u óxido de aluminio (TEPA- Al_2O_3) que se preparó exitosamente utilizando el método de impregnación ultrasónica. La innovación al combinar la técnica de adsorción por supergravedad determinaron las condiciones óptimas de operación para el adsorbente lo que resultó en una máxima capacidad de adsorción saturada de 48,5 mg/g, una mayor capacidad de adsorción tasa constante en comparación con los sistemas tradicionales de lecho fijo. Descubrimiento que demuestra las Ventajas de la técnica de adsorción por supergravedad para mejorar la velocidad del proceso de adsorción además de una estabilidad significativa durante el uso repetido y procesos de regeneración, manteniendo una capacidad de adsorción de 40,32 mg/g incluso después 10 ciclos de regeneración. Resultado que destaca, no sólo la buena durabilidad del adsorbente, sino también su valor potencial en aplica-

ciones prácticas, especialmente para lograr sostenibilidad en las tecnologías de captura directa de aire (Wang, S; et al., 2024).

Los hidratos de fluoruro de tetrabutilamonio (TBAF), un compuesto de inclusión capaz de atrapar moléculas de gas dentro de una estructura reticular compuesta de moléculas de agua, requiere condiciones de alta presión y baja temperatura, lo que resulta en un importante consumo de energía. Su utilización como promotor termodinámico formando un hidrato de tipo semicladrato, permite la captura o separación de gases a temperatura ambiente. Esos TBAF se hidratan para comprobar su capacidad de separación de CO_2 de los gases de combustión, la mezcla de CO_2 y gases N_2 . Las tasas de formación y las capacidades de almacenamiento de gas de los TBAF se alcanzaron en 2,36 y 2,38 mmol/mol para TBAF·29,7 agua (H_2O) y TBAF·32,8 H_2O hidrato, respectivamente, después de la completa enclatración del gas de alimentación de CO_2 . (80 %) + N_2 (20 %) (Kim, H.; Ahn, Y.-H, 2024).

La diversidad de estos materiales resalta la importancia de seleccionar adecuadamente el adsorbente, considerando criterios clave como alta capacidad de regeneración, buena selectividad, bajo consumo energético, estabilidad cíclica, durabilidad a largo plazo y bajo costo (S. H. Kim et al., 2022).

Otro material es la utilización de un polímero llamado melamina que se ha establecido una forma barata, fácil y energéticamente eficiente para capturar el CO_2 de las chimeneas por investigadores químicos. Este nuevo material, el cual es sencillo de fabricar puesto que su principal componente es el polvo de melamina, que se encuentra en el mercado a bajos precios, se mezcla con formaldehído y el ácido cianúrico, producto químico que se añade con cloro a las piscinas. La conocida red porosa de melamina captura el CO_2 con una gran eficacia, la cuál es comparable a los primeros resultados de los marcos orgánicos metálicos o MOF la cual captura el CO_2 a unos 40°C , ligeramente por encima de la temperatura ambiente, y lo libera a 80°C , por debajo del punto de ebullición del agua. El ahorro de energía proviene de no tener que calentar la sustancia a altas temperaturas (Mao, H; Reimer, J; 2022).

Un filtro que ha resultado ser más eficiente que las alternativas disponibles para capturar CO_2 de centrales eléctricas y emisiones industriales sin que llegue a la atmósfera, es el de grafeno que puede separar el CO_2 de una mezcla de gases y hacerlo con una eficiencia y velocidad que supera a la mayoría de los filtros actuales. La "membrana", tecnología que puede extraer CO_2 de la mezcla de gases, que luego puede almacenarse o convertirse en productos químicos útiles, aunque posee grandes costos en el mercado, estas membranas resultantes provocaron atractivos rendimientos de tamizado con grandes permeancias de CO_2 y O_2 [$>10\,000$ y 1000 unidades de permeación de gas (GPU), respectivamente], lo que las hace muy prometedoras para la captura de carbono con una eficiencia energética. (Huang S., et al., 2021).

El Cuadro 3 representa, a modo de resumen, una comparativa de los métodos de

captura de CO₂ en cuanto a tipo, ventajas y desventajas.

De acuerdo con el estudio del estado del arte, se puede concluir que la MDEA se destaca como uno de los solventes más eficaces para la captura de CO₂ en aplicaciones industriales, gracias a su bajo consumo energético, estabilidad química y capacidad de adaptación a condiciones operativas exigentes. A diferencia de otras alcanolaminas como la MEA o la dietanolamina (DEA), la MDEA —una amina terciaria— emplea un mecanismo de absorción por hidrólisis, lo que reduce la formación de carbamatos y disminuye la degradación térmica del solvente. Estas propiedades la convierten en una opción ideal para procesos de captura postcombustión y tratamiento de gas natural a gran escala, donde la eficiencia y la durabilidad del solvente son factores clave, se posiciona como uno de los solventes más eficientes en la captura industrial de CO₂, reduciendo en un 20–25 % la energía de regeneración respecto a la MEA. Opera a temperaturas más bajas (90–122°C frente a 120–140°C de la MEA), lo que prolonga la vida útil de los equipos y reduce costos operativos.

2.3. Fuentes de emisión de CO₂

La huella de carbono y las emisiones de los crematorios y restaurantes están cada vez más bajo escrutinio, ya que ambos sectores contribuyen a la degradación ambiental.

2.3.1. Restaurantes

Según ElSharkawy, M.; Ibrahim, O. (2022) los niveles medios más altos de CO₂ (916,7 ± 463,4 ppm) fueron registrados en chimeneas de parrilladas de los restaurantes y en las zonas contiguas a éstos, estos contaminantes son emitidos a un ritmo mucho mayor que otros métodos de cocción. Además, cualquier variación en la eficiencia de la combustión o en el proceso de cocción interno de los restaurantes (positiva o negativa), se reflejará directamente en la calidad del aire en el entorno exterior, evidenciando la relación entre las prácticas internas y su impacto ambiental.

Los estudios de Wang, T., Roberts, C., 2020; Carbon Trust, 2021 y Lin, H., et al., 2023 destacan que las emisiones de CO₂ en restaurantes dependen del tipo de cocina, el equipo utilizado y el combustible empleado. Las cocinas comerciales que usan gas natural emiten entre 1.5 y 3 kg de CO₂ por hora. Un restaurante promedio puede emitir entre 20 y 100 tCO₂ al año, considerando tanto la energía para la cocción como para calefacción y otros usos energéticos. Las cocinas de gran capacidad que operan varias horas al día pueden generar entre 15 y 25 kgCO₂ por hora. El propano, usado en parrillas y hornos portátiles, emite aproximadamente 5.67 kgCO₂ por galón. En cuanto a electricidad, un restaurante promedio consume entre 50 y 100 kWh diarios para la cocina, lo que resulta en entre 20 y 40 kgCO₂ por día (basado en una intensidad de 0.4 kgCO₂/kWh). Esto equivale a 7.3 a 14.6 tCO₂ al año, con variaciones según la eficiencia de los equipos y el

Cuadro 3: Comparación de Métodos de captura de CO₂.

Método de Captura	Tipo	Ventajas	Desventajas
Absorción química (ej. aminas: MEA, MDEA)	Post-combustión	Alta eficiencia, Tecnología madura, Aplicable a gases de combustión	Alto consumo energético en la regeneración, Degradación del solvente, Corrosividad del sistema.
Absorción física (ej. Selexol, Rectisol)	Pre-combustión	Eficiente a alta presión, Regeneración más fácil que con aminas	No apto para gases de baja presión, Costo elevado del solvente
Adsorción en sólido (ej: zeolitas, MOFs)	Post/pre-combustión	Bajos requerimientos de energía, Posibilidad de regeneración, Modular	Menor capacidad de captura, Degradación con ciclos térmicos o químicos
Captura por membranas (polímeros, inorgánicas, híbridas)	Post/pre-combustión	Sin reactivos químicos, Sistema compacto, Fácil escalabilidad	Baja selectividad y permeabilidad para CO ₂ , Elevado costo inicial
Captura directa del aire (DAC)	Ambiental (atmósfera)	Ubicación flexible, Potencial carbono-negativo	Alta demanda energética, Costos muy altos por tonelada capturada
Carbonatación-calcalcificación (Ca-looping)	Post-combustión	Sorbentes baratos, Integración energética con plantas térmicas	Alta temperatura de operación (>900°C), Desgaste del sorbente
Ciclo amoníaco (chilled ammonia process)	Post-combustión	Baja corrosividad, Buena capacidad de carga, Menor pérdida de solvente	Mayor complejidad operativa, Formación de sales indeseadas
Bioenergía con captura y almacenamiento (BECCS)	Biológica/Post	Bajas emisiones negativas posibles, Uso de residuos agrícolas o forestales	Gran demanda de tierras y agua, Competencia con la seguridad alimentaria
Reforestación y suelos (sumideros naturales)	Biológica	Bajo costo, Mejora ecosistemas	Limitada capacidad anual, Vulnerabilidad al cambio climático y deforestación
Cultivo de algas (biofijación)	Biológica	Alta tasa de fijación de CO ₂ , Producción de biomasa valiosa (biocombustibles, alimentos)	Costos elevados, Control complejo de condiciones ambientales
Mineralización (captura mineral in situ o ex situ)	Geoquímica	Captura permanente de CO ₂ , No requiere monitoreo constante	Procesos lentos, Costos altos si se realiza artificialmente

uso de energías renovables en la red local.

En Da Costa, D, et al., (2020) se valida, por expertos, una lista de verificación de indicadores sostenibles en el servicio de alimentos. Establecen un instrumento práctico, de rápida aplicación, poco extenso y abarca los tres pilares de la sostenibilidad (ambiental, económico y social) que ayuda a profesionales, que trabajan en servicios de comida, a utilizar y aplicar indicadores de sostenibilidad creando estrategias para mejorar los comportamientos hacia el medio ambiente.

Leyva, S, et al., (2022) presenta una escala clara, coherente y relevante para evaluar el desempeño ambiental de los restaurantes que siguen los protocolos y normas de inocuidad alimentaria. En el sector de la hospitalidad y el turismo, los restaurantes son esenciales para el crecimiento, pero si no se gestionan y monitorean adecuadamente, pueden generar un impacto negativo en el ambiente. La investigación también ofrece una herramienta de análisis de desempeño empresarial, especialmente útil para las pequeñas empresas que no cuentan con un sistema robusto de evaluación de indicadores.

Germán-Soto, V, (2024) realizó un estudio en 500 corporaciones de México que buscan responsabilidad social al emplear estrategias de reducción del daño al medio ambiente lo que impacta directamente en las emisiones de gases para lo que es necesario dar prioridad a la utilización de técnicas de innovación para cumplir con los compromisos sociales.

Röös, E., Johansson, M., (2019); Muthu, S. S., (2019) y Carbon Trust, (2020) señalan que la huella de carbono de los restaurantes se genera principalmente a través de tres tipos de emisiones: alcance 1, que son directas (como el gas natural para cocinar y calefacción); alcance 2, que son indirectas (como el consumo de electricidad y otros servicios como agua o calefacción); y alcance 3, que incluyen la cadena de suministro, el transporte de alimentos, la gestión de residuos y la actividad de los empleados. La cadena de suministro de alimentos es uno de los mayores contribuyentes a las emisiones, especialmente la producción agrícola, el transporte de ingredientes y el procesamiento de los alimentos. El transporte global de alimentos representa un 11 % de las emisiones relacionadas con la producción de alimentos, lo que tiene un impacto significativo en la huella de carbono del sector.

De acuerdo con el estudio del estado del arte, se puede concluir que las cocinas comerciales que utilizan gas natural emiten entre 1.5 y 3 kg de CO₂ por hora, un restaurante promedio emite entre 20 y 100 tCO₂ anualmente. Las cocinas de gran capacidad pueden generar entre 15 y 25 kgCO₂ por hora. El uso de tecnologías limpias y eficientes es fundamental para reducir las emisiones de CO₂ en restaurantes. En resumen, los restaurantes desempeñan un papel crucial en la generación de emisiones de CO₂ debido a sus prácticas de cocina y operaciones generales. Para mitigar su impacto ambiental, es esencial adoptar prácticas sostenibles, optimizar el uso de recursos y utilizar tecnologías que reduzcan las emisiones, cumpliendo así con las normativas y contribuyendo a la sostenibilidad global.

2.3.2. Crematorios

Normativas y Medición de Emisiones en Crematorios

El Comité de las Naciones Unidas para la Eliminación de Contaminantes Orgánicos Persistentes (2024) fija límites para dioxinas (PCDD) y furanos (PCDF) en crematorios inferiores a 0.1 ng EQT-I/Nm³ (en cada metro cúbico de gas emitido (ajustado a condiciones estándar), hay 0.1 nanogramos de dioxinas y furanos equivalentes a la toxicidad de la dioxina más peligrosa). Las concentraciones varían regionalmente (0.01–0.12 ng en Reino Unido, hasta 17.6ng en Bangkok), lo que refleja la influencia del diseño y antigüedad de los hornos.

Para la medición de emisiones a la atmósfera, los equipos de cremación de cadáveres humanos, de restos humanos, restos humanos áridos, así como los equipos de incineración de cadáveres de animales y sus restos, deberán contar con plataforma y puertos de muestreo en la chimenea y cumplir con lo establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-009-1993- SCFI.

Según Caltec (s.f.), los hornos CALTEC operan con un caudal de 0.81 Nm³/s, temperatura de 760°C y velocidad de 11 m/s, asegurando una combustión completa y control de contaminantes.

Combustibles y Emisiones de CO₂ por Cremación

La Environmental Performance of Electric Cremation Systems (EPECS), (2023) y Becken, S., McLaren, L., (2021) destacan que la cantidad de CO₂ emitida por un crematorio depende de la intensidad de carbono de la red eléctrica en la región. En redes con una intensidad promedio de 0.4 kgCO₂/kWh, como en muchas áreas de Europa y América del Norte, cada cremación puede consumir entre 200 y 300 kWh, lo que genera entre 80 y 120 kgCO₂ por cremación. Si un crematorio consume electricidad a un ritmo de 20 kW durante el proceso de cremación, las emisiones son de entre 8 y 10 kgCO₂ por hora. En crematorios que realizan alrededor de 1,000 cremaciones anuales, las emisiones totales pueden sumar entre 80 y 120 tCO₂ al año.

Según Environmental Impacts of Cremation (EIC), (2022) y Beck, A., Jones, P., (2021), un crematorio promedio que utiliza gas natural produce entre 160 a 245 kgCO₂/cremación, lo que traduce a alrededor de 160 a 245 tCO₂/año, valor que puede variar según la eficiencia de los equipos de combustión y el tamaño de las instalaciones. El Propano es menos común en crematorios, pero cuando se usa, emite alrededor de 5.67 kgCO₂/galón, emite una cantidad similar o ligeramente superior de CO₂ comparado con el gas natural.

Benavides, S. et al. (2022) señalan que el aumento en las muertes causadas por COVID-19 provocó un incremento significativo en el número de cremaciones en la Ciudad de México, lo que a su vez elevó notablemente los niveles de emisiones contaminantes liberadas a la atmósfera. A través del uso de factores de emisión, se estimó el aumento de estas emisiones derivadas de la cremación de cuerpos durante la pandemia, los resul-

tados mostraron un incremento en la proporción de emisiones atribuibles a este proceso, pasando del 72.9 % registrado antes de la pandemia al 76.8 % en diciembre de 2020. Entre 2019 y junio de 2021, este fenómeno implicó la cremación adicional de aproximadamente 47,217 cuerpos.

La Comisión de Salud del Honorable Congreso de la Ciudad de México (CSNH), (2020) y EIC, (2021) reportan que la cremación de un cuerpo humano genera entre 190 y 250 kgCO₂, dependiendo de la tecnología y eficiencia del horno crematorio, equivalente a las emisiones de un automóvil que viaja entre 600 y 800 km. La quema de gas natural en los hornos produce CO₂ y otras emisiones contaminantes como NO_x y COVs, que deterioran la calidad del aire. Para mitigar su impacto ambiental, algunos crematorios están adoptando tecnologías más eficientes y compensando las emisiones de CO₂ mediante programas de neutralización, como inversiones en energía renovable o filtración de agua en comunidades desfavorecidas.

El estudio de Hernández (2019) reveló que las emisiones de CO en tres hornos crematorios superaron el límite establecido por la norma (120 mg/m³), con promedios de 6805.24 mg/m³, 28934.52 mg/m³ y 7265.70 mg/m³ para los hornos 1, 2 y 3, respectivamente. El manejo del horno por parte del operario influyó significativamente en las emisiones de CO, debido a la falta de un proceso estandarizado. Según el coeficiente de correlación de Spearman ($r=-0.698$), la cantidad de oxígeno emitido dependió del peso del cuerpo cremado, aunque las emisiones de CO no se vieron afectadas por las características del cuerpo ni las condiciones del proceso. En México, la cremación sin ataúd es una buena práctica, pero los hornos requieren equipos para controlar las emisiones y cumplir con los límites establecidos por la normativa vigente.

CONAGUA, (2016) aborda que, en México, los crematorios suelen utilizar gas natural como combustible principal para la incineración de los cuerpos. El gas natural es una opción más eficiente y menos contaminante en comparación con otros combustibles como el diésel o el petróleo. Además, el gas natural proporciona una combustión más limpia y controlada, lo que es esencial para cumplir con las regulaciones ambientales y de salud pública.

Sánchez, E., (2010), EPA, (2015) y EEA, (2023) señalan que, en ausencia de gas natural, algunos crematorios utilizan propano o gas LP, aunque el gas natural es preferido por su menor costo y mayor disponibilidad en áreas urbanas. La combustión del gas natural emite principalmente CO₂, un gas de efecto invernadero con una emisión de aproximadamente 2.75 kgCO₂ por metro cúbico quemado. También se generan óxidos de nitrógeno (NO_x), que contribuyen a la formación de ozono y lluvia ácida, y monóxido de carbono (CO) en caso de combustión incompleta. Además, se emiten compuestos orgánicos volátiles (COV_s), como benceno y tolueno. Aunque las partículas emitidas son bajas al usar gas natural, los crematorios modernos incorporan sistemas de filtración para minimizarlas.

Emisiones de Gases Contaminantes

Marchi, B. et al. (2023) plantea que el flujo de gases en las chimeneas de crematorios varía según la eficiencia del equipo, el tipo de combustible y las condiciones operativas. Durante la cremación, la chimenea emite gases a temperaturas entre 200 y 300°C, incluyendo CO₂, CO, NO_x (alrededor de 18,000 kg/año en áreas con alta densidad de crematorios), COVs, partículas finas y, en algunos casos, mercurio de empastes dentales. Para capturar CO₂, los sistemas de filtración pueden beneficiarse del uso de filtros de grafeno, que tienen una alta área superficial y capacidad de adsorción, permitiendo una captura eficiente de CO₂ antes de su liberación, lo cual es especialmente relevante en crematorios debido a la importancia de reducir las emisiones de carbono.

El estudio de Ruiz (2023) analiza los promedios de concentración de monóxido de carbono (CO) durante el período 2018-2021. En 2020, se registró la mayor concentración en febrero con 1.218 partes por millón (ppm), seguida por abril de 2021 con 1.222 ppm. Sin embargo, ningún año superó el límite máximo permisible establecido por la NOM-021-SSA1-2021 de 9ppm, ya que las concentraciones fueron generalmente bajas, siendo junio de 2020 el mes con el promedio más bajo, con 0.458 ppm. En ciertos meses, como febrero de 2020, aunque se registró un pico de CO, también fue el mes con menos cremaciones, lo que influyó en los niveles.

Copeland, B. (2020), un estudio en el Reino Unido estimó que, para 470,000 cremaciones anuales, se liberan alrededor de 115,000tCO₂ y hasta 18,000kg de NO_x, lo que constituye una carga ambiental significativa, especialmente en crematorios urbanos con operaciones frecuentes. Estas emisiones han impulsado la exploración de alternativas tecnológicas, como los cremadores eléctricos, que emiten menos CO₂ y NO_x en comparación con los hornos de gas tradicionales. Sin embargo, la reducción de CO₂ sigue siendo un desafío sin tecnologías adicionales de captura de carbono. La implementación de filtros de grafeno podría mejorar la eficiencia en la captura de CO₂, especialmente en crematorios que utilizan combustibles fósiles.

Jia et al. (2020) indican que los crematorios son fuentes relevantes de emisiones de CO₂ debido a la incineración de cuerpos y materiales asociados. La magnitud de estas emisiones depende del tipo de combustible (el diésel ligero produce más CO₂ que el gas natural) y de la eficiencia del horno. Los sistemas modernos incluyen lavado de gases para neutralizar contaminantes antes de su liberación.

Hernández, S. (2020) aborda que, durante la cremación de un cuerpo humano, se liberan a la atmósfera diversas sustancias tóxicas, entre ellas: CO₂, monóxido de carbono (CO), partículas suspendidas, óxidos de nitrógeno, así como dioxinas y furanos. Según el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de España, la incineración de un cadáver emite en promedio 27 kg de CO₂. En México, con aproximadamente 130 mil cremaciones anuales (el 20 % de las 650 mil muertes registradas), esto representa cerca de 3.5 millones de kilogramos de CO₂ al año, sin considerar el aumento de decesos durante

la pandemia por COVID-19.

Según Won, Y. Lee, S. (2019), el aumento en la tasa de cremación en Corea ha generado la necesidad de modernizar la infraestructura crematoria. A través de simulaciones avanzadas, proponen soluciones orientadas a mejorar la eficiencia térmica de los sistemas de cremación y a reducir el consumo de combustible, con el objetivo de atender la demanda creciente y minimizar el impacto ambiental. Si bien minimizan el consumo energético, la emisión de CO₂ aumenta en un 2,3 % disminuyendo el flujo de gases total. Se refleja una evolución en el diseño de crematorios, orientada a mejorar la eficiencia energética y reducir emisiones, como respuesta al aumento en la demanda y al cumplimiento de normativas ambientales más estrictas.

En estudio realizado por Lee, K.-H, et al., (2022), examina las emisiones de carbono generadas por la cremación y su impacto en el calentamiento global, utilizando datos de la ONU y encuestas de la OMS. Se concluye que las tecnologías más sostenibles para la eliminación de cadáveres, como el proceso de Cryomation (descomposición por secado por congelación), serán fundamentales para el futuro de la industria funeraria. El estudio destaca que esta tecnología podría reducir las emisiones de carbono aún más de lo que se había predicho originalmente, según simulaciones basadas en análisis de relaciones de recurrencia.

Lee, K.-et al. (2022) analizan el impacto de las muertes humanas en las emisiones globales de dióxido de carbono. En 2020, se registraron 59 millones de muertes a nivel mundial, incluyendo un incremento de más de 1,9 millones debido a la COVID-19. Esto representó aproximadamente el 0,001370 % de las emisiones globales de CO₂. A partir de estos datos, se proyecta que, aunque la tasa de mortalidad relativa disminuye por el crecimiento poblacional, el número absoluto de muertes sigue en aumento. Este crecimiento, junto con una mayor esperanza de vida, sugiere que las emisiones asociadas a las muertes continuarán incrementándose en las próximas décadas. Se estima que cada fallecimiento genera en promedio 245kg de CO₂.

Estrategias de Mitigación y Tecnologías Alternativas

Marchi, B., et al. (2023) presentan un proyecto orientado a mejorar la eficiencia de un crematorio con el objetivo de lograr un impacto ambiental, energético y económico prácticamente nulo. Tras analizar diversas alternativas, determinan que la solución más efectiva es la recuperación térmica para abastecer a usuarios térmicos cercanos mediante una red de distribución (DHL). Aunque esta opción implica una disipación del 28 % de la energía térmica de los gases de escape —superior a la generada por el cuerpo (23 %)—, se considera viable gracias a su potencial ecológico: toda la energía recuperada proviene del calor evitado. El sistema proyectado reduce el uso de combustibles fósiles, mejora la eficiencia energética territorial y genera beneficios sociales.

Bhuripañño et al. (2023) proponen los crematorios inteligentes, que optimizan la eficiencia energética y reducen emisiones de dioxinas y furanos, mejorando la calidad del

aire y promoviendo la sostenibilidad urbana.

Ibrahim, M. et al. (2023) analizan los riesgos ambientales y de salud en las cinco etapas del manejo de cadáveres en la industria funeraria, revelando una baja percepción de estos riesgos y una infraestructura deficiente, especialmente en ventilación. A través de entrevistas con directores de funerarias, se identificaron estrategias de mitigación como establecer certificaciones ambientales obligatorias, mejorar la capacitación, regular el embalsamamiento móvil y optimizar la ventilación en salas de embalsamamiento. Se destaca la necesidad de un cambio cultural hacia prácticas funerarias más sostenibles. El estudio concluye que los trabajadores están expuestos a altos riesgos tóxicos y que se requieren medidas tanto a corto como a largo plazo para mejorar la seguridad laboral y reducir el impacto ambiental del sector.

Mato (2022) señala que, pese a incorporar tecnologías como hornos ecológicos y sistemas de lavado de gases, las emisiones de CO₂ siguen siendo un reto ambiental. Los monitoreos anuales permiten identificar tendencias y asegurar el cumplimiento de estándares.

González y Urrego (2020) describen que un horno crematorio consta de dos cámaras: una principal de cremación y otra de postcombustión, donde los gases son tratados térmicamente antes de salir al ambiente. Un control adecuado del flujo de aire y combustible garantiza la eficiencia y cumplimiento normativo.

La Comisión de Salud del Honorable Congreso de la Ciudad de México (2020) establece, mediante el Artículo 349 Bis de la Ley General de Salud, la obligación de cumplir protocolos sanitarios y ambientales en los servicios funerarios, garantizando calidad del aire, control de emisiones y protección a la salud pública.

En Ávila, J, et al., (2018), informan que, en el estudio realizado en el Cementerio Distrital del Norte, la huella de carbono total de la operación fue de 572,77 tCO₂e/año. Los principales procesos productivos que contribuyen a las emisiones de GEI son los hornos crematorios y los vehículos (alcance 1), con una huella de 511,65 tCO₂e/año. Como estrategia de reducción, se propone la automatización del control del flujo de gas en los hornos crematorios, mediante válvulas que regulen la entrada de gas a los quemadores. Esta mejora tecnológica permitiría un ahorro de 3.600 m³ de gas al mes, lo que equivale a una reducción de 80,46 tCO₂e/año.

En conjunto, la cremación representa un desafío ambiental significativo, pero la aplicación de regulaciones, innovación tecnológica y estrategias de mitigación puede asegurar un manejo funerario sostenible y responsable.

De acuerdo con el estudio del estado del arte, se puede concluir que la cantidad de CO₂ emitido por un crematorio varía entre 160 a 245 kg de CO₂ por cremación. Al considerar la cantidad de cremaciones anuales, las emisiones totales de CO₂ pueden ascender a entre 80 y 120 toneladas, dependiendo de la eficiencia de los hornos y los métodos de operación utilizados. A pesar de la tecnología avanzada, la reducción de CO₂ sigue siendo un desafío,

lo que resalta la importancia de implementar tecnologías de captura de carbono más eficaces.

La industria funeraria y crematoria representa una fuente significativa de emisiones contaminantes y riesgos laborales que ha sido poco atendida en las agendas ambientales. Sin embargo, estudios recientes demuestran que es posible lograr mejoras sustanciales mediante innovación tecnológica, recuperación energética, regulación más estricta y transformación cultural. Para avanzar hacia una gestión funeraria sostenible, se requiere una combinación de: Tecnología limpia y eficiente, Cumplimiento normativo estricto, Educación sectorial y una conciencia pública sobre el impacto ambiental post mortem.

En la Sección 3, que se presenta a continuación, se establece el marco teórico donde se abordan las cuestiones relacionadas con el sistema, así como la operación teórica del software.

3. MARCO TEÓRICO

Se explican los fundamentos teóricos de las tecnologías de captura de CO_2 : precombustión, postcombustión y oxidcombustión, con esquemas y análisis de ventajas y desventajas. Se profundiza en el proceso químico de absorción con aminas, resaltando la relevancia del solvente MDEA por su eficiencia energética y estabilidad. Se detalla el modelo termodinámico y los criterios para el diseño de columnas de absorción y desorción, apoyándose en simulaciones avanzadas.

3.1. Tecnologías de Captura de CO_2

El incremento de CO_2 en la atmósfera se ha relacionado con el cambio climático y esto se debe al desarrollo tecnológico e industrial. Existen varias tecnologías que permitirían evitar las emisiones de CO_2 y los gases de efecto invernadero según Gutiérrez, P, et al., 2014 como son:

1. Captura y almacenamiento de CO_2 .
2. Valorización del CO_2 .
3. Uso de combustibles que emitan menos CO_2 .
4. Uso de energías renovables.
5. Uso de energía nuclear.
6. Eficiencia energética.

La finalidad de estas tecnologías para capturar CO_2 es producir un flujo casi puro del mismo a alta presión, que fácilmente pueda ser transportado a un emplazamiento para su almacenamiento. Para la obtención de este flujo de CO_2 existen tres sistemas de captura, según el punto del proceso donde se realice la separación de los gases de combustión: pre-combustión, post-combustión y oxidcombustión.

3.1.1. Captura de CO_2 en pre-combustión

Las tecnologías de pre-combustión se centran en la eliminación del carbono presente en el gas de síntesis, el cual proviene tanto del carbón como del gas natural. Este proceso se lleva a cabo antes de la combustión en una turbina de gas de ciclo combinado. El proceso inicial de retirar el carbono antes de la combustión es más complicado y costoso pero las concentraciones más altas de CO_2 y la presión más elevada facilitan la separación. Estos procesos de captura se ejecutan con la transformación del combustible primario en una corriente de gas donde los principales componentes son CO y H_2 . Estas tecnologías de

captura antes de la combustión se pueden aplicar a todos los recursos fósiles (gas natural, fuel y carbón) para que el resultado sea el gas de síntesis (Gutiérrez, P, et al., 2014). La Figura 4 muestra el proceso de captura de CO_2 en pre-combustión.

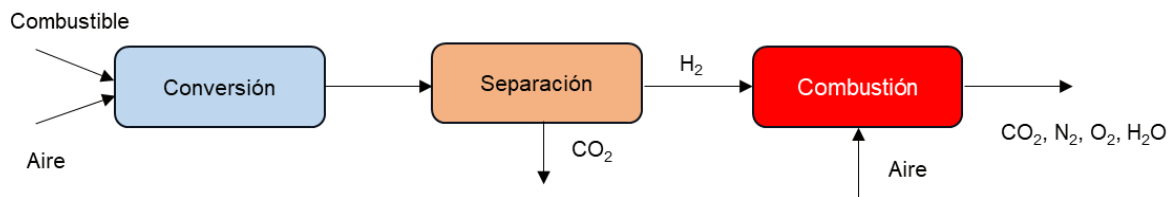


Figura 4: *Esquema Pre-combustión.*

3.1.2. Captura de CO_2 en post-combustión

La captura de CO_2 mediante absorción química se reconoce como una de las alternativas tecnológicamente más consolidadas para la reducción de emisiones en procesos industriales y plantas de generación eléctrica. Este enfoque resulta particularmente adecuado para aplicaciones post-combustión, donde los gases de salida presentan grandes caudales, baja presión y concentraciones moderadas de CO_2 . El proceso se fundamenta en el contacto gas-líquido entre los gases de combustión y soluciones acuosas de aminas, lo que permite una separación selectiva y eficiente del CO_2 antes de su liberación a la atmósfera (IPCC, 2005).

La post-combustión consiste en la captura del CO_2 después de la combustión de combustibles fósiles. Usualmente, estos sistemas utilizan un solvente químico para captar la pequeña fracción de CO_2 , entre un 3 y un 15 % del volumen, presente en los gases de combustión, cuyo componente principal es el nitrógeno procedente del aire. En estas circunstancias el CO_2 presenta una baja presión parcial y es necesario tratar un gran volumen para su separación. La Figura 5 muestra el proceso de post-combustión.

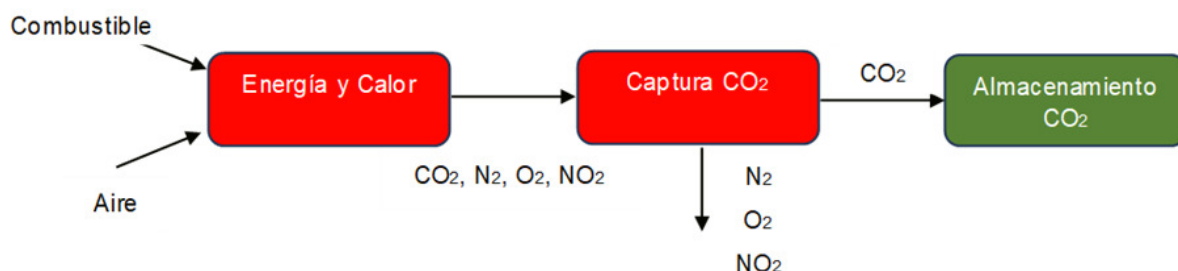


Figura 5: *Esquema Post-combustión.*

3.1.3. Captura de CO_2 en oxidcombustión

La oxidcombustión se caracteriza por la combustión directa con oxígeno sin estar presente el N_2 para concentrar el CO_2 de los gases, utilizando una Unidad de Separación de

Aire (ASU). Sin embargo, no puede llevarse a cabo de forma directa en la combustión ya que sus temperaturas de llama serían mucho más elevadas que las tolerables por los materiales del espacio de caldera. Evitando esta situación se maneja una corriente de atemperación consistente en gases recirculados de la propia combustión, que es mezclado con el comburente fresco para disminuir la temperatura de hogar y así facilitar la transferencia de calor. Este proceder logra, luego de la combustión, crear una corriente casi únicamente por CO_2 y H_2O , donde el H_2O se puede excluir por condensación (Gutiérrez, P, et al., 2014). La Figura 6 muestra el proceso de oxidcombustión.

