https://doi.org/10.69639/arandu.v13i3.2626

Diseño y construcción de una torre de absorción empacada para el estudio del contacto en equilibrio de una sola etapa de un sistema gas - líquido

Design and Construction of a Packed Absorption Tower for the Study of Single-Stage Equilibrium Contact in a Gas–Liquid System

Gerardo Galindo Ramos
gerardo.gr@acapulco.tecnm.mx
https://orcid.org/0000-0002-3268-2857
Tecnológico Nacional de México Campus Acapulco
Acapulco – México

Beatriz Gabriel Salmerón
beatriz.gs@acapulco.tecnm.mx
https://orcid.org/0000-0001-6785-1342
Tecnológico Nacional de México Campus Acapulco
Acapulco-México

María de los Ángeles Gama Gálvez
maria.gg@acapulco.tecnm.mx
https://orcid.org/0000-0003-2687-19902
Tecnológico Nacional de México Campus Acapulco
Acapulco-México

Nyx Anaid Vargas Sotomayor
nyx.vs@acapulco.tecnm.mx
https://orcid.org/0000-0003-2295-6567
Tecnológico Nacional de México Campus Acapulco
Acapulco-México

Monserrat Roman Mosso
L23320393@acapulco.tecnm.mx
https://orcid.org/0009-0005-0453-1663
Tecnológico Nacional de México Campus Acapulco
Acapulco - México

Olga Simone Rodríguez Hernández
L23320313@acapulco.tecnm.mx
https://orcid.org/0009-0004-7019-8339
Tecnológico Nacional de México Campus Acapulco
Acapulco – México

Artículo recibido: (la fecha la coloca el Equipo editorial) - Aceptado para publicación:
Conflictos de intereses: Ninguno que declarar.

RESUMEN

La absorción gas-líquido es una operación unitaria de gran importancia en la ingeniería química y bioquímica debido a su aplicación en procesos de separación, purificación y control de emisiones gaseosas. El estudio de este proceso permite relacionar los fundamentos de transferencia de masa con su comportamiento en equipos a escala laboratorio. El objetivo de este proyecto fue diseñar y construir una torre de absorción empacada como herramienta didáctica para el estudio de la absorción física de dióxido de carbono (CO_2) en un líquido. Para su desarrollo

se realizaron bocetos preliminares y selección de materiales, además de procesos de fabricación y montaje de la estructura. Se integraron los sistemas de tipo hidráulico, neumático y eléctrico mediante una bomba, un compresor, flujómetros y un panel de control, considerando un diseño desmontable y móvil que facilitara su operación y mantenimiento. Posteriormente, se realizaron pruebas de funcionamiento para evaluar la circulación de los fluidos y el desempeño general del equipo. Durante las pruebas se observó una circulación continua de una mezcla gaseosa y agua en contracorriente, así como un funcionamiento adecuado de los componentes integrados y de los flujómetros para la visualización y regulación de los flujos. El desarrollo del prototipo permitió aplicar conocimientos relacionados con transferencia de masa, mecánica de fluidos, instrumentación y operaciones unitarias, además de fortalecer las habilidades prácticas adquiridas durante la formación académica. En este sentido, la construcción de la torre representa una experiencia que facilita la vinculación entre los conocimientos teóricos y su aplicación experimental, proporcionando una herramienta para futuras prácticas de laboratorio.

Palabras clave: absorción, torre, líquido, CO2, masa

ABSTRACT

Gas–liquid absorption is a unit operation of great importance in chemical and biochemical engineering due to its applications in separation, purification, and gaseous emission control processes. The study of this process makes it possible to relate the fundamentals of mass transfer to its behavior in laboratory-scale equipment. The objective of this project was to design and construct a packed absorption tower as a teaching tool for studying the physical absorption of carbon dioxide (CO_2) into a liquid. The development of the equipment involved preliminary sketches and material selection, as well as fabrication and assembly of the structure. Hydraulic, pneumatic, and electrical systems were integrated through the use of a pump, compressor, flow meters, and a control panel, incorporating a removable and mobile design to facilitate operation and maintenance. Subsequently, functional tests were conducted to evaluate fluid circulation and the overall performance of the equipment. During the tests, continuous countercurrent circulation of a gas mixture and water was observed, along with proper operation of the integrated components and flow meters for flow visualization and regulation. The development of the prototype enabled the application of knowledge related to mass transfer, fluid mechanics, instrumentation, and unit operations, while also strengthening the practical skills acquired throughout the academic training. In this regard, the construction of the tower represents an experience that facilitates the connection between theoretical knowledge and its experimental application, providing a tool for future laboratory practices.

Keywords: absorption, tower, liquid, CO2, mass

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Atribution 4.0 International.

