

Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2024,
Volumen 8, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3

**LA APLICABILIDAD DE LAS TORRES DE
ABSORCIÓN DE GASES EN EL CONTROL DE
EMISIONES INDUSTRIALES: UNA REVISIÓN
BIBLIOGRÁFICA**

**THE APPLICABILITY OF GAS ABSORPTION TOWERS IN
INDUSTRIAL EMISSION CONTROL: A LITERATURE REVIEW**

Washington Jair Cabrera Palacios
Universidad Técnica de Machala, Ecuador

Martha Cristina Espinoza Aguirre
Universidad Técnica de Machala, Ecuador

Dennis Brigitte Lazo Chica
Universidad Técnica de Machala, Ecuador

Angie Lilibeth Ulloa González
Universidad Técnica de Machala, Ecuador

Wilson Patricio León Cueva
Universidad Técnica de Machala, Ecuador

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.12033

La Aplicabilidad de las Torres de Absorción de Gases en el Control de Emisiones Industriales: Una Revisión Bibliográfica

Washington Jair Cabrera Palacios¹wcabrera3@utmachala.edu.ec<https://orcid.org/0009-0007-1406-0513>Universidad Técnica de Machala
Ecuador**Martha Cristina Espinoza Aguirre**mespinoza14@utmachala.edu.ec<https://orcid.org/0009-0003-9394-611X>Universidad Técnica de Machala
Ecuador**Dennis Brigitte Lazo Chica**dlazo1@utmachala.edu.ec<https://orcid.org/0009-0003-4196-5933>Universidad Técnica de Machala
Ecuador**Angie Lilibeth Ulloa González**aulloa3@utmachala.edu.ec<https://orcid.org/0009-0000-0680-6273>Universidad Técnica de Machala
Ecuador**Wilson Patricio León Cueva**wleon@utmachala.edu.ec<https://orcid.org/0000-0002-5474-430X>Universidad Técnica de Machala
Ecuador

RESUMEN

La absorción de gases es crucial para reducir las emisiones atmosféricas de industrias que contribuyen significativamente a la contaminación del aire. Sin embargo, gran parte de la información disponible sobre este tema es antigua y puede no ser citable. Este artículo de revisión bibliográfica tiene como objetivo recopilar y sintetizar información actualizada sobre las torres de absorción de gases, proporcionando una referencia moderna para investigadores y académicos. La metodología incluyó la búsqueda de literatura en bases de datos científicas como Springer Link, Elsevier, MDPI, Google Académico, y ResearchGate, seleccionando estudios publicados entre 2017 y 2024 en inglés y español en el caso de los artículos científicos. Se seleccionaron, revisaron y analizaron 31 fuentes relevantes entre las que comprenden artículos científicos, libros y demás documentación. Los resultados destacan la efectividad de las torres de absorción en diversas aplicaciones industriales y su importancia en la mitigación de la contaminación atmosférica. Las implicaciones de esta revisión subrayan la necesidad de adoptar y optimizar estas tecnologías para cumplir con las normativas ambientales y mejorar la calidad del aire.

Palabras clave: absorción de gases, torres de absorción, emisiones industriales, gases contaminantes, control de contaminación

¹ Autor principal.

Correspondencia: wcabrera3@utmachala.edu.ec

The Applicability of Gas Absorption Towers in Industrial Emission Control: A Literature Review

ABSTRACT

The gas absorption is crucial to reduce atmospheric emissions from industries that contribute significantly to air pollution. However, much of the available information on this topic is old and may not be citable. This literature review article aims to compile and synthesize up-to-date information on gas absorption towers, providing a modern reference for researchers and academics. The methodology included literature search in scientific databases such as Springer Link, Elsevier, MDPI, Google Scholar, and ResearchGate, selecting studies published between 2017 and 2024 in English and Spanish in the case of scientific articles. Thirty-one relevant sources including scientific articles, books, and other documentation were selected, reviewed, and analyzed. The results highlight the effectiveness of absorption towers in various industrial applications and their importance in air pollution mitigation. The implications of this review highlight the need to adopt and optimize these technologies to comply with environmental regulations and improve air quality.

Keywords: gas absorption, absorption towers, industrial emissions, gaseous pollutants, pollution control

Artículo recibido 18 mayo 2024

Aceptado para publicación: 21 junio 2024



INTRODUCCIÓN

La revolución industrial marcó el comienzo de un crecimiento exponencial en el desarrollo tecnológico, económico y social, mejorando significativamente la calidad de vida. No obstante, este progreso también ha generado problemas ambientales graves, afectando recursos vitales como el agua, el suelo y, en particular, el aire (Bravo-Calle et al., 2021; Oliveros et al., 2022).

El aire, que permite la dispersión de gases y partículas, sufre graves la contaminación derivada de la quema de combustibles fósiles, utilizada principalmente para producir energía. Esta actividad libera sustancias nocivas como el dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Algunos de estos compuestos son gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global, mientras que otros son precursores de aerosoles atmosféricos que, a pesar de tener un efecto de enfriamiento, resultan altamente tóxicos y están asociados con la muerte prematura de millones de personas anualmente (Shindell & Smith, 2019). Otras industrias tales como la química, la petroquímica y la minería metálica y no metálica también generan aspectos ambientales que contaminan el recurso aire (H. Yang et al., 2018).

Ante estas circunstancias, la absorción de gases surge como una herramienta para reducir la liberación de gases tóxicos y nocivos hacia la atmósfera, cumpliendo así con las normativas ambientales respectivas para cada región y actividad industrial a la vez que se garantiza la responsabilidad ambiental por parte de las industrias.

El propósito de este artículo es recopilar y sintetizar los conceptos principales de las torres de absorción de gases y las aplicaciones que estas tienen en las industrias cuyas actividades aportan más a la contaminación atmosférica, en vista de que una buena parte de la data disponible sobre el tema ya cuenta con una antigüedad considerable y puede dejar de ser citable en algunos casos. Por tanto, los autores buscan actualizar la información para que pueda ser usada como referencia por los escritores de futuras investigaciones.

METODOLOGÍA

Se plantea una investigación del tipo descriptivo mientras que el diseño de investigación usado para el desarrollo de este artículo fue de carácter documental de revisión, en el cual se incluyeron buscadores digitales como: Springer Link, Elsevier, Google Scholar, Web of Science,