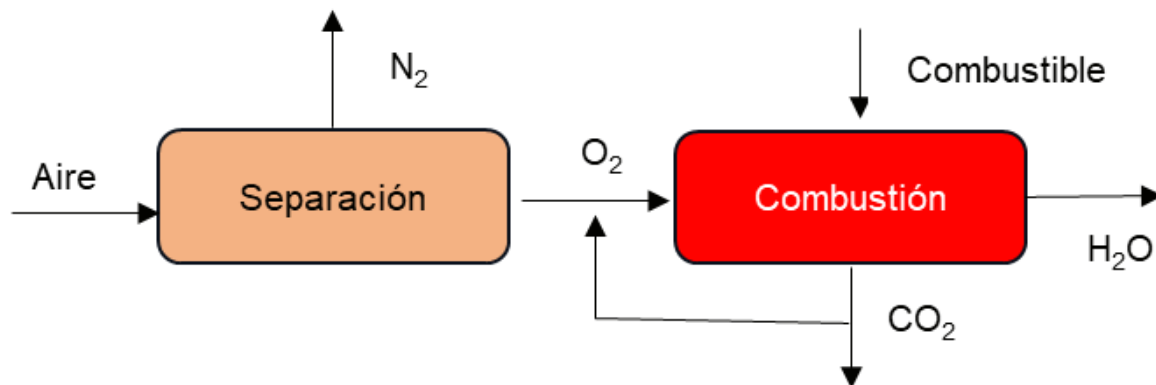


Figura 6: *Esquema Oxidcombustión.*

Un resumen de las ventajas y desventajas de los principales procesos y materiales para la captura de CO_2 se muestran en los Cuadros 4 y 5.

3.2. Utilización de CO_2

Los métodos de captura ofrecen, como una de las posibilidades, la reutilización de grandes cantidades de CO_2 al convertirlo en un recurso para nuevas aplicaciones industriales en vez de un residuo y emitirlo a la atmósfera, dando paso a prácticas totalmente sostenibles y de gran atractivo para la economía, la sociedad y el medio ambiente (Pedraza, J, et al., 2018). Las diferentes alternativas para su aprovechamiento, con el objetivo común de reducir el CO_2 del Medio ambiente son:

- Bioprocesos: Biodiesel, Combustible para aviones, Nutracéuticos, Concentrado para animales.
- Industria Química: Catalizadores, Cementos, Polímeros, Combustibles, Fertilizantes.
- Industria Alimentaria: Carbonatación de energías, Conservación de alimentos, Aditivos alimentarios.

Cuadro 4: Ventajas y Desventajas de los Procesos de captura de CO₂.

Proceso	Ventaja	Desventaja
Pre-combustión	Permite la captura antes de la combustión, lo que puede resultar en una mayor eficiencia. Menor consumo de energía que la post-combustión. Puede ser aplicada en la producción de hidrógeno a partir de gas natural o carbón.	Requiere de cambios significativos en los procesos de producción, especialmente en nuevas plantas. Requiere una cadena de suministro de gas de proceso y equipos adicionales. Costos de capital iniciales mayores que la post-combustión.
Post-combustión	No requiere cambios significativos en los procesos de producción. Tecnología bien desarrollada. Utilizado comercialmente en varias industrias. Gran eficiencia de absorción.	Para la captura y separación se requiere de consumo de energía extra. Requiere grandes volúmenes de gas de proceso para lograr altas tasas de captura. Costos de capital y operativos significativos.
Captura Directa	Puede ser aplicada en fuentes difusas de emisiones, como el aire ambiental o gases residuales de procesos ambientales. No depende de la ubicación geográfica de las fuentes de emisión. Potencial para la captura de manera continua.	Baja concentración de CO ₂ en las fuentes de emisión, lo que requiere procesos de captura más eficientes. Consumo de energía significativos y costos operativos elevados. Tecnología aún en desarrollo y costos de implementación inicialmente altos.
Captura Biológica	Utiliza organismos vivos (algas y bacterias) que capturan el CO ₂ y lo convierten en biomasa u otros productos útiles. Potencial para utilizar la biomasa convertida como biocombustible o materia prima para otros procesos industriales. Puede ser aplicada en fuentes difusas de emisiones o en sistemas cerrados, como biorreactores.	Eficiencia de captura y conversión del CO ₂ variable según el tipo de organismo y las condiciones de operación. Requiere condiciones específicas de cultivo y control de la contaminación para mantener la viabilidad de los organismos. Tecnología aún en etapas de desarrollo y escala.

Cuadro 5: Ventajas y Desventajas de los Materiales para la captura de CO₂.

Material	Ventaja	Desventaja
Aminas (ej. MEA, MDEA)	Alta eficiencia en captura química; tecnología madura; buena selectividad.	Alto consumo energético en regeneración; corrosión; degradación del solvente.
Zeolitas	Buena capacidad de adsorción; estabilidad química y térmica.	Menor capacidad que aminas; Degradación por ciclos térmicos o químicos.
Carbón activado	Alta capacidad de adsorción; selectividad; bajo costo.	Sensible a la humedad; puede requerir activación y regeneración compleja.
Membranas poliméricas	Modularidad; operación continua; sin productos químicos.	Baja selectividad y permeabilidad a CO ₂ ; alto costo inicial.
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	Buena estabilidad; capacidad de adsorción moderada.	Necesita condiciones específicas de operación; proceso de impregnación complejo.
Polímeros	Bajo costo; fácil fabricación; eficiencia energética.	Limitado por degradación de la vida útil; posible falta de capacidad alta.
Grafeno	Alta permeabilidad y selectividad; eficacia energética.	Costos altos; tecnología emergente aún en desarrollo.
Melamina	Amplia resistencia a las altas temperaturas del sol, agua y roturas. Barata, fácil y energéticamente eficiente para capturar el CO ₂ de las chimeneas.	Puede sufrir daños por calor y humedad excesivos.

3.3. Emisiones de CO₂

Las emisiones de CO₂ están estrechamente ligadas al calentamiento global y representan una amenaza ambiental significativa (Lu et al., 2015; Shamiri et al., 2016). En México, el principal emisor en 2013 fue el sector transporte (32 %), seguido por el eléctrico (25 %) y el industrial (21 %), especialmente por la producción de cemento. La IEA (2016) proyecta una futura dependencia del gas natural para generación eléctrica, lo que subraya la necesidad de implementar sistemas energéticos más eficientes.

La NOM-085-SEMARNAT-2011, como se muestra a continuación, establece el cálculo de emisiones de gases. Para determinar la emisión de un contaminante en 1 hora (kg/h), a partir de su concentración y el flujo de gases en chimenea medidos o calculados se utiliza la Ecuación 1:

$$E_i = C_i \times \phi \quad (1)$$

donde:

- E_i es la emisión del contaminante i -ésimo, en kg/h.
- C_i es la concentración de dicho contaminante en condiciones de referencia y base seca, expresada en kg/m³.

- ϕ es el flujo de gases de combustión en la chimenea, medido o calculado en condiciones de referencia y base seca, expresada en m³/h.

Para calcular la emisión del contaminante en kg/GJ a partir de la concentración medida, se utiliza la Ecuación 2:

$$E_i = \frac{C_d}{F_d} \quad (2)$$

donde:

- E_i es la emisión en kg/GJ del contaminante i .
- C_d es la concentración medida del contaminante en condiciones de referencia y base seca, en kg/m³.
- F_d es el volumen de productos de la combustión por unidad de energía en el combustible, m³/GJ en condiciones de referencia y base seca.

Si se conoce el consumo de combustible en kg/h, es posible calcular el flujo de gases de chimenea utilizando la Ecuación 3:

$$\phi = q \times H \times F_d \quad (3)$$

donde:

- ϕ es el flujo de gases de combustión en m³/h, en condiciones de referencia.
- q es el consumo de combustible (kg/h).
- H es el poder calorífico del combustible (GJ/kg) y
- F_d se obtiene según el combustible.

Según la NOM-085-SEMARNAT-2011 en el apartado 6.11 establece que el nivel máximo de emisión ponderado se obtiene aplicando la Ecuación 4, que considera los niveles máximos permisibles de emisión correspondientes a los equipos y al combustible utilizado en unidades de concentración:

$$NMPE = \frac{\sum(NMPE_i \times Q_i)}{\sum Q_i} \quad (4)$$

donde:

- NMPE es el Nivel máximo permisible de emisión ponderado por fuente fija, expresado en unidades de concentración ppmV o mg/m³.

- $NMPE_i$ es el nivel máximo permisible de emisión del equipo i -ésimo, que se obtiene de las Tablas 4 o 5, en función de la capacidad y tipo de combustible, expresado en unidades de concentración ppmV o mg/m³.
- Q_i es la capacidad térmica del equipo de combustión i -ésimo, expresada en MJ/h. Se obtiene de multiplicar el consumo de combustible por su poder calorífico,
- i es un número consecutivo (1,2,3..., n) que se asigna a los equipos de combustión hasta n , que es el número total de equipos.

Para corregir las concentraciones medidas a la referencia de 5 % O₂, se utiliza la Ecuación 5:

$$CR = CM \times \frac{21 - O_M}{21 - O_R} \quad (5)$$

donde:

- CR = Concentración calculada al valor de referencia del O₂,
- CM = Concentración medida (Partículas, CO, NO_X o SO₂),
- O_M = Valor medido para el O₂ (%),
- O_R = Nivel de referencia para el O₂ (5 %).

*Para valores medidos para el O₂ entre 15.1 % y 20.9 % se utilizará un valor de O_M de 15 % en esta ecuación de corrección.

(2) Para NO_X, las ZC listadas en los numerales 4.24.4 a 4.24.7, se consideran como Resto del País.

Según el Cuadro 6, que muestra una clasificación dada por diferentes organizaciones a nivel mundial respecto a la cantidad de emisiones de CO₂ anuales, los crematorios, al emitir entre 80 – 120 tCO₂/año, se clasifican de pequeña escala.

Cuadro 6: Clasificación según cantidad de emisiones.

Clasificación	Unión Europea (UE) (Graus y Voogt, 2007)	Agencia Protección Ambiental (EPA) EEUU	ONU
Pequeña	<10 000 tCO ₂ /año	<25 000 tCO ₂ /año	<5 000 tCO ₂ /año
Mediana	10 000 – 50 000 tCO ₂ /año	25 000 – 100 000 tCO ₂ /año	5 000 – 20 000tCO ₂ /año
Grande	>50 000 tCO ₂ /año	>100 000 tCO ₂ /año	>20 000 tCO ₂ /año

Según la NADF-017- AIRE-2017 en sus apartados 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 y 7.5 establece que las fuentes emisoras que operen equipos de cremación de cadáveres humanos, de restos

Cuadro 7: Límites máximos permisibles de contaminantes.

Contaminante	Límite máximo de emisión promedio horario (mg/m ³)
Partículas Suspendidas	40
CO	120
NO _x	180

humanos, restos humanos áridos, así como los equipos de incineración de cadáveres de animales y sus restos, deberán cumplir con los límites mostrados en el Cuadro 7.

mg/m³: miligramos por metro cúbico.

Los límites de la presente Norma Ambiental están referenciados a condiciones de 25°C, 1 Atm (101,325 Pa) y 11 % de Oxígeno (O₂).

Para corregir las concentraciones medidas a la referencia de O₂ se utiliza la Ecuación 6:

$$CR = \frac{20,9 - OR}{(20,9 - MR) \times CM} \quad (6)$$

Dónde:

CR = Concentración calculada al valor de referencia del O₂ (mg/m³)

CM = Concentración medida del contaminante (mg/m³)

OM = Valor medido para el O₂ (%)

OR = Nivel de referencia para O₂ (11 %).

Según la NADF-017- AIRE-2017 en su apartado 8 establece el Procedimiento de medición de las emisiones dónde deberá realizarse en condiciones de operación normal durante el servicio de cremación de cadáveres humanos, de restos humanos, restos humanos áridos, así como durante la incineración de cadáveres de animales y sus restos.; la determinación de COVs, CO y NO_x, así como la frecuencia de medición.

Según la NOM-085-SEMARNAT-2011 en su apartado 6.9 cuando un equipo de combustión utilice simultáneamente varios combustibles, su emisión debe compararse con la del combustible que tenga el valor más elevado de nivel máximo permisible de emisión de entre los diversos tipos de combustibles utilizados, como se indica en el Cuadro 8:

Cuadro 8: Nivel Máximo Permisible de emisión según el combustible.

Combustibles utilizados	Nivel Máximo Permisible de Emisión (NMPE) correspondiente
Gas/líquido	Líquido
Gas/sólido	Sólido
Líquido/sólido	Líquido
Gas/líquido/sólido	Líquido

Según la NOM-021-SSA1-2021 en su apartado 5, establece las especificaciones que las fuentes emisoras que operen equipos de cremación de cadáveres humanos, de restos humanos, restos humanos áridos, así como los equipos de incineración de cadáveres de animales y sus restos, deberán cumplir con los límites mostrados en el Cuadro 4. 5. Especificaciones. 5.1 Valores límite para la concentración ambiental de monóxido de carbono (Cuadro 9):

Cuadro 9: Valores límite de CO en el aire ambiente.

Concentración	CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO (ppm)	Forma de cálculo
De 1 hora	30 000	26.0	Obtenido como el máximo de las concentraciones horarias, calculado como se especifica en el inciso 5.2 de esta Norma.
De 8 horas	10 000	9.0	Obtenido como el máximo de los promedios móviles de 8 horas de CO, calculado como se especifica en el inciso 5.2 de esta Norma.

Nota: Los valores límite están establecidos a condiciones de referencia, temperatura de 25°C (298 K) y 1 atm de presión (101.3 kPa).

5.2. Manejo de datos para determinar el cumplimiento de los valores límites de CO.

5.2.1 Redondeo. En cada sitio de monitoreo, las concentraciones horarias en ppm, deberán tener una cifra decimal significativa. Si se cuenta con valores de 2 o más cifras decimales, el valor será redondeado de la siguiente manera: si el segundo decimal es un número entre 5 y 9, el valor del primer decimal se incrementará al inmediato superior; si el valor del segundo decimal es 4 o menor el valor del primer decimal no se incrementa. Para determinar el cumplimiento de los valores límite, la concentración deberán tener una cifra decimal significativa, de acuerdo al redondeo descrito en el párrafo anterior. 5.2.2 Requerimientos de suficiencia de datos para la obtención de promedios en equipos de monitoreo (Cuadro 10):

Cuadro 10: Requerimientos de suficiencia de datos.

Concentración	Requerimiento
Promedio horario	Para el cálculo del promedio horario se requerirá un mínimo de 75 % de las concentraciones por minuto válidas en una hora (45 registros).
Promedio móvil de 8 horas	Para el cálculo del promedio móvil de ocho horas se requerirá al menos 6 de las 8 horas con concentraciones válidas.

5.2.4.1 Un sitio de monitoreo cumple con el valor límite de 1 hora cuando el máximo de las concentraciones horarias sea menor o igual a 26.0 ppm. En caso de que se tenga menos del 75 % de los registros horarios en el periodo y al menos 1 de las concentraciones horarias sea mayor que 26.0 ppm, se incumplirá la Norma. 5.2.4.2 Un sitio de monitoreo cumple con el límite de 8 horas cuando el valor máximo de los promedios móviles de 8 horas sea menor o igual a 9.0 ppm. En caso de que se tenga menos del 75 % de los

registros en el periodo y al menos 1 de las concentraciones de los promedios móviles de 8 horas sea mayor que 9.0 ppm, se incumplirá la Norma.

En México, la Norma NMX-AA-009-1993-SCFI regula la instalación de puertos de muestreo para monitoreo de emisiones. Los crematorios nacionales usan mayormente gas natural, aunque también propano o gas LP. Las emisiones incluyen CO_2 , NO_x , CO, COVs y partículas suspendidas, con valores promedio de 160–245 kg de CO_2 por cremación.

Según Alonso, M. (2015) la captura post-combustión separa el CO_2 de los gases de escape tras la combustión en aire, donde predomina N_2 y O_2 . La concentración de CO_2 en estos gases es baja (4–14 %), lo que implica una baja presión parcial del gas ($\leq 0,15\text{atm}$), dificultando su captura debido al limitado potencial termodinámico. Aun así, esta tecnología es la más prometedora a corto plazo porque puede adaptarse a plantas existentes y ya se usa en industrias como la química y del gas natural, aunque en condiciones más favorables. La absorción química con aminas es la técnica más desarrollada comercialmente, estas reaccionan con el CO_2 formando sales que, al aplicar calor, liberan el gas capturado. Aunque eficaces, requieren un alto consumo energético en la etapa de regeneración.

En México, la dinámica demográfica actual resalta la importancia de esta cuestión, sobre todo en áreas urbanas y metropolitanas. Las Estadísticas de Defunciones Registradas (EDR) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) revelan un alza notable en las defunciones anuales durante 2020-2021, ligada principalmente a la pandemia de COVID-19. Así, en 2020 se registran 1 086 743 defunciones [INEGI, 2021], que suben a 1 122 249 en 2021 [INEGI, 2022], los picos más elevados de las últimas décadas. Aunque 2023 muestra una baja en comparación con esos años pico, las 799 869 defunciones reportadas [INEGI, 2024] siguen ejerciendo presión sostenida sobre la infraestructura funeraria nacional. Esta mayor mortalidad no solo sobrecarga los servicios funerarios, sino que también acelera el funcionamiento de los crematorios y, por ende, sus emisiones contaminantes.

Ruiz, M. (2023) analiza la evolución de las cremaciones realizadas entre 2018 y 2021 en el Centro de Incineración del ISSSTE, ubicado en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, México. El estudio revela un aumento significativo en la cantidad de cremaciones durante los dos últimos años del periodo analizado, coincidiendo con la emergencia sanitaria por COVID-19. Se consideraron las cremaciones de adultos, niños y restos áridos, lo que permitió reflejar de forma integral la tendencia ascendente, como se muestra en el Cuadro 11. Este incremento en la actividad crematoria conlleva un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente de CO_2 , como resultado del mayor número de incineraciones.

La captura de carbono mediante absorción se basa en la transferencia selectiva de CO_2 desde una corriente gaseosa hacia una fase líquida, utilizando una disolución acuosa alcalina como absorbente. El proceso típico, ilustrado en la Figura 7, consta de dos columnas principales: en la columna de absorción, el CO_2 es capturado por el solvente

Cuadro 11: Total de cremaciones por año.

Año	Total de cremaciones
2018	958
2019	756
2020	1578
2021	1072
Total	4364

químico a temperaturas que oscilan entre 40 y 60°C. La solución rica en CO₂ se envía luego a la columna de regeneración, donde el solvente se somete a temperaturas entre 100 y 140°C, a presiones cercanas a la atmosférica, para liberar el CO₂ absorbido. Finalmente, el solvente regenerado, con baja concentración de CO₂, retorna al sistema para ser reutilizado.

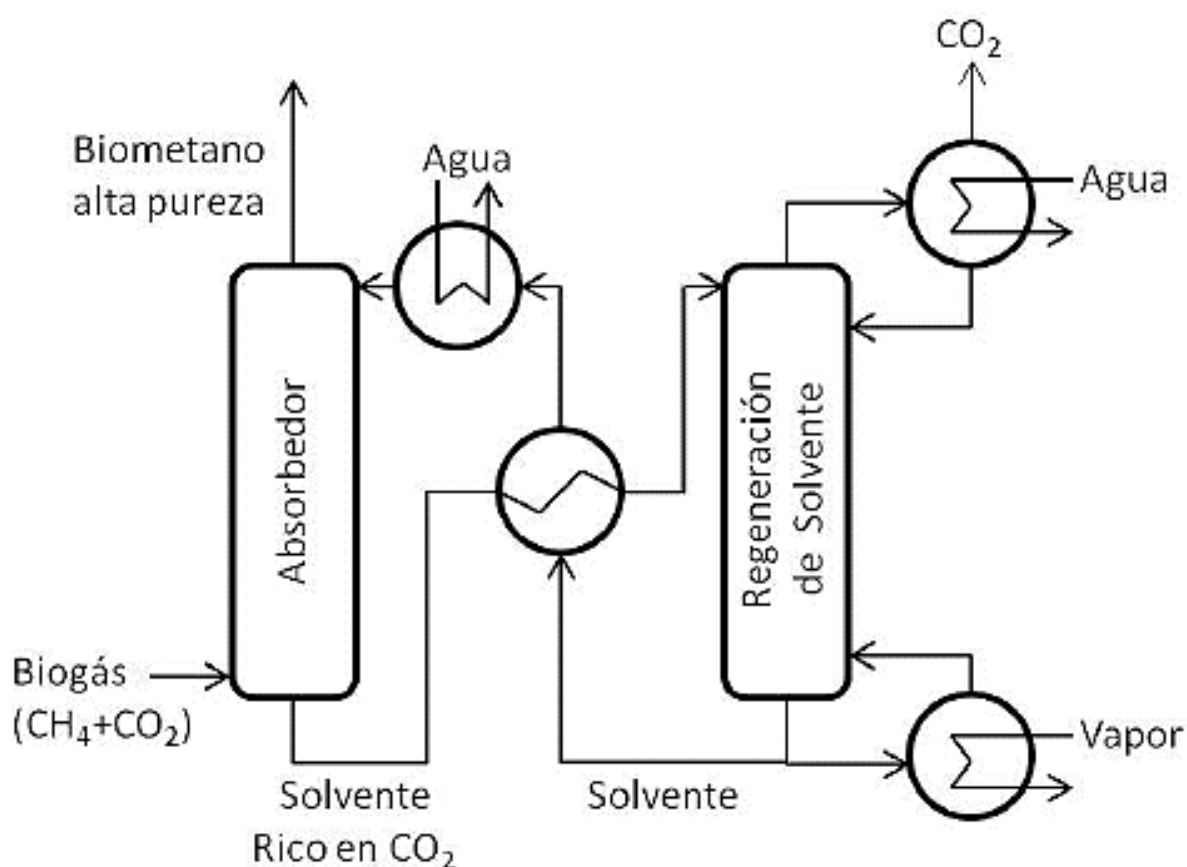


Figura 7: Esquema general de la absorción de CO₂. Fuente: Robertson, 2007

Aramendiz, E. (2018) establece que el dimensionamiento de torres de absorción para captura de CO₂ requiere un enfoque técnico riguroso que incluye el uso de modelos como el método de Billet, simulaciones con software especializado (como Aspen-HYSYS) y validación con datos experimentales. Se consideran variables como la composición del gas, condiciones de operación (presión, temperatura) y caudales de gas y líquido. Un diseño

típico incluye torres empacadas en contracorriente y líquidos absorbentes como aminas o líquidos iónicos, que ofrecen alta eficiencia, pero pueden tener limitaciones económicas. La eficiencia del sistema depende de la correcta selección del absorbente, las condiciones operativas y el diseño estructural de la torre. Aunque se logran altos porcentajes de captura, la viabilidad económica y el impacto ambiental siguen siendo retos clave para su implementación a gran escala.

3.4. Funcionamiento del Absorbedor, Desorbedor. Uso de MDEA

La teoría del absorbedor, desorbedor y del uso de MDEA se basa en operaciones unitarias fundamentales para el tratamiento y captura de gases, especialmente CO_2 , mediante procesos de transferencia de masa y reacciones químicas en solventes (Absorción y Desorción de Gases, 2025).

3.4.1. Absorbedor - Desorbedor (columna de desorción o regeneración)

Es un dispositivo donde una corriente gaseosa que contiene el componente a separar (en éste caso: CO_2) se hace contactar con un líquido solvente que lo absorbe. La absorción puede ser física (donde el gas se disuelve en el líquido por solubilidad) o química (donde el gas reacciona químicamente con el solvente). En columnas de absorción, el gas y el líquido fluyen en contracorriente para maximizar la transferencia de masa (CETA UNAM, 2023). Un ejemplo típico es la captura de CO_2 a partir de gases de combustión usando aminas líquidas, como la MDEA. En la columna, el CO_2 pasa de la fase gaseosa a la líquida, donde se captura selectivamente, y el gas pobre en CO_2 sale por el tope de la columna.

Es el proceso inverso a la absorción, donde el componente capturado (CO_2 en solución) se separa del líquido regenerándolo. Esto se logra generalmente calentando el líquido absorbente para reducir la solubilidad o romper la unión química del CO_2 con el solvente. En una torre desorbedora, el solvente rico en CO_2 se calienta, y el CO_2 liberado es removido en la fase gaseosa que sube por la columna, mientras que el solvente regenerado baja y es recirculado al absorbedor (Manual UNEP-POPS, s.f.).

Un sistema convencional de captura de CO_2 mediante aminas está compuesto principalmente por una columna de absorción, una columna de desorción (stripper), un rehervidor, un condensador y un intercambiador de calor rico-pobre. En la columna de absorción, el gas de combustión entra en contacto contracorriente con el solvente a temperaturas típicamente inferiores a 60°C y presiones cercanas a la atmosférica, promoviendo la transferencia de masa del CO_2 desde la fase gas hacia la fase líquida (Vega et al., 2016).

El solvente rico en CO_2 es posteriormente enviado a la columna de desorción, donde el CO_2 es liberado mediante el suministro de energía térmica en el rehervidor. Esta etapa se lleva a cabo generalmente a temperaturas del orden de 120°C y presiones entre 1.8 y 3 bar, permitiendo la regeneración del solvente para su recirculación al absorbedor (Nittaya,

2014).

Varios estudios han demostrado que el consumo energético del rehervidor representa el principal costo operativo del proceso, lo que convierte a la etapa de desorción en el foco principal de optimización energética y de desarrollo de nuevos solventes (Nittaya, 2014; Vega et al., 2016).

El estudio dinámico de Nittaya (2014) destaca la importancia de una correcta integración entre absorbedor, stripper y equipos auxiliares, así como del diseño de estrategias de control capaces de mantener la tasa de captura de CO_2 , la estabilidad operativa y la calidad del CO_2 producido. Estas consideraciones son especialmente relevantes en sistemas con MDEA, donde la cinética más lenta de absorción hace crítico el control de variables como la temperatura, el caudal de solvente y la carga térmica del rehervidor.

Un sistema convencional de captura de CO_2 por absorción química se compone principalmente de una columna de absorción y una columna de desorción o stripper, las cuales operan de manera integrada. En la columna de absorción, el CO_2 es transferido desde la fase gaseosa hacia el solvente amínico bajo condiciones cercanas a la presión atmosférica. Posteriormente, el solvente rico en CO_2 es conducido a la columna de desorción, donde el gas es liberado mediante el aporte de energía térmica, permitiendo la regeneración del solvente y su recirculación al absorbedor. Se identifica que el consumo energético asociado al rehervidor del stripper representa el principal desafío técnico y económico del proceso, lo que convierte a esta etapa en el foco de optimización del sistema (IPCC, 2005).

Asimismo, investigaciones aplicadas a nivel de tesis confirman que el desempeño global del sistema depende fuertemente de la correcta selección del solvente, del diseño hidráulico de las columnas de absorción y desorción y de la integración térmica del proceso. En particular, se señala que la columna de desorción constituye el principal punto de consumo energético, lo que refuerza el interés en solventes como la MDEA debido a su menor entalpía de regeneración y mayor estabilidad operativa (Sánchez, 2023).

3.4.2. Uso de MDEA (Metildietanolamina)

MDEA es un solvente amínico terciario utilizado comúnmente para la captura selectiva de CO_2 . Funciona principalmente por reacción química donde el CO_2 reacciona de forma reversible con la MDEA para formar especies solubles. MDEA tiene la ventaja de ser menos corrosiva, tener menor consumo energético durante la regeneración que otras aminas (como MEA) y mayor selectividad para CO_2 frente a otros gases como H_2S . En el proceso, el gas rico en CO_2 se contacta con MDEA en la columna de absorción donde el CO_2 se disuelve y se retira del gas. Luego, en la columna de desorción, la MDEA rica en CO_2 es calentada para liberar el CO_2 y regenerar el solvente (Ruiz Ruiz, 2021).

La MDEA es una amina terciaria ampliamente utilizada en procesos industriales de remoción de gases ácidos. En comparación con aminas primarias como la MEA, la MDEA

presenta menor reactividad química, pero ofrece ventajas significativas en términos de estabilidad térmica, menor corrosividad y reducción del consumo energético en la regeneración. Desde el punto de vista químico, la MDEA no forma carbamatos estables con el CO_2 debido a la ausencia del enlace N-H , capturando el CO_2 principalmente a través de la formación de bicarbonato. Este mecanismo conduce a una cinética de absorción más lenta, pero reduce la entalpía de regeneración del solvente, lo cual resulta particularmente atractivo en la columna de desorción (Vega et al., 2016).

La MDEA se posiciona como un solvente de interés para sistemas de captura de CO_2 debido a su menor calor de regeneración, elevada estabilidad térmica y reducida tendencia a la corrosión en comparación con aminas primarias. Aunque la MDEA presenta una cinética de absorción más lenta, su mecanismo de captura basado en la formación de bicarbonato facilita la liberación del CO_2 en la etapa de desorción, disminuyendo los requerimientos energéticos del proceso. De acuerdo con el IPCC (2005), el empleo de aminas terciarias como la MDEA, junto con un diseño adecuado de las columnas de absorción y desorción, contribuye a mejorar la eficiencia energética y la viabilidad operativa de los sistemas de captura de CO_2 a gran escala.

El Cuadro 12 muestra un resumen sobre el funcionamiento de las columnas del sistema así como del material a utilizar, MDEA.

Cuadro 12: Resumen de funcionamiento.

Operación	Descripción	Proceso clave
Absorción	Transferencia de CO_2 del gas al solvente líquido (MDEA)	Reacción química reversible
Desorción	Liberación de CO_2 del solvente por calentamiento (regeneración)	Rompimiento del enlace CO_2 -solvente
MDEA	Solvente para capturar CO_2 con alta selectividad y bajo consumo energético	Aminas terciarias con reacción reversible

Así, el absorbedor y desorbedor con MDEA constituyen un sistema eficiente y regenerable para la captura selectiva de CO_2 en procesos industriales, como los usados para controlar emisiones en crematorios o plantas industriales.

3.4.3. Software Aspen Plus

Una de las cuestiones importantes a la hora de diseñar un sistema de captura de CO_2 utilizando Aspen Plus es cómo optimizar los diferentes componentes del proceso, como la absorción con solventes (MDEA), la desorción, el enfriamiento y otros equipos auxiliares, para alcanzar la máxima eficiencia y el menor consumo energético y económico posible. Para ello, se crean modelos de simulación detallados que permiten analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones y configurar los parámetros óptimos del proceso.

Aspen Plus es una potente herramienta que permite simular procesos de captura de CO₂ basados en absorción química y otros métodos, facilitando la predicción de flujos, composición de gases, consumo de solvente, requerimientos energéticos y dimensionamiento de equipos. La simulación puede incluir desde la entrada del gas con CO₂ hasta la purificación y recuperación del gas capturado. En la Figura 1 se muestra un procedimiento metodológico típico para la simulación y mejora del proceso de captura de CO₂ utilizando Aspen Plus, desde la definición del sistema, modelación de las etapas de absorción y desorción, hasta el análisis de los resultados.

Aspen Plus simplifica la tarea de diseñar sistemas. Para trabajar eficazmente con Aspen Plus es necesario comprender sus seis funciones principales: simulación integrada de procesos, modelado termodinámico avanzado, reacciones químicas y cinéticas, optimización de procesos y análisis y diseño, y cómo interactúan, como se muestra en la Figura 8.

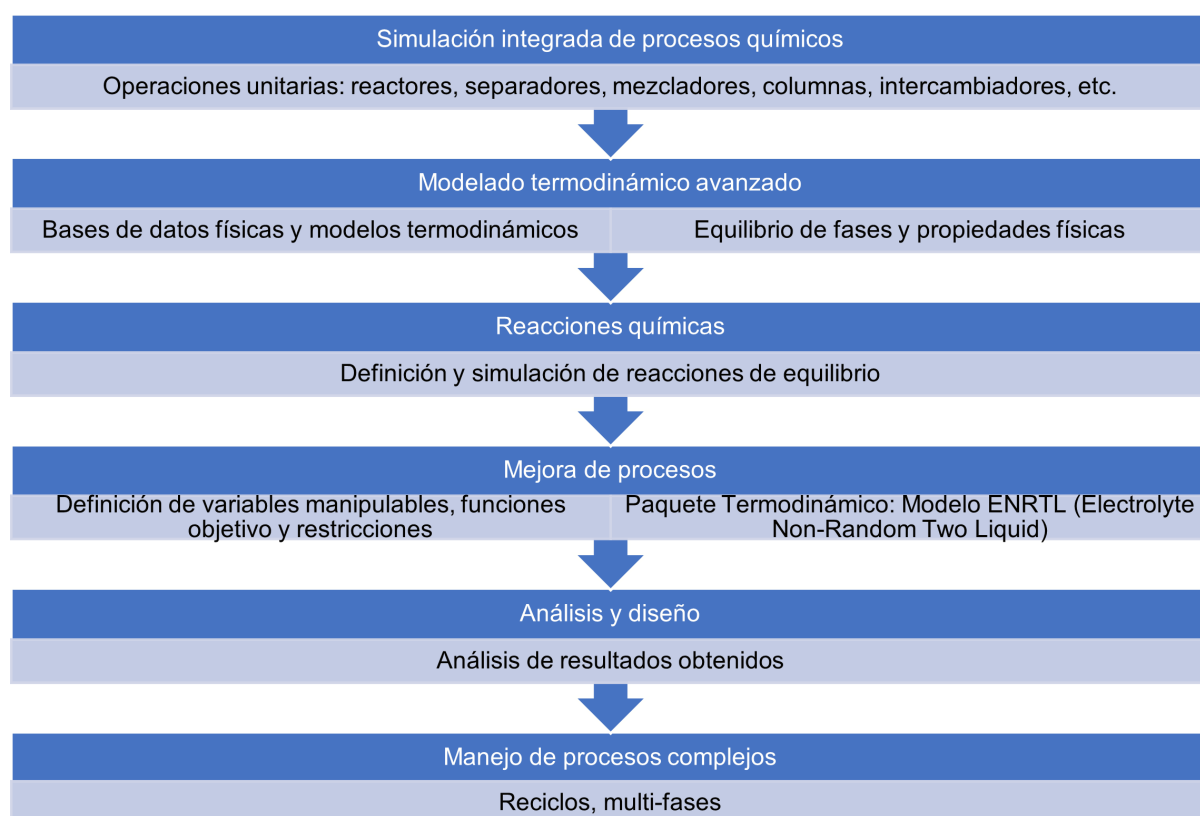


Figura 8: *Funciones principales del Aspen Plus.*

- Simulación integrada de procesos químicos: Aspen Plus permite integrar todas las operaciones unitarias necesarias en un proceso químico dentro de un mismo entorno. Esto incluye reactores, separadores, mezcladores, columnas de absorción - desorción, intercambiadores de calor, etc. Se construye un diagrama de flujo del proceso y se simula el comportamiento conjunto de todas estas unidades bajo las condiciones de-

finidas, considerando fases líquidas y de gas. Esto facilita la modelación de procesos reales complejos en forma conjunta y coherente.

- **Modelado termodinámico avanzado:** Aspen Plus contiene una extensa base de datos con propiedades físicas de múltiples compuestos y modelos termodinámicos para determinar equilibrios de fases y propiedades como densidad, viscosidad, calor específico, entre otros. Esto es crucial para simular comportamientos físicos y químicos reales y precisos, garantizando que las predicciones del proceso sean confiables.
- **Reacciones químicas:** El software permite definir y simular reacciones químicas tanto homogéneas como heterogéneas. Esto es importante para procesos donde la conversión química impacta significativamente el diseño y operación.
- **Mejora de procesos:** Aspen Plus cuenta con módulos para definir variables manipulables (como temperatura, presión, flujo), funciones objetivo (ej. minimizar costos o consumo energético, maximizar pureza o producción) y restricciones (límites operativos o ambientales). Algoritmos robustos como SQP (programación cuadrática secuencial), realizan optimizaciones numéricas para encontrar las mejores condiciones de operación que cumplen con los objetivos planteados.
- **Análisis y diseño:** Se incluyen herramientas para análisis de sensibilidad (cómo afectan los cambios en variables al resultado), regresión para ajuste de parámetros. Esta etapa ayuda a validar el diseño simulado, comprender la robustez del proceso y facilitar la toma de decisiones informadas.
- **Manejo de procesos complejos:** Aspen Plus puede manejar ciclos con reciclaje, múltiples fases que interactúan simultáneamente y estrategias de integración energética para optimizar el uso de recursos. Esto permite simular procesos industriales reales completos y complejos, asegurando que las soluciones propuestas sean aplicables a escala planta.

A continuación, en la Sección 4, se establece el caso del estudio, donde se definen las características de la industria seleccionada y del sistema.

4. CASO DE ESTUDIO

Se describe la aplicación práctica del diseño propuesto para la captura de CO_2 en crematorios usando una solución acuosa de MDEA al 30 %. Se definen las características del proceso, condiciones operativas, dimensiones preestablecidas de columnas de absorción y desorción, y flujos de operación basados en datos reales y bibliografía reciente. Se plantea un modelo conceptual para la simulación en Aspen Plus que contempla la eficiencia esperada y el impacto ambiental mediante la reducción de emisiones.

Captura de CO_2 en crematorios mediante absorción química con MDEA

Dado el creciente interés por mitigar las emisiones de GEI, se propone la implementación de un sistema de captura de CO_2 por absorción química usando una solución acuosa de MDEA.

El objetivo del caso es diseñar un esquema preliminar para la captura de CO_2 en la corriente de gases de combustión generada por el crematorio, estimando el flujo necesario de MDEA, las emisiones capturadas, y el impacto ambiental del sistema.

El sistema para la captura de CO_2 en crematorios emplea un proceso de postcombustión mediante una solución acuosa de MDEA. Durante la cremación, el gas natural se utiliza como fuente de energía para mantener la temperatura requerida, la cual varía en función del tamaño corporal y la duración del proceso.

Según la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU., 2024 y National Geographic, 2019, para un cuerpo adulto promedio, con un peso aproximado de 70 kg, se requiere alrededor de 30 m^3 de gas natural, cuyo consumo genera un volumen de gases aproximadamente diez veces mayor, debido a la mezcla con aire atmosférico. Este gas natural, principalmente metano (CH_4), al quemarse genera temperaturas entre 800 y 1000°C y produce principalmente CO_2 , vapor de agua, junto con trazas de O_2 , N_2 , CO , NO_x y SO_x . Cada metro cúbico de gas natural quemado produce aproximadamente 2,75 kg de CO_2 , lo que se traduce en cerca de 82,5 kg de CO_2 emitidos por cada cremación evaluada.

Según Concepción (2016), la concentración de MDEA en la solución acuosa se establece en un 30 % en peso para optimizar la capacidad de absorción y minimizar el volumen de solvente circulante. Los gases a tratar, inicialmente calientes, se enfrían mediante intercambiadores hasta una temperatura entre 40 y 50°C , condiciones idóneas para las reacciones de absorción química. El gas de calor ingresa en la columna de absorción, donde se contacta contracorriente con la solución de MDEA, absorbiendo el CO_2 mediante la formación de compuestos reversibles. La MDEA, como amina terciaria, se distingue por su selectividad eficiente para CO_2 y su menor tendencia corrosiva en comparación con otras aminas.

El solvente enriquecido con CO_2 se dirige a la columna de desorción, donde se lleva a cabo la regeneración del solvente y la liberación del CO_2 en forma concentrada, lista para su compresión o almacenamiento.

Para mejorar los resultados del proceso, el sistema integra intercambiadores de calor que permiten precalentar el solvente y recuperar energía, así como enfriar los gases para su separación del vapor de H₂O. El ciclo se cierra al recircular la solución regenerada y el H₂O recuperada hacia la columna de absorción.

Para el caso de estudio se contempla la cremación de dos cuerpos, en un día, cada cuerpo, según Aurens (2024) suele durar alrededor de un promedio de 3 h.

Datos del sistema:

- Cremaciones: 2 cuerpos, 3 horas.
- CO₂ emitido por cremación (promedio): 27 kg/cuerpo (Hernández, S. 2020).
- CO₂ emitido por gas consumido en la cremación (promedio): 82.5 kg.

Con base en estos datos es posible calcular la emisión diaria de CO₂ generada durante las cremaciones. EL cálculo se muestra en la Ecuación 7:

$$\begin{aligned}
 \text{Emisiones diarias de CO}_2 &= \frac{2 \text{ cuerpos}}{3 \text{ h}} \times (82,5 \text{ kg} + 27 \text{ kg}) / \text{cuerpo} & (7) \\
 &= \frac{2 \text{ cuerpos}}{3 \text{ h}} \times 109,5 \text{ kg/h} \\
 &= \frac{219 \text{ kg}}{3 \text{ h}} \\
 &= 73 \text{ kg/h CO}_2
 \end{aligned}$$

Concentración de CO₂ en los gases de combustión: 12 % molar Proceso de captura: absorción química con MDEA 30 % en torre empacada. Tasa de captura esperada: 90 % Flujo de gases: CO₂ es el 12 % = 912.5 kg/h Caudal MDEA-H₂O: 2737.5 kg/h.

Los resultados esperados para la captura de CO₂ se muestran en la Ecuación 8 así como la reducción anual de emisiones en la Ecuación 9:

$$\text{CO}_2 \text{ capturado por día (suponiendo 2 cremaciones)} : 73 \text{ kg/da} \times 0,90 = 65,7 \text{ kg/da} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 \text{Reducción anual de emisiones} : 65,7 \text{ kg/da} \times 365 \text{ das/ao} \\
 = 23\,981 \text{ kg/ao} = 24 \text{ t CO}_2/\text{año} & (9)
 \end{aligned}$$

Modelo conceptual: instalar una columna de absorción vertical empacada con las características preliminares, que se muestran en el Cuadro 13.

Es importante señalar que esta corriente rica no representa aún el CO₂ recuperado en forma separada. Una columna de desorción para la captura de CO₂ con MDEA funciona

Cuadro 13: Resumen de dimensiones Absorbedor (Sainz, A. 2022).

Parámetro	Valor estimado	Comentario
Diámetro de columna	0.35 m	Flujo gas 912.5 kg/h, diseño típico
Altura de columna	9 m	40 etapas $\times$ HETP 0.225 m
Tiempo de contacto	10 s	Consistente con caudales.
Tipo de relleno	Anillos MELLAPAK (plástico)	Alta área superficial, buena distribución.
Presión	1 atm	Caída 4.171 mm-water

como un equipo especializado en regenerar el solvente cargado mediante un proceso térmico que libera el CO_2 capturado. Esta columna opera a temperaturas controladas alrededor de $110\text{-}130^\circ\text{C}$ para evitar la degradación química del MDEA, con presiones que favorecen la separación eficiente del gas. El diseño incluye lechos empacados con materiales como anillos Rachette, Pall o sillas Berl, que proporcionan una gran superficie para optimizar la transferencia de masa entre fases. Para mejorar la recuperación del solvente y remover el vapor de agua, se integran condensadores de reflujo. La estructura está fabricada con materiales resistentes a la corrosión y equipada con instrumentación avanzada para monitorear y controlar parámetros clave de temperatura, presión y flujo, garantizando una operación segura, continua y energéticamente eficiente durante el proceso de regeneración del solvente. Un resumen con las características preliminares del desorbedor, se muestran en el Cuadro 14.

Cuadro 14: Resumen de dimensiones Desorbedor.

Parámetro	Valor estimado	Comentario
Diámetro de columna	0.5 m	
Altura de columna	9 m	30 etapas $\times$ HETP 0.3 m.
Tiempo de contacto	300 s	Consistente con caudales.
Tipo de relleno	Packed PALL (metal)	Alta área superficial, buena distribución.
Presión	2.1 bar	Caída 0.2 bar.

En conjunto, las dimensiones preliminares del desorbedor ofrecen una base para evaluar el desempeño del regenerador térmico para recuperar MDEA y liberar CO_2 concentrado.

4.1. Método de Diseño

El desarrollo y mejora de procesos industriales implica definición y ajuste de variables operativas con el fin de cumplir los objetivos planteados de manera eficiente y confiable. En este sentido, Aspen Plus se posiciona como una herramienta esencial para el modelado y simulación de sistemas, especialmente en aplicaciones de captura de gases como el

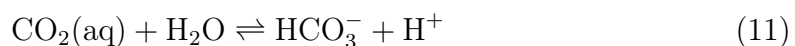
dióxido de carbono. Este software permite establecer las condiciones de operación y las características de los equipos, tales como columnas de absorción, solventes empleados y etapas de desorción, facilitando la determinación de parámetros críticos como el número de etapas necesarias, temperaturas y presiones necesarias para maximizar el desempeño del proceso.

En el contexto del presente estudio, se emplea Aspen Plus para el modelado y ajuste de un sistema de captura de CO₂, orientado a definir las condiciones operativas que mejoran la captura y a validar la factibilidad técnica del proceso. La simulación generará resultados que apoyarán la consecución de objetivos centrales, tales como maximizar la captación del gas y asegurar la calidad del producto final.

- El proceso de captura ocurre en la fase líquida del absorbedor y se describe mediante una secuencia de equilibrios físico-químicos. En primer lugar, el CO₂ se transfiere desde la fase gaseosa hacia la solución acuosa, donde se disuelve de acuerdo con el equilibrio de solubilidad, como se observa en la Ecuación 10.



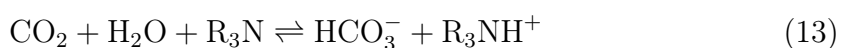
Una vez disuelto, el CO₂ reacciona con el agua presente en el solvente, dando lugar a la formación de bicarbonato mediante un equilibrio ácido-base, Ecuación 11.



La MDEA actúa como aceptor de protones, como puede observarse en la Ecuación 12, capturando el protón liberado durante la hidratación del CO₂, formando la especie amina protonada.



La reacción global mostrada en la Ecuación 13, describe el mecanismo dominante de captura de CO₂ con MDEA en solución.



Este mecanismo indica que el CO_2 es capturado principalmente en forma de ión bicarbonato, mientras que la MDEA se protona. A diferencia de las aminas primarias y secundarias, la MDEA no forma carbamatos estables, lo que reduce la energía requerida para la regeneración del solvente.

Durante la etapa de regeneración, el calentamiento de la solución rica en CO_2 desplaza los equilibrios hacia la izquierda, liberando el CO_2 en forma concentrada y permitiendo la recirculación del solvente al absorbedor.

- Se establece la estructura del Modelo en Aspen Plus donde la simulación se lleva a cabo mediante la creación de un modelo que represente el sistema de captura propuesto. El sistema de captura de CO_2 en la simulación se compone de una columna de absorción (1. Absorbedor), donde los gases se hacen burbujear en sentido contrario al MDEA, una columna de desorción (2. Desorbedor) para la regeneración del solvente y la obtención de CO_2 para su posterior utilización, varios intercambiadores de calor (3. Calentador: para aumentar la temperatura de la mezcla; 4. Enfriador/ 5. Enfriador1: para disminuir la temperatura de las mezclas), un separador (6. Separador: separa el CO_2 y el H_2O), un mezclador (7. Mezclador: mezcla el H_2O y la MDEA regenerado) y una bomba (8. Bomba: que bombea la mezcla a la columna de absorción), como se muestra en la Figura 9.

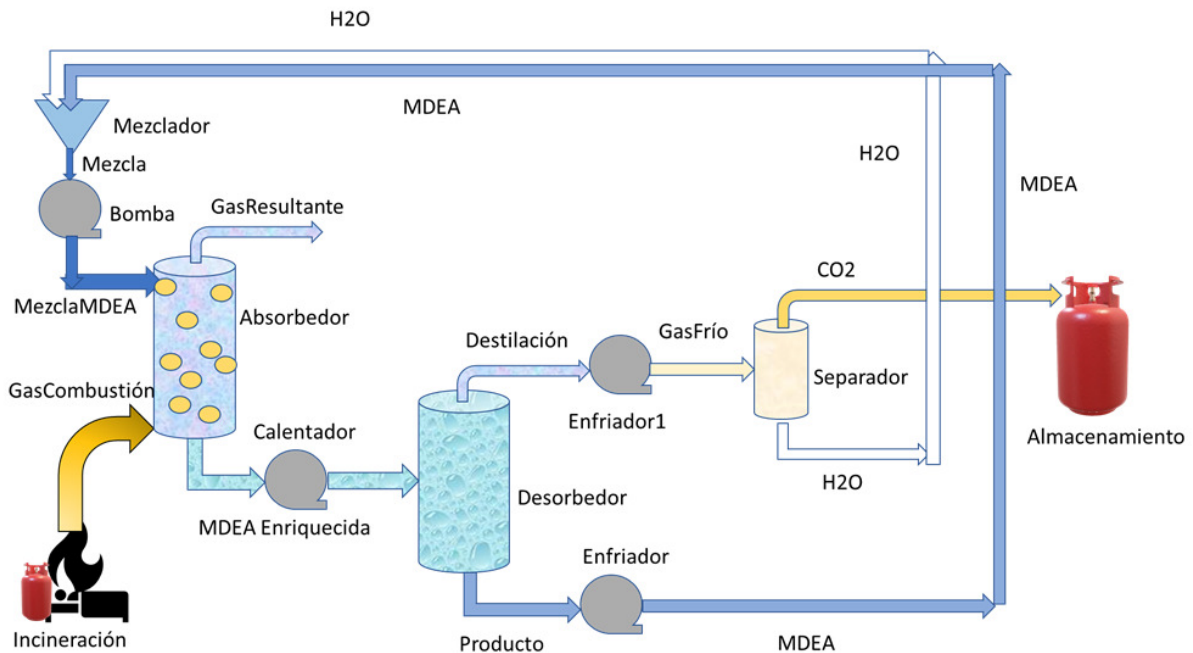


Figura 9: Esquema del Sistema de Captura de CO_2 .

- Se realiza la selección del Modelo Termodinámico y la Configuración Básica del Flujo de gases.

Para modelar el comportamiento de la solución MDEA, se utiliza el modelo termodinámico Electrolyte-NRTL (Non-Random Two-Liquid), que es adecuado para sistemas que contienen disolventes acuosos como el MDEA, ya que considera tanto la interacción entre iones como los efectos de las especies químicas en la fase líquida.

En la simulación, el flujo de gases de escape se utiliza a una temperatura adecuada para la absorción ($60^{\circ}C$) antes de ser introducido en la columna de absorción.

En los procesos de captura de CO_2 mediante absorción química con MDEA, el stripper o columna de desorción es la unidad clave para regenerar el solvente cargado con CO_2 , liberando el gas para su posterior manejo y permitiendo que el solvente sea reutilizado en el absorbedor. Este proceso es fundamental para el ciclo cerrado del solvente y la viabilidad energética y económica del sistema.

La estructura del modelo, como se muestra en la Figura 9, se divide en los siguientes bloques principales:

1. Entrada de gases de escape a la columna de Absorción (GasCombustión): El modelo de gases de escape se modela con una corriente que contenga CO_2 , O_2 , N_2 , CO , CH_4 y otros compuestos menores. Las características de esta corriente (como flujo volumétrico, composición y temperatura) se toman de datos típicos de un crematorio. Composición típica de los gases de escape: 12 % de CO_2 , 67 % N_2 , 3.1 % O_2 , 10 % H_2O y trazas de otros gases. Temperatura de entrada: $900-1000^{\circ}C$. Presión de entrada: 1 atmósfera (suponiendo que el proceso de cremación ocurre a presión atmosférica).
2. Entrada de la solución acuosa compuesta de MDEA y H_2O (MezclaMDEA). La solución acuosa MDEA- H_2O , en sus concentraciones, es introducida en la columna de absorción para capturar el CO_2 al entrar en contacto con el flujo de gases. Concentración de MDEA: 30 %. Temperatura de la solución: $60^{\circ}C$.
3. Columna de Absorción (Absorbedor): La columna de absorción se modela como una torre de absorción, en la cual se especifica el flujo de la solución de MDEA y su concentración. El modelo incluye la transferencia de masa entre la fase gas y la fase líquida (modelo matemático o computacional de la columna de absorción considera el proceso físico por el cual el CO_2 (que está en la fase gaseosa) pasa o se disuelve dentro de la solución líquida de MDEA), considerando las condiciones operativas del proceso. Se asume una eficiencia de transferencia de masa alta (90 %) para la absorción de CO_2 en la solución de MDEA. Número de etapas de la columna y la altura se estima de 40 etapas para obtener una captura eficiente de CO_2 .
4. Salida de CO_2 capturado con MDEA (MDEAEnriquecida) La sustancia acuosa, cargada del CO_2 capturado, es extraída de la columna de absorción, con

los compuestos derivados de la reacción.

5. Salida de Gases resultantes (GASResultante) El gas resultante es liberado a la atmósfera con pequeñas cantidades de CO₂ residual.
6. Rehervidor (Calentador): Proporciona el calor necesario para generar vapor en la base de la columna, que asciende y desorbe el CO₂ químicamente ligado al solvente. Este vapor también ayuda a desplazar el equilibrio químico hacia la liberación del CO₂.
7. Desorbedor o Stripper (Desorbedor) La solución rica en CO₂ (solvente cargado) proveniente del absorbedor es bombeada hacia el stripper, pasando primero por un intercambiador de calor donde se precalienta usando la energía térmica de la solución pobre que sale del stripper. La temperatura: 100°C, suficiente para romper los enlaces químicos entre el CO₂ y la MDEA. La presión es ligeramente superior a la atmosférica, 2.1bar, para facilitar la desorción sin pérdidas excesivas de solvente. El stripper está dividido en múltiples etapas o bandejas (30) donde se produce el contacto contracorriente entre el solvente descendente y el vapor ascendente, favoreciendo la transferencia de masa y la desorción del CO₂. En la parte superior, el vapor de agua y CO₂ se condensa parcialmente para eliminar el agua y aumentar la pureza del CO₂ liberado. El agua condensada retorna como reflujo para mejorar el proceso. Corriente superior (DESTILAC/ GASFRIO) donde el CO₂ es liberado junto con vapor de agua, que tras condensación se obtiene CO₂ con purezas entre 95- 99%. Corriente inferior (Producto/ MDEA): solvente regenerado (pobre en CO₂), enfriado y enviado de nuevo al absorbedor para continuar el ciclo.

Funcionamiento y Resultados Clave

En la desorción química, el MDEA libera el CO₂ debido al aumento de temperatura y la reducción de presión parcial de CO₂ en la fase vapor, rompiendo los enlaces carbamato o bicarbonato formados en el absorbedor.

Como eficiencia energética, se tienen que el consumo de energía en el rehervidor es el principal costo operativo, ya que se requiere vapor para mantener la desorción y regeneración del solvente.

En la pureza del CO₂ se tiene que el CO₂ obtenido en la corriente superior del stripper suele tener una pureza superior al 95 %, adecuado para compresión y almacenamiento o uso industrial.

Como recuperación del solvente, se tiene que el solvente regenerado contiene una mínima concentración de CO₂, asegurando un ciclo eficiente y continuo sin saturación del solvente.

Como balance térmico y material, el intercambio de calor entre la solución rica y pobre optimiza el consumo energético, reduciendo la carga térmica en el rehervidor.

La importancia del reflujo esta en que el reflujo en la parte superior mejora la separación y pureza del CO_2 , además de ayudar a controlar la temperatura y composición del vapor ascendente.

El stripper es una columna de desorción donde la MDEA cargada con CO_2 se regenera mediante calentamiento y reducción de presión parcial, liberando CO_2 puro y solvente listo para reutilizar. El proceso implica un balance cuidadoso entre temperatura, presión, número de etapas y consumo energético para mejorar los resultados y minimizar costos operativos. La regeneración continua evita la saturación del solvente y permite un ciclo cerrado efectivo para la captura de CO_2 en procesos postcombustión.

La Sección 5, que se presenta a continuación, define los escenarios y las características de diseño del sistema para la simulación.

5. DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CAPTURA DE CO₂

Se documenta el modelado del proceso de absorción y desorción en el software Aspen Plus, configurando parámetros como temperatura, presión, concentración de solvente, número de etapas y tiempos de contacto. Se presentan los resultados de las simulaciones con ajustes en variables para mejorar la eficiencia del sistema. Se incluyen esquemas y análisis detallados del comportamiento interno de las columnas, flujos de masa, transferencia de masa y perfiles térmicos, validando la eficiencia del sistema de manera integral.

5.1. Modelado del proceso en Aspen Plus

El proceso de absorción se modela utilizando el software Aspen Plus, seleccionando las propiedades termodinámicas adecuadas para MDEA y CO₂. Se utiliza una columna de absorción como unidad de operación para simular el contacto entre los gases de combustión y el absorbente MDEA dónde ocurre la reacción química.

El proceso de desorción complementa y cierra el ciclo de captura de CO₂ modelado en Aspen Plus, partiendo de la solución rica en CO₂ obtenida en la columna de absorción. En la simulación, la columna de desorción se configura para representar el contacto entre la solución rica de MDEA y el vapor, donde el CO₂ se libera por desorción térmica. La combinación adecuada de temperatura y presión en esta unidad es fundamental para facilitar la separación del gas y la regeneración del solvente.

Partiendo de una composición de gases, luego de la combustión, de CO₂ al 12 %, O₂ al 3.1 %, N₂ al 67 %, vapor de H₂O al 10 %, CO al 0.4 %, CH₄ al 0.5 %; NO_x, SO_x y partículas, un flujo de 912.5 kg/h a una temperatura (T) de 60°C, presión (P) de 1.1 atm de entrada en el absorbedor. La entrada de mezcla de MDEA-H₂O se simula en un 30 % y 70 % respectivamente con iguales valores de temperatura (60°C) y presión para un caudal de 2737.5 kg/h.

Es decir, el sistema de ventilación puede proporcionar un flujo máximo de salida de gases de 912.5 kg por hora, compuesto por igual parte aire y gases de combustión.

Este dato es clave para dimensionar el sistema de extracción, tratamiento y monitoreo de emisiones. Un resumen de los datos del funcionamiento de la columna de absorción así como de algunos parámetros claves de operación calculados por Aspen, se muestran en la Figura 10.

La Figura 10 presenta un resumen de los parámetros internos de la columna de absorción empacada, utilizados para evaluar su desempeño hidráulico y operativo dentro del sistema de captura de CO₂. La columna analizada comprende desde la etapa 2 hasta la etapa 39, con una altura total de sección de 9 m, lo que indica un diseño orientado a proporcionar un tiempo de contacto gas-líquido suficiente para favorecer la transferencia

ABSORBED Column Internals INT-1 Sections CS-1 - Results		
Summary By Stage Messages		
Property	value	units
Section starting stage	2	
Section ending stage	39	
Calculation Mode	Sizing	
Column diameter	0.35	meter
Packed height per stage	0.236842	meter
Section height	9	meter
Maximum % capacity (constant L/V)	185.57	
Maximum % capacity (constant L)	224.373	
Maximum capacity factor (Cs)	0.27296	m/sec
Section pressure drop	18173.1	bar
Average pressure drop / Height	2.05905e+07	mm-water/m
Average pressure drop / Height (Frictional)	2.05905e+07	mm-water/m
Maximum stage liquid holdup	0.00201639	cum
Maximum liquid superficial velocity	84.9907	cum/hr/sqm
Maximum Fs	0.0271488	sqrt(atm)
Maximum % approach to system limit	126.562	

Figura 10: Configuración de la columna de Absorción.

de masa del CO_2 hacia el solvente.

El diámetro de la columna es de 0.35 m, con una altura de empaque por etapa de aproximadamente 0.237 m, parámetros que influyen directamente en el área interfacial disponible y en la eficiencia de absorción. La figura también muestra la capacidad máxima de operación, alcanzando valores cercanos al 185 % para operación a relación L/V constante y hasta 224 % para operación a flujo líquido constante, lo que sugiere que la columna opera con un margen amplio respecto a condiciones de inundación, garantizando estabilidad hidráulica durante la absorción de CO_2 .

Desde el punto de vista hidráulico, la caída de presión total de la sección se reporta del orden de 18 173 bar, mientras que la caída de presión promedio por unidad de altura se expresa en términos de mm de columna de agua por metro de empaque. Estos valores indican una resistencia moderada al flujo, compatible con la operación de columnas empacadas utilizadas en procesos de captura de CO_2 . Asimismo, el holdup máximo de líquido es bajo, lo que refleja una adecuada distribución del solvente y reduce el riesgo de canalización o acumulación excesiva de líquido dentro del empaque.

Finalmente, los parámetros asociados a la velocidad superficial máxima del líquido y al factor F confirman que la columna opera dentro de límites seguros, manteniéndose por debajo del límite del sistema con un margen superior al 100 %. Este comportamiento es especialmente relevante en sistemas que emplean MDEA, ya que la menor cinética de reacción de esta amina terciaria requiere una operación hidráulicamente estable y bien

distribuida para maximizar el contacto gas-líquido y compensar la velocidad de absorción más lenta.

La columna de desorción opera a temperaturas más elevadas, 100°C en el rebosadero, promoviendo la ruptura de las uniones químicas entre el CO_2 y el MDEA. Asimismo, la presión en la columna es de 2.1 bar con una caída de 0.2 bar, se mantiene ligeramente por debajo o cercana a la atmosférica, para favorecer la transferencia del CO_2 a la fase de vapor sin pérdidas excesivas de solvente. Un resumen de los parámetros, dados por Aspen, se muestran en la Figura 11. La alimentación de la solución rica se introduce en una etapa intermedia, permitiendo el contacto contracorriente con los vapores ascendentes y optimizando la liberación del CO_2 .

Main Flowsheet x DESORBED Column Internals INT-1 Sections x DESORBED Column Internals			
Summary By Stage Messages			
	property	value	units
▶	Section starting stage	2	
▶	Section ending stage	29	
▶	Calculation Mode	Sizing	
▶	Column diameter	0.5	meter
▶	Packed height per stage	0.321429	meter
▶	Section height	9	meter
▶	Maximum % capacity (constant L/V)	71.4008	
▶	Maximum % capacity (constant L)	66.5441	
▶	Maximum capacity factor (Cs)	0.0684506	m/sec
▶	Section pressure drop	0.0227773	bar
▶	Average pressure drop / Height	25.8071	mm-water/m
▶	Average pressure drop / Height (Frictional)	24.55	mm-water/m
▶	Maximum stage liquid holdup	0.00274636	cum
▶	Maximum liquid superficial velocity	17.5658	cum/hr/sqm
▶	Maximum Fs	0.00661978	sqrt(atm)
▶	Maximum % approach to system limit	32.6167	

Figura 11: Configuración de la columna de Desorción.

El diseño específico de la columna de desorción incluye un número adecuado de 30 etapas de equilibrio, donde se modelan los fenómenos de transferencia de masa, reacción y termodinámica, considerando las propiedades físico-químicas del sistema MDEA- CO_2 -agua. Durante el proceso, se generan perfiles térmicos donde la temperatura alcanza un pico cerca del rebosadero debido al calor necesario para la desorción, mientras que hacia la parte superior la temperatura tiende a disminuir conforme el CO_2 es liberado.

Además de las condiciones térmicas y de presión, Aspen Plus proporciona información sobre el desempeño interno de la columna de desorción. En primer lugar, el diámetro de 0.5 m y la altura útil de 9 m indican una columna con capacidad suficiente para permitir el contacto adecuado entre la solución rica y el vapor generado en el rehervidor. El empaque

considerado presenta una altura por etapa cercana a 0.32 m, lo que da lugar a un número adecuado de zonas de contacto para favorecer la remoción del CO₂.

Los valores de capacidad se mantienen por debajo del límite operativo, lo que sugiere que la columna trabaja en una zona estable, sin riesgo de inundación.

La caída de presión por sección es baja (≈ 0.022 bar), lo cual es importante en desorción, ya que evita pérdidas innecesarias de energía y contribuye a mantener el equilibrio adecuado para liberar el CO₂. El holdup de líquido es reducido, lo que refleja que el empaque permite un buen drenaje del solvente caliente, condición necesaria para favorecer la transferencia del CO₂ hacia la fase de vapor.

Finalmente, la velocidad superficial del líquido y el factor de capacidad (Cs) se encuentran dentro de rangos típicos para columnas empacadas con aminas, lo que indica que la columna opera de manera uniforme, con una distribución estable del solvente en cada etapa. En conjunto, estos parámetros confirman que la configuración seleccionada es adecuada para la regeneración de la MDEA y la liberación eficiente del CO₂ absorbido.

La solución pobre en CO₂, regenerada y lista para ser recirculada a la columna de absorción, se extrae desde la base de la columna de desorción. Esta solución mantiene propiedades que garantizan la máxima capacidad de absorción en el siguiente ciclo. Paralelamente, el gas desorbido que sale por la parte superior contiene una alta concentración de CO₂, cercana a la pureza requerida para su compresión y almacenamiento.

El modelado de esta columna de desorción en Aspen Plus, permite evaluar el rendimiento global de regeneración del solvente y la mejora en la liberación de CO₂, considerando variables operativas como la temperatura, presión, caudales y número de etapas. Así, el sistema simulado reproduce el proceso real, proporcionando información valiosa para el diseño, optimización y eventual implementación industrial del sistema de captura con MDEA.

Los flujos de gas y absorbente se simulan en función de las propiedades termodinámicas, la velocidad de flujo y las concentraciones de CO₂.

La Figura 12 presenta el diagrama de proceso generado en Aspen Plus para la captura química de CO₂ utilizando una solución de MDEA. El esquema integra las principales operaciones del sistema: absorción, desorción, enfriamiento, bombeo y separación de fases.

En la parte izquierda del diagrama se introduce la corriente gaseosa rica en CO₂, la cual entra a la columna de absorción (ABSORBED). Paralelamente, la solución de solvente (MDEA+agua) se alimenta por la parte superior de la columna, estableciendo un contacto contracorriente entre ambas fases. En esta etapa ocurre la absorción del CO₂, dando lugar a la solución rica (MDEACO₂) que sale por la parte inferior.