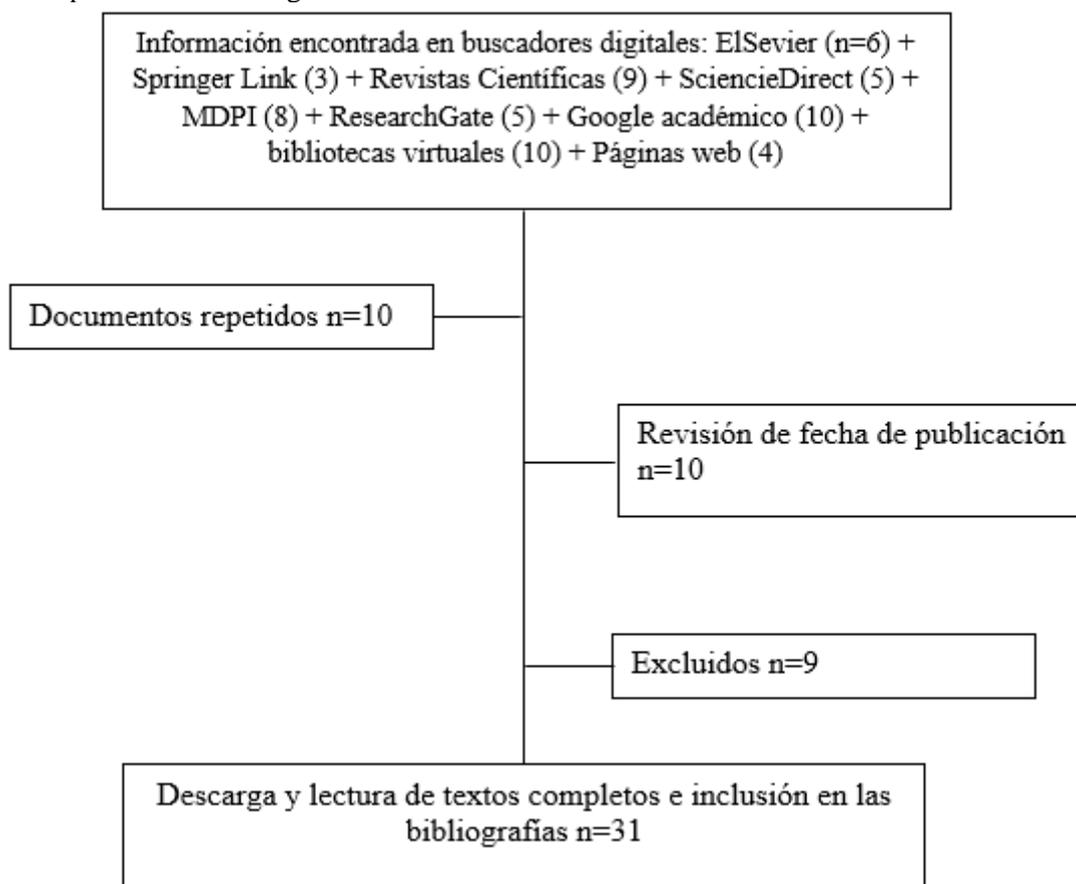
ResearchGate, MDPI, ScieDirect, Mendeley, bibliotecas virtuales y revistas científicas con el fin de obtener acceso a las fuentes de información necesaria y fidedigna. La selección de información contenida en artículos científicos cumplía con un lapso de 8 años entre 2017 y el 2024 para los artículos más relevantes y de años anteriores para los de tipo complementario. Del mismo para la selección de libros no se requirió años específicos debido a que algunos de los textos tienen varios años de antigüedad pero que la información que contienen es fundamental para este trabajo. El idioma seleccionado fue en español e inglés, las palabras claves de búsqueda fueron, “Absorción de gases”, “Torres de absorción”, “Torres de lavado de gases”, “Aplicaciones industriales de torres de absorción”, “contaminación atmosférica” para la búsqueda en español, y “Pollution”, “scrubbers”, “absorption”, “Gas washing towers”, “Gas absorption”, “Industrial Applications” en el caso del idioma inglés.

Se extrajo información detallada referente al tema, autores, año de publicación, metodología, revisiones de literatura y conclusiones emitidas que brindan información sobre absorción de gases, torres de absorción, columna de platos, torres empacadas, aplicaciones industriales, contaminación ambiental aquella información que no presentaba estos términos eran excluidos.

De las 60 fuentes de información se eliminaron 10 por duplicación de datos. Considerando los criterios de exclusión se evaluó el título, fecha de publicación, resumen y conclusión de los artículos científicos, de los que 10 se eliminaron por no cumplir 8 años de publicación, y 9 por decisión de autores. Finalmente se seleccionaron 31 fuentes de información que cumplían los requisitos de búsqueda. Después se descargó el texto completo y se analizó cada uno.



Gráfico 1. Diagrama de búsqueda y selección de información científica para desarrollo del artículo por revisión bibliográfica



Fuente: Autoría propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Principios de funcionamiento de las torres de absorción de gases

La absorción de gases es una operación unitaria basada en la transferencia de masa que tiene lugar cuando una mezcla de gases entre en contacto con un líquido que puede disolver uno o varios componentes de dicha mezcla, dejándola libre de los gases absorbidos por el líquido (McCabe et al., 2007; Wankat, 2008). Para que la absorción tenga efecto, una fracción del gas debe no ser soluble en el líquido usado, esto suele ser nombrado como “inerte” y es el producto del proceso de absorción. La fracción del gas que sí es absorbida por el líquido suele recibir la denominación de “soluto de interés”.

Las torres de absorción o columnas de absorción son equipos cilíndricos altos que se usan para absorción de gases. Están diseñadas para maximizar el área de contacto entre el gas y el líquido, lo que facilita la transferencia de masa del soluto desde la fase gaseosa a la fase líquida. Para ello,

se emplea una sustancia líquida que tiene una alta afinidad con el componente deseado. El equipo se compone de un tanque de alimentación de solvente, una columna de absorción, un tanque para recolectar el solvente usado, un baño frío y un humidificador (INTECMO S.A.S., 2017).

La mezcla gaseosa que contiene el soluto entra en contacto con el líquido absorbente dentro de la torre o columna de absorción. El método más común y efectivo para la absorción es el flujo a contracorriente, en el que el gas fluye en dirección opuesta al líquido.

Se difunde el soluto desde la fase gaseosa hacia la fase líquida debido a la diferencia de concentración entre ambas. La fuerza que impulsa la transferencia de masa es la diferencia de potencial químico del soluto entre las dos fases. Luego, el soluto se disuelve en el líquido absorbente, formando una solución. La solubilidad del soluto en el líquido es un factor importante que determina la eficiencia del proceso de absorción. El líquido absorbente, ahora rico en soluto, se retira de la parte inferior de la torre de absorción y se envía a un proceso de regeneración donde se separa el soluto del absorbente, el cual se recircula a la torre para ser reutilizado. El soluto recuperado puede ser un producto final o un intermedio en otro proceso (Salazar, 2000).

Tipos de torres de absorción

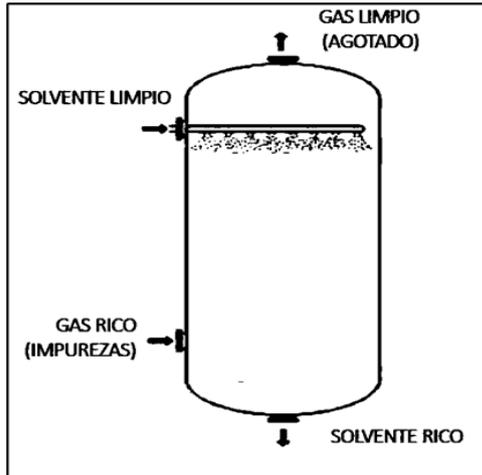
Torres de spray o de rocío

Se emplea en operaciones a gran escala, especialmente para la eliminación de partículas contaminantes de los gases de combustión en centrales térmicas y otros procesos industriales. Estas torres no suelen tener relleno en su interior y se las recomienda cuando se busca una pérdida baja de carga y cuando existe presencia de partículas en suspensión en la corriente gaseosa entrante, es decir que puede manejar corrientes de gas que contienen presencia de partículas como polvo, entre otros (Salazar, 2000).

El solvente líquido ingresa al sistema mediante boquillas de aspersion colocadas en la parte superior de la estructura, donde el líquido se atomiza en finas gotas distribuyéndose uniformemente dentro de la torre y el gas que contiene el componente absorbedor ingresa por la parte del fondo del sistema.



Gráfico 2. Estructura de una torre de rocío

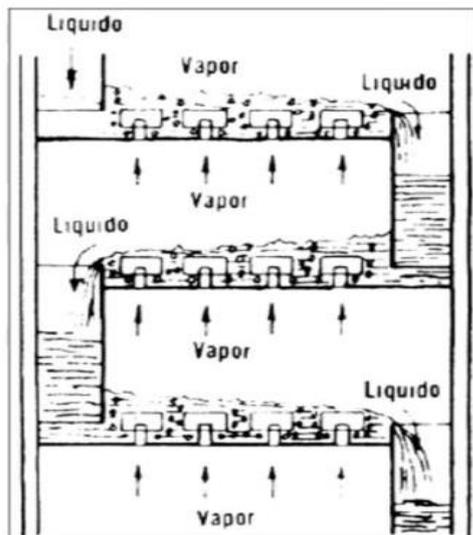


Fuente: (Marcilla Gomis, 1999).