La solución rica se envía posteriormente a un intercambiador de calor (CALENTAD), donde incrementa su temperatura antes de ingresar a la columna de desorción (DESORBED). En esta unidad se aplica calor adicional mediante un rehervidor (MDEAENRC), favoreciendo la ruptura de las especies químicamente combinadas y liberando el CO₂. El

gas desorbido atraviesa un sistema de enfriamiento (ENFRIAD1 y GASFRIO) y posteriormente pasa al separador (SEPARAD), donde se obtiene el CO_2 como producto.

La solución pobre regenerada se enfría en un segundo intercambiador (ENFRIAD2) y finalmente se recircula hacia la columna de absorción para reiniciar el ciclo. El solvente fresco (MDEA y agua) se alimenta desde la parte superior del sistema para compensar pérdidas y mantener la composición requerida.

En conjunto, el esquema representa el circuito completo de captura-regeneración, mostrando las interacciones térmicas, los puntos de alimentación, las etapas de separación y las corrientes clave necesarias para evaluar el desempeño del proceso en la simulación.

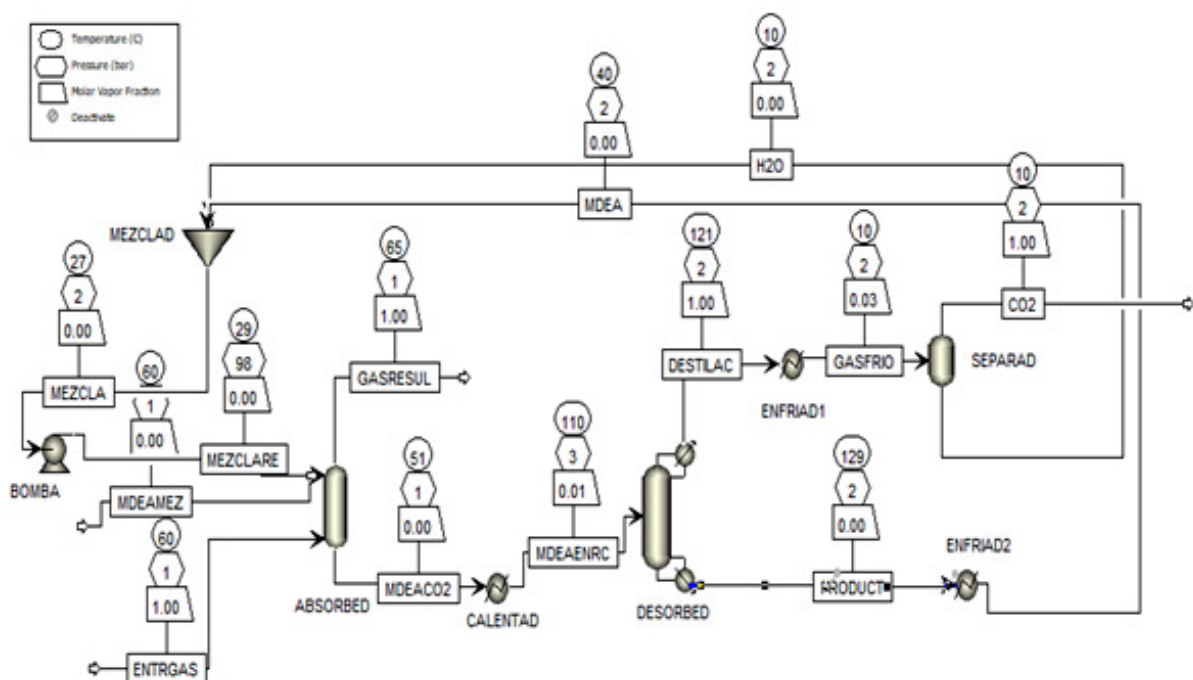


Figura 12: Esquema del Sistema de Captura de CO_2 en Aspen Plus.

5.2. Limitantes del sistema y modelo

- En el modelo, se asume una composición de gases de escape estándar basada en datos promedio. Sin embargo, en la práctica, las emisiones de crematorios pueden variar dependiendo de diversos factores, lo que podría afectar la precisión del modelo.
- El modelo asume que las propiedades termodinámicas del MDEA son constantes, lo cual puede no ser del todo preciso a lo largo del tiempo debido a la posible degradación de la amina al regenerarse o la variabilidad de las condiciones de operación.
- Los contaminantes presentes en los gases de escape (como NO_x , SO_x y otros compuestos) no fueron modelados detalladamente, aunque podrían afectar la eficiencia de la absorción y la regeneración de la amina.

- Estos resultados proporcionan una visión clara sobre la efectividad de la captura de CO_2 en crematorios usando MDEA, subrayando tanto las ventajas como las áreas de mejora del sistema.
- El uso de MDEA permite una alta capacidad de absorción y una menor corrosión en las instalaciones en comparación con otros solventes. Además, es más eficiente y menos costoso a largo plazo.
- Los modelos simplificados pueden no captar efectos dinámicos o fenómenos complejos (degradación del solvente).
- Escasez de datos experimentales específicos para condiciones particulares puede limitar la generalización.

En la Sección 6, que continua, se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones y se realiza un estudio comparativo entre cada escenario para determinar el sistema más efectivo y factible.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se analizan los resultados obtenidos, destacando la eficiencia en captura de CO_2 y la pureza en la corriente de gas desorbido. Se comparan datos con literatura científica y se discuten ventajas, desventajas, limitaciones del sistema, así como el cumplimiento de objetivos y respuesta a las preguntas planteadas.

6.1. Simulaciones realizadas

Para analizar el mejor funcionamiento del sistema, se realizan varias simulaciones en Aspen Plus, con iguales flujos de gas y mezcla, y diferentes configuraciones, tanto en temperatura (T), tiempo de contacto y etapas.

Condiciones Establecidas para Cada Simulación

Las simulaciones en Aspen Plus mantienen flujos de gas y mezcla constantes, variando tres parámetros clave: tiempo de interacción (5 o 10 s), temperatura (50, 60 o 70°C) y número de etapas (5, 10 o 40). Las 10 configuraciones son:

- Sim 1-2: 60°C , 5 etapas; 1 a 5 s, 2 a 10 s.
- Sim 3-4: 60°C , 10 etapas; 3 a 5 s, 4 a 10 s.
- Sim 5-6: 10 s, 40 etapas; 5 a 70°C , 6 a 50°C .
- Sim 7-8: 5 s, 40 etapas; 7 a 50°C , 8 a 70°C .
- Sim 9-10: 60°C , 40 etapas; 9 a 5 s, 10 a 10 s.

Objetivo de las Simulaciones

Éstas simulaciones permiten evaluar como influyen la temperatura, tiempo de contacto y cantidad de etapas en la eficiencia de captura de CO_2 en un absorbedor, identificando las mejores condiciones para maximizar la remoción mediante bicarbonato (HCO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-}) con solvente MDEA.

Resultados de las Simulaciones

Los resultados obtenidos, con diferentes eficiencias de captura, se muestran en el Cuadro 15.

La Figura 13 corresponde a la Simulación 1 y resume, la forma en que se definieron las condiciones de operación en Aspen Plus para el absorbedor, así como los principales resultados obtenidos.

En el inciso (a) se muestra la configuración de la corriente de entrada de gas. En esta simulación se fija la condición termodinámica de alimentación (temperatura (60°C) y presión) y el flujo total de la corriente gaseosa, además de su composición mediante

Cuadro 15: Resultado de 10 simulaciones de captura de CO₂.

Simulaciones	Tiempo interacción (s)	T (°C)	Etapas	CO ₂ capturado (HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ²⁻)(kg/h)	CO ₂ no capturado	Eficiencia (%)
1	5	60	5	0.03242	0.04665	41.0
2	10	60	5	0.03529	0.04313	45.0
3	5	60	10	0.02784	0.05170	35.0
4	10	60	10	0.02844	0.05056	36.0
5	10	70	40	0.10596	0.01404	88.3
6	10	50	40	0.10818	0.01181	90.0
7	5	50	40	0.10667	0.01333	88.9
8	5	70	40	0.10491	0.01509	87.4
9	5	60	40	0.07589	0.00339	95.7
10	10	60	40	0.07922	0.00006	99.9

fracciones másicas. Esta definición es relevante porque establece la carga de CO₂ disponible para ser removida y la presencia de otras especies que pueden afectar el equilibrio gas-líquido, así como el comportamiento hidráulico dentro de la columna.

El inciso (b) presenta la mezcla absorbente MDEA-H₂O utilizada como solvente. Aquí se especifican las condiciones de operación (temperatura y presión) y el flujo total de la corriente líquida, además de la proporción de agua y MDEA. Este punto es importante porque la relación solvente/gas y la concentración de amina influyen directamente en la capacidad de absorción: un caudal bajo o una composición poco favorable puede limitar la cantidad de CO₂ que puede transferirse a la fase líquida durante el contacto.

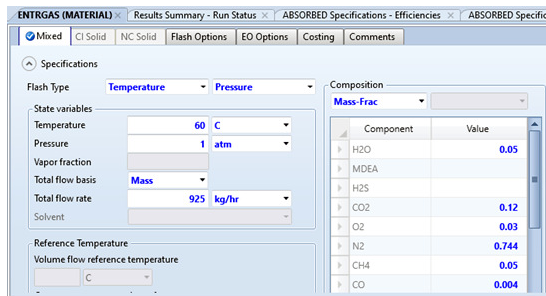
En el inciso (c) se configura el tiempo de interacción (tiempo de residencia) asociado a la columna. En la simulación se establecen valores para el tiempo de contacto a lo largo de las etapas consideradas. Este parámetro representa, el tiempo disponible para que ocurra la transferencia de masa y la reacción en la fase líquida. Un tiempo de contacto reducido puede reflejarse en una captura limitada, aun cuando exista solvente disponible, ya que el sistema no alcanza a acercarse al equilibrio en cada sección.

El inciso (d) corresponde a la configuración del número de etapas de equilibrio del absorbedor. En esta simulación se emplean 5 etapas, lo cual implica una zona de contacto relativamente corta. Este ajuste es determinante porque el número de etapas representa la “longitud efectiva” del proceso de absorción: a menor número de etapas, menor área de contacto y menor oportunidad de que el CO₂ sea transferido y retenido en el solvente.

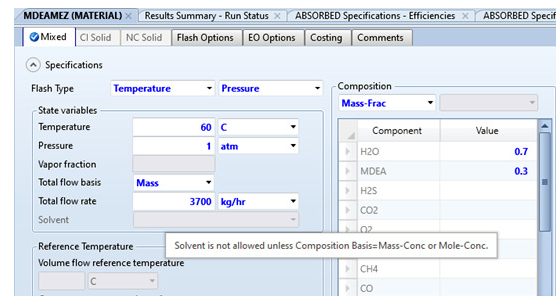
Finalmente, el inciso (e) muestra una tabla de resultados globales de la simulación, donde se observa la distribución de especies entre corrientes de salida. En particular, se aprecia que una fracción importante del CO₂ permanece en la corriente gaseosa de salida (gas residual), mientras que la fracción capturada en la solución rica se refleja en la formación de especies asociadas a la captura en fase líquida. En conjunto, estos

resultados se traducen en una eficiencia de captura de 41 %, lo cual es consistente con la configuración de esta primera simulación: un número reducido de etapas y un tiempo de contacto limitado restringen el grado de remoción alcanzable.

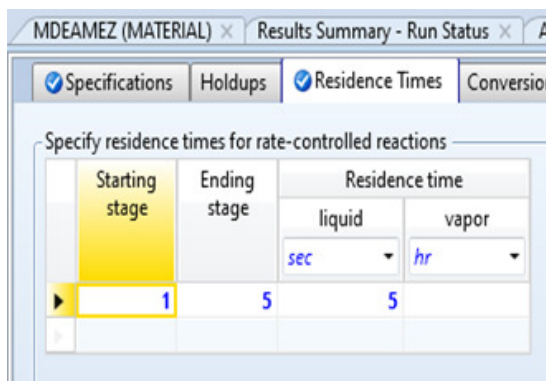
En conclusión, la Simulación 1 permite establecer una línea base del comportamiento del sistema bajo condiciones conservadoras, y evidencia que, para incrementar la captura de CO_2 , será necesario aumentar el grado de contacto gas/líquido mediante ajustes en el número de etapas y/o en el tiempo de interacción, manteniendo constantes los flujos definidos para el caso de estudio.



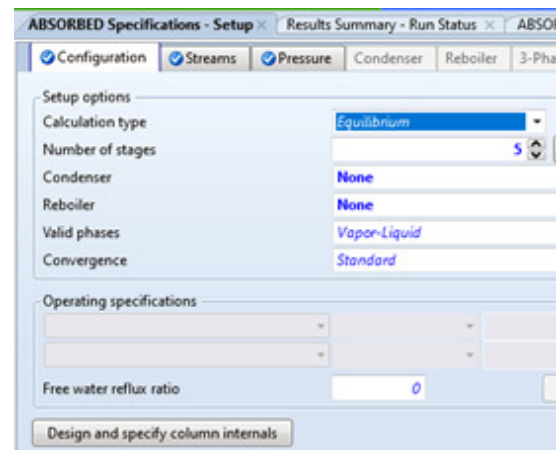
(a) Configuración Entrada de gas.



(b) Configuración mezcla MDEA- H_2O



(c) Configuración del tiempo de iteración.



(d) Configuración cantidad de etapas.

Material	Heat	Load	Vol.% Curves	Wt.% Curves	Petroleum	Polymers	Solids
H2S							
CO2							
O2							
N2							
CH4							
CO							
H2							
HCO3-							
MDEA+							
CO3-2							
HS-							

(e) Resultados de la Simulación.

Figura 13: Configuración y Resultados de la Simulación 1.

La Figura 14 corresponde a la Simulación 2 y resume, la forma en que se definieron las condiciones de operación en Aspen Plus para el absorbedor, así como los principales resultados obtenidos.

En el inciso (a) se muestra la configuración de la corriente de entrada de gas. En esta simulación se fija la condición termodinámica de alimentación (temperatura (60°C) y presión) y el flujo total de la corriente gaseosa, además de su composición mediante fracciones másicas. Esta definición es relevante porque establece la carga de CO_2 disponible para ser removida y la presencia de otras especies que pueden afectar el equilibrio gas-líquido, así como el comportamiento hidráulico dentro de la columna.

El inciso (b) presenta la mezcla absorbente MDEA- H_2O utilizada como solvente. Aquí se especifican las condiciones de operación (temperatura y presión) y el flujo total de la corriente líquida, además de la proporción de agua y MDEA. Este punto es importante porque la relación solvente/gas y la concentración de amina influyen directamente en la capacidad de absorción: un caudal bajo o una composición poco favorable puede limitar la cantidad de CO_2 que puede transferirse a la fase líquida durante el contacto.

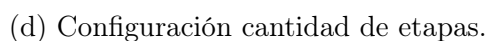
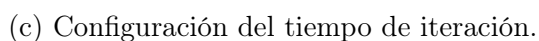
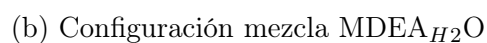
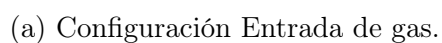
En el inciso (c) se configura el tiempo de interacción (tiempo de residencia) asociado a la columna. En la simulación se establecen valores para el tiempo de contacto a lo largo de las etapas consideradas. Este parámetro representa, el tiempo disponible para que ocurra la transferencia de masa y la reacción en la fase líquida. Un tiempo de contacto reducido puede reflejarse en una captura limitada, aun cuando exista solvente disponible, ya que el sistema no alcanza a acercarse al equilibrio en cada sección.

El inciso (d) corresponde a la configuración del número de etapas de equilibrio del absorbedor. En esta simulación se emplean 5 etapas, lo cual implica una zona de contacto relativamente corta. Este ajuste es determinante porque el número de etapas representa la “longitud efectiva” del proceso de absorción: a menor número de etapas, menor área de contacto y menor oportunidad de que el CO_2 sea transferido y retenido en el solvente.

Finalmente, el inciso (e) muestra una tabla de resultados globales de la simulación, donde se observa la distribución de especies entre corrientes de salida. En particular, se aprecia que una fracción importante del CO_2 permanece en la corriente gaseosa de salida (gas residual), mientras que la fracción capturada en la solución rica se refleja en la formación de especies asociadas a la captura en fase líquida. En conjunto, estos resultados se traducen en una eficiencia de captura de 45 %, lo cual es consistente con la configuración de esta segunda simulación: un número reducido de etapas y un tiempo de contacto limitado restringen el grado de remoción alcanzable.

En conclusión, la Simulación 2, de igual manera, permite establecer una línea base del comportamiento del sistema bajo condiciones conservadoras, y evidencia que, para incrementar la captura de CO_2 , será necesario aumentar el grado de contacto gas/líquido mediante ajustes en el número de etapas y/o en el tiempo de interacción, manteniendo constantes los flujos definidos para el caso de estudio.

La Figura 15 corresponde a la Simulación 3 y resume, la forma en que se definieron las condiciones de operación en Aspen Plus para el absorbedor, así como los principales resultados obtenidos.



(e) Resultados de la Simulación.

Figura 14: Configuración y Resultados de la Simulación 2.

En el inciso (a) se muestra la configuración de la corriente de entrada de gas. En esta simulación se fija la condición termodinámica de alimentación (temperatura (60°C) y presión) y el flujo total de la corriente gaseosa, además de su composición mediante fracciones másicas. Esta definición es relevante porque establece la carga de CO_2 disponible para ser removida y la presencia de otras especies que pueden afectar el equilibrio gas-líquido, así como el comportamiento hidráulico dentro de la columna.

El inciso (b) presenta la mezcla absorbente MDEA- H_2O utilizada como solvente. Aquí se especifican las condiciones de operación (temperatura y presión) y el flujo total de la corriente líquida, además de la proporción de agua y MDEA. Este punto es importante porque la relación solvente/gas y la concentración de amina influyen directamente en la capacidad de absorción: un caudal bajo o una composición poco favorable puede limitar la cantidad de CO_2 que puede transferirse a la fase líquida durante el contacto.

En el inciso (c) se configura el tiempo de interacción (tiempo de residencia) asociado a la columna. En la simulación se establecen valores para el tiempo de contacto a lo largo de las etapas consideradas. Este parámetro representa, el tiempo disponible para que ocurra la transferencia de masa y la reacción en la fase líquida. Un tiempo de contacto reducido puede reflejarse en una captura limitada, aun cuando exista solvente disponible, ya que el sistema no alcanza a acercarse al equilibrio en cada sección.

El inciso (d) corresponde a la configuración del número de etapas de equilibrio del absorbedor. En esta simulación se emplean 10 etapas, lo cual implica una zona de contacto corta. Este ajuste es determinante porque el número de etapas representa la “longitud efectiva” del proceso de absorción: a menor número de etapas, menor área de contacto y menor oportunidad de que el CO_2 sea transferido y retenido en el solvente.

Finalmente, el inciso (e) muestra una tabla de resultados globales de la simulación, donde se observa la distribución de especies entre corrientes de salida. En particular, se aprecia que una fracción importante del CO_2 permanece en la corriente gaseosa de salida (gas residual), mientras que la fracción capturada en la solución rica se refleja en la formación de especies asociadas a la captura en fase líquida. En conjunto, estos resultados se traducen en la menor eficiencia de captura de 35 %, lo cual es consistente con la configuración de esta tercera simulación: un número reducido de etapas y un tiempo de contacto limitado restringen el grado de remoción alcanzable.

En conclusión, la Simulación 3, de igual manera que las anteriores, permite establecer una línea base del comportamiento del sistema bajo condiciones conservadoras, y evidencia que, para incrementar la captura de CO_2 , será necesario aumentar el grado de contacto gas/líquido mediante ajustes en el número de etapas y/o en el tiempo de interacción, manteniendo constantes los flujos definidos para el caso de estudio.

La Figura 16 corresponde a la Simulación 4 y resume, la forma en que se definieron las condiciones de operación en Aspen Plus para el absorbedor, así como los principales resultados obtenidos.

State variables

Temperature: 60 C

Pressure: 1 atm

Vapor fraction: Mass

Total flow basis: Mass

Total flow rate: 925 kg/hr

Solvent: H2O

Reference Temperature: C

Volume flow reference temperature: C

Component concentration reference temperature: C

Component	Value
H2O	0.05
MDEA	0.12
H2S	0.03
CO2	0.744
O2	0.05
N2	0.004
CH4	0.002
CO	
H2	

(a) Configuración Entrada de gas.

State variables

Temperature: 60 C

Pressure: 1 atm

Vapor fraction: Mass

Total flow basis: Mass

Total flow rate: 3700 kg/hr

Solvent: H2O

Reference Temperature: C

Volume flow reference temperature: C

Component concentration reference temperature: C

Component	Value
H2O	0.7
MDEA	0.3
H2S	
CO2	
O2	
N2	
CH4	
CO	

(b) Configuración mezcla MDEA_H2O

Specify residence times for rate-controlled reactions

Starting stage	Ending stage	Residence time	
		liquid (sec)	vapor (hr)
1	10	10	

(c) Configuración del tiempo de iteración.

Setup options

Calculation type: Equilibrium

Number of stages: 10

Condenser: None

Reboiler: None

Valid phases: Vapor-Liquid

Convergence: Standard

Operating specifications

Free water reflux ratio: 0

(d) Configuración cantidad de etapas.

Material	Heat	Load	Vol.% Curves	Wt.% Curves	Petroleum	Polymers	Solids
H2S							
CO2							
O2							
N2							
CH4							
CO							
H2							
HCO3-							
MDEA+							
CO3-2							
HS-							

(e) Resultados de la Simulación.

Figura 15: Configuración y Resultados de la Simulación 3.

En el inciso (a) se muestra la configuración de la corriente de entrada de gas. En esta simulación se fija la condición termodinámica de alimentación (temperatura (60°C) y presión) y el flujo total de la corriente gaseosa, además de su composición mediante fracciones másicas. Esta definición es relevante porque establece la carga de CO_2 disponible para ser removida y la presencia de otras especies que pueden afectar el equilibrio gas-líquido, así como el comportamiento hidráulico dentro de la columna.

El inciso (b) presenta la mezcla absorbente MDEA- H_2O utilizada como solvente. Aquí se especifican las condiciones de operación (temperatura y presión) y el flujo total de la corriente líquida, además de la proporción de agua y MDEA. Este punto es importante porque la relación solvente/gas y la concentración de amina influyen directamente en la capacidad de absorción: un caudal bajo o una composición poco favorable puede limitar la cantidad de CO_2 que puede transferirse a la fase líquida durante el contacto.

En el inciso (c) se configura el tiempo de interacción (tiempo de residencia) asociado a la columna. En la simulación se establecen valores para el tiempo de contacto a lo largo de las etapas consideradas. Este parámetro representa, el tiempo disponible para que ocurra la transferencia de masa y la reacción en la fase líquida. Un tiempo de contacto reducido puede reflejarse en una captura limitada, aun cuando exista solvente disponible, ya que el sistema no alcanza a acercarse al equilibrio en cada sección.

El inciso (d) corresponde a la configuración del número de etapas de equilibrio del absorbedor. En esta simulación se emplean 10 etapas, lo cual implica una zona de contacto corta. Este ajuste es determinante porque el número de etapas representa la “longitud efectiva” del proceso de absorción: a menor número de etapas, menor área de contacto y menor oportunidad de que el CO_2 sea transferido y retenido en el solvente.

Finalmente, el inciso (e) muestra una tabla de resultados globales de la simulación, donde se observa la distribución de especies entre corrientes de salida. En particular, se aprecia que una fracción importante del CO_2 permanece en la corriente gaseosa de salida (gas residual), mientras que la fracción capturada en la solución rica se refleja en la formación de especies asociadas a la captura en fase líquida. En conjunto, estos resultados se traducen en la segunda menor eficiencia de captura de 36 %, lo cual es consistente con la configuración de esta cuarta simulación: un número reducido de etapas y un tiempo de contacto limitado restringen el grado de remoción alcanzable.

En conclusión, la Simulación 4, de igual manera que las anteriores, permite establecer una línea base del comportamiento del sistema bajo condiciones conservadoras, y evidencia que, para incrementar la captura de CO_2 , será necesario aumentar el grado de contacto gas/líquido mediante ajustes en el número de etapas y/o en el tiempo de interacción, manteniendo constantes los flujos definidos para el caso de estudio.

La Figura 17 corresponde a la Simulación 5 y resume, la forma en que se definieron las condiciones de operación en Aspen Plus para el absorbedor, así como los principales resultados obtenidos.

(a) Configuración Entrada de gas.

(b) Configuración mezcla MDEA_H₂O

(c) Configuración del tiempo de iteración.

(d) Configuración cantidad de etapas.

Material	Heat	Load	Vol.% Curves	Wt.% Curves	Petroleum	Polymers	Solids
H2S							
CO2							
O2							
N2							
CH4							
CO							
H2							
HCO3-							
MDEA+							
CO3-2							
HS-							

(e) Resultados de la Simulación.

Figura 16: Configuración y Resultados de la Simulación 4.

En el inciso (a) se muestra la configuración de la corriente de entrada de gas. En esta simulación se fija la condición termodinámica de alimentación (temperatura (70°C) y presión) y el flujo total de la corriente gaseosa, además de su composición mediante fracciones másicas. Esta definición es relevante porque establece la carga de CO_2 disponible para ser removida y la presencia de otras especies que pueden afectar el equilibrio gas-líquido, así como el comportamiento hidráulico dentro de la columna.

El inciso (b) presenta la mezcla absorbente MDEA- H_2O utilizada como solvente. Aquí se especifican las condiciones de operación (temperatura y presión) y el flujo total de la corriente líquida, además de la proporción de agua y MDEA. Este punto es importante porque la relación solvente/gas y la concentración de amina influyen directamente en la capacidad de absorción: un caudal bajo o una composición poco favorable puede limitar la cantidad de CO_2 que puede transferirse a la fase líquida durante el contacto.

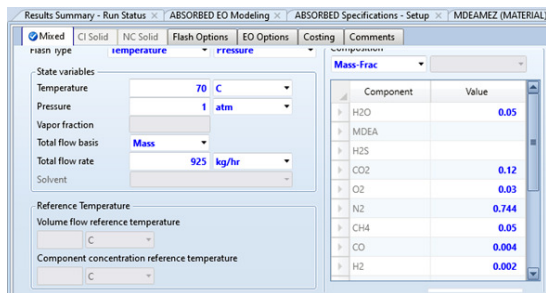
En el inciso (c) se configura el tiempo de interacción (tiempo de residencia) asociado a la columna. En la simulación se establecen valores para el tiempo de contacto a lo largo de las etapas consideradas. Este parámetro representa, el tiempo disponible para que ocurra la transferencia de masa y la reacción en la fase líquida. Un tiempo de contacto reducido puede reflejarse en una captura limitada, aun cuando exista solvente disponible, ya que el sistema no alcanza a acercarse al equilibrio en cada sección.

El inciso (d) corresponde a la configuración del número de etapas de equilibrio del absorbedor. En esta simulación se emplean 40 etapas, lo cual implica una larga zona de contacto. Este ajuste es determinante porque el número de etapas representa la “longitud efectiva” del proceso de absorción: a mayor número de etapas, mayor área de contacto y mayor oportunidad de que el CO_2 sea transferido y retenido en el solvente.

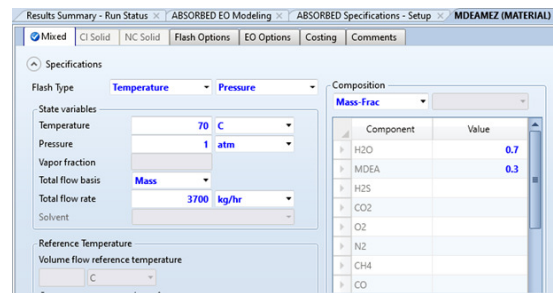
Finalmente, el inciso (e) muestra una tabla de resultados globales de la simulación, donde se observa la distribución de especies entre corrientes de salida. En particular, se aprecia que una fracción no tan importante del CO_2 permanece en la corriente gaseosa de salida (gas residual), mientras que la fracción capturada en la solución rica se refleja en la formación de especies asociadas a la captura en fase líquida. En conjunto, estos resultados se traducen en un aumento en la eficiencia de captura de 88 %, lo cual es consistente con la configuración de esta quinta simulación: un número aumentado de etapas y un tiempo de contacto mayor, aumentan el grado de remoción alcanzable.

En conclusión, la Simulación 5, permite establecer una línea base del comportamiento del sistema bajo condiciones menos conservadoras, y evidencia que, para incrementar la captura de CO_2 , es necesario aumentar el grado de contacto gas/líquido mediante ajustes en el número de etapas y/o en el tiempo de interacción, manteniendo constantes los flujos definidos para el caso de estudio.

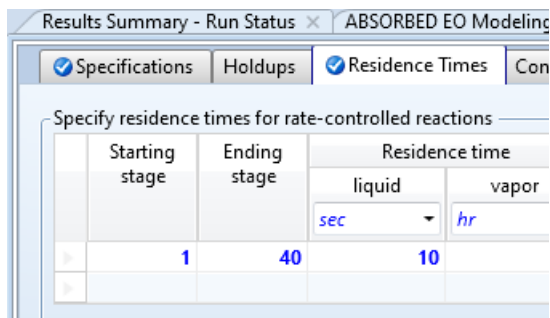
La Figura 18 corresponde a la Simulación 6 y resume, la forma en que se definieron las condiciones de operación en Aspen Plus para el absorbedor, así como los principales resultados obtenidos.



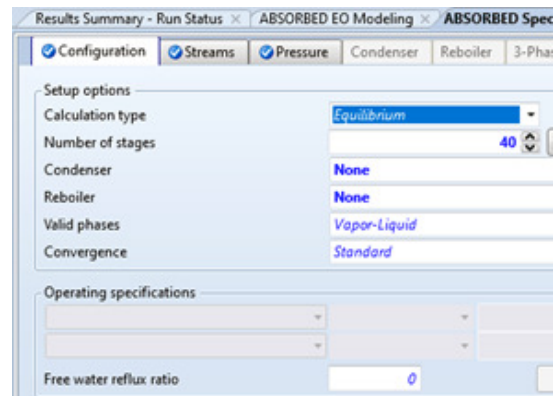
(a) Configuración Entrada de gas.



(b) Configuración mezcla MDEA_H₂O



(c) Configuración del tiempo de iteración.



(d) Configuración cantidad de etapas.

Material	Heat	Load	Vol. % Curves	Wt. % Curves	Petroleum	Polymers	Solids
H2S							
CO2							
O2							
N2							
CH4							
CO							
H2							
HCO3-							
MDEA+							
CO3-2							
HS-							

(e) Resultados de la Simulación.

Figura 17: Configuración y Resultados de la Simulación 5.

En el inciso (a) se muestra la configuración de la corriente de entrada de gas. En esta simulación se fija la condición termodinámica de alimentación (temperatura (50°C) y presión) y el flujo total de la corriente gaseosa, además de su composición mediante fracciones másicas. Esta definición es relevante porque establece la carga de CO_2 disponible para ser removida y la presencia de otras especies que pueden afectar el equilibrio gas-líquido, así como el comportamiento hidráulico dentro de la columna.

El inciso (b) presenta la mezcla absorbente MDEA- H_2O utilizada como solvente. Aquí se especifican las condiciones de operación (temperatura y presión) y el flujo total de la corriente líquida, además de la proporción de agua y MDEA. Este punto es importante porque la relación solvente/gas y la concentración de amina influyen directamente en la capacidad de absorción: un caudal bajo o una composición poco favorable puede limitar la cantidad de CO_2 que puede transferirse a la fase líquida durante el contacto.

En el inciso (c) se configura el tiempo de interacción (tiempo de residencia) asociado a la columna. En la simulación se establecen valores para el tiempo de contacto a lo largo de las etapas consideradas. Este parámetro representa, el tiempo disponible para que ocurra la transferencia de masa y la reacción en la fase líquida. Un tiempo de contacto reducido puede reflejarse en una captura limitada, aun cuando exista solvente disponible, ya que el sistema no alcanza a acercarse al equilibrio en cada sección.

El inciso (d) corresponde a la configuración del número de etapas de equilibrio del absorbedor. En esta simulación se emplean 40 etapas, lo cual implica una larga zona de contacto. Este ajuste es determinante porque el número de etapas representa la “longitud efectiva” del proceso de absorción: a mayor número de etapas, mayor área de contacto y mayor oportunidad de que el CO_2 sea transferido y retenido en el solvente.

Finalmente, el inciso (e) muestra una tabla de resultados globales de la simulación, donde se observa la distribución de especies entre corrientes de salida. En particular, se aprecia que una fracción no tan importante del CO_2 permanece en la corriente gaseosa de salida (gas residual), mientras que la fracción capturada en la solución rica se refleja en la formación de especies asociadas a la captura en fase líquida. En conjunto, estos resultados se traducen en un aumento en la eficiencia de captura de 90 %, lo cual es consistente con la configuración de esta sexta simulación: un número aumentado de etapas y un tiempo de contacto mayor, independientemente de la temperatura, aumentan el grado de remoción alcanzable.

En conclusión, la Simulación 6, permite establecer una línea base del comportamiento del sistema bajo condiciones no tan conservadoras, y evidencia que, para incrementar la captura de CO_2 , es necesario aumentar el grado de contacto gas/líquido mediante ajustes en el número de etapas y/o en el tiempo de interacción, manteniendo constantes los flujos definidos para el caso de estudio.

La Figura 19 corresponde a la Simulación 7 y resume, la forma en que se definieron las condiciones de operación en Aspen Plus para el absorbedor, así como los principales

(a) Configuración Entrada de gas.

(b) Configuración mezcla MDEA_H₂O

(c) Configuración del tiempo de iteración.

(d) Configuración cantidad de etapas.

Material	Heat	Load	Vol % Curves	Wt % Curves	Petroleum	Polymers	Solids	Units	ENTRIGAS	MDEAMEZ	GASRESUL	MDEACO2
H2S									0	0	0	0
CO2									0.12	0	0.0117651	5.03905e-05
O2									0.03	0	0.031193	7.49152e-05
N2									0.744	0	0.778392	0.000727638
CH4									0.05	0	0.0486121	0.000636674
CO									0.004	0	0.00418245	4.48872e-06
H2									0.002	0	0.00210077	1.34534e-11
HCO3-									0	0	0	0.0327281
MDEA+									0	0.000322483	0	0.0820542
CO3-2									0	0	0	0.00439279
HS-									0	0	0	0

(e) Resultados de la Simulación.

Figura 18: Configuración y Resultados de la Simulación 6.

resultados obtenidos.

En el inciso (a) se muestra la configuración de la corriente de entrada de gas. En esta simulación se fija la condición termodinámica de alimentación (temperatura (50°C) y presión) y el flujo total de la corriente gaseosa, además de su composición mediante fracciones másicas. Esta definición es relevante porque establece la carga de CO_2 disponible para ser removida y la presencia de otras especies que pueden afectar el equilibrio gas-líquido, así como el comportamiento hidráulico dentro de la columna.

El inciso (b) presenta la mezcla absorbente MDEA- H_2O utilizada como solvente. Aquí se especifican las condiciones de operación (temperatura y presión) y el flujo total de la corriente líquida, además de la proporción de agua y MDEA. Este punto es importante porque la relación solvente/gas y la concentración de amina influyen directamente en la capacidad de absorción: un caudal bajo o una composición poco favorable puede limitar la cantidad de CO_2 que puede transferirse a la fase líquida durante el contacto.

En el inciso (c) se configura el tiempo de interacción (tiempo de residencia) asociado a la columna. En la simulación se establecen valores para el tiempo de contacto a lo largo de las etapas consideradas. Este parámetro representa, el tiempo disponible para que ocurra la transferencia de masa y la reacción en la fase líquida. Un tiempo de contacto reducido puede reflejarse en una captura limitada, aun cuando exista solvente disponible, ya que el sistema no alcanza a acercarse al equilibrio en cada sección.

El inciso (d) corresponde a la configuración del número de etapas de equilibrio del absorbedor. En esta simulación se emplean 40 etapas, lo cual implica una larga zona de contacto. Este ajuste es determinante porque el número de etapas representa la “longitud efectiva” del proceso de absorción: a mayor número de etapas, mayor área de contacto y mayor oportunidad de que el CO_2 sea transferido y retenido en el solvente.

Finalmente, el inciso (e) muestra una tabla de resultados globales de la simulación, donde se observa la distribución de especies entre corrientes de salida. En particular, se aprecia que una fracción no tan importante del CO_2 permanece en la corriente gaseosa de salida (gas residual), mientras que la fracción capturada en la solución rica se refleja en la formación de especies asociadas a la captura en fase líquida. En conjunto, estos resultados se traducen en una ligera disminución en la eficiencia de captura de 88.9 %, lo cual es consistente con la configuración de esta séptima simulación: un número aumentado de etapas y un tiempo de contacto menor así como disminución en la temperatura, disminuyen el grado de remoción alcanzable.

En conclusión, la Simulación 7, permite establecer una línea base del comportamiento del sistema bajo condiciones no tan conservadoras, y evidencia que, para incrementar la captura de CO_2 , es necesario aumentar el grado de contacto gas/líquido mediante ajustes en el número de etapas y/o en el tiempo de interacción, manteniendo constantes los flujos definidos para el caso de estudio.

La Figura 20 corresponde a la Simulación 8 y resume, la forma en que se definieron

(a) Configuración Entrada de gas.

(b) Configuración mezcla MDEA_H₂O

(c) Configuración del tiempo de iteración.

(d) Configuración cantidad de etapas.

(e) Resultados de la Simulación.

Figura 19: Configuración y Resultados de la Simulación 7.

las condiciones de operación en Aspen Plus para el absorbedor, así como los principales resultados obtenidos.

En el inciso (a) se muestra la configuración de la corriente de entrada de gas. En esta simulación se fija la condición termodinámica de alimentación (temperatura (70°C) y presión) y el flujo total de la corriente gaseosa, además de su composición mediante fracciones másicas. Esta definición es relevante porque establece la carga de CO_2 disponible para ser removida y la presencia de otras especies que pueden afectar el equilibrio gas-líquido, así como el comportamiento hidráulico dentro de la columna.

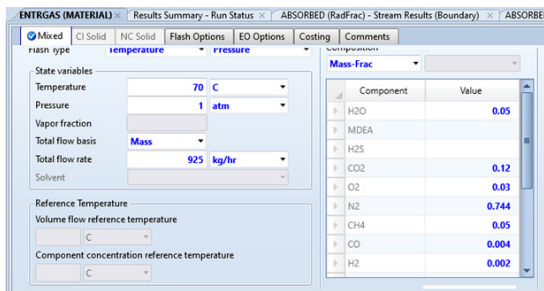
El inciso (b) presenta la mezcla absorbente MDEA- H_2O utilizada como solvente. Aquí se especifican las condiciones de operación (temperatura y presión) y el flujo total de la corriente líquida, además de la proporción de agua y MDEA. Este punto es importante porque la relación solvente/gas y la concentración de amina influyen directamente en la capacidad de absorción: un caudal bajo o una composición poco favorable puede limitar la cantidad de CO_2 que puede transferirse a la fase líquida durante el contacto.

En el inciso (c) se configura el tiempo de interacción (tiempo de residencia) asociado a la columna. En la simulación se establecen valores para el tiempo de contacto a lo largo de las etapas consideradas. Este parámetro representa, el tiempo disponible para que ocurra la transferencia de masa y la reacción en la fase líquida. Un tiempo de contacto reducido puede reflejarse en una captura limitada, aun cuando exista solvente disponible, ya que el sistema no alcanza a acercarse al equilibrio en cada sección.

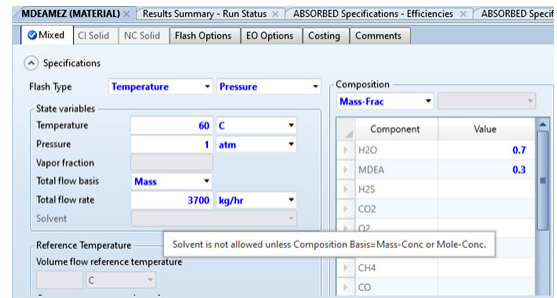
El inciso (d) corresponde a la configuración del número de etapas de equilibrio del absorbedor. En esta simulación se emplean 40 etapas, lo cual implica una larga zona de contacto. Este ajuste es determinante porque el número de etapas representa la “longitud efectiva” del proceso de absorción: a mayor número de etapas, mayor área de contacto y mayor oportunidad de que el CO_2 sea transferido y retenido en el solvente.

Finalmente, el inciso (e) muestra una tabla de resultados globales de la simulación, donde se observa la distribución de especies entre corrientes de salida. En particular, se aprecia que una fracción no tan importante del CO_2 permanece en la corriente gaseosa de salida (gas residual), mientras que la fracción capturada en la solución rica se refleja en la formación de especies asociadas a la captura en fase líquida. En conjunto, estos resultados se traducen en una ligera disminución en la eficiencia de captura de 87.4 %, lo cual es consistente con la configuración de esta octava simulación: un número aumentado de etapas y un tiempo de contacto menor y un aumento en la temperatura, disminuyen el grado de remoción alcanzable.

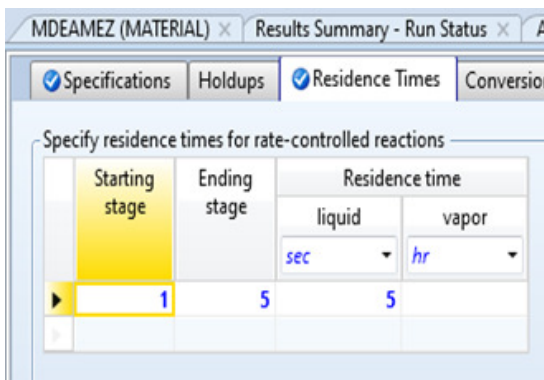
En conclusión, la Simulación 8, permite establecer una línea base del comportamiento del sistema bajo condiciones no tan conservadoras, y evidencia que, para incrementar la captura de CO_2 , es necesario aumentar el grado de contacto gas/líquido mediante ajustes en el número de etapas y/o en el tiempo de interacción, manteniendo constantes los flujos definidos para el caso de estudio.



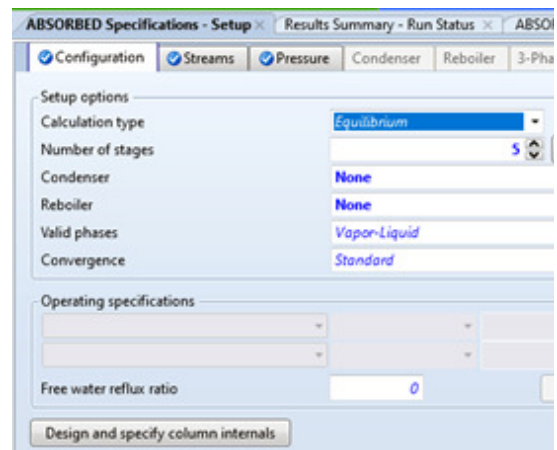
(a) Configuración Entrada de gas.



(b) Configuración mezcla MDEA_H₂O



(c) Configuración del tiempo de iteración.



(d) Configuración cantidad de etapas.

ABSORBED (RadFrac) - Stream Results (Boundary)									
Material	Heat	Load	Vol.% Curves	Wt.% Curves	Petroleum	Polymers	Solids		
								Units	
								ENTRIGAS	MDEAMEZ
H2S								0	0
CO2								0.049595	0
O2								0.0258098	0
N2								0.731145	0
CH4								0.0858003	0
CO								0.00399132	0
H2								0.0273126	0
HCO3-								4.85745e-39	0
MDEA+								0.0254686	7.08572e-05
CO3-2								0	0
H5-								0	0

(e) Resultados de la Simulación.

Figura 20: Configuración y Resultados de la Simulación 8.

La Figura 21 corresponde a la Simulación 9 y resume, la forma en que se definieron las condiciones de operación en Aspen Plus para el absorbedor, así como los principales resultados obtenidos.

En el inciso (a) se muestra la configuración de la corriente de entrada de gas. En esta simulación se fija la condición termodinámica de alimentación (temperatura (60°C) y presión) y el flujo total de la corriente gaseosa, además de su composición mediante fracciones másicas. Esta definición es relevante porque establece la carga de CO_2 disponible para ser removida y la presencia de otras especies que pueden afectar el equilibrio gas-líquido, así como el comportamiento hidráulico dentro de la columna.

El inciso (b) presenta la mezcla absorbente MDEA- H_2O utilizada como solvente. Aquí se especifican las condiciones de operación (temperatura y presión) y el flujo total de la corriente líquida, además de la proporción de agua y MDEA. Este punto es importante porque la relación solvente/gas y la concentración de amina influyen directamente en la capacidad de absorción: un caudal bajo o una composición poco favorable puede limitar la cantidad de CO_2 que puede transferirse a la fase líquida durante el contacto.

En el inciso (c) se configura el tiempo de interacción (tiempo de residencia) asociado a la columna. En la simulación se establecen valores para el tiempo de contacto a lo largo de las etapas consideradas. Este parámetro representa, el tiempo disponible para que ocurra la transferencia de masa y la reacción en la fase líquida. Un tiempo de contacto reducido puede reflejarse en una captura limitada, aun cuando exista solvente disponible, ya que el sistema no alcanza a acercarse al equilibrio en cada sección.

El inciso (d) corresponde a la configuración del número de etapas de equilibrio del absorbedor. En esta simulación se emplean 40 etapas, lo cual implica una larga zona de contacto. Este ajuste es determinante porque el número de etapas representa la “longitud efectiva” del proceso de absorción: a mayor número de etapas, mayor área de contacto y mayor oportunidad de que el CO_2 sea transferido y retenido en el solvente.

Finalmente, el inciso (e) muestra una tabla de resultados globales de la simulación, donde se observa la distribución de especies entre corrientes de salida. En particular, se aprecia que una fracción no tan importante del CO_2 permanece en la corriente gaseosa de salida (gas residual), mientras que la fracción capturada en la solución rica se refleja en la formación de especies asociadas a la captura en fase líquida. En conjunto, estos resultados se traducen en un aumento en la eficiencia de captura de 95.7%, lo cual es consistente con la configuración de esta novena simulación: un número aumentado de etapas y un tiempo de contacto menor, y una disminución en la temperatura, aumenta el grado de remoción alcanzable.

En conclusión, la Simulación 9, permite establecer una línea base del comportamiento del sistema bajo condiciones no conservadoras, y evidencia que, para incrementar la captura de CO_2 , es necesario aumentar el grado de contacto gas/líquido mediante ajustes en el número de etapas y/o en el tiempo de interacción, y temperatura, manteniendo

constantes los flujos definidos para el caso de estudio.

(a) Configuración Entrada de gas.

(b) Configuración mezcla MDEA_H₂O

(c) Configuración del tiempo de iteración.

(d) Configuración cantidad de etapas.

Material	Heat	Load	Vol. % Curves	Wt. % Curves	Petroleum	Polymers	Solids
ENTRERGAS							
MDEAMEZ							
GASRESUL							
MDEARICO							
H2S							
CO2							
O2							
N2							
CH4							
CO							
H2							
HCO3-							
MDEA+							
CO3-2							
HS-							

(e) Resultados de la Simulación.

Figura 21: Configuración y Resultados de la Simulación 9.

La Figura 22 corresponde a la Simulación 10 y resume, la forma en que se definieron las condiciones de operación en Aspen Plus para el absorbedor, así como los principales resultados obtenidos.

En el inciso (a) se muestra la configuración de la corriente de entrada de gas. En esta simulación se fija la condición termodinámica de alimentación (temperatura (60°C) y presión) y el flujo total de la corriente gaseosa, además de su composición mediante fracciones másicas. Esta definición es relevante porque establece la carga de CO₂ disponible para ser removida y la presencia de otras especies que pueden afectar el equilibrio gas-líquido, así como el comportamiento hidráulico dentro de la columna.

El inciso (b) presenta la mezcla absorbente MDEA-H₂O utilizada como solvente. Aquí se especifican las condiciones de operación (temperatura y presión) y el flujo total de la

corriente líquida, además de la proporción de agua y MDEA. Este punto es importante porque la relación solvente/gas y la concentración de amina influyen directamente en la capacidad de absorción: un caudal bajo o una composición poco favorable puede limitar la cantidad de CO_2 que puede transferirse a la fase líquida durante el contacto.

En el inciso (c) se configura el tiempo de interacción (tiempo de residencia) asociado a la columna. En la simulación se establecen valores para el tiempo de contacto a lo largo de las etapas consideradas. Este parámetro representa, el tiempo disponible para que ocurra la transferencia de masa y la reacción en la fase líquida. Un tiempo de contacto reducido puede reflejarse en una captura limitada, aun cuando exista solvente disponible, ya que el sistema no alcanza a acercarse al equilibrio en cada sección.

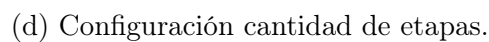
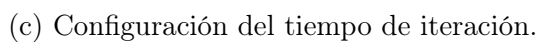
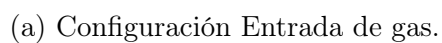
El inciso (d) corresponde a la configuración del número de etapas de equilibrio del absorbedor. En esta simulación se emplean 40 etapas, lo cual implica una larga zona de contacto. Este ajuste es determinante porque el número de etapas representa la “longitud efectiva” del proceso de absorción: a mayor número de etapas, mayor área de contacto y mayor oportunidad de que el CO_2 sea transferido y retenido en el solvente.

Finalmente, el inciso (e) muestra una tabla de resultados globales de la simulación, donde se observa la distribución de especies entre corrientes de salida. En particular, se aprecia que una fracción no tan importante del CO_2 permanece en la corriente gaseosa de salida (gas residual), mientras que la fracción capturada en la solución rica se refleja en la formación de especies asociadas a la captura en fase líquida. En conjunto, estos resultados se traducen en un aumento en la eficiencia de captura de 99.9 %, lo cual es consistente con la configuración de esta decima simulación: un número aumentado de etapas y un tiempo de contacto mayor, y manteniendo la temperatura, aumenta el grado de remoción alcanzable.

En conclusión, la Simulación 10, permite establecer una línea base del comportamiento del sistema bajo condiciones no conservadoras, y evidencia que, para incrementar la captura de CO_2 , es necesario aumentar el grado de contacto gas/líquido mediante ajustes en el número de etapas y/o en el tiempo de interacción, así como en la temperatura, manteniendo constantes los flujos definidos para el caso de estudio.

- Número de etapas: Dominante; 40 etapas elevan eficiencia a más del 87 % vs. menos del 45 % con 5-10 etapas.
- Temperatura: 50-60°C óptimos (90-99.9 %); 70°C reduce un 2-3 % aproximadamente por menor solubilidad de CO_2 .
- Tiempo de contacto: mayor captura para 10 s.

La simulación 10 logra máxima eficiencia (99.9 %) con condiciones balanceadas.



(e) Resultados de la Simulación.

Figura 22: Configuración y Resultados de la Simulación 10.

Decisiones para el Diseño del Sistema

Se selecciona la configuración de la Simulación 10 (10 s, 60°C, 40 etapas, MDEA al 30 %) como base de diseño, por eficiencia cercana al 100 % con CO₂ no capturado mínimo (0.00006 kg/h). Se implementa el absorbedor con 40 etapas teóricas, control de T en 60°C y tiempo de interacción de 10 s para maximizar la captura de CO₂ en crematorios.

Se realiza la simulación, con la configuración de mejor resultado, la simulación 10, en el Cuadro 16 se muestra el resultado según flujo de gases de los crematorios, con la que se realiza las pruebas del sistema, mostrando los resultados en fracción de masa.

Cuadro 16: Resultado de la simulación del Absorbedor.

Simulaciones	Tiempo interacción (s)	T (°C)	Etapas	CO ₂ capturado (HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ²⁻)(kg/h)	CO ₂ no capturado	Eficiencia (%)
11	10	60	40	0.97053	0.02947	97.1

En la Figura 23 se muestran el resultado de las reacciones de Aspen Plus para la simulación 11, con las configuraciones anteriormente establecidas, donde se observa que:

- CO₂ de entrada= 0.12
- CO₂ no capturado = 0.02947 = 2.9 %
- Eficiencia de captura = 100 – 2.9 = 97.1 %

La Figura 23 muestra los resultados de composición en fracción másica de dos corrientes clave asociadas a la columna de absorción en el sistema de captura de CO₂ mediante MDEA. En particular, se presentan los datos correspondientes a la corriente gaseosa residual (GASRESUL) y a la corriente líquida rica en CO₂ (MDEACO2), lo que permite evaluar la eficiencia de la etapa de absorción.

En la corriente GASRESUL, predominan componentes inertes o poco reactivos como el nitrógeno (N₂) y el oxígeno (O₂), lo cual es característico de gases de combustión. La fracción másica de CO₂ en esta corriente es relativamente baja, lo que indica que una parte significativa del CO₂ ha sido removida durante el contacto con el solvente en la columna de absorción. La presencia de pequeñas fracciones de CH₄, CO, H₂ y H₂O corresponde a trazas típicas del gas de entrada y no afecta de forma significativa el desempeño del proceso.

Por otro lado, la corriente MDEACO2 presenta una elevada fracción másica de agua y MDEA, lo que confirma su naturaleza como solvente absorbente. En esta corriente se observa una mayor presencia de especies relacionadas con la captura de CO₂, tales como bicarbonato (HCO₃⁻), carbonato (CO₃²⁻) y la forma protonada de la amina (MDEA⁺).

Main Flowsheet		ABSORBED (RadFrac) - Stream Results (Boundary)			
Material	Heat	Load	Vol.% Curves	Wt. % Curves	Petroleum
		Units	GASRESUL	MDEACO2	
— Mass Fractions					
H2O			0.163419	0.65375	
MDEA			8.00283e-05	0.209955	
H2S			0	0	
CO2			0.0294202	5.13526e-05	
O2			0.0291074	7.23553e-05	
N2			0.725056	0.000697092	
CH4			0.0470661	0.000617765	
CO			0.00389648	4.32349e-06	
H2			0.00195453	1.07894e-11	
HCO3-			0	0.0363054	
MDEA+			0	0.0931437	
CO3-2			0	0.0054027	
HS-			0	0	
S-2			0	0	
H3O+			0	4.57721e-11	

Figura 23: Resultado de las reacciones de absorción en Aspen Plus.

Estas especies evidencian que el CO₂ ha sido absorbido principalmente mediante el mecanismo de formación de bicarbonato, característico de las aminas terciarias como la MDEA.

La baja fracción de CO₂ molecular libre en la corriente líquida, junto con la aparición de especies iónicas, indica que el CO₂ se encuentra químicamente retenido en el solvente, lo cual es deseable antes de su envío a la columna de desorción. En conjunto, los datos confirman un funcionamiento adecuado de la columna de absorción, con una remoción efectiva de CO₂ del gas tratado y una correcta carga del solvente MDEA previo a la etapa de regeneración.

En la gráfica, Figura 24, el Eje X (Número de Etapas): representa el número de etapas de contacto en la columna de absorción. Cuanto más alta es la cantidad de etapas, mayor es el tiempo de contacto entre el gas y la solución de amina. El Eje Y (Captura de CO₂): muestra la fracción molar de CO₂ que se ha capturado en cada etapa. Se muestra el comportamiento de la captura por etapas de la simulación, donde se obtuvo una buena captura; se observa que las primeras etapas (de la 1 a la 26) muestran un aumento rápido en la captura de CO₂, lo que sugiere que las primeras etapas son las más eficaces en cuanto a la absorción del gas, en las restantes sigue amentando en menor medida.

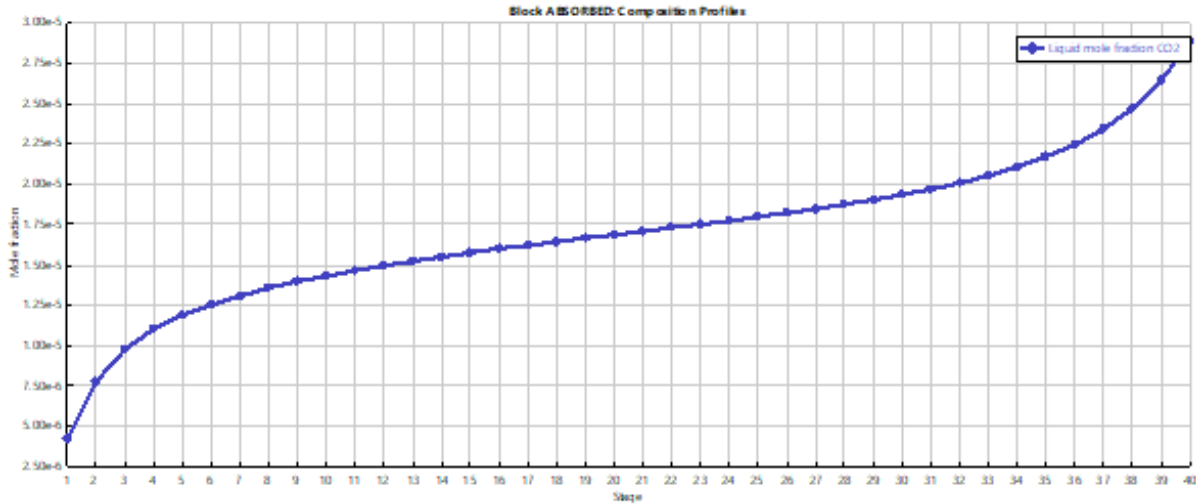


Figura 24: *Captura de CO_2 vs Etapas.*

6.2. Gráficos de funcionamiento interno Absorbedor

El análisis obtenido a partir de las simulaciones realizadas en Aspen Plus muestra que las condiciones operativas (temperatura, presión y caudales) en el absorbedor están para maximizar la captura, con flujos de solvente y gas diseñados para mantener una tasa de transferencia de masa adecuada.

Los gráficos, Figuras 25, 26, 27, 28, 29 y 30, representan las curvas de rendimiento de cada plato o etapa en la torre de absorción, donde se relaciona el flujo de líquido (kg/h) en el eje horizontal (x) con el flujo mínimo de vapor (kg/h) en el eje vertical (y). Las curvas de color morado y rosada representan diferentes caídas de presión (mm-water/m), que son un indicador del rendimiento y efectividad de la etapa.

- Eje x: Representa la cantidad de líquido que pasa a través de la etapa por hora.
- Eje y: Representa el flujo de vapor.
- Curvas (Caída de Presión): Cada curva (4.17, 9.46, 21.48, 48.77, 110.74 mm-water/m) representa los límites de operación para un valor constante de caída de presión a través del plato. La caída de presión es la pérdida de energía del vapor al pasar por la etapa.
- Línea de Capacidad Máxima: La línea superior rosada y el límite superior indican el punto de inundación, el máximo flujo de vapor que puede manejar la etapa antes de que el líquido sea arrastrado hacia arriba, lo cual colapsaría la operación.

Las gráficas permiten visualizar la relación entre los flujos de vapor y líquido y las restricciones operacionales (caída de presión e inundación).

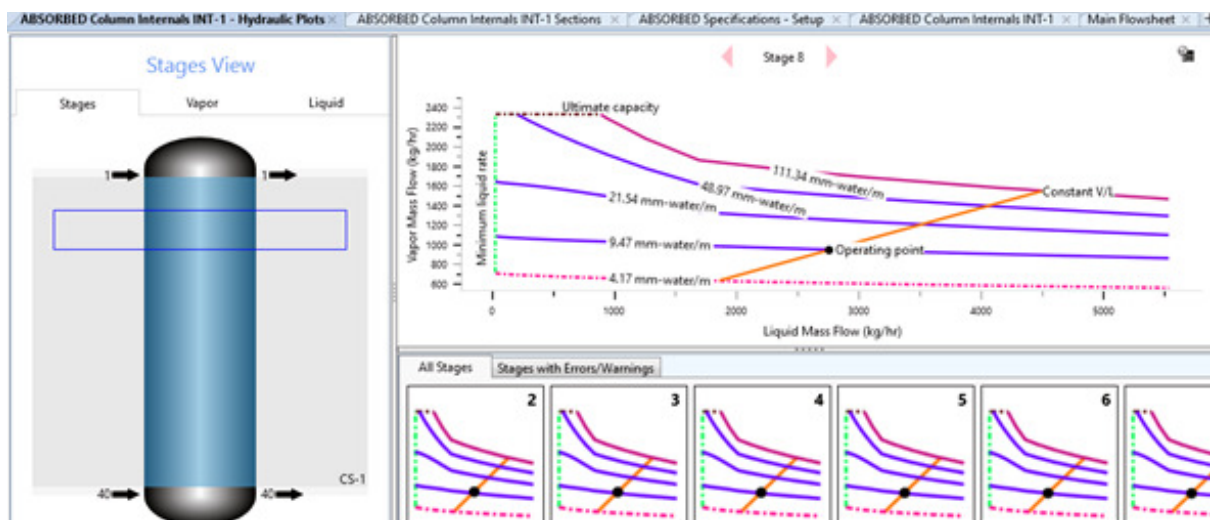


Figura 25: Gráficos resultados de las etapas 2 a la 9 del Absorbedor.

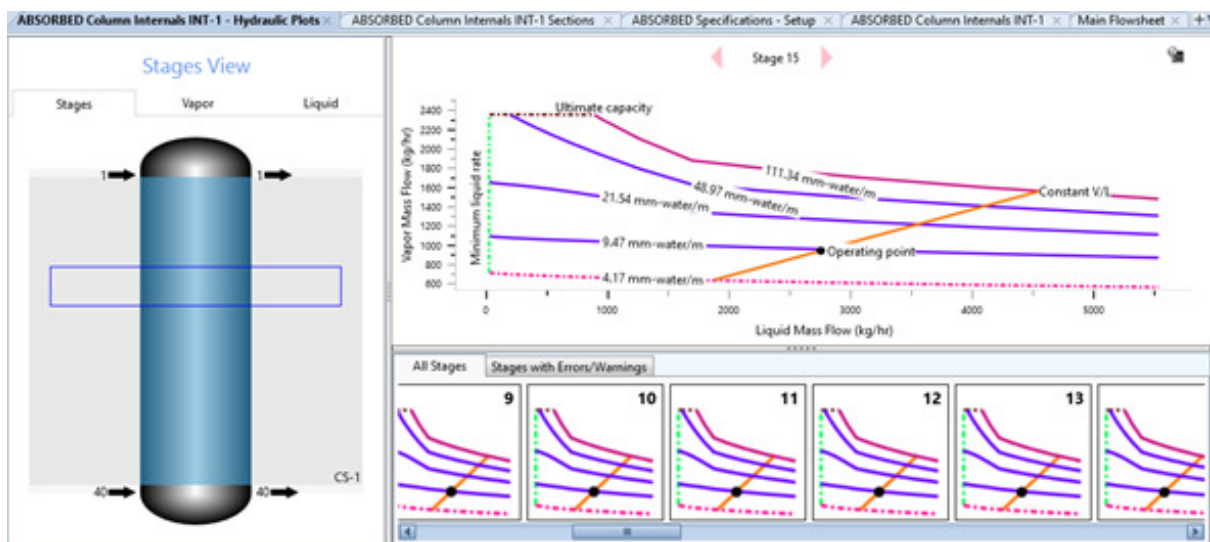


Figura 26: Gráficos resultados de las etapas 9 a la 15 del Absorbedor.

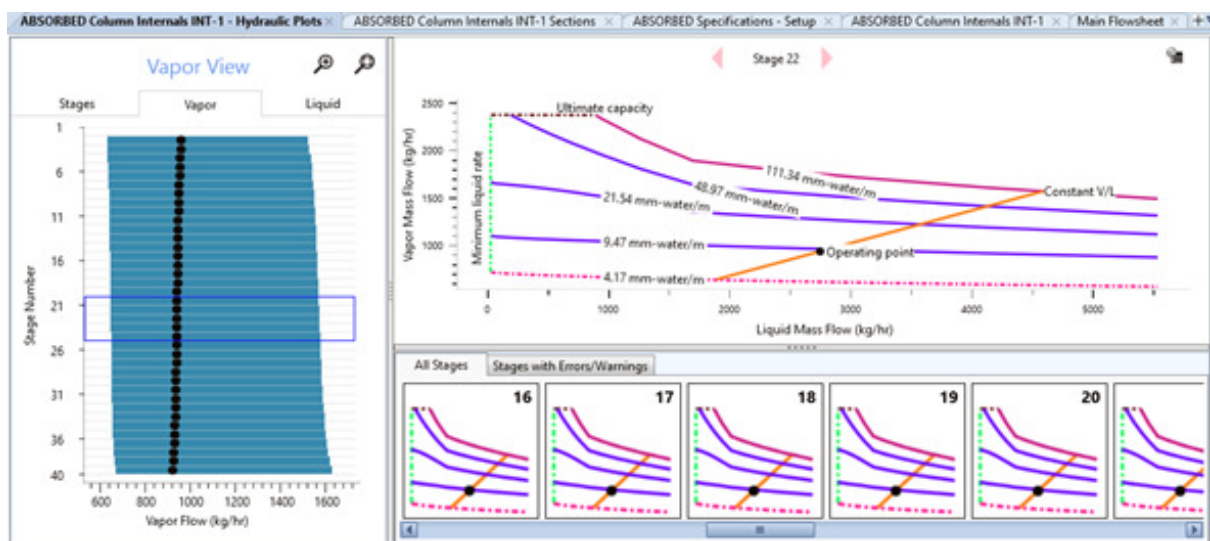


Figura 27: Gráficos resultados de las etapas 16 a la 22 del Absorbedor.