Columnas de platos

Las columnas de platos operan bajo el principio de contracorriente, donde el gas y el líquido fluyen en direcciones opuestas. En el interior del equipo se encuentran unas superficies planas llamadas platos que dividen la torre en partes o también conocido como etapas (Valiente Barderas, 2010). Cada plato es como una etapa de equilibrio en la que los componentes gaseosos se incorporan al líquido absorbente (Noguera, 2023).

Gráfico 3. Absorción con columna de platos



Fuente: (McCabe et al., 2007).

El líquido se introduce por la parte superior y desciende por gravedad a través de estos platos los cuales tienen como función retener cierta cantidad de líquido en su superficie, mientras que el gas ingresa en la columna por su parte inferior y sube a través de los platos, asegurando un buen

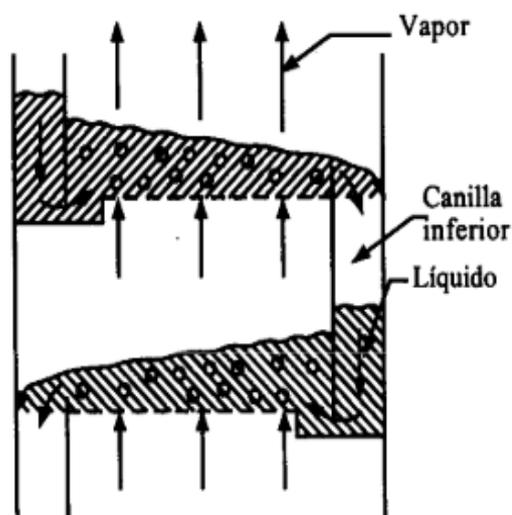
contacto entre las fases. El líquido presente en cada plato se desplaza al siguiente a través de un rebosadero situado en el borde o extremo de cada plato. En este plato se mezclan ambas corrientes, permitiendo la transferencia de materia. Se utiliza dos tipos de variaciones de platos los cuales son:

- Platos perforados

Los platos perforados son placas circulares generalmente fabricadas en metal, como acero inoxidable o aluminio. Poseen una gran cantidad de orificios o perforaciones distribuidas uniformemente por toda su superficie.

El gas asciende burbujeando a través de los orificios en los platos perforados, sobre los cuales fluye la fase líquida. El líquido permanece en la superficie de cada placa porque la energía cinética del gas ascendente impide que el líquido fluya por los agujeros. La profundidad de líquido en cada plato se mantiene constante mediante un vertedero de salida que canaliza el exceso de líquido hacia el plato inferior. Este proceso se repite en cada nivel de platos que exista en la columna de absorción, hasta que el líquido alcanza el fondo del equipo (Valiente Barderas, 2010).

Gráfico 4. Detalle de una torre de platos perforados



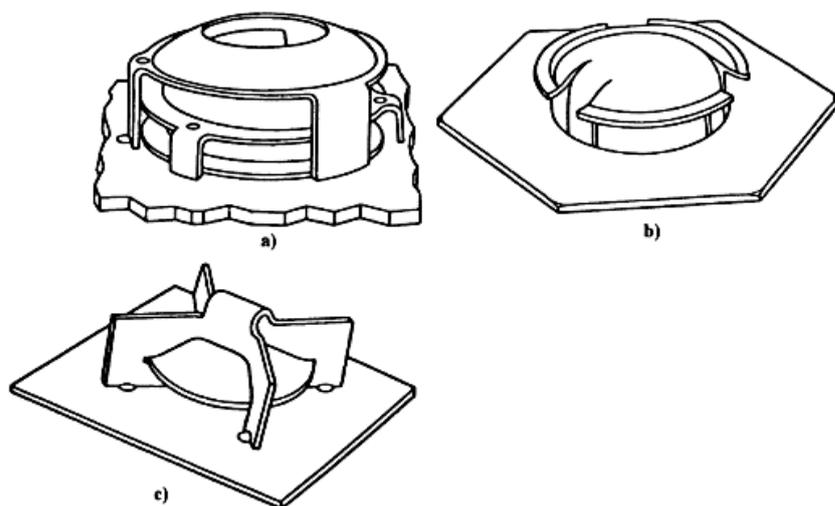
Fuente: (Geankoplis, 1998).

Platos de válvula

Los platos de válvula son una evolución de los platos de perforados. En este diseño, hay una válvula que puede moverse verticalmente para ajustar el área de apertura de cada orificio. Esta característica permite que la válvula se abra con la presión del gas en ascenso, lo que evita la fuga

de líquidos solventes a través de los orificios, especialmente cuando se trabaja con bajas presiones de vapor. Debido a sus ventajas y eficacia, esta configuración es ampliamente empleada (Geankoplis, 1998).

Gráfico 5. Válvulas representativas. a) Glitsch tipo A-1. b) Koch tipo A. c) Koch tipo T.

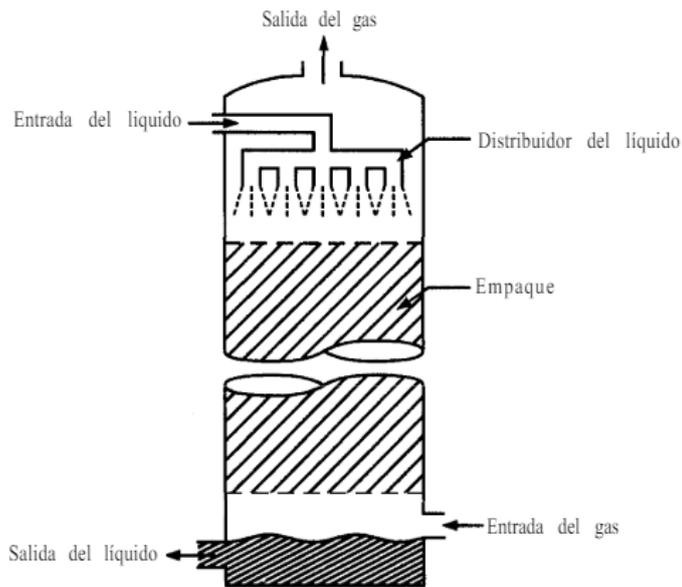


Fuente: (Marcilla Gomis, 1999).

Torres rellenas o empacadas

Estas torres contienen en su interior varios elementos sólidos pequeños que son ligeros, económicos y químicamente inertes con la fase circulante, es decir, no reaccionan con los componentes involucrados. Estos elementos se distribuyen dentro de la columna al azar, manualmente o de manera ordenada y estructurada. La torre contiene una parrilla que soporta el relleno y un separador de nieblas que captura las gotas que el gas podría arrastrar al salir del lecho (UnADM, 2021). El líquido se dispersa deslizándose por la superficie de estos elementos sólidos, entrando en contacto íntimo con el gas circulante en dirección opuesta.