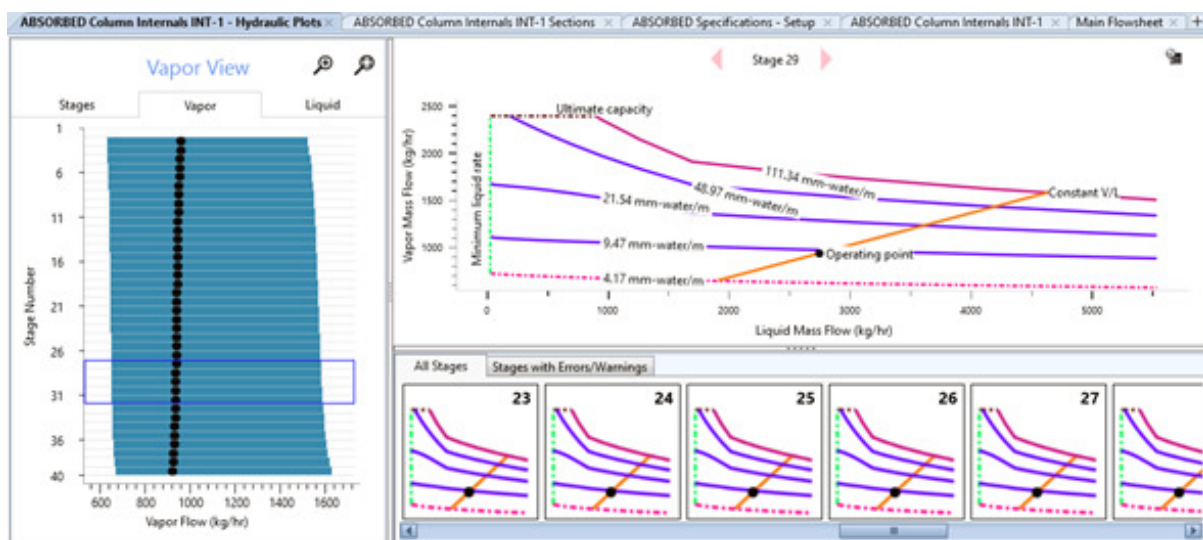


Figura 28: Gráficos resultados de las etapas 23 a la 29 del Absorbedor.

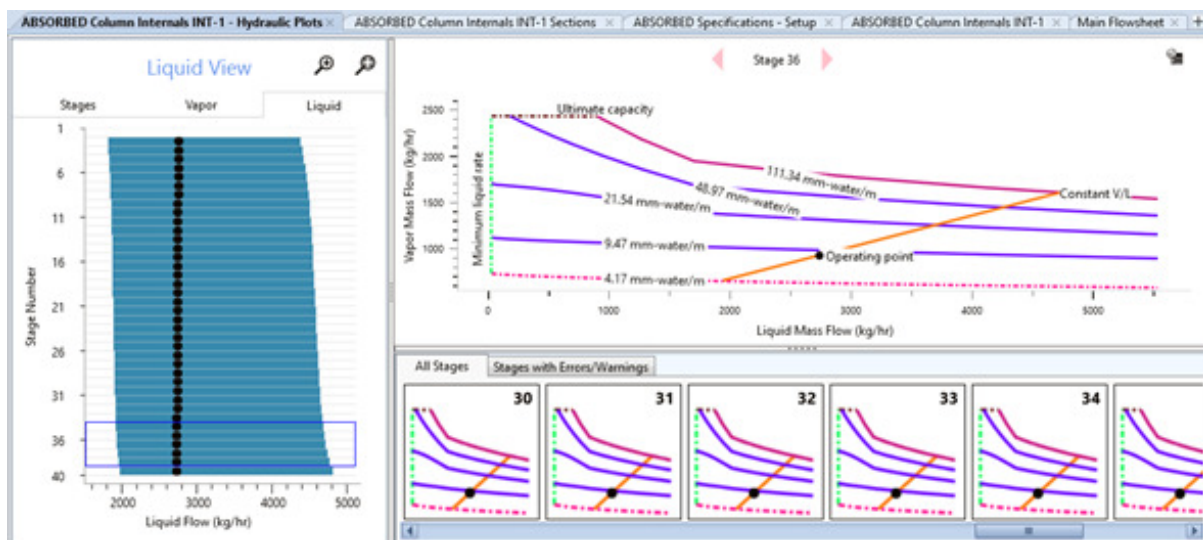


Figura 29: Gráficos resultados de las etapas 30 a la 36 del Absorbedor.

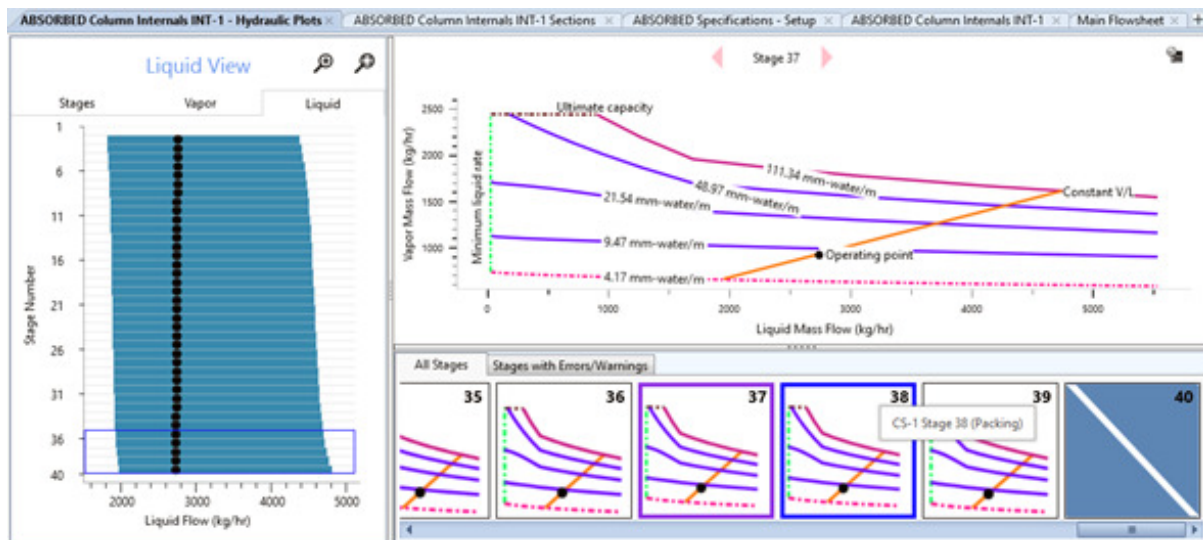


Figura 30: Gráficos resultados de las etapas 37 a la 39 del Absorbedor.

Para un flujo de líquido constante (2752 kg/h), aumentar el flujo de vapor lleva a un aumento en la caída de presión. Esto es porque hay más vapor pasando por la misma área incrementa la fricción y la contrapresión.

La capacidad máxima de vapor que el sistema puede procesar se reduce a medida que aumenta el flujo de líquido. Si el flujo de líquido es muy alto, el límite de inundación (curva rosada) se alcanza con un flujo de vapor menor.

La línea roja punteada (4.17 mm-water/m) puede representar el límite inferior de operación, donde el flujo de vapor es tan bajo que el líquido simplemente cae a través de los orificios del plato sin una interacción adecuada con el vapor.

El gráfico identifica un Punto de Operación óptimo o deseado en la gráfica:

- Flujo de Líquido: Aproximadamente 2752 kg/h.
- Flujo de Vapor: Aproximadamente 1921 kg/h (estimado de la posición vertical).

La caída de presión de operación, punto que cae sobre la curva de 9.47 mm-water/m. Esto significa que, bajo estas condiciones de flujo, la etapa operará con esta pérdida de energía.

En la línea de V/L constante, línea naranja que pasa por el punto de operación, indica que el sistema debe mantener una relación entre el flujo de Vapor (V) y el flujo de Líquido (L) constante para ese proceso en particular. Otros puntos sobre esta línea representan el mismo ratio V/L, pero a diferentes capacidades.

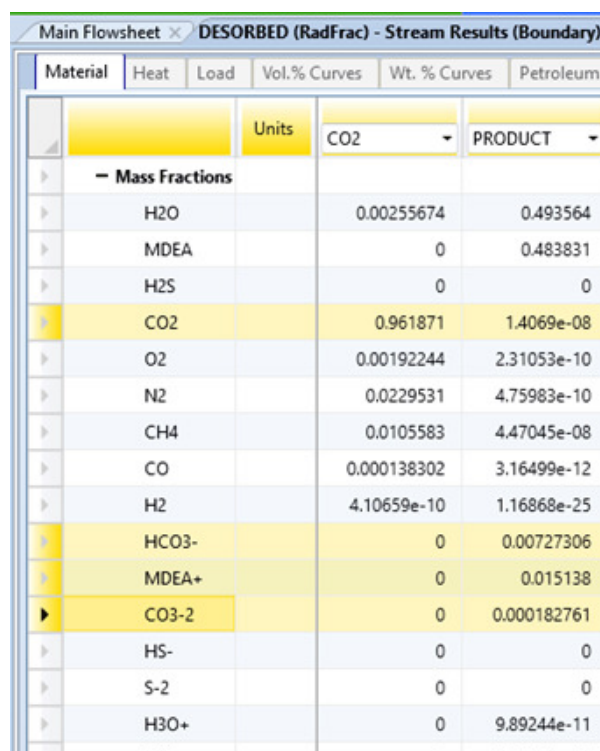
El análisis de cada etapa, revela las limitaciones operativas y el rendimiento en función de los flujos máscicos de vapor y líquido.

Conclusiones de Rendimiento:

1. La caída de presión actual es aceptable puesto que se observa un amplio margen de seguridad antes de alcanzar la capacidad máxima o inundación (curva rosada) para el flujo de líquido actual. El límite de inundación de líquido está muy por encima del flujo de vapor actual.
2. El rendimiento máximo de la etapa disminuye significativamente a medida que el flujo de líquido aumenta.
3. El proceso debe mantenerse en una relación V/L constante (línea naranja). Si la capacidad necesita ser aumentada, manteniendo el mismo ratio V/L, el punto de operación se movería hacia arriba y a la derecha, lo cual incrementaría la caída de presión y reduciría el margen de seguridad respecto a la inundación.

En la Figura 31, se muestra el resultado de la columna de desorción o stripper; la corriente de producto gaseoso (CO_2) contiene una fracción máscica de CO_2 de 0.961871 (96.2%), lo que demuestra que la columna logra una desorción, obteniendo un producto

de gas que es prácticamente CO_2 puro, adecuado para su compresión, almacenamiento o uso directo en otras aplicaciones industriales. Las fracciones másicas de CO_2 , HCO_3^- , MDEA^+ y CO_3^{2-} en la corriente de salida de solvente regenerado (PRODUCT) son bajas, 1.4×10^{-8} , 0.0073, 0.015 y 0.00018 respectivamente, indicando que el solvente regresa a la columna de absorción prácticamente libre de CO_2 , lo que permite mantener el funcionamiento global del ciclo.



Material	Heat	Load	Vol.% Curves	Wt.% Curves	Petroleum
			CO2	PRODUCT	
— Mass Fractions					
H2O			0.00255674	0.493564	
MDEA			0	0.483831	
H2S			0	0	
CO2			0.961871	1.4069e-08	
O2			0.00192244	2.31053e-10	
N2			0.0229531	4.75983e-10	
CH4			0.0105583	4.47045e-08	
CO			0.000138302	3.16499e-12	
H2			4.10659e-10	1.16868e-25	
HCO3-			0	0.00727306	
MDEA+			0	0.015138	
CO3-2			0	0.000182761	
HS-			0	0	
S-2			0	0	
H3O+			0	9.89244e-11	

Figura 31: Resultado de la desorción de Aspen Plus.

En la gráfica, Figura 32, muestra el perfil de composición molar de CO_2 en fase vapor a lo largo de las 30 etapas de la columna de desorción simulada en Aspen Plus. El eje horizontal representa las 30 etapas o etapas de equilibrio de la columna de desorción, desde la base (etapa 1) hasta la cima (etapa 30). En el eje vertical se muestra la fracción molar de CO_2 en la fase vapor para cada etapa, con valores que van de 0 a 1 (0 a 100 %).

Se observa que en las etapas iniciales (1-2), la fracción molar de CO_2 es alta, lo que corresponde al fondo del desorbedor donde la solución absorbente entra cargada de CO_2 . Entre las etapas 3 a 28, la fracción molar de CO_2 se mantiene casi constante, indicando que la mayor parte de la eliminación de CO_2 ocurre en las primeras etapas y que el líquido se va empobreciendo de CO_2 a medida que asciende en la columna. En las etapas finales (29-30), se observa una caída brusca en la fracción molar de CO_2 , comportamiento que se debe a un efecto de arrastre o a las corrientes de entrada/salida, como el reflujo o la salida del solvente regenerado, típicos en simulaciones de columnas que representan la entrada o salida de corrientes con diferente composición justo en los extremos.

El gráfico refleja un perfil típico de desorbedor en el que la remoción de CO_2 tiene

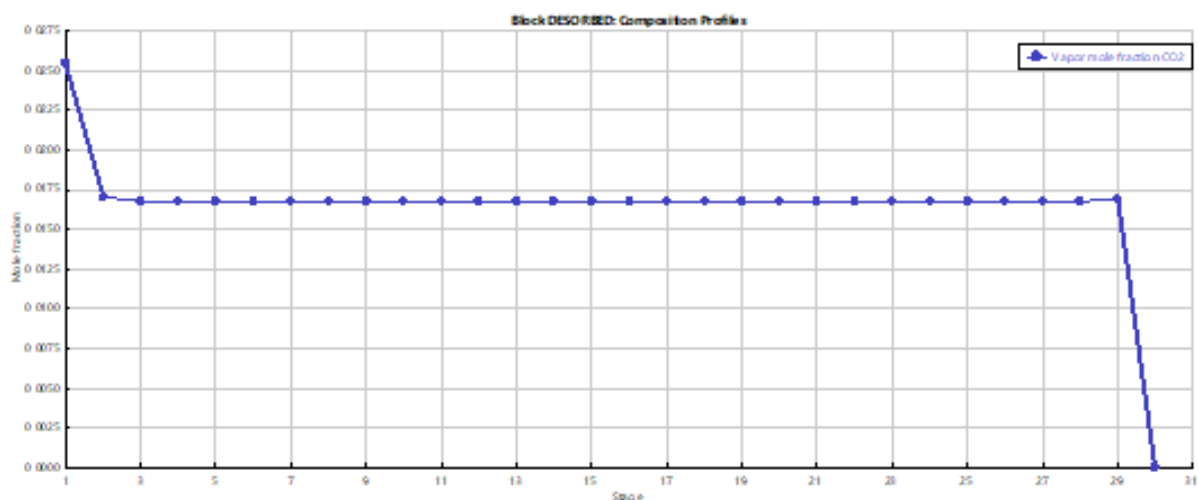


Figura 32: Composición de CO_2 (vapor) en las 30 etapas de la columna de desorción.

lugar en las primeras etapas, con una composición residual constante y baja a lo largo de la columna, terminando con un cambio abrupto en los extremos por condiciones de frontera.

6.3. Gráficos de funcionamiento interno del Desorbedor

El análisis detallado confirma que las condiciones operativas (temperatura, presión y caudales) en el absorbedor están para maximizar la captura, con flujos de solvente y gas diseñados para mantener una tasa de transferencia de masa adecuada.

Las gráficas, Figuras 33, 34, 35 y 36, muestran el rendimiento de las etapas de la columna de desorción en función de las condiciones de flujo. Dónde el eje X (Liquid Mass Flow - kg/h) muestra el flujo de masa del líquido (la amina rica cargada con CO_2) que desciende por la columna; el eje Y (Vapor Mass Flow - kg/h) muestra el flujo de masa del vapor de stripping (regeneración) que asciende por la columna. Las líneas Curvas (Violeta y Rosa) representan la caída de presión por unidad de altura $\frac{\Delta P}{m}$ a diferentes condiciones de flujo, de 4.17 mm-water/m hasta 138.91 mm-water/m, curvas que indican cuánto se opone el plato al flujo (resistencia). La curva más alta (rosa) representa la capacidad máxima o inundación. El punto negro (Operating point), representa las condiciones de flujo de líquido y vapor bajo las cuales la columna está diseñada para operar. La línea Naranja (Constant V/L), muestra cómo cambiaría el punto de operación si se aumentaran o redujeran proporcionalmente los flujos de vapor y líquido.

La interpretación se centra en dónde se sitúa el punto de operación con respecto a la inundación y las caídas de presión. El punto de operación se encuentra cerca de 553.4 kg/h de flujo de líquido y 16162 kg/h de flujo de vapor (eje Y). Se sitúa entre las curvas de 24.06 mm-water/m y 57.8 mm-water/m, por lo que está significativamente alejado

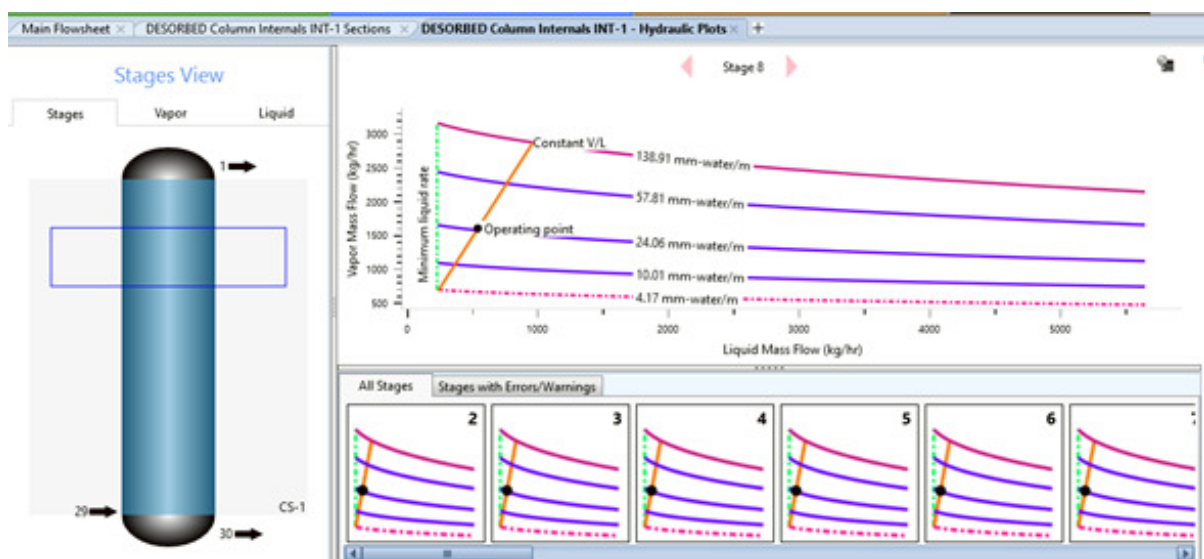


Figura 33: Gráficos resultados de las etapas 2 a la 8 del Desorbedor.

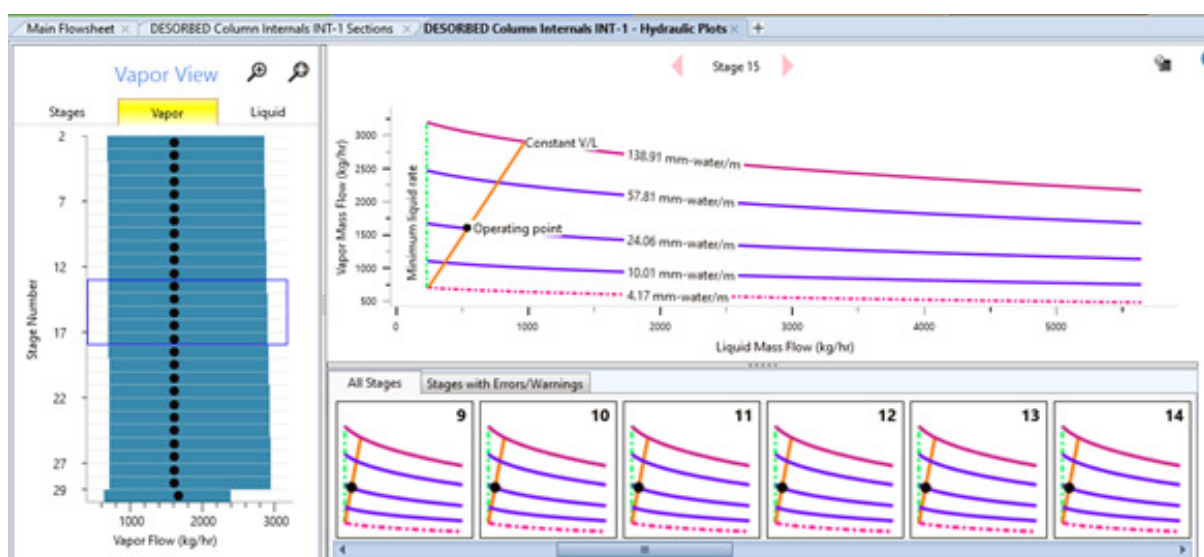


Figura 34: Gráficos resultados de las etapas 9 a la 15 del Desorbedor.

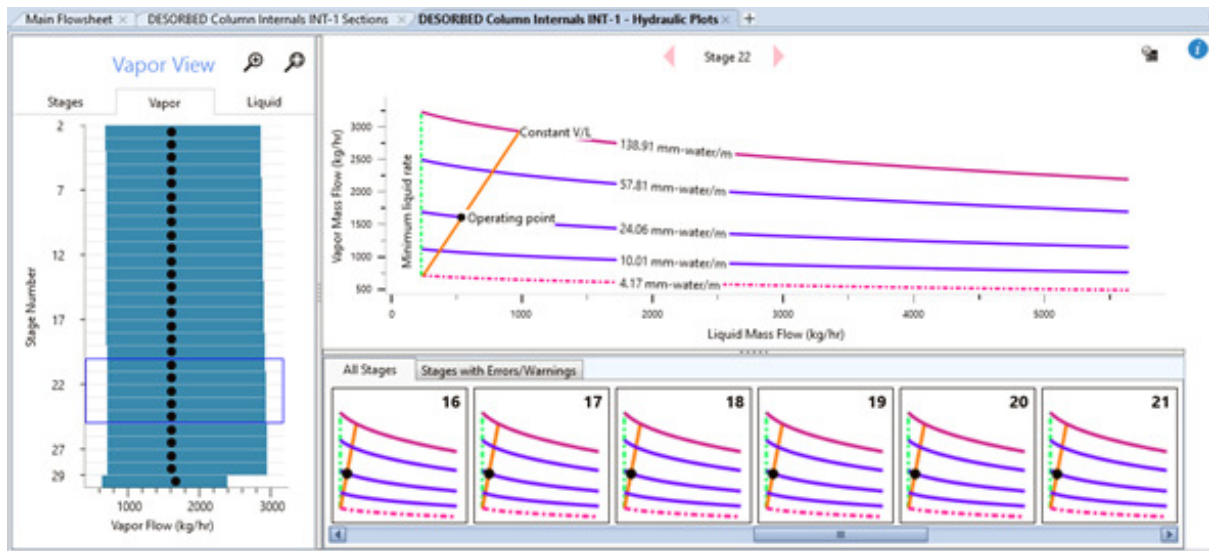


Figura 35: Gráficos resultados de las etapas 16 a la 22 del Desorbedor.

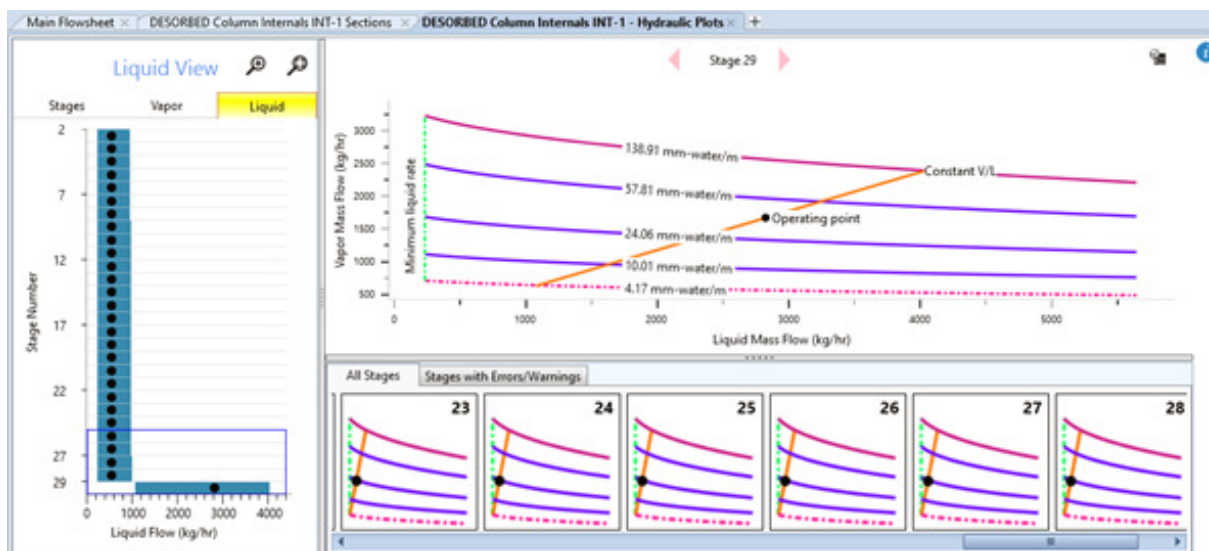


Figura 36: Gráficos resultados de las etapas 23 a la 29 del Desorbedor.

de la curva de capacidad máxima (138.93 mm-water/m) lo que indica que el diámetro y el diseño de los internos de la columna (platos o empaque) son ampliamente suficientes para manejar los flujos simulados. La planta física tendrá un margen de seguridad muy robusto contra la inundación, permitiendo flexibilidad operativa para aumentos de flujo sin riesgo de apagarse.

En el análisis anterior (perfil de presión), la caída de presión promedio en el Desorbedor fue de aproximadamente 67 mm-agua/etapa. El punto de operación en el gráfico hidráulico está correctamente ubicado cerca de la curva de 57.81 mm-water/m, lo que valida la caída de presión total y el diseño robusto de la columna. Esta caída de presión es alta (como es típico en un Desorbedor que maneja mucho vapor) pero segura.

Los gráficos (etapas 2-29) muestra una distribución homogénea del flujo de líquido en la mayoría de las etapas, lo que es ideal. Sin embargo, se observa una anomalía en la última etapa (29), donde el flujo de líquido parece concentrarse en un valor ligeramente más alto (cercano a 3273 kg/h), lo que sugiere que esta etapa final (cerca del rehervidor) la simulación está agrupando el flujo de vapor condensado en ese punto.

El análisis hidráulico del bloque DESORBER confirma un diseño de internos robusto y una operación estable. La columna opera con un amplio margen de seguridad contra la inundación. El punto de operación se sitúa muy lejos de la capacidad máxima, lo que asegura que la planta física podrá manejar variaciones en los flujos (especialmente en el vapor de regeneración) sin experimentar inestabilidad o inundación.

La simulación cumple con el objetivo principal, lo que significa que el proceso de captura y desorción de CO₂ es termodinámicamente factible, y el calor y la energía necesarios para la regeneración del solvente se simulan con resultados positivos, asumiendo que el CO₂ es secuestrado. Resultados que indican un diseño de proceso estable para la captura de CO₂. Los perfiles de presión son consistentes con la física de la separación y la caída de presión en las torres es controlada.

6.4. Principales resultados

Captura de CO₂

- Simulaciones realizadas: 200 iteraciones en Aspen Plus para 10 s, mostrando: 97.1 % de captura.
- Desempeño del MDEA: Alta capacidad de absorción, menor corrosión comparado con otras aminas y mayor estabilidad y menor costo operativo en el tiempo.

Desorción de CO₂

- La corriente gaseosa que sale de la columna de desorción tiene una pureza de CO₂ igual a 96.2 %, lo que representa una buena desorción.

- El solvente regenerado retiene muy poco CO_2 , lo que permite su reciclaje dentro del proceso sin pérdidas significativas.
- Los arrastres de agua y solvente (MDEA) en el gas desorbido son bajos, lo que asegura la calidad del gas capturado y limita posibles pérdidas operativas.

6.5. Análisis del Sistema

El sistema presenta un conjunto de ventajas y desventajas que ofrecen un marco claro para evaluar la efectividad y las áreas de mejora de los sistemas de captura de CO_2 basados en MDEA, impulsando su desarrollo hacia aplicaciones más eficientes y confiables.

6.5.1. Ventajas del sistema

- Alta selectividad y capacidad para capturar CO_2 en gases de combustión.
- Menor energía requerida para regeneración comparada con otras aminas (MEA) debido a la menor entalpía de reacción.
- Estabilidad química y menor degradación durante ciclos de operación.
- Compatibilidad con plantas industriales existentes y escalabilidad.

6.5.2. Desventajas del sistema

- Consumo energético aún significativo para la operación de la columna de desorción.
- Costo asociado a la compra y manejo químico de MDEA.
- Posible formación de subproductos y corrosión si no se controla adecuadamente.
- Requiere tratamiento de aguas residuales por el consumo de solventes.

6.6. Validación práctica

- Comparación con literatura científica y datos experimentales

El desempeño en la captura de CO_2 alcanzado, 97.1 % mediante el uso de MDEA en un sistema de captura postcombustión, se encuentra en línea con los resultados reportados en literatura científica y en aplicaciones industriales consolidadas. Numerosos estudios han demostrado que los procesos que emplean aminas terciarias como la MDEA pueden lograr eficiencias cercanas al 95 % cuando se operan bajo condiciones necesarias (Ruiz Ruiz, 2021). Por ello, lograr una captura del 97.1 % válida que el proceso simulado se ajusta a parámetros técnicamente factibles y que la

modelación realizada en Aspen Plus refleja adecuadamente los resultados esperados en escenarios reales.

En cuanto a la etapa de desorción, la evidencia extraída de investigaciones industriales y pilotos indica que los porcentajes de regeneración del CO₂ oscilan sustancialmente entre 95 % 99 % (Manual UNEP-POPS, s.f; Robertson, 2007). El valor de desorción del 96.2 % obtenido mediante simulación se sitúa dentro de este rango, demostrando un rendimiento elevado. Este nivel de recuperación confirma que el diseño del proceso y los parámetros operativos empleados son apropiados, y que el modelo utilizado reproduce fielmente el desempeño previsto para una planta de captura y regeneración que utiliza MDEA.

En conjunto, la comparación con datos experimentales y bibliográficos fortalece la confianza en la validez de los resultados obtenidos, evidenciando que el sistema modelado podría funcionar en condiciones reales, siguiendo las prácticas documentadas internacionalmente.

A continuación se presentan las conclusiones de este estudio, cumpliendo con los objetivos y dando respuesta a las preguntas de investigación.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se diseñó y evaluó, mediante simulación, un sistema de captura de dióxido de carbono aplicable a pequeña y mediana escala, orientado a fuentes estacionarias de carácter urbano, como los crematorios alimentados con gas natural. El estudio confirma que la captura post-combustión mediante absorción química es una alternativa técnicamente viable para este tipo de aplicaciones, al integrarse a procesos existentes sin requerir modificaciones sustanciales en la operación principal.

El modelado del sistema en Aspen Plus permitió analizar el comportamiento del proceso de absorción y desorción utilizando MDEA como solvente. Los resultados obtenidos muestran una eficiencia de captura del 97.1 % en la columna de absorción y una eficiencia de desorción del 96.2 %, lo que evidencia una regeneración adecuada del solvente y un desempeño estable del ciclo de operación. Estos valores se encuentran en concordancia con resultados reportados en la literatura para procesos de captura post-combustión con aminas, lo que respalda la consistencia del modelo desarrollado.

El análisis de las variables de operación permitió identificar que el tiempo de residencia del gas, la temperatura de absorción y el número de etapas en la columna influyen de manera directa en el desempeño del sistema. En particular, se observó que operar a temperaturas moderadas y con una configuración adecuada de etapas favorece la remoción de CO₂ sin incrementar de forma significativa los requerimientos energéticos.

Desde el punto de vista del producto del proceso, el sistema genera una corriente de CO₂ con alta pureza, lo que permite considerar su posible aprovechamiento o acondicionamiento para almacenamiento, en caso de integrarse a esquemas más amplios de captura, utilización y almacenamiento de carbono. Asimismo, los bajos contenidos residuales de CO₂ en el solvente regenerado indican un funcionamiento adecuado de la etapa de desorción y reducen la probabilidad de pérdidas de desempeño a lo largo del ciclo.

Si bien el estudio se desarrolló en simulación, los resultados permitieron establecer un análisis preliminar de sistemas de captura de CO₂ en crematorios urbanos, los cuales, aunque no representan grandes volúmenes de emisión a escala nacional, constituyen fuentes puntuales localizadas cuya operación se ha incrementado en los últimos años.

Finalmente, el desarrollo de este tipo de sistemas contribuye al análisis de alternativas tecnológicas orientadas a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la mitigación de impactos ambientales en entornos urbanos, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. En particular, el estudio se alinea con el ODS 11, al abordar problemáticas ambientales asociadas a ciudades y comunidades, y con el ODS 13, al contribuir al análisis de acciones orientadas a la mitigación del cambio climático.

En la siguiente Sección se presentan como anexos, el artículo publicado en el 4to CITCA así como algunas de las retribuciones sociales realizadas; luego se presenta la bibliografía utilizada en la investigación.

8. ANEXOS

Anexo 1. Artículo publicado en 4to CITCA.

CO₂ Capture Analysis by Chemical Absorption using MDEA

Sánchez Ruiz Ildester*, Cervantes Bobadilla Marisol*, García Morales Jarniel *, Vargas Méndez Rodolfo Amalio *, Arce Landa Jesús*, Olmos Barba Emmanuel*, Adam Medina Manuel*

* Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México, 62490. (e-mail: m24ce015@cenidet.tecnm.mx;

marisol.cb@cenidet.tecnm.mx; jarniel.gm@cenidet.tecnm.mx, rodolfo.vm@cenidet.tecnm.mx; jesus.al@cenidet.tecnm.mx; emmanuel.ob@cenidet.tecnm.mx; manuel.am@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: The increase in atmospheric carbon dioxide (CO₂) concentrations, linked to industrial and technological development, has generated significant consequences for climate change. In this context, CO₂ capture and recovery technologies are presented as a solution to mitigate environmental impact and generate valuable resources from industrial waste. Crematoriums, as facilities that emit CO₂ in large quantities, can benefit from these technologies by capturing the gas during the cremation process. This study uses Aspen Plus simulation software to model CO₂ capture in crematoriums, employing N-methyl diethanolamine (MDEA) as an absorbent in an absorption column. The model simulates different operating conditions to maximize process efficiency, achieving a capture efficiency of 99%. In addition, emerging technologies for CO₂ capture, such as pre-combustion, post-combustion, and oxy-combustion, as well as CO₂ recovery in various industries, are reviewed. Despite advances, challenges remain regarding costs, energy consumption, and safe CO₂ storage. Simulations confirm that MDEA is effective for capturing CO₂ in crematoria, and optimal operating conditions are suggested to improve efficiency.

Keywords: CO₂ capture, Simulations, Chemical absorption, MDEA

1. INTRODUCCIÓN

Las emisiones de CO₂ derivadas de diversas fuentes industriales representan una de las principales preocupaciones ambientales debido a su contribución al cambio climático. Entre estas fuentes, los crematorios generan una cantidad significativa de CO₂ debido a la quema de restos humanos, y su control resulta esencial para minimizar el impacto ambiental de esta práctica. Los crematorios están diseñados para operar a altas temperaturas, lo que favorece la completa combustión de los materiales orgánicos; sin embargo, la emisión de CO₂ sigue siendo inevitable.

El control de las emisiones contaminantes se ha vuelto crucial para cumplir con normativas medioambientales cada vez más estrictas y con los objetivos globales de reducción de gases de efecto invernadero. La captura de CO₂ postcombustión es una de las soluciones más prometedoras para mitigar estas emisiones en industrias como la cremación, que producen gases residuales con alta concentración de CO₂.

Los crematorios emiten una variedad de gases contaminantes como parte de sus procesos de combustión, entre ellos dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx) y otros compuestos orgánicos volátiles. Si bien el CO₂ es el principal gas de efecto invernadero emitido, la cantidad exacta varía según la tecnología utilizada, la eficiencia de la combustión y el tipo de combustible empleado. Según EIC, 2022 y Beck, A., & Jones, P., 2021, un crematorio promedio que utiliza gas natural produce entre 160 a 245 kgCO₂/cremación, lo que traduce alrededor de 80 a 120 tCO₂/año, contemplando entre 325 y 750 cremaciones anuales, valor que puede variar según la eficiencia de los equipos de combustión y el tamaño de las instalaciones.

Dado que la incineración de restos humanos es una práctica que difícilmente puede eliminarse, la implementación de tecnologías de captura de CO₂ se perfila como una alternativa viable para mitigar su impacto ambiental. Reducir las emisiones en este sector puede contribuir a los objetivos globales de sostenibilidad, así como a mejorar la calidad del aire en las zonas cercanas a los crematorios, donde estos procesos suelen llevarse a cabo.

La post-combustión se lleva a cabo después de la combustión de los combustibles fósiles, cuando el CO₂ ya está presente en los gases de escape en concentraciones bajas (entre un 3% y un 15%). En este caso, se utilizan solventes químicos para capturar el CO₂, que se encuentra diluido en una mezcla de gases.

Esto se realiza generalmente a través de tecnologías de absorción, adsorción o membranas, siendo la absorción con soluciones de aminas la más común.

Entre las soluciones aminas utilizadas, Antonini, C., *et. al.*, 2021, el MDEA (N-metil-di-etanolamina) es una de las más eficaces para la captura de CO₂, especialmente en condiciones de baja presión y temperaturas moderadas. El MDEA es preferido debido a su alta selectividad por CO₂, menor corrosividad y buena estabilidad térmica, lo que lo hace ideal para aplicaciones en procesos industriales, como la captura postcombustión.

En la captura de CO₂ postcombustión con MDEA, el CO₂ se absorbe en una solución de amina en un absorbente, luego la solución cargada de CO₂ se calienta en un sistema de desorción (columna de desorción), liberando CO₂ puro que puede ser almacenado o utilizado en otros procesos industriales.

Este trabajo presenta una primera aproximación al diseño de un dispositivo para la captura de CO₂, con potencial de aplicación en instalaciones de pequeña y mediana escala. La propuesta se basa en el uso de MDEA (N-metil dietanolamina) como absorbente químico en un esquema de captura por postcombustión. Para ello, se emplea el software Aspen Plus, mediante el cual se realiza la simulación preliminar del sistema. Se considerará el tratamiento de gases generados por crematorios, excluyendo otras fuentes de emisiones como las procedentes de la quema de combustibles fósiles en sectores industriales. Esta delimitación permite mantener un enfoque específico en la optimización del proceso de captura en este tipo de instalaciones, sentando las bases para desarrollos posteriores ajustados a sus condiciones particulares.

El estudio se centra exclusivamente en la captura de CO₂ de los gases de escape de un crematorio, considerando las características típicas de estos sistemas y las propiedades del MDEA como solvente. La simulación se lleva a cabo utilizando Aspen Plus para modelar el proceso de absorción con el fin de determinar los mejores parámetros operativos (como la concentración de MDEA, las temperaturas de operación, y la eficiencia de la captura).

2. METODOLOGÍA

La post-combustión, proceso que se muestra en la figura 1, aunque menos eficiente que la pre-combustión en términos de concentración de CO₂, es un proceso aplicable a instalaciones ya existentes, lo que lo convierte en una opción atractiva para su implementación a corto plazo.

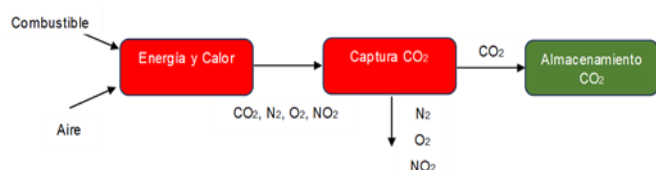


Figura 1: Esquema Post-combustión.

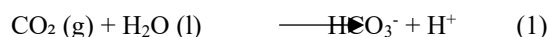
El sistema propuesto para la captura de CO₂ en un crematorio es un proceso de captura postcombustión basado en la absorción de CO₂ en una solución acuosa de MDEA. Este sistema consta de una etapa principal: la absorción.

En la absorción, los gases de escape del crematorio, que contienen una concentración de CO₂, se introducen en una columna de absorción donde se ponen en contacto con la solución de MDEA. Durante este proceso, el CO₂ se disuelve en la solución acuosa, formando un complejo con el MDEA.

Este proceso es eficiente, económico y escalable para su implementación en crematorios de diferentes tamaños, con el beneficio adicional de que se minimizan las emisiones de CO₂ a la atmósfera., proceso que se muestra en la figura 2.

La MDEA es una amina terciaria que, al entrar en contacto con CO₂ disuelto en agua, forma iones bicarbonato (HCO₃⁻) y carbonato (CO₃²⁻) mediante una reacción ácido-base reversible. Este proceso ocurre en la fase líquida de la torre de absorción, donde el CO₂ se transfiere desde la fase gaseosa al líquido. La formación de MDEA⁺ indica que la reacción de captura ha tenido lugar, ya que es el producto de la protonación

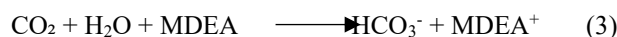
de la MDEA tras la reacción con CO₂, como se muestra en la Ec. 1.



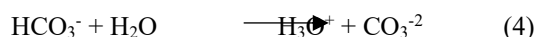
La MDEA capta el protón H⁺ para formar el ión protonado, como se muestra en la Ec. 2:



Donde la reacción total simplificada se muestra en la Ec. 3:



Además, el CO₂ absorbido en agua forma primero HCO₃⁻, donde parte de ese bicarbonato puede perder otro protón y transformarse en el ión carbonato CO₃²⁻, como se muestra en la Ec. 4:



El CO₂ capturado en forma de carbamato de amonio y el ión carbonato, puede ser liberado mediante un proceso de regeneración. Al calentar la solución rica en CO₂, el carbamato se descompone, liberando CO₂ puro que puede ser almacenado o utilizado, mientras que la MDEA se regenera y puede ser recirculada al sistema.

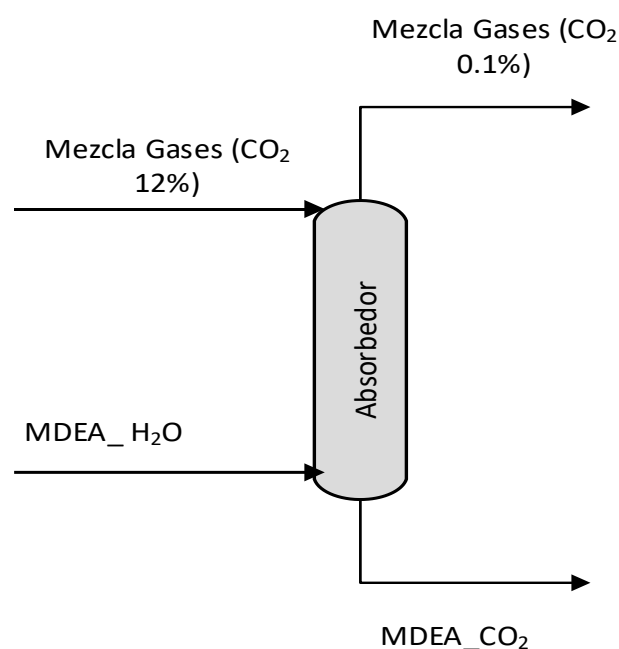


Figura 2. Esquema de Captura de CO₂
Estructura del Modelo en Aspen Plus

La simulación en Aspen Plus se lleva a cabo mediante la creación de un modelo que represente el sistema de captura propuesto. La estructura del modelo se divide en los siguientes bloques principales:

1. Entrada de Gases de Escape:

El modelo de gases de escape se modela con una corriente que contenga CO₂, O₂, N₂ y otros compuestos menores. Las características de esta corriente (como flujo volumétrico, composición y temperatura) se toman de datos típicos de un crematorio.

- Entrada de la solución acuosa compuesta de MDEA y H_2O .

La solución acuosa MDEA- H_2O , a diferentes concentraciones, es introducida en la columna de absorción para capturar el CO_2 al entrar en contacto con el flujo de gases.

- Columna de Absorción:

La columna de absorción se modela como una torre de absorción, en la cual se especifica el flujo de la solución de MDEA y su concentración. El modelo incluye la transferencia de masa entre la fase gas y la fase líquida, considerando las condiciones operativas del proceso.

- Salida de CO_2 capturado con MDEA

La sustancia acuosa, cargada del CO_2 capturado, es extraída de la columna de absorción.

- Salida de Gases resultantes.

El gas resultante es liberado a la atmósfera con pequeñas cantidades de CO_2 residual.

Condiciones de Operación

Para la simulación en Aspen Plus, se definen las siguientes condiciones y supuestos:

- Gases de Escape del Crematorio:

- Composición típica de los gases de escape: 10-15% de CO_2 , 80-85% de N_2 y O_2 , y trazas de otros gases.
- Temperatura de entrada: 900-1000°C.
- Presión de entrada: 1 atmósfera (suponiendo que el proceso de cremación ocurre a presión atmosférica).

- Solución de MDEA:

- Concentración de MDEA: 30 y 50%.
- Temperatura de la solución: 60 y 70°C.
- Velocidad de recirculación: Definida para garantizar una captura eficiente sin problemas de corrosión o pérdida de amina.

- Columna de Absorción:

- Se asume una eficiencia de transferencia de masa alta (90%) para la absorción de CO_2 en la solución de MDEA.
- Número de etapas de la columna y la altura se estima de 10 etapas para obtener una captura eficiente de CO_2 .

Selección de Modelo Termodinámico y Configuración Básica del Flujo

- Para modelar el comportamiento de la solución MDEA, se utiliza el modelo termodinámico Electrolyte-NRTL (Non-Random Two-Liquid), que es adecuado para sistemas que contienen disolventes acuosos como el MDEA, ya que considera tanto la interacción entre iones como los efectos de las especies químicas en la fase líquida.
- En la simulación, el flujo de gases de escape se utiliza a una temperatura adecuada para la absorción (60-70°C) antes de ser introducido en la columna de absorción.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelado del proceso en Aspen Plus

El proceso de absorción se modela utilizando el software Aspen Plus, seleccionando las propiedades termodinámicas adecuadas para MDEA y CO_2 . Se utiliza una columna de absorción como unidad de operación para simular el contacto entre los gases de combustión y el absorbente MDEA donde ocurre la reacción química.

Partiendo de una composición de gases, luego de la combustión, de CO_2 al 12%, O_2 al 3.1%, N_2 al 67%, vapor de H_2O al 10%, CO al 0.4%, CH_4 al 0.5%; NO_x , SO_x y partículas, a una temperatura (T) de 60 y 70°C, presión (P) de 1.1 atm de entrada en el absorbedor. La entrada de mezcla de MDEA- H_2O se simula en varias composiciones, según la literatura, de cada sustancia, al 50 % de cada una, así como 30% y 70% respectivamente con iguales valores de T (60°C) y P para una fracción de masa de 400kg/h.

El dispositivo de captura de CO_2 en la simulación se compone de una columna de absorción, como se muestra en la figura 3, donde los gases se hacen burbujear en sentido contrario al MDEA.

Los flujos de gas y absorbente se simulan en función de las propiedades termodinámicas, la velocidad de flujo y las concentraciones de CO_2 .

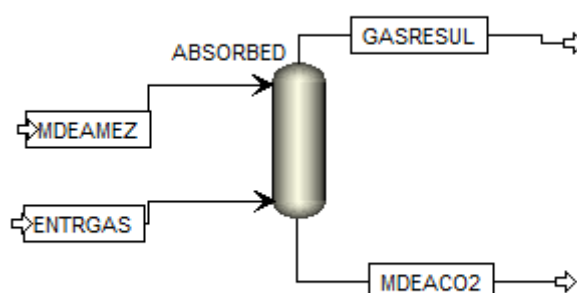


Figure 3. Esquema de Captura de CO_2 en Aspen Plus

Limitaciones del Modelo

- En el modelo, se asume una composición de gases de escape estándar basada en datos promedio. Sin embargo, en la práctica, las emisiones de crematorios pueden variar dependiendo de diversos factores, lo que podría afectar la precisión del modelo.
- El modelo asume que las propiedades termodinámicas del MDEA son constantes, lo cual puede no ser del todo preciso a lo largo del tiempo debido a la posible degradación de la amina o la variabilidad de las condiciones de operación.
- Los contaminantes presentes en los gases de escape (como NO_x , SO_x y otros compuestos) no fueron modelados detalladamente, aunque podrían afectar la eficiencia de la absorción y la regeneración de la amina.

Estos resultados proporcionan una visión clara sobre la efectividad de la captura de CO_2 en crematorios usando

MDEA, subrayando tanto las ventajas como las áreas de mejora del sistema.

El uso de MDEA permite una alta capacidad de absorción y una menor corrosión en las instalaciones en comparación con otros solventes. Además, es más eficiente y menos costoso a largo plazo.

Se realizan varias simulaciones en Aspen Plus, las primeras 4, se realizan configurando el absorbedor para $P = 1.1 \text{ atm}$, con 10 etapas para una eficiencia de 90% y 200 iteraciones, con diferentes valores de T , 60°C para las simulaciones 1 y 3, y 70°C para las simulaciones 2 y 4; el tiempo de contacto en cada etapa de 5s para las simulaciones 1 y 2; y 10s para las simulaciones 3 y 4; la composición de mezcla de MDEA- H_2O al 50% de cada sustancia para un flujo de mezcla de 400 kg/h y un flujo de gases de 100 kg/h .

Con las configuraciones anteriores se logran diferentes valores de captura de CO_2 en la figura 4 se muestran los resultados de las simulaciones 1 y 3, a) y b) respectivamente, donde se aprecia la mayor captura de CO_2 en cada componente, como resultado de la reacción química. Un resumen de los resultados de las simulaciones 1, 2, 3 y 4 se muestran en la Tabla 1 con sus respectivos valores de eficiencia.

Material	Heat	Load	Vol.% Curves	Wt.% Curves	Petroleum	Material	Heat	Load	Vol.% Curves	Wt.% Curves	Petroleum
MDEA			0.000153485	0.455431		MDEA			0.000132897	0.453136	
H2S			0	0		H2S			0	0	
CO2			1.0959e-05	2.41375e-05		CO2			1.67376e-06	2.55706e-05	
O2			0.031174	4.22949e-05		O2			0.0317553	4.49869e-05	
N2			0.778828	0.000419902		N2			0.793516	0.000448205	
CH4			0.0493654	0.000355743		CH4			0.050209	0.000378029	
CO			0.00418456	2.55367e-06		CO			0.00426344	2.71934e-06	
H2			0.00210388	1.22629e-11		H2			0.00214391	1.40964e-11	
HCO3-			0	0.0171184		HCO3-			0	0.0177901	
MDEA+			0	0.0420458		MDEA+			0	0.0431982	
CO3-2			0	0.00207817		CO3-2			0	0.00203562	

a) Simulación 1

b) Simulación 3

Figura 4. Resultados de Captura de CO_2 en Aspen Plus (1ra y 3ra Simulación)

Tabla 1. Resultado de captura de CO_2 en Aspen Plus para 50% MDEA.

Simulación	Tiempo interacción (s)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	CO_2 captura do ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$)(kg/h)	CO_2 no captura do	Eficiencia (%)
1	5	60	11.9781	0.02189	99.82
2	5	70	11.9764	0.02365	99.63
3	10	60	11.9785	0.02154	99.66
4	10	70	11.9770	0.02299	99.64

En un proceso de absorción como el que se simula en Aspen Plus, la eficiencia de captura de CO_2 aumenta a medida que el gas pasa a través de las distintas etapas de la columna de absorción. Cada etapa permite que el CO_2 se transfiera de la fase gaseosa a la fase líquida (solución de MDEA), y la eficiencia de captura mejora conforme se incrementa el número de etapas. Sin embargo, a medida que el número de etapas aumenta, la mejora en la captura tiende a estabilizarse después de un cierto punto.

En la gráfica, el Eje X (Número de Etapas): representa el número de etapas de contacto en la columna de absorción. Cuanto más alta es la cantidad de etapas, mayor es el tiempo de contacto entre el gas y la solución de amina. El Eje Y (Captura de CO_2): muestra la fracción molar de CO_2 que se ha capturado en cada etapa.

En la gráfica, figura 5, se muestra el comportamiento de la captura por etapas de la simulación 1, donde se obtuvo mayor eficiencia de captura; se observa que las primeras etapas (del 1 al 6) muestran un aumento rápido en la captura de CO_2 , lo que sugiere que las primeras etapas son las más eficaces en cuanto a la absorción del gas.

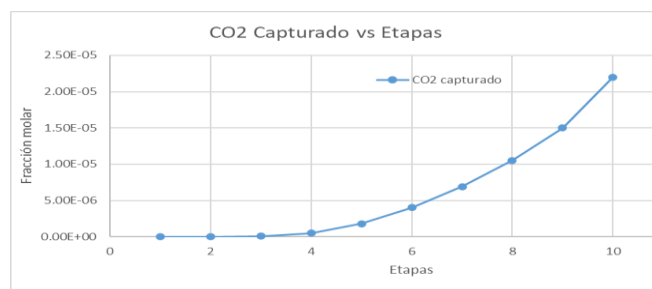


Figura 5. Gráfico de Resultados de Captura de CO_2 vs Etapas en Aspen Plus (1ra Simulación)

Aumentar el número de etapas requiere de más espacio y, en algunos casos, más energía (para mover los líquidos a través de la columna y mejorar la transferencia de masa). Por lo tanto, hay un equilibrio entre la mejora en la captura y los costos operativos adicionales.

Basándose en este tipo de gráfico, un diseño óptimo podría limitar el número de etapas a las necesarias para alcanzar una captura eficiente de CO_2 sin incurrir en costos adicionales innecesarios. Esto es particularmente relevante cuando se evalúa la viabilidad económica de la implementación del sistema de captura.

Las siguientes 4 simulaciones se realizan configurando el absorbedor para iguales valores de T y P , cantidad de etapas, eficiencia, iteraciones y tiempo de contacto; variando la composición de mezcla de MDEA- H_2O al 30 y 70% respectivamente, con iguales valores de flujos.

Con las configuraciones anteriores se logran diferentes valores de captura de CO_2 en la figura 6 se muestran los resultados de las simulaciones 7 y 8, a) y b) respectivamente, donde se aprecia la mayor captura de CO_2 en cada componente, como resultado de la reacción química. Un resumen de los resultados correspondientes a las simulaciones 5, 6, 7 y 8 se muestran en la Tabla 2 con sus respectivos valores de eficiencia.

Material	Heat	Load	Vol.% Curves	Wt.% Curves	Petroleum	Material	Heat	Load	Vol.% Curves	Wt.% Curves	Petroleum
MDEA			7.57201e-05	0.247711		MDEA			0.000139753	0.25407	
H2S			0	0		H2S			0	0	
CO2			1.12773e-05	3.09075e-05		CO2			1.13327e-05	3.12485e-05	
O2			0.0305504	5.85578e-05		O2			0.0283517	5.98257e-05	
N2			0.764028	0.000578462		N2			0.709525	0.000595106	
CH4			0.0480323	0.000492887		CH4			0.0443563	0.000501581	
CO			0.00410461	3.52981e-06		CO			0.00381166	3.61515e-06	
H2			0.00206519	1.51858e-11		H2			0.00191886	1.7976e-11	
HCO3-			0	0.020907		HCO3-			0	0.0198344	
MDEA+			0	0.0513696		MDEA+			0	0.0480022	
CO3-2			0	0.00254364		CO3-2			0	0.00223012	

a) Simulación 7

b) Simulación 8

Figura 6. Resultados de Captura de CO_2 en Aspen Plus (7ma y 8va Simulación)

Tabla 2. Resultado de captura de CO₂ en Aspen Plus para 30% MDEA.

Simulación	Tiempo interacción (s)	Temperatura (°C)	CO ₂ capturado (HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ⁻²)(kg/h)	CO ₂ no capturado	Eficiencia (%)
5	5	60	9.66814	2.33186	80.42
6	5	70	11.9761	0.02391	99.61
7	10	60	11.9760	0.02396	99.62
8	10	70	11.9753	0.02466	99.61

La eficiencia de captura se define como la cantidad de CO₂ absorbido por la solución de MDEA en relación con el CO₂ total presente en los gases resultantes de la combustión. Es uno de los índices más cruciales para evaluar el rendimiento del sistema, como se muestra en la Ec. 5.

$$\text{Eficiencia de Captura} = \frac{\text{CO}_2 \text{ capturado}}{\text{CO}_2 \text{ total en gases de combustión}} \times 100 \quad (5)$$

Los resultados de las simulaciones muestran la eficiencia de la captura de CO₂ (99%) bajo diferentes condiciones operativas. Se evaluaron parámetros como la concentración de MDEA y T, y se determinó que ciertas condiciones operativas favorecen una mayor captura de CO₂.

En la siguiente gráfica, el Eje X (simulaciones realizadas): representa el número de simulaciones realizadas para cada % de mezcla de MDEA (30 y 50%). El Eje Y (Temperatura): muestra las T (60 y 70°C) a las que se realizaron las simulaciones.

En la gráfica, figura 7, se muestra el comportamiento de la captura de CO₂, donde, a pesar de obtener capturas eficientes, mayores del 99% en la mayoría de las simulaciones, sólo en la simulación 5 (30% MDEA) se observan diferencias considerables, quedando por debajo del 90% la eficiencia de captura, en el resto de las simulaciones se muestra una variación muy pequeña para los flujos de gases utilizados, se obtuvo una captura constante para el 30% de la mezcla de MDEA independientemente de la T y tiempos de interacción utilizados.

Se observa que variando la concentración de MDEA, se mejora la eficiencia de captura.

Los resultados indican que la eficiencia de captura de CO₂ es sensible a la concentración de MDEA. Se sugieren condiciones de operación óptimas para maximizar la captura.

La eficiencia se mantuvo alta incluso con variaciones en la concentración de MDEA, lo que sugiere que el sistema de captura propuesto es robusto frente a diferentes condiciones.

La simulación mostró que la temperatura óptima para la absorción se encuentra 60°C.

Los resultados confirman que el uso de MDEA en un proceso de captura de CO₂ en crematorios es eficaz. Sin embargo, la optimización del proceso depende de factores operativos como la temperatura y la concentración del absorbente.

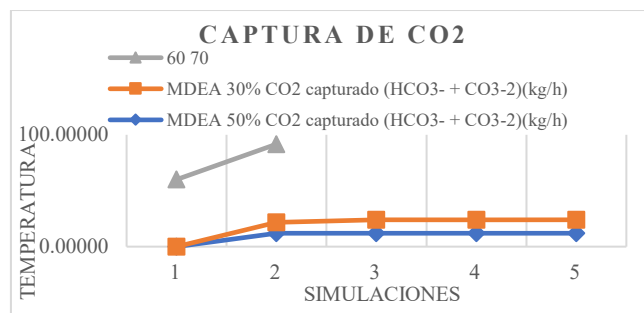


Figura 7. Comparativa de resultados de Captura de CO₂ con Temperatura y Cantidad de MDEA.

Comparando con estudios previos en la literatura sobre la captura de CO₂ con MDEA, los resultados obtenidos en esta simulación muestran valores superiores con la mayoría de los estudios que informan eficiencias de captura entre 90% y 95% para procesos de absorción con aminas. La eficiencia del sistema propuesto supera el rango esperado para tecnologías de captura postcombustión, lo que respalda la viabilidad de usar MDEA en crematorios.

A pesar de que el MDEA es eficaz, tecnologías como la captura por membranas o el uso de otros solventes más avanzados podrían ofrecer mejores rendimientos en ciertas condiciones. Sin embargo, el MDEA sigue siendo una opción viable para muchos procesos industriales.

4. CONCLUSIONES

En el estudio de la captura de CO₂ en crematorios utilizando MDEA, se han observado los siguientes hallazgos clave:

La eficiencia de captura de CO₂ utilizando una solución de MDEA en el sistema de absorción postcombustión es alta, alcanzando un 99% de captura bajo condiciones operativas estándar. Esto sugiere que el sistema es eficaz para reducir las emisiones de CO₂ generadas en los crematorios.

Se establece la temperatura óptima para la absorción, lo cual favorece una mayor captura de CO₂ sin generar un consumo energético excesivo. Además, el número de etapas de absorción influye directamente en la eficiencia, siendo las primeras etapas las más eficientes.

La propuesta de implementar un sistema de captura de CO₂ en crematorios utilizando MDEA es viable, especialmente para aquellos crematorios con una alta tasa de emisión de CO₂. Las principales ventajas de este sistema incluyen:

El sistema permite reducir de manera significativa las emisiones de CO₂, al capturar el 99% del CO₂ lo cual es crucial para cumplir con las normativas ambientales y mejorar el perfil ecológico de los crematorios.

La propuesta de captura de CO₂ utilizando MDEA para crematorios es viable, con altos índices de captura y una clara reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Con un enfoque adecuado en la investigación y mejora de los procesos, esta tecnología puede desempeñar un papel crucial en la reducción de la huella de carbono de los crematorios y en el cumplimiento de las regulaciones ambientales. La simulación muestra que la captura de CO₂ en un crematorio

mediante MDEA es viable y efectiva, con un alto rendimiento bajo condiciones optimizadas.

La simulación en Aspen Plus es una herramienta crucial en la optimización del proceso de captura de CO₂, ya que permite realizar un análisis detallado y preciso de diversos aspectos del proceso, desde la selección de solventes hasta la optimización de parámetros operativos. La variación de la concentración de MDEA, la variación de la temperatura y el tiempo de contacto afectan directamente la capacidad de absorción de CO₂. Se pueden simular diferentes concentraciones, temperaturas y tiempo de interacción para encontrar el valor óptimo. Además, proporciona la flexibilidad necesaria para probar diferentes configuraciones sin incurrir en los costos y riesgos de la experimentación física. Lo cual resulta en un diseño más eficiente, rentable y sostenible para las tecnologías de captura de CO₂.

5. RECOMENDACIONES

Desarrollo de Nuevos Solventes: el MDEA es una opción prometedora, su degradación con el tiempo puede ser un desafío, por lo que se podría explorar el uso de solventes alternativos o aditivos que incrementen la vida útil de la amina y mejoren la eficiencia en la captura.

Reducción de Costos Operativos: diseñar columnas de absorción con mayor capacidad de captura para reducir el número de etapas necesarias y, por ende, los costos operativos.

Monitoreo y Control Continuo: Desarrollar un sistema de monitoreo en tiempo real para la concentración de CO₂ en los gases de escape y en la solución de MDEA. Esto permitiría ajustar dinámicamente las condiciones operativas y optimizar la eficiencia del proceso.

Estudios de Impacto Económico y Ambiental: Realizar un análisis de costo-beneficio detallado que considere no solo los costos de implementación, sino también los beneficios a largo plazo en términos de reducción de emisiones de CO₂, cumplimiento de normativas ambientales y posibles incentivos fiscales por la adopción de tecnologías limpias.

Pilotaje en Crematorios Reales: Implementar un proyecto piloto en un crematorio para validar la viabilidad del sistema en condiciones operativas reales. Esto permitiría ajustar los parámetros de operación y proporcionar datos más precisos sobre los costos y el rendimiento.

6. AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, y Tecnologías e Innovación (SECIHTI) por la beca para desarrollar esta investigación en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet) sede del Tecnológico Nacional de México (TecNM).

7. REFERENCIAS

Antonini, C., Pérez-Calvo, J.F., Van der Spek, M., Mazzotti, M. (2021). Optimal design of an MDEA CO₂ capture plant for low-carbon hydrogen production — A rigorous process optimization approach.

Arachchige, U., Rasenthiran, K., Liyanage, M. (2019). Modelling Of CO₂ Capture Using Aspen Plus For Coal Fired

Power Plant. International Journal of Scientific & Technology Research, Volume 8, ISSUE 07, ISSN 2277-8616, 316, IJSTR©2019. www.ijstr.org

Beck, A., & Jones, P. (2021). Carbon Emissions from Modern Crematories. Journal of Environmental Science & Technology.

Becken, S., & McLaren, L. (2021). Electricity-Based Cremation and CO₂ Emissions. Journal of Sustainable Environmental Science.

Environmental Impact of Cremation: CO₂ Emissions and Regulatory Measures. (2022). Environmental Impact Journal, 15(2): 101-115.

Environmental Performance of Electric Cremation Systems: A Comparative Analysis. (2023). Environmental Impact Journal, 20(1): 70-85.

Gupta, V. (2016). Modelling of CO₂ capture using Aspen Plus for EDF power plant, Krakow, Poland. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal. October 2016.

Gutiérrez, P., Vigil Montaña, M. R., & Burgos Rodriguez, S. (2014). TECNOLOGIAS DE CAPTURA DE CO₂. Dyna, 89(3), 360–365. <https://doi.org/10.6036/7003>

Leiqing Hu, Vinh T. Bui, Narjes Esmaeili, Haiqing Lin. (2024). Nanoengineering membrane surfaces: A new paradigm for efficient CO₂ capture, Carbon Capture. Science & Technology, Volume 10, 100150, ISSN 2772-6568. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100150>

Liu, C., Shao, L., Pan, C., Xu, F., Wu, Z., Zhao, Z., Chen, Y., Fan, H., Zheng, C., & Gao, X. (2024). Multi-stage solvent circulation absorption enhancement: System optimization for energy-saving CO₂ capture. Separation and Purification Technology, 332(125644), 125644. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125644>

Pedraza, J; Martínez, L; Suarez, L; Rojas, N; Ramírez, J; Mejía, A; Cano, D; Chavarrio, J; Casallas, J. (2018). Métodos de captura de CO₂: Innovando contra el cambio climático. Innovación y Ciencia, Revista XXV No. 1. AvanCiencia. https://innovacionyciencia.com/articulos_cientificos/metodos-de-captura-de-co2-innovando-contra-el-cambio-climatico

Zhang, M., Xu, T., Zhao, Q., Liu, K., Liang, D., & Si, C. (2024). Cellulose-based materials for carbon capture and conversion. Carbon Capture Science & Technology, 10(100157), 100157. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100157>

Won, Y., Lee, S. (2019). Energy Efficiency Improvement and Field Scale Study of Crematory using Computation Fluid Dynamics. Appl. Chem. Eng., Vol. 30, No. 1, February 2019, 95-101. <https://doi.org/10.14478/ace.2018.1108>



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A

Ildester Sánchez Ruiz

Por su valiosa participación como Personal de Apoyo en la organización y desarrollo del
3er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA)
Llevado a cabo del 19 al 22 de noviembre de 2024 en las instalaciones del Tecnológico Nacional de
México campus Centro nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET)

Cuernavaca, Morelos, 22 de noviembre de 2024



1081624

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>

LORENZO O. HERNÁNDEZ
DIRECTOR DEL CENTRO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Sello Digital:

j2R/eCvR46H8ACO9VvvbH9B51KfWY1u6G83VK3ze65fuPOKvJzOt+EEIyq1406N3/0jB3b0sgv7NWT00aWdX
VtJEQAc472Zn8y8cNZXD7Cpwr/tKJLjQedBiomMfPx+DwTZ8e12IwF55zvEQ63EA83Bkak8T46CQmc3OLk9jEA
bsRBBuGUICjs056d3fHhVhHwk9xMPIEiCYKFMB6htrLHex+jNqvMalWshOPp//9rjTNFVsGkIbbPR925G1WDJV
f3aIJbDMBqOXiWEY5NUxQhGvyN2n1L7+BS1Gd6V6spOFYSTmfi+EpomBy+OIUJDVpbkzmiAjt0BB6YpAOmXw==

ALICIA MARTÍNEZ REBOLLAR
COORDINADORA GENERAL
III CITCA

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

CITCA
3er CONGRESO INTERNACIONAL
DE TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A

Ildester Sánchez Ruiz

Por su destacada e invaluable participación como miembro del
EQUIPO ORGANIZADOR
del 4.º Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA), celebrado
en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico del 21 al 23 de
mayo de 2025.