Gráfico 6. Flujos y características de absorción para torres empacadas

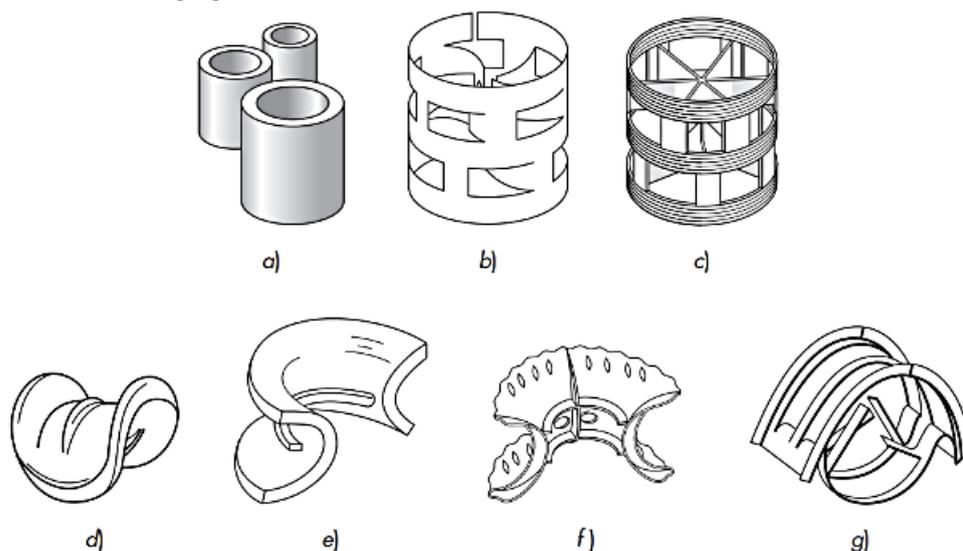


Fuente: (Geankoplis, 1998).

Un buen empaque se caracteriza por una alta proporción de espacios vacíos respecto al volumen total aparente de la pieza, con valores deseables entre el 60% y el 90%. Esto proporciona un amplio espacio de contacto entre fases (líquida y gaseosa) mientras que también minimiza las pérdidas de presión en la torre. Los empaques deben estar fabricados con materiales económicos, duraderos y que retengan muy poco líquido. Existen varios tipos de rellenos desarrollados para este propósito, entre los más usados y/o conocidos tenemos los siguientes:

- a) anillos Raschig
- b) anillo metálico Pall
- c) anillo plástico Pall
- d) montura Berl
- e) montura de cerámica Intalox
- f) montura plástica Super Intalox
- g) montura metálica Intalox.

Gráfico 7. Empaques comunes en torres



Fuente: (McCabe et al., 2007).

Salazar (2000) destaca que las columnas empacadas son adecuadas para materiales altamente corrosivos, líquidos muy espumantes y situaciones que requieren una caída de presión muy baja, como columnas de gran o pequeño diámetro y en operaciones a escalas pequeñas. La elección del tipo de empaque se basa en la resistencia mecánica y a la corrosión, la capacidad para manejar los flujos requeridos, eficiencia de la transferencia de masa y costo. Manifiesta que las columnas de platos pueden ser más económicas para operaciones a gran escala, especialmente cuando las velocidades del líquido son tan bajas que el empaque no se humedecería adecuadamente, o donde las velocidades del gas son tan bajas que puede producir dispersión axial. Las columnas de platos son necesarias cuando se requiere enfriamiento intermedio y cuando necesiten menos susceptibilidad al ensuciamiento por sólidos.

UnADM (2021) añade que las columnas de platos permiten una manipulación más sencilla de los sólidos que las columnas rellenas. Las velocidades del gas y del líquido en los platos suelen ser más altas que las que existe a través del relleno, lo que proporciona un efecto de barrido y mantiene despejadas las aberturas de la bandeja. Los sólidos tienden a acumularse en los huecos del medio, dejando menos espacio para que se asienten, lo que hace que los platos sean más fáciles de limpiar.

Marcilla (1999) presenta una comparación directa en costos y eficiencia operativa. Esto significa que, aunque el relleno es más caro que el plato en sí, la diferencia de coste no es demasiado

grande. Las diferencias en la altura de la columna también suelen ser insignificantes si las velocidades de flujo son tales que las eficiencias están cerca de su valor máximo. Normalmente, los platos se utilizan en columnas de gran diámetro que constan de más de 20 o 30 etapas.

Los tres autores coinciden en que tanto las columnas empacadas como las de platos tienen aplicaciones específicas dependiendo de las condiciones operación y del tipo de material utilizado. Las columnas empacadas son ideales para aplicaciones que requieren baja caída de presión y manejo de materiales corrosivos o espumantes, las columnas de platos son utilizadas para operaciones a gran escala, manejo de sólidos, y cuando hay más flexibilidad en las condiciones operativas.

Diseño y operación de las torres de absorción

Las torres de absorción de gases, lavado de gases o simplemente “scrubbers”, son equipos en los que tiene lugar la operación unitaria mencionada de forma continua. Para el diseño y construcción de las scrubbers se debe tener en cuenta distintos factores como, por ejemplo; lograr el máximo contacto entre la fase líquida y gaseosa aumentando el tiempo de residencia de ambas sustancias dentro de la torre lo que beneficia a la eficiencia de la operación (Wu et al., 2017).

Una de las variables más importantes consideradas al diseñar una torre es la altura del relleno o empaque en el caso de las torres empacadas y el número de platos necesarios para las torres de lavado gaseoso con platos. Estas dos corresponden a los dos tipos de torres de absorción de gases más comúnmente usados debido a su elevada eficiencia, cercana al 100% (Kempner et al., 1970). El flujo de gas, que debe calcularse y manejarse para asegurar una óptima interacción entre las fases gaseosa y líquida, son otros factores que los fabricantes comerciales consideran. De igual manera, los perfiles de temperatura a lo largo de la torre son monitoreados para mantener condiciones ideales que maximicen la eficiencia del proceso de absorción. Además, la concentración del soluto de interés en la mezcla gaseosa y en el líquido absorbente es muy importante, sobre todo si se contempla la recirculación del absorbente. Todo lo mencionado garantiza que los scrubbers operen de manera eficiente y efectiva, adaptándose a las necesidades específicas de cada aplicación industrial (Klepik, 2024).



Funcionamiento de la torre

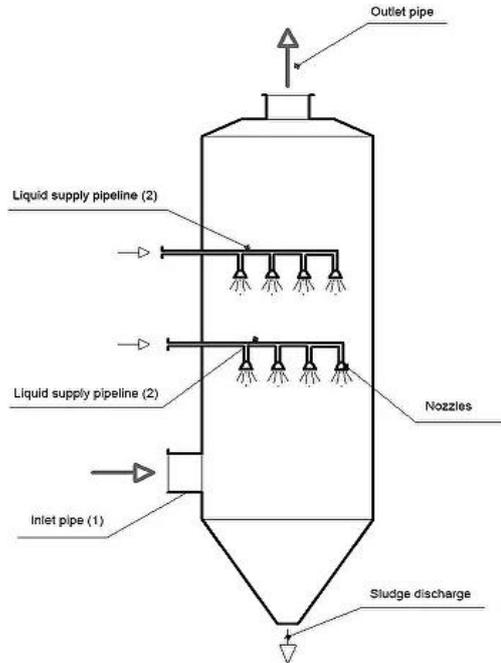
El gráfico 8 muestra un diagrama simplificado de una torre de absorción de gases. Primero el líquido absorbente es rociado mediante boquillas, o algún sistema de distribución similar, desde la parte superior de la torre y dejado caer por fuerza de gravedad. En principio este líquido tiene nula concentración del soluto de interés, sin embargo, al aplicar scrubbers en grandes industrias se suele optar por recircular el líquido por lo que tiene presencia de la sustancia absorbida, aunque en muy baja concentración, esto mejora la efectividad del proceso de absorción (Akbar & Ghiaasiaan, 2004).

Después, el gas que contiene el soluto de interés es introducido a la torre desde la parte inferior por medio de una tubería, lo cual permite que el gas por su baja densidad tienda a ascender y en algún punto empiece a tener contacto directo con el líquido absorbente. Dependiendo de la torre, este contacto se prolonga en el tiempo gracias al contacto físico del líquido y el gas con los platos instalados o el empaque usado dentro de la torre. O sea que, independientemente del tipo de estructura que se tenga en la torre, se quiere lograr que el tiempo en el que líquido y el gas intercambian la sustancia deseada sea el más largo posible para garantizar un alto grado de absorción.

Una vez el líquido y el gas superan la interfase de la torre cada uno sale de esta por lados distintos y con condiciones diferentes a las que ingresaron al proceso. El líquido se recoge en la parte inferior de la torre y se desecha o recircula según el tipo de absorción que se efectúe como se mencionó anteriormente. La concentración del soluto de interés en este líquido saliente es superior comparado con el líquido entrante, debido a que la mayor parte del soluto que se encontraba en el gas ahora se encuentra disuelto en él. Lo contrario pasa con el gas, que sigue ascendiendo hasta abandonar el equipo por la parte superior con una concentración muy inferior comparada con la del gas entrante. Es así como el scrubber cumple su función.



Gráfico 8. Diagrama de una torre de absorción



Fuente: (Klepik, 2024).

Modelo de operación

Como se mencionó previamente, uno de los parámetros básicos a ser estudiados para el diseño de una torre de absorción es el cálculo de etapas o platos que deben instalarse para un proceso. El equipo debe configurarse según varios parámetros como el tipo de componentes a separar, la concentración del soluto de interés y los flujos de materia. El método de McCabe-Thiele es el más usado para calcular el número de etapas de una torre de absorción de platos, así como de otros procesos de separación (Wankat, 2008).

Para calcular el número de etapas reales que debe tener una torre de absorción, necesitamos el número de etapas teóricas y es aquí donde se usa el método de McCabe-Thiele. A continuación, las variables a considerar:

Fase líquida

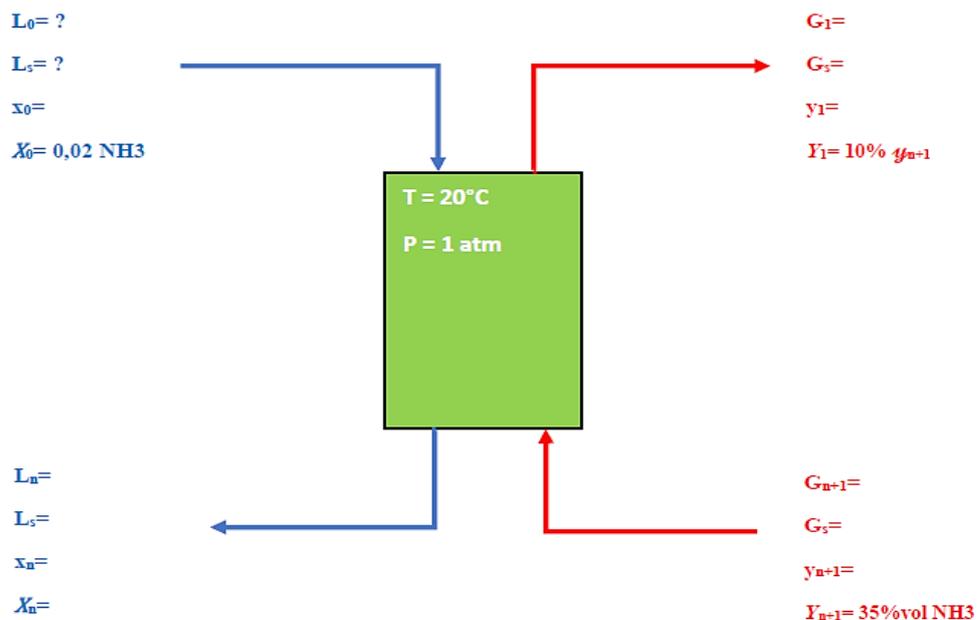
- L_0 = Flujo de líquido total entrante
- L_s = Flujo de líquido inerte (valor constante durante todo el proceso)
- X_0 = Fracción de moles de soluto de interés sobre moles totales entrantes
- x_0 = Fracción de moles de soluto de interés sobre moles de líquido inerte entrante
- L_n = Flujo de líquido total saliente

- X_n = Fracción de moles de soluto de interés sobre moles totales salientes
- x_n = Fracción de moles de soluto de interés sobre moles de líquido inerte saliente

Fase gaseosa

- G_{n+1} = Flujo de gas total entrante
- G_s = Flujo de gas inerte (valor constante durante todo el proceso)
- Y_{n+1} = Fracción de moles de soluto de interés sobre moles totales entrantes
- y_{n+1} = Fracción de moles de soluto de interés sobre moles de gas inerte entrante
- G_l = Flujo de gas total saliente
- Y_l = Fracción de moles de soluto de interés sobre moles totales salientes
- y_l = Fracción de moles de soluto de interés sobre moles de gas inerte saliente

Gráfico 9. Variables del proceso de absorción

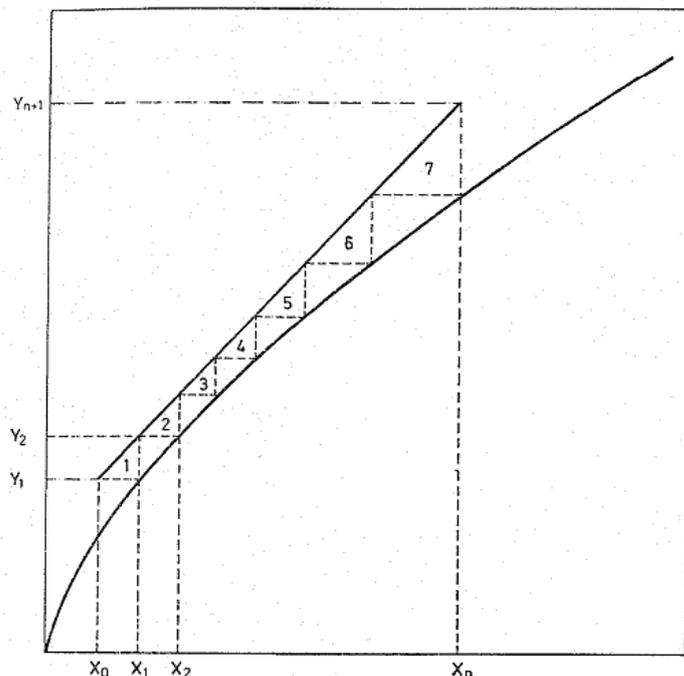


Fuente: Autoría propia.

Una vez calculadas las diferentes variables del proceso mediante balances de materia, es posible trazar nuestra línea de operación. Pero para poder calcular el número de platos además de la línea de operación necesitamos una curva de equilibrio, construida experimental para cada mezcla y a diferentes concentraciones expresadas como presiones parciales mediante una tabla de datos. Estas tablas suelen estar anexadas a diferentes libros sobre operaciones unitarias de separación dependiendo de los tipos de ejercicios de resolución que estos presenten.