Cuernavaca, Morelos, 23 de mayo de 2025

LORENZO O. HERNÁNDEZ
Director del CENIDET

MANUEL ADAM MEDINA
Coordinador General
4.º CITCA



Sello Digital:

YAnZTeTjwDyWox2pgQjYP2IWJa+C3xpW+iAMj+9jecXwkKdgYM7YmfhXtJa4Nngjm0bY2MAK
7tV43Xk4SmI9XDmBantgUQvzsTN1huJDQ3it5tB54rXxpAL5NXpC/fkvTLG2JMLvAV5WUBN
Le1SvZNMwn5KSGMqrSNz5Rfsx0WRvFKP9hNU3r5ERqUly1Ow7OznAg1AGoeWwZhRxx99aYp2D
FmmCTjLptvpAKROhRqPg5wa63QIgLiFVP2d/8kDGR5bvTOVG8a+yKoOJNc+q1jthgcpBzYU3
E1KngkbFWWnLtiWtRxEwR7+HrG0t4Uz/LaYXrk2VJp1MyojkuErkeg==

1090525

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Agencia de Protección Ambiental de EE. UU., 2024. Calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero: Cálculos, <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculadora-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero-calculos>.
2. Aguillón, J., 2020. Captura de CO₂. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, <https://www.iingen.unam.mx/es-mx/AlmacenDigital/Gaceta/GacetaMarzo-Abril2020/Paginas/captura-co2.aspx>.
3. Alonso, M., 2015. Capítulo III. Revisión del estado del arte. <https://1library.co/document/zwz4jp1z-captura-post-combusti%C3%B3n-tecnolog%C3%ADas-captura-co-centrales-t%C3%A9rmicas>.
4. Antonini, C. and Pérez-Calvo, J.-F. and van der Spek, M. and Mazzotti, M., 2021. Optimal design of an MDEA CO₂ capture plant for low-carbon hydrogen production: A rigorous process optimization approach. Separation and Purification Technology, 274, 119715, DOI 10.1016/j.seppur.2021.119715.
5. Arachchige, U., Rasenthiran, K., Liyanage, M. (2019). Modelling Of CO₂ Capture Using Aspen Plus For Coal Fired Power Plant. International Journal of Scientific & Technology Research, Volume 8, ISSUE 07, ISSN 2277-8616, 316, IJSTR©2019. www.ijstr.org.
6. Aramendiz, E. (2018). Dimensionamiento y simulación de una torre de absorción empacada en contracorriente para separación de CO₂ derivado de efluentes gaseosos industriales. Universidad de Pamplona.
7. Aurens. (2024, 22 de octubre). ¿Cuánto dura una incineración? Etapas y factores. <https://www.aurens.es/es/blog/cuanto-dura-incineracion>.
8. Ávila, J, León, E, Ortiz, O. (2018). Determinación de la huella de carbono por medio del protocolo (ghg) Green house gas protocol y medidas de mitigación para el cementerio Distrital del norte Bogotá D.C. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/15903/Articulo%20final%20Revisado.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
9. Ayala Blanco, E., & Martínez Ortega, F. (2019). Tecnologías de captura de CO₂ en procesos de postcombustión de gas natural. MET&FLU 2019.
10. Baker, J., Perinu, P., Psarrou, M., Mordal, S., Kusuma, V., Muldoon, P., Asimakopoulou, A., Hopkinson, A., Economopoulos, S. (2024). Mixed matrix membranes composed of graphene-based derivatives as additives in PVAm for CO₂ capture. <https://ssrn.com/abstract=4831241>

11. Beck, A., & Jones, P. (2021). Carbon Emissions from Modern Crematories. *Journal of Environmental Science & Technology*.
12. Becken, S., & McLaren, L. (2021). Electricity-Based Cremation and CO₂ Emissions. *Journal of Sustainable Environmental Science*.
13. Benavides, S., Soto, N., Ugalde, L., Hernández, S., & Márquez, F. (2021). Estimación del incremento de las emisiones de contaminantes a la atmósfera producto del proceso de cremación de cadáveres por COVID-19 en la Ciudad de México. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5 (6), 11676. https://doi.org/10.37811/cl_cm.v5i6.1194.
13. Benavides, S., Soto, N., Ugalde, L., Hernández, S., & Márquez, F. (2022). Análisis de la calidad del aire en la CDMX para identificar la presencia de los contaminantes: PM_{1,0}, PM_{2,5}, CO, NO_x y SO₂, emitidos en la cremación debido al incremento de cadáveres en periodo de la pandemia por COVID-19. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6 (4), 5942. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.3064.
14. Bhuripaño, P., Wirunsutakhunand, P., Somsri, T., Phaensomboon, P., Yai-in, A. y Rattanachan, K. (2023). Desarrollo de un modelo de aprendizaje para mejorar la práctica budista en templos y comunidades urbanas como modelo de cremación. *Revista de Educación y Aprendizaje*, 12 (1), 19–34. <https://doi.org/10.5539/jel.v12n1p19>.
15. Borges, L. (2023). Tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ como vía hacia la descarbonización. <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/33898>.
16. Breck, D. W. (1974). *Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry, and Use*. Wiley-Interscience.
17. Bui, M., & Mac Dowell, N. (Eds.). (2020). *Carbon capture and storage (Energy and Environment Series No. 26)*. The Royal Society of Chemistry. <http://books.rsc.org/books/edited-volume/chapter-pdf/1579944/bk9781788011457-00001.pdf>.
18. Caltec. (sf) Hornos automáticos “Caltec” para Cremación [Folleto]
19. Cao, L., Lei, S., Guan, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Tian, J., Wang, T., Luo, B., & Ren, T. (2022). CCUS industry under target of carbon-peak and carbon-neutrality: Progress and challenges. *Frontiers in energy research*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.860665>
20. Carbon Trust. (2020). *Carbon Footprint Calculation for Restaurants and Foodservice Operators*.

21. Carbon Trust (2021). Emissions Factors for Commonly Used Fuels. Carbon Trust Publications.
22. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016). Emisiones atmosféricas y su impacto en la salud.
23. Comisión de Salud del Honorable Congreso de la Ciudad de México, I Legislatura. (2020). Dictamen en sentido positivo con modificaciones a la iniciativa con proyecto de decreto, por el que se añade el artículo 349 bis, a la Ley General de Salud (Documento legislativo No. 1). Congreso de la Ciudad de México.
24. Comité de las Naciones Unidas para la Eliminación de Contaminantes Orgánicos Persistentes (2024). Sección VI. Orientación/directrices por categorías de fuentes: Parte III del Anexo C - Categoría de fuentes (g): Crematorios [Informe oficial].
25. Concepción, EIC (2016). Caracterización termodinámica de mezclas acuosas de aminas. (Tesis doctoral). Universidad de Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/25811/Tesis1296-170921.pdf?sequence=1>
26. Copeland, B. (2020) <https://www.thecdsgroup.co.uk/news/the-uk-cremation-industry-emissions>.
27. Cremation Society of New Hampshire. (2020). Cremation Carbon Footprint. [Enlace](<https://csnh.com>).
28. Da Costa, D, Puppín, R, Yoshio, E, Assunção, R. (2020). Indicadores de Sostenibilidad en Restaurantes: El desarrollo de una lista de verificación. *Sostenibilidad*, 12, 4076; doi:10.3390/su12104076.
29. Dai, H., Xia, Y., & Zheng, H. (2017). Carbon-Based Nanomaterials for Environmental Protection and Remediation. Springer.
30. Darunte, L. A., Sen, T., Bhawanani, C., Walton, K. S., Sholl, D. S., Realff, M. J., & Jones, C. W. (2019). Moving beyond adsorption capacity in design of adsorbents for CO₂ capture from ultradilute feeds: Kinetics of CO₂ adsorption in materials with stepped isotherms. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(1), 366–377. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b05042>.
31. Das, D., Agarwal, T., & Biswal, A. K. (2023). A review on different methods of CO₂ capture, separation and utilization. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s43153-023-00378-z>.
32. Dziejarski, B., Krzyżyńska, R., & Andersson, K. (2023). Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment. *Fuel*, 342, 127776. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127776>.

33. ElSharkawy, MF; Ibrahim, OA. (2022). Impacto de las emisiones de las chimeneas de los restaurantes en la calidad del aire exterior. *Atmósfera*, 13, 261. <https://doi.org/10.3390/atmos13020261>.
34. Environmental Impacts of Cremation, *Journal of Environmental Management*, 2021.
35. Environmental Impact of Cremation: CO₂ Emissions and Regulatory Measures. (2022). *Environmental Impact Journal*, 15(2): 101-115.
36. Environmental Performance of Electric Cremation Systems: A Comparative Analysis. (2023). *Environmental Impact Journal*, 20(1): 70-85.
37. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. file:///C:/Users/USER/Downloads/5.C.1.b.v %20Cremation %202023 %20FINAL.pdf.
38. EPA (United States Environmental Protection Agency). (2015). Emission Factors for Incineration.
39. EPA-454/R-23-001cc March 2023. 2020 National Emissions Inventory Technical Support Document: Miscellaneous Non-Industrial NEC: Cremation – Human and Animal. https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-04/NEI2020_TSD_Section29_Cremation.pdf.
40. European Environment Agency (EEA). (2023). Emission Inventory Guidebook 2023. Agencia Europea de Medio Ambiente.
41. Fang, M., Lackner, M., & Sajjadi, B. (2022). Absorción química. En M. Lackner, B. Sajjadi, & W. Y. Chen (Eds.), *Manual de mitigación y adaptación al cambio climático* (p. 38). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72579-2_38.
42. Fathalian, F., Aarabi, S., Ghaemi, A. & Hemmati, A. (2022). Intelligent prediction models based on machine learning for CO₂ capture performance by Graphene oxide-based adsorbents. *Scientific Reports* | (2022) 12:21507. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26138-6>.
43. Franco, D., Georgin, J., Villarreal, L., Arango M., Orozco, J., Moreno, C., Neckel, I., Oliveira, M., Gindri, C. (2022). The environmental pollution caused by cemeteries and cremations: A review. *Chemosphere*, Volume 307, Part 4, 136025, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136025>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522025188>.
44. Gautam, A., & Mondal, M. K. (2023). Review of recent trends and various techniques for CO₂ capture: Special emphasis on biphasic amine solvents. *Fuel* (London, England), 334(126616), 126616.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126616>.

45. Geográfico Nacional. (2019, 27 de noviembre). El precio ambiental de cremar a los muertos. National Geographic Latinoamérica. <https://www.nationalgeographicla.com/ciencia/2019/11/el-precio-ambiental-de-cremar-los-muertos>.
46. Graus, W., & Voogt, M. (2007). Small installations within the EU Emissions Trading Scheme: Report under the project “Review of EU Emissions Trading Scheme” (ECS04079). European Commission, Directorate-General for Environment / Ecofys.
47. González, LC y Urrego, CA (2020). Análisis del impacto ambiental generado por el horno crematorio jardín de la localidad de Fontibón [Trabajo académico, Universidad Antonio Nariño]. Facultad de Ingeniería Ambiental, Ingeniería Ambiental, Sede Sur.
48. Goyat, R.; Saharan, Y.; Singh, J.; Umar, A.; Akbar, S. (2022). Synthesis of Graphene-Based Nanocomposites for Environmental Remediation Applications: A Review. *Molecules* 2022, 27, 6433. <https://doi.org/10.3390/molecules27196433>.
49. Gunarathna, M., Aviddika, N., Sithija, A., Sureka, P. (2024). Current advancements in CO₂ capture using graphene-based materials. *European Journal of Chemistry* 15 (3) (2024) 302-30. <https://doi.org/10.5155/eurjchem.15.3.302-306.2561>.
50. Gupta, V. (2016). Modelling of CO₂ capture using Aspen Plus for EDF power plant, Krakow, Poland. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal. October 2016.
51. Gutiérrez, J. P., Torres, F., Ale Ruiz, E. L., Bandoni, J. A., & Erdmann, E. (2019). Diseño conceptual óptimo de una planta de separación de dióxido de carbono con evaluación económica futura y riesgo ambiental. X Congreso Argentino de Ingeniería Química (CAIQ2019). Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/163815>.
52. Gutierrez, P., Vigil Montaña, M. R., & Burgos Rodriguez, S. (2014). Tecnologías de captura de CO₂. *Dyna*, 89(3), 360–365. <https://doi.org/10.6036/7003>.
53. Gwenzi, W. (2021). Autopsy, thanatopraxy, cemeteries and crematoria as hotspots of toxic organic contaminants in the funeral industry continuum. *Science of The Total Environment*, Volume 753, 2021, 141819, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141819>.
54. Han, S., J. Kim, J., Ko, S. (2021). Advances in air filtration technologies: structure-based and interaction-based approaches. *Materials Today Advances* 9 (2021) 100134. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2021.100134>.

55. Hernández Contreras, J. M. (2019). Caracterización química y determinación de factores de emisión de contaminantes emitidos por hornos crematorios [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco].
56. Hernández, J. (2019). Tesis de Maestría Caracterización química y determinación de factores de emisión de contaminantes emitidos por hornos crematorios. Universidad Autónoma Metropolitana Casa Abierta al tiempo Azcapotzalco.
57. Hernández, S. (2020, abril 2). Natural | Crematorios contaminan con tecnologías obsoletas. El Sol de México. <https://oem.com.mx/elsoldemexico/mexico/crematorios-contaminan-con-tecnologias-obsoletas-muertes-coronavirus-covid-19-salud-16670764>.
58. Huang, S., Li, S., Villalobos, L. F., Dakhchoune, M., Micari, M., Babu, D. J., Vahdat, M. T., Mensi, M., Oveisi, E., & Agrawal, K. V. (2021). Millisecond lattice gasification for high-density CO₂ - and O₂ -sieving nanopores in single-layer graphene. *Science Advances*, 7(9). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abf0116>.
59. Huang, X.; Ai, N.; Li, L.; Jiang, Q.; Wang, Q.; Ren, J.; Wang, J. (2022). Simulación de CO₂ Proceso de captura en Gases de combustión de la combustión de oxígeno y combustible Planta y efectos de las propiedades de Absorbente. *Separaciones* 2022, 9, 95. <https://doi.org/10.3390/separaciones9040095>.
60. Ibrahim, M. A., Petersson, M., Åström, M., & Johansson, M. (2023). Physical environmental hazards associated with the Swedish death care industry. *Safety Science*, 161, 106195. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106195>.
61. INEGI. (2021). Nota técnica, Estadísticas de defunciones registradas (EDR) 2020.
62. INEGI. (2022). Nota técnica, Estadísticas de defunciones registradas (EDR) 2021.
63. INEGI. (2024). Nota técnica, Estadísticas de defunciones registradas (EDR) 2023.
64. INEGI. (2020-2021). Recopilación de Información de los Cementerios Públicos en las Zonas Metropolitanas del País 2021
65. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2005). IPCC special report on carbon dioxide capture and storage (B. Metz, O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, L. A. Meyer, Eds.). Cambridge University Press.
66. International Energy Agency (2016). Mexico Energy Outlook Special Report.
67. IEA (2021), About CCUS, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/about-ccus>, Licence: CC BY 4.0.

68. International Cremation Federation (ICF). (2019). Cremation Technology and Standards.
69. Isah, M., Lawal, R., Onaizi, S. (2024). CO₂ capture and conversion using graphene-based materials: a review on recent progresses and future outlooks. Green Chemical Engineering, DOI: <https://doi.org/0.1016/j.gce.2024.09.009>.
70. Jia, J., Zou, X., Chen, X., Wang, H. y Sun, Q. (2020). Análisis de imitación de la transferencia de calor en hornos crematorios mediante software de simulación de elementos finitos. Thermal Science, 24 (S5), 3545–3555. <https://doi.org/10.2298/TSCI191216127J>.
71. Jiang, Z., & Cao, Y. (2019). Adsorption and desorption of water vapor on silica gel and zeolite in industrial desiccant systems. Chemical Engineering Journal.
72. Khan S., Navalgund L., Joshi K., Kumar A. (Autumn 2023). Design and fabrication of a system to capture ambient CO₂. Journal of Air Pollution and Health; 8(4): 399-410. <http://japh.tums.ac.ir>.
73. Kim, H., & Ahn, Y.-H. (2024). Selective CO₂ capture from CO₂/N₂ gas mixtures utilizing tetrabutylammonium fluoride hydrates. Molecules (Basel, Switzerland), 29(6), 1284. <https://doi.org/10.3390/molecules29061284>.
74. Kim, S. H., Landa, H. O. R., Ravutla, S., Realff, M. J., & Boukouvala, F. (2022). Data driven simultaneous process optimization and adsorbent selection for vacuum pressure swing adsorption. Chemical Engineering Research and Design, 188, 1013–1028. <https://doi.org/10.1016/j.cher.2022.10.002>.
75. Lee, K.-H.; Huang, C.-C.; Chuang, S.; Huang, C.-T.; Tsai, W.-H.; Hsieh, C.-L. (2022). Energy Saving and Carbon Neutrality in the Funeral Industry. Energies. 15, 1457. <https://doi.org/10.3390/en15041457>.
76. Leiqing Hu, Vinh T. Bui, Narjes Esmaeili, Haiqing Lin. (2024). Nanoengineering membrane surfaces: A new paradigm for efficient CO₂ capture, Carbon Capture. Science & Technology, Volume 10, 100150, ISSN 2772-6568. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100150>.
77. Leyva, S, Arango, P, Toledo, A. (2022). Validación de un instrumento para medir el desempeño Ambiental de restaurantes. ANFECA, 26 Congreso Internacional de Ciencias Administrativas, Ciudad de México, Días 5, 6 y 7 de octubre.
78. Little, B. (2019, noviembre 6). ¿Cómo afecta la incineración al medio ambiente? National Geographic en Español. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2019/11/como-afecta-la-incineracion-al-medio-ambiente>.

79. Little, B. (2019, noviembre 28). El precio ambiental de cremar a los muertos. National Geographic en Español. <https://www.nationalgeographicla.com/ciencia/2019/11/el-precio-ambiental-de-cremar-los-muertos>.
80. Lin, H., et al. (2023). Energy Consumption and Carbon Emissions in Commercial Kitchens. *Journal of Sustainable Hospitality*, 34(1): 55-69.
81. Liu, C., Shao, L., Pan, C., Xu, F., Wu, Z., Zhao, Z., Chen, Y., Fan, H., Zheng, C., & Gao, X. (2024). Multi-stage solvent circulation absorption enhancement: System optimization for energy-saving CO₂ capture. *Separation and Purification Technology*, 332(125644), 125644. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125644>.
82. Liying A., Shenfang L., Wang, L., Wu, L., Wu, Z., Ma, C., Yu, Q., Hu, X. (2019). Novel Nitrogen-Doped Porous Carbons Derived from Graphene for Effective CO₂ Capture. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2019, 58, 33493358 © 2019 American Chemical Society 3349 DOI: 10.1021/acs.iecr.8b06122. Downloaded <https://pubs.acs.org/sharingguidelines> for options on how to legitimately share published articles.
83. Lu J. G., Gao L., Wang J. T., et al. (2015). Prediction and validation of physical property for a CO₂ capture agent of aqueous (potassium citrate + 2-amino-2-methyl-1-propanol). *J. Nat. Gas. Sci. Eng.* 27:1574– 1584. doi: 10.1016/j.jngse.2015.10.025.
84. Madeira, L., Ribau Teixeira, M., & Carvalho, F. (2024). Modeling and optimization of atmospheric CO₂ capture for neutralization of high alkaline wastewaters using response surface methodology. *Journal of CO₂ Utilization*, 81(102705), 102705. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102705>.
85. Maniarasu, R., Rathore, S.K., and Sivalingam, M. (2022). “Simulation Study of Post-Combustion CO₂ Adsorption Using Adsorbent”. SAE Technical Paper 2022-28-0318, doi:10.4271/2022-28-0318.
86. Marchi, B., Nardin, G., Barazzutti, A., & Giust, F. (2023). Environmental and energetic performance of crematorium plants. *Chemical Engineering Transactions*, 99, 667–672. <https://doi.org/10.3303/CET2399112>.
87. Mao Haiyan and Jeffrey Reimer. (2022). Un material sencillo y barato para la captura de carbono, quizás de los tubos de escape. <https://www.quimica.es/noticias/1177287/un-material-sencillo-y-barato-para-la-captura-de-carbono-quizas-de-los-tubos-de-escape.html>.
88. Mato Mariño, JI (2022). Evaluación del impacto ambiental generado por los procesos de un crematorio privado en el centro poblado de Jancao, distrito de Amarilis, Huánuco, 2021 [Trabajo para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental]. Huánuco, Perú.

89. Mesa Niño, FA y Rodríguez Montes, AM (2023). Estudio técnico, económico y de impacto ambiental del proceso de absorción química de CO₂ mediante el uso de aminas (MEA y MDEA) y amoníaco (NUEVA HAMPSHIRE3) [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química.
90. Mohd H., Agarwal R., Sharma U., Thapliyal P., Singh, L. (2023) A review on CO₂ capture and sequestration in the construction industry: Emerging approaches and commercialised technologies. *Journal of CO₂ Utilization*, Volume 67, 102292, ISSN 2212-9820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102292>.
91. Montse M., José L. (2010). Toxic emissions from crematories: A review. *Environment International*, Volume 36, Issue 1, Pages 131-137, ISSN 0160-4120. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.09.006>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412009002050>.
92. Moreno Sanz, S. (2019). Estudio de sistemas de captura de CO₂ y métodos de concentración de CO₂ en corrientes gaseosas aplicados a ciclos combinados [Proyecto fin de grado, Universidad de Sevilla, Dpto. Ingeniería Química y Ambiental, Escuela Técnica Superior de Ingeniería].
93. Muthu, S. (2019). *Carbon Footprint Analysis: Concepts, Methods, Implementation and Case Studies*. CRC Press.
94. Nakao, S.-i., Yogo, K., Goto, K., Kai, T., & Yamada, H. (2019). *Tecnologías avanzadas de captura de CO₂*.
95. Muthu, S. (2019). *Carbon Footprint Analysis: Concepts, Methods, Implementation and Case Studies*. CRC Press.
96. Nittaya, T. (2014). *Dynamic modelling and control of MEA absorption processes for CO₂ capture from power plants* (Master's thesis, University of Waterloo).
97. O'Keeffe, J. (2020). *Field inquiry: crematoria emissions and Air quality impacts*. National Collaborating Centre for Environmental Health. https://ncceh.ca/sites/default/files/FINAL_Field%20Inquiry-Crematoria%20emissions%20and%20air%20quality%20impacts_EN_0.pdf.
98. Organización de las Naciones Unidas. (1992). *Agenda 21: Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo*.
<https://www.un.org/es/conferences/environment/riode1992>.

99. Organización de las Naciones Unidas. (2015). Transformando nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (A/RES/70/1). <https://sdgs.un.org/2030agenda>.
100. Pedraza, J; Martínez, L; Suarez, L; Rojas, N; Ramírez, J; Mejía, A; Cano, D; Chavarrio, J; Casallas, J. (2018). Métodos de captura de CO₂: Innovando contra el cambio climático. *Innovación y Ciencia, Revista XXV No. 1. AvanCiencia*. https://innovacionyciencia.com/articulos_cientificos/metodos-de-captura-de-co2-innovando-contra-el-cambio-climatico.
101. Peres, C. B., Resende, P. M. R., Nunes, L. J. R., Morais, L. C. de. (2022). Advances in carbon capture and use (CCU) technologies: A comprehensive review and CO₂ mitigation potential analysis. *Clean Technologies*, 4(4), 1193–1207. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4040073>.
102. Puentes, L., & Velandia, L. (2024). Tecnologías para captura de CO₂: Revisión sistemática de tecnologías para captura de CO₂ de grado, Universidad Industrial de Santander]. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/163815>.
103. Quan, C., Zhou, Y., Wang, J., Wu, C., & Gao, N. (2023). Biomass-based carbon materials for CO₂ capture: A review. *Journal of CO₂ Utilization*, 68(102373), 102373. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102373>.
104. Rincón Ocampo, EF, & Mejía Díaz, RJ (2023). Simulación en Aspen HYSYS del proceso de captura de CO₂ con mezclas de monoetanolamina (MEA) y líquidos iónicos [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química.
105. Robertson, E. (2007). Analysis of CO₂ separation from flue gas, pipeline transportation, and sequestration in Coal. Estados Unidos de América: Idaho National Laboratory. 29.
106. Rööös, E., & Johansson, M. (2019). Carbon Footprint of Food in Restaurants: A Case Study. *Journal of Cleaner Production*, 228, 876-885.
107. Ruhaimi, A.H., Hitam, C.N.C., Aziz, M.A.A., Hamid, N.H.A., Setiabudi, H.D., Teh, L.P. (2022). The role of surface and structural functionalisation on graphene adsorbent nanomaterial for CO₂ adsorption application: Recent progress and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 167, 112840, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112840>.
108. Ruiz, M. (2023). Tesis Licenciatura en Ciencias Ambientales Emisiones 2018-2021 de crematorios en la ZMVT detectados por la RAMA. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Planeación Urbana y Regional. <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/138719/UAME-FaPUR-TESIS-MARIA>

%20FERNANDA %20RUIZ %20RUIZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

109. Ruiz, M. (2023). Tendencia de cremaciones y emisiones en el Valle de Toluca [Informe institucional].
110. Saif, A., SungWoo N. and Seyed A. (2019). Recent Advances in Graphene Oxide Membranes for Gas Separation Applications. <http://dx.doi.org/10.3390/ijms20225609>.
111. Sainz i Codes, A. (2022). Diseño de una columna de absorción de CO₂ para el tratamiento de biogás [Trabajo de grado, Universitat Politècnica de Catalunya]. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/376990>.
112. Salomone, F., Marocco, P., Ferrario, D., Lanzini, A., Fino, D., Bensaid, S., & Santarelli, M. (2023). Process simulation and energy analysis of synthetic natural gas production from water electrolysis and CO₂ capture in a waste incinerator. *Applied Energy*, 343 (121200), 121200. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121200>.
113. Sánchez, E. (2010). Impacto ambiental de los crematorios en la Ciudad de México. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
114. Sánchez Bas, MM (2023). Absorción química de CO₂ para la obtención de una corriente de metano, procedente del biogás generado en el proceso de digestión anaerobia de una depuradora de aguas residuales urbanas (Tesis doctoral, Universidad de Granada, Departamento de Ingeniería Civil). <https://hdl.handle.net/10481/82549>.
115. Schnelle Jr., K.B., Dunn, R.F., & Ternes, M.E. (2015). *Air Pollution Control Technology Handbook*. (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19286>.
116. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial Norma Mexicana NMX-AA-009-1993-SCFI. Contaminación atmosférica-fuentes fijas-determinación de flujo de gases en un conducto por medio de tubo de PITOT.
117. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México. Norma ambiental para el Distrito federal NADF-017- AIRE-2017 - Equipos de cremación e Incineración - Límites máximos permisibles de emisiones a la Atmósfera y condiciones de operación. 2018. https://paot.org.mx/centro/normas_a/2020/NADF_017_AIRE_2017.pdf.
118. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2012). NORMA Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011: Contaminación atmosférica - Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición. Secretaría de Gobernación. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5232012&fecha=02/02/2012#gsc.tab=0.

119. Secretaría de Salud. (2021, octubre 29). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al monóxido de carbono (CO). Valores normados para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634084&fecha=29/10/2021.
120. Serrano Vasco, A. (2024). Estudio comparativo sobre aspectos ambientales entre las tecnologías de descarbonización por absorción de aminas y vía membranas [Tesis de maestría, Universidad de Sevilla]. Dpto. Ingeniería Química y Ambiental, Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
121. Shahid, M. Z., Maulud, A. S., Bustam, M. A., Suleman, H., Abdul Halim, H. N., & Shariff, A. M. (2021). Packed column modelling and experimental evaluation for CO₂ absorption using MDEA solution at high pressure and high CO₂ concentrations. *Journal of Natural Gas. Science and Engineering*, 88 (January), 103829. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103829>.
122. Shamiri A., Shafeeyan M. S., Tee H. C., et al. (2016). Absorption of CO₂ into aqueous mixtures of glycerol and monoethanolamine. *J. Nat. Gas. Sci. Eng.* 35:605–613. doi: 10.1016/j.jngse.2016.08.072.
123. Swati Singh, S., Varghese, A., Reinalda, D., Karanikolos, G. (2021). Graphene - based membranes for carbon dioxide separation. *Journal of CO₂ utilization*. 49 101544. 2212-9820/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101544>.
124. Tavares, N., Rojas, A., Da Cruz, Dos Santos, F., Bittencourt, I., Zancan, I., Silva, G., (2017). Environmental impacts caused by cemeteries and crematoria, new funeral technologies, and preferences of the Northeastern and Southern Brazilian population as for the funeral process. *Environ Sci Pollut Res Int* 2017 Nov;24(31):24121-24134. doi: 10.1007/s11356-017-0005-3.
125. Terlouw, T., Treyer, K., Bauer, C., & Mazzotti, M. (2021). Life cycle assessment of direct air carbon capture and storage with low-carbon energy sources. *Environmental Science & Technology*, 55(16), 11397–11411. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03263>.
126. Tirado Ballesteros, D. H., & Umaña Caballero, L. M. (2021). Estudio conceptual de la tecnología de captura de CO₂ por medio de la absorción de aminas y su efecto en la corrosión de aceros al carbono. Universidad Industrial de Santander. Recuperado de <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/40948>.

127. Tri Komala Junita, Norman Syakir, Ferry Faizal, and ACS Omega 2024. Graphene-Based Composite for Carbon Capture. 9 (19), 20658-20669. DOI: 10.1021/acsomega.3c08722.
128. Turrado Fernández, S. (2019). Desarrollo de nuevos procesos de captura de CO₂ con CaO en cementeras [Tesis doctoral, Universidad de Oviedo].
129. UNFCCC. (2015). Acuerdo de París (FCCC/CP/2015/10/Add.1).
<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>.
130. Vega, F., Cano, M., Camino, S., Gallego Fernández, L. M., Portillo, E., & Navarrete, B. (2016). Solvents for carbon dioxide capture. En Carbon dioxide chemistry, capture and oil recovery. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71443>.
131. Wang, L., Pereira, N., Hung, Y. (2004). Air pollution control engineering / edited by Lawrence K. Wang, Norman C. Pereira, Yung-Tse Hung; consulting editor, Kathleen Hung Li. Humana Press Inc. Volume 1. Handbook of Environmental Engineering.
132. Wang, T., & Roberts, C. (2020). Carbon Footprint Analysis of Food and Beverage Operations. Hospitality Environmental Management Journal, 12(3): 215-230.
133. Wang, S., Liu, Y., Zhang, C., Guo, S., & Li, Y. (2024). High gravity-enhanced Direct Air Capture: A leap forward in CO₂ adsorption technology. Atmosphere, 15(2), 238. <https://doi.org/10.3390/atmos15020238>.
134. Won, Y.-T., & Lee, S.-M. (2019). Field scale study for energy efficiency improvement of crematory system by the shape optimization of combustion chamber. Applied Chemistry for Engineering, 30(1), 95–101. <https://doi.org/10.14478/ace.2018.1108>.
135. Xu, Jiayuan. (2023). Research progress in CO₂ capture technology. Highlights in Science, Engineering and Technology, Volume 73. EMCEME 2023.
136. Xue Y., Cheng L, Chen X, Zhai X, Wang W, Zhang W, et al. (2018). Emission characteristics of harmful air pollutants from cremators in Beijing, China. PLoS ONE 13(5): e0194226. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194226>.
137. Zhao, X., & He, J. (2018). Graphene-based materials for CO capture: A review. Environmental Science Technology, 52(8), 4219-4236. DOI: 10.1021/acs.est.8b01342. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01342>.
138. Zhang, M., Xu, T., Zhao, Q., Liu, K., Liang, D., & Si, C. (2024). Cellulose-based materials for carbon capture and conversion. Carbon Capture Science & Technology, 10(100157), 100157. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100157>.

139. Zhang, W., & Liu, Y. (2019). Recent advances in graphene-based adsorbents for CO₂ capture. *Journal of Materials Science*, 54(15), 10107-10126. DOI: 10.1007/s10853-019-03390-6. [https://doi.org/ 10.1007/s10853-019-03390-6](https://doi.org/10.1007/s10853-019-03390-6).