Gráfico 10. Gráfica típica del método de McCabe-Thiele para absorción de gases



Fuente: (Ocon Gracia & Tojo Barreiro, 1970)

Cuando ya se tienen trazadas la curva de equilibrio y la línea de operación sólo resta unir mediante líneas perfectamente horizontales y verticales en forma de escalones empezando desde el extremo inferior de la línea de operación (x_0) y terminando en el extremo superior de la misma (x_n), tal y como puede apreciarse en el Gráfico 10 siendo la parte superior de cada escalón representativa a una etapa o plato. El número total de escalones determinará el número de platos teóricos, que junto con el valor de la eficiencia nos ayudará a calcular el número de platos reales, es decir, los que se deben instalar en el aparato, siguiendo la expresión a continuación:

$$\text{Platos Reales} = \frac{\text{Platos teóricos}}{\% \text{Eficiencia}} * 100$$

Efecto de la presión

La capacidad y la eficiencia de las torres de absorción se ve mejorada cuando los equipos operan a presiones más elevadas que la presión atmosférica (Iliuta & Larachi, 2019). Esto se debe a que, según la Ley de Henry, la solubilidad de los gases en líquidos aumenta junto con la presión total. Un ejemplo cotidiano de este fenómeno se observa en la industria de las bebidas carbonatadas, como las gaseosas. Durante el proceso de producción, la presión en los envases se incrementa hasta las 3 atm, lo suficiente para mantener el dióxido de carbono disuelto en el líquido. Esta alta

presión asegura que el gas permanezca disuelto hasta que la bebida llegue en similares condiciones a manos del consumidor (Giannattasio, 2023).

Aplicación de absorbedores en granjas porcinas: Mitigación de emisiones de NH₃

En los sectores agrícolas en áreas de producción porcina genera grandes emisiones de amoníaco (NH₃), se destaca por ser considerado un contaminante significativo que tiene serios impactos ambientales, incluyendo la acidificación del suelo, la eutrofización tanto terrestre como marina, y la formación de partículas finas que perjudican la salud humana. El amoníaco es un subproducto producido de la descomposición del estiércol en las granjas porcinas. Su volatilización aporta significativamente a la contaminación atmosférica y la deposición de nitrógeno, que a su vez provoca una serie de problemas ambientales. Entre ellos se incluyen:

- **Acidificación del Suelo:** El NH₃ corresponde a la acidificación del suelo, afectando a la biodiversidad y la productividad agrícola.
- **Eutrofización:** La acumulación de nitrógeno en los cuerpos de agua crea un crecimiento desmedido de algas, lo que deteriora la calidad del agua y perjudica los ecosistemas acuáticos.
- **Formación de Partículas Finas (PM_{2.5} y PM₁₀):** El amoníaco (NH₃) interactúa con otros compuestos en el aire, generando partículas finas que son perjudiciales para la salud humana, provocando problemas respiratorios y cardiovasculares.

Dos estudios recientes han explorado soluciones tecnológicas para mitigar estas emisiones en granjas porcinas del sur de Europa, específicamente en Italia y España, mediante el uso de depuradores secos y húmedos.

Depuradores Húmedos

El estudio realizado por (Ruiz-Colmenero et al., 2024) evalúa el uso de depuradores húmedos en granjas porcinas en Italia y España. Los depuradores húmedos utilizan una solución ácida, generalmente ácido sulfúrico o cítrico, para absorber el NH₃ del aire que pasa a través del material de embalaje rociado con esta solución. Este proceso convierte el NH₃ gaseoso en una solución líquida, reduciendo así su liberación a la atmósfera. Las ventajas de este tipo de depurador son la alta eficiencia en la reducción de NH₃ y otros contaminantes gaseosos y un menor riesgo para los

trabajadores y animales cuando se utiliza ácido cítrico en lugar de ácido sulfúrico (Costantini et al., 2020). En otro sentido, las desventajas que estos presentan van desde un alto consumo de energía y recursos, lo que aumenta los impactos ambientales asociados con la producción y transporte de ácido hasta la necesidad de infraestructura adicional y manejo especializado.

Ruíz-Colmenero et al. (2024) deducen que los depuradores húmedos son muy eficientes en reducir NH_3 , logrando hasta un 90% de reducción en condiciones óptimas. Aunque el ácido cítrico es menos eficiente que el ácido sulfúrico, es más seguro para trabajadores y animales. Sin embargo, los depuradores húmedos consumen mucha energía y recursos, aumentando su huella de carbono. Además, el manejo y transporte de ácidos presentan riesgos ambientales y de seguridad. Implementar estos depuradores requiere una inversión inicial alta y costos operativos elevados debido al uso continuo de ácidos.

Depuradores Secos

Por otro lado, los depuradores secos, también evaluados por (Ruiz-Colmenero et al., 2024), funcionan haciendo pasar el aire contaminado a través de filtros que retienen el polvo y las partículas. Esta tecnología, común en entornos industriales, ha sido adaptada para su uso en granjas porcinas. Las ventajas del uso de depuradores secos incluyen menor consumo de recursos y energía en comparación con los depuradores húmedos y tampoco requiere manejo de soluciones ácidas, reduciendo el riesgo para los trabajadores y animales. Las desventajas contemplan una menor eficiencia en la reducción de NH_3 en comparación con los depuradores húmedos y la necesidad de reemplazo regular de los filtros, lo que genera residuos adicionales.

Costantini et al. (2020) indican que los depuradores secos, aunque menos eficientes en reducir NH_3 (60%-70%), tienen un menor impacto ambiental en cuanto a consumo de recursos y energía. A largo plazo, son una opción más sostenible debido a sus menores costos operativos y de mantenimiento. Sin embargo, requieren un reemplazo regular de filtros, lo que implica una gestión continua de residuos.

Aplicación de absorbedores en las minas de carbón

Las minas de carbón generan un problema significativo debido a las emisiones de polvo, que presentan riesgos a la salud de los trabajadores y a la seguridad de las operaciones mineras. La

inhalación de polvo de carbón puede llevar a provocar enfermedades crónicas pulmonares, como la neumoconiosis. Además, según estadísticas se menciona que el 87.32% de las minas de carbón en China están en riesgo de explosiones de polvo de carbón, trayendo como consecuencia 16 accidentes importantes registrados entre 2000 y 2019, que resultaron en 514 muertes (Animah et al., 2024).

Ciertos estudios han evaluado el rendimiento de diferentes diseños de scrubbers húmedos, tomando en cuenta variables como: la concentración total de polvo, la concentración de polvo respirable, el volumen de aire y la caída de presión media. Se identificó que la eficiencia de remoción de polvo se eleva cuando existe un aumento de entrada de agua. Por lo tanto, llegaron a determinar que el equipo de scrubber con 16 aspas presenta una mejor eficiencia en cuanto a la remoción de polvo cuando ingresa una cantidad considerable de agua en la entrada, dando un porcentaje de remoción del polvo total del 96.81% y del polvo respirable un 95.59% (Hu et al., 2021).

Este equipo fue implementado en una planta de preparación de carbón en la provincia de Shanxi, China, el cual se obtuvo como resultado la disminución de concentración de polvo total a menos de 8.1 mg/m³ y mientras la concentración de polvo respirable a menos de 5.9 mg/m³. demostrando la efectividad práctica del dispositivo en condiciones reales (Animah et al., 2024).

Existen otros métodos innovadores en cuanto la remoción de polvo mediante absorción para frentes de trabajo en túneles mineros. Este método utiliza un baño de agua autoexcitante con una película de agua que captura el polvo generado en las operaciones subterráneas. Varios estudios han demostrado que este método es altamente eficaz para controlar el polvo en áreas mineras subterráneas.

Los autores de los artículos discuten varios aspectos clave sobre la efectividad y la implementación de los scrubbers húmedos y otros métodos de remoción de polvo en las minas de carbón. Hu et al. (2021) destacan la importancia de optimizar el diseño de los scrubbers para maximizar la eficiencia de remoción de polvo. Argumentan que el incremento en la entrada de agua y el diseño de las aspas juegan un papel crucial en la mejora de la eficacia del dispositivo. Además, señalan que, aunque la implementación de estos dispositivos puede requerir una

inversión inicial significativa, los beneficios en términos de reducción de enfermedades pulmonares y mejora de la seguridad laboral justifican los costos.

Por otro lado, Animah et al. (2024) enfatizan la necesidad de tecnologías complementarias para abordar el polvo en diferentes entornos dentro de las minas, como los frentes de trabajo en túneles. Su estudio sobre el baño de agua autoexcitante resalta la versatilidad de esta tecnología para adaptarse a condiciones subterráneas específicas, proporcionando una solución eficaz para el polvo generado durante las operaciones mineras. Los autores también discuten la importancia de la implementación práctica y el monitoreo continuo para asegurar que las tecnologías de remoción de polvo mantengan su efectividad a lo largo del tiempo.

Ambos estudios coinciden en que la mitigación del polvo en las minas de carbón es una tarea multifacética que requiere una combinación de tecnologías y estrategias de manejo. Subrayan la necesidad de un enfoque holístico que incluya tanto la innovación tecnológica como la implementación práctica y el monitoreo continuo para asegurar un ambiente de trabajo seguro y saludable.

Reducción de emisiones de gases de SO_x por depuradores en transportes marinos

Entre las emisiones atmosféricas por los gigantes motores marítimos, el óxido de azufre (SO_x), es el que destaca por ser un gas de efecto invernadero que una vez en el aire reacciona con vapor de agua formando así las lluvias ácidas (Ayala Buforn, 2019). El más común gas del grupo de SO_x es el SO₂, que se da por la combustión del azufre (S), presente en los carburantes. Con el fin de controlar las emisiones de óxido de azufre, la Organización Marítima Internacional (OMI) estableció áreas de control de emisiones de azufre o por sus siglas (SECA) donde ya en el 2020 entró en vigencia un límite permisible global de 0.5% de azufre (Comer et al., 2020).

Los depuradores o scrubbers surgen como alternativas para cumplir los estándares establecidos en el Organización Marítima Internacional (OMI), sobre las emisiones de óxido de azufre (SO_x). El equipo es montado en el sistema de gases de escape del motor, donde para reducir las concentraciones de SO_x utilizan sustancias lavadoras como agua del mar, agua dulce tratada químicamente o sustancias secas (Maleras-Expósito, 2021).

Existen 2 sistemas de depuradores el seco y el húmedo. Los sistemas de lavado en seco no utilizan agua como sustancia lavadora, en cambio usan cal hidratada que reaccionan con los gases de escape de SO_2 formando gránulo de yeso que son retirados del absorbente, ya en Tierra debido a que es una sustancia inofensiva se puede utilizar en construcciones de casas (Balaji & Girija, 2024).

Por otra parte, el sistema de lavado húmedo utiliza líquido como sustancia lavadora que reduce los SO_x de los gases de escape. Dependiendo del líquido utilizado se subclasifica en: abierto, cerrado y híbrido. El circuito abierto utiliza agua del mar como medio y no se recircula, sino que es desechada al medio luego de su uso. Al contrario, los circuitos cerrados usan agua tratada químicamente que es recirculada para reducir los SO_x . El híbrido combina la operación de ambos circuitos. Estudios demuestran que el uso de depuradores para reducir los SO_x de los transportes marinos es eficiente en su propósito.

Según (Panasiuk et al., 2018) en su estudio propone algoritmos para la instalación de depurador de SO_x en buques basado en métodos de ingeniería tomando en cuenta variables esenciales de seguridad del buque como el peso muerto, el asiento y el metacentro. Estos algoritmos aplicados en proyectos de instalación de depuradores reales ayudan a identificar la ubicación óptima de los elementos del sistema de depuración dentro del rango factible.

En el estudio de (Mestemaker et al., 2024) crearon un modelo dinámico para un sistema de depuración húmeda de circuito cerrado utilizando como sustancia lavadora, agua dulce y sosa caustica, para reducir así las emisiones de SO_x en cargas dinámicas del motor, donde obtuvieron resultados positivos.

En el estudio de (J. Yang et al., 2021) midieron las emisiones de gases en un buque portacontenedores clase D7, en movimiento y estático utilizando fuelóleo pesado con altas concentraciones de azufre, mediante técnicas híbridas de depuración húmeda, donde presentaron resultados positivos en la reducción de SO_2 con hasta un 95% de las emisiones sin el uso de depuradores.

CONCLUSIÓN

Mediante revisión bibliográfica se concluyó que la absorción de gases es una herramienta esencial para reducir las emisiones atmosféricas provenientes de actividades antropogénicas como la quema de combustible que generan gases tóxicos como: dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), que en la atmósfera producen impactos ambientales adversos en los recursos naturales como el agua, el suelo y especialmente, el aire. Su operación se base en el contacto entre la mezcla gaseosa (con el gas requerido) y una sustancia de lavado afín (comúnmente el agua), el disolvente lo que hará es absorber ese gas tóxico para que no se emita a la atmósfera. Los depuradores o scrubbers son equipos que operan por distintos sistemas como son: secos y húmedos (abierto, cerrado y híbrido) que se instalan en el sistema de emisiones de gases de escape en motores y surgen como alternativa para la reducción de gases en el medio, estos son muy versátiles y aplicables a distintas industrias que buscan cumplir con las normativas ambientales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akbar, M. K., & Ghiaasiaan, S. M. (2004). Modeling the gas absorption in a spray scrubber with dissolving reactive particles. *Chemical Engineering Science*, 59(5), 967–976.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.10.024>
- Animah, F., Keles, C., Reed, W. R., & Sarver, E. (2024). Effects of dust controls on respirable coal mine dust composition and particle sizes: case studies on auxiliary scrubbers and canopy air curtain. *International Journal of Coal Science and Technology*, 11(1).
<https://doi.org/10.1007/s40789-024-00688-8>
- Ayala Buforn, J. (2019). Estudio comparativo de sistemas de gases de exhaustación (Scrubbers). Diseño de un procedimiento de selección y evaluación económica para su aplicación en buques existentes. *Trabajo de Fin de Grado*.
- Balaji, C., & Girija, V. (2024). Examining shipboard scrubber systems performance in reducing SO_x & PM from marine diesel engines exhaust gases - a short review. *Industrial Engineering Journal*, 53(3).
https://www.researchgate.net/publication/379542313_EXAMINING_SHIPBOARD_SC



[RUBBER SYSTEMS PERFORMANCE IN REDUCING SO_x PM FROM MARINE DIESEL ENGINES EXHAUST GASES - A SHORT REVIEW?enrichId=rgreq-84fbff3581acf103d2c02d092b59ade-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzM3OTU0MjMxMzZBUzoxMTQzMTI4MTIzNDA2MzY5M0AxNzEyMjEzNTk5NDAx&el=1_x_2&esc=publicationCoverPdf](#)

- Bravo-Calle, O., Osorio-Rivera, M., & Loor-Lalvay, X. (2021). La calidad del desarrollo industrial y su impacto en el medio ambiente. *Polo Del Conocimiento*, 6(9), 153–167. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i9>
- Comer, B., Georgeff, E., & Osipova, L. (2020). Air emissions and water pollution discharges from ships with scrubbers. *Consult. Rep. Int. Counc. Clean Transp*, November, 12–13. <https://theicct.org/publication/air-emissions-and-water-pollution-discharges-from-ships-with-scrubbers/>
- Costantini, M., Bacenetti, J., Coppola, G., Orsi, L., Ganzaroli, A., & Guarino, M. (2020). Improvement of human health and environmental costs in the European Union by air scrubbers in intensive pig farming. *Journal of Cleaner Production*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124007>
- Da Silva Santos , F., & López Vargas , R. (2020). Efecto del Estrés en la Función Inmune en Pacientes con Enfermedades Autoinmunes: una Revisión de Estudios Latinoamericanos. *Revista Científica De Salud Y Desarrollo Humano*, 1(1), 46–59. <https://doi.org/10.61368/r.s.d.h.v1i1.9>
- Geankoplis, C. J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3a Edición. In *Jurnal Sains dan Seni ITS* (CECSA).
- Giannattasio, E. (2023). *El proceso de las bebidas carbonatadas, refrescos o gaseosas*. Advance. <https://somasadvance.com/expertise/bebidas-carbonatadas-proceso-de-obtencion-y-parametros-de-seguimiento-y-control/>
- Hu, S., Gao, Y., Feng, G., Hu, F., Liu, C., & Li, J. (2021). Experimental study of the dust-removal performance of a wet scrubber. *International Journal of Coal Science and Technology*, 8(2), 228–239. <https://doi.org/10.1007/s40789-021-00410-y>



- Iliuta, I., & Larachi, F. (2019). Modeling and Simulations of NO_x and SO₂ Seawater. *Catalysts*, 9(6). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/catal9060489>
- INTECMO S.A.S. (2017). *Columna de absorción de gases. Manual del usuario* (pp. 1–13). www.intecmo.net
- Kempner, S. K., Seiler, E. N., & Bowman, D. H. (1970). Performance of commercially available equipment in scrubbing hydrogen chloride gas. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 20(3), 139–143. <https://doi.org/10.1080/00022470.1970.10469384>
- Klepik, M. (2024). *Wet Scrubber for Boiler: Design, Construction, Principle of Operation, Types of Materials*. Torch-Air. <https://torch-air.com/blog/boiler-scrubber>
- Maleras-Expósito, V. (2021). Installation of an Open Loop Scrubber System on an Ro-Ro Vessel. *Trabajo Fin de Grado*, 1–82.
- Marcilla Gomis, A. (1999). Introducción a las operaciones de separación. Contacto continuo. In Espagrac (Ed.), *Texto Docente de la Universidad de Alicante*. Publicaciones Universidad de Alicante.
- McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2007). Operaciones unitarias en ingeniería química. In *Operaciones unitarias en ingeniería química* (7th ed.). McGrawHill.
- Mestemaker, B. T. W., Elmazi, E., Van Biert, L., Van den Heuvel, H. N., & Visser, K. (2024). Modelling and Simulation of a Wet Scrubber System. *Modelling and Optimisation of Ship Energy Systems 2023, October*. <https://doi.org/10.59490/moses.2023.664>
- Morales, J. C. (2023). Fostering Recycling Culture Through Playful Strategies. *Revista Veritas De Difusão Científica*, 4(1), 143–160. <https://doi.org/10.61616/rvdc.v4i1.41>
- Martínez, O., Aranda, R., Barreto, E., Fanego, J., Fernández, A., López, J., Medina, J., Meza, M., Muñoz, D., & Urbieta, J. (2024). Los tipos de discriminación laboral en las ciudades de Capiatá y San Lorenzo. *Arandu UTIC*, 11(1), 77–95. Recuperado a partir de <https://www.uticvirtual.edu.py/revista.ojs/index.php/revistas/article/view/179>
- Noguera, B. (2023). *Torres de absorción: Guía práctica para ingenieros químicos*. Ingeniería Química Reviews. <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2023/07/torres-de-absorcion-guia-ingenieros-quimicos.html#Tipos-de-torres-de-absorcion>



- Neri Vázquez, J. R., & Perez Jaramillo, P. A. (2024). Percepción de inseguridad en personal sanitario del bajío mexicano. *Revista Científica De Salud Y Desarrollo Humano*, 5(1), 234–252. <https://doi.org/10.61368/r.s.d.h.v5i1.87>
- Ocon Gracia, J., & Tojo Barreiro, G. (1970). *Problemas de ingeniería química. Tomo II* (1st ed.). Aguilar.
https://www.academia.edu/9204703/Problemas_de_Ingeniería_Química_Vol_2_OCON_TOJO
- Olvieros, J., Castañeda, N., & Peñaranda, G. (2022). Revolución industrial y su impacto en el medio ambiente. *Revista Lumen Gentium*, 6(2), 9–20.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.52525/lg.v6n2a1>
- Panasiuk, I., Lebedevas, S., & Čerka, J. (2018). The assessment algorithm of technological feasibility of SOx scrubber installation. *Transport*, 33(1), 197–207.
<https://doi.org/10.3846/16484142.2016.1152298>
- Ruiz-Colmenero, M., Costantini, M., Bállega, A., Zoli, M., Andón, M., Cerrillo, M., Fàbrega, E., Bonmatí, A., Guarino, M., & Bacenetti, J. (2024). Air treatment technologies in pig farms. Life cycle assessment of dry and wet scrubbers in Northern Italy and Northeastern Spain. *Science of the Total Environment*, 922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171197>
- Salazar, E. J. (2000). *Operaciones Unitarias para Ingeniería Industrial* (1st ed.). Universidad Católica Andrés Bello.
<http://biblioteca2.ucab.edu.ve/anexos/biblioteca/marc/texto/AAP0476.pdf>
- Shindell, D., & Smith, C. J. (2019). Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels. *Nature*, 573, 408–411. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41586-019-1554-z>
- Sandoval Chambi, A. N., Mejia Ccama, S. V., Chaiña Cahuapaza, K. A., Sosa Valero, E., & Onofre Cachicatari, B. Y. (2024). Percepción de la Calidad de Espacios Públicos de Encuentro en el Centro de la Ciudad de Juliaca, 2024. *Estudios Y Perspectivas Revista Científica Y Académica*, 4(1), 2097–2104. <https://doi.org/10.61384/r.c.a.v4i1.166>
- UnADM. (2021). Programa de Asignatura: Operaciones unitarias I. In *Universidad Abierta y a*



Distancia de México (pp. 0–44). Universidad Abierta y a Distancia de México.

Valiente Bardenas, A. (2010). *ABSORCIÓN* (1st ed.). UNAM. <https://docplayer.es/72750591->

[Absorcion-antonio-valiente-bardenas-facultad-de-quimica-unam-c-u-mexico-d-f.html](https://docplayer.es/72750591-Absorcion-antonio-valiente-bardenas-facultad-de-quimica-unam-c-u-mexico-d-f.html)

Villanueva Alvaro, N. S., & Quispe Clavijo, E. (2024). Comparación In Vitro Del Efecto Antifúngico Del Aceite Esencial De Piper Aduncum (Matico) Y Extracto Puro De Allium Sativum (Ajo) Sobre *Cándida Albicans*. *Emergentes - Revista Científica*, 4(2), 16–33.

<https://doi.org/10.60112/erc.v4i2.128>

v, H., & Quispe Coca, R. A. (2024). Tecno Bio Gas. *Horizonte Académico*, 4(4), 17–23.

Recuperado a partir de

<https://horizonteacademico.org/index.php/horizonte/article/view/14>

Wankat, P. (2008). *Ingeniería de procesos de separación* (R. Fuerte Rivera (ed.); 2nd ed.). Pearson Education.

Wu, X., Yu, Y., Qin, Z., & Zhang, Z. (2017). Performance of CO₂ absorption in a diameter-varying spray tower. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 25(8), 1109–1114.

<https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.03.013>

Yang, H., Liu, Y., Liu, J., Wang, Y., & Tao, S. (2018). The roles of the metallurgy, nonmetal products and chemical industry sectors in air pollutant emissions in China. *Environmental Research Letters*, 13(8).

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad4ea>

Yang, J., Tang, T., Jiang, Y., Karavalakis, G., Durbin, T. D., Wayne Miller, J., Cocker, D. R., & Johnson, K. C. (2021). Controlling emissions from an ocean-going container vessel with a wet scrubber system. *Fuel*, 304.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121323>