INTRODUCCIÓN

La absorción gas-líquido es una operación de transferencia de masa en la que uno o más componentes presentes en una corriente gaseosa se transfieren hacia una fase líquida debido a una diferencia de concentración entre ambas fases. Esta operación constituye una alternativa ampliamente utilizada para la separación y acondicionamiento de corrientes gaseosas, así como para la recuperación de compuestos y el control de emisiones. Entre los equipos empleados para favorecer este contacto se encuentran las torres de platos y las torres empacadas; estas últimas incorporan un material de empaque que proporciona una superficie de contacto entre las fases y favorece el intercambio de masa. En este tipo de equipos, el líquido se distribuye sobre el empaque y desciende a través de la columna, mientras que la corriente gaseosa asciende en sentido contrario, estableciendo un régimen de contacto contracorriente (McCabe, Smith, & Harriott, 2007; Geankoplis, 2006).

El desempeño de una torre empacada no depende únicamente de la presencia del material de empaque, sino también de las condiciones hidrodinámicas bajo las cuales se establece el contacto gas-líquido. Variables como los caudales de las fases, la distribución del líquido, la velocidad de circulación, la caída de presión y las características del empaque influyen sobre el área interfacial disponible y, por tanto, sobre la transferencia de masa. La literatura especializada señala que los fenómenos hidrodinámicos y de transferencia de masa se encuentran estrechamente relacionados, debido a que la distribución de las fases y el área efectiva de contacto condicionan el transporte del soluto entre ellas (Flagiello et al., 2021). Por ello, antes de evaluar cuantitativamente la absorción, resulta necesario disponer de un sistema capaz de mantener una circulación estable de las fases y establecer condiciones de operación reproducibles.

En este contexto, el problema que aborda el presente trabajo se relaciona con la necesidad de contar con un sistema de contacto gas-líquido que permita estudiar el comportamiento operativo de una torre de absorción empacada bajo condiciones controladas. La disponibilidad de un equipo funcional permite analizar de manera integrada elementos que intervienen en la operación, como la recirculación del líquido, el suministro de la fase gaseosa, la regulación de los caudales y el establecimiento del flujo en contracorriente. Esta condición resulta particularmente relevante debido a que la evaluación del desempeño de una torre requiere que sus componentes hidráulicos, neumáticos y de control funcionen de manera coordinada antes de realizar estudios específicos de transferencia de masa.

Desde el punto de vista teórico, la operación de absorción se fundamenta en el transporte de un componente desde la fase gaseosa hacia la fase líquida a través de una interfase. La velocidad de transferencia está relacionada con los gradientes de concentración y con las resistencias al transporte presentes en ambas fases. En las torres empacadas, la superficie proporcionada por el empaque favorece la formación y renovación del área interfacial, mientras

que el contacto contracorriente permite mantener el intercambio entre las fases a lo largo de la columna. Asimismo, el equilibrio gas-líquido constituye una referencia fundamental para analizar la capacidad de absorción de un soluto; para sistemas que involucran gases disueltos, la relación entre presión parcial y solubilidad puede describirse mediante la ley de Henry bajo las condiciones en que esta resulte aplicable (Geankoplis, 2006; Çengel & Ghajar, 2015). Estos fundamentos permiten establecer los criterios necesarios para analizar posteriormente el comportamiento de una torre de absorción y sus variables de operación.

Los antecedentes disponibles muestran que las torres empacadas han sido estudiadas desde las perspectivas hidráulica y de transferencia de masa. Estudios experimentales y de modelado han analizado parámetros como la caída de presión, la retención de líquido, el área interfacial y los coeficientes de transferencia de masa, evidenciando la importancia de las condiciones de flujo para el desempeño de estos equipos. En particular, Flagiello et al. (2021) señalan que la caracterización de las condiciones fluidodinámicas constituye un elemento relevante para la estimación de los parámetros de transferencia de masa en columnas empacadas.

A partir de lo anterior, el presente trabajo se enfoca en el diseño e integración de una torre de absorción empacada destinada al estudio del contacto entre una fase gaseosa y una fase líquida. El sistema incorpora una columna empacada, un circuito de recirculación de líquido, suministro de aire, dispositivos de medición y regulación de flujo, así como elementos estructurales y de control que permiten su operación. El aporte del trabajo se centra en disponer de un sistema funcional en el que puedan establecerse y observarse las condiciones necesarias para el contacto gas-líquido en contracorriente, proporcionando una base para posteriores evaluaciones cuantitativas de transferencia de masa.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es diseñar e integrar una torre de absorción empacada funcional para el estudio del contacto gas-líquido en contracorriente, evaluando su comportamiento mecánico y operacional mediante la verificación de la circulación de las fases, el funcionamiento de los sistemas de bombeo, suministro de gas y medición de flujo, así como la estabilidad y seguridad del sistema.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se desarrolló bajo un enfoque experimental y aplicado, orientado al diseño, construcción e integración de un prototipo de torre de absorción empacada a escala laboratorio con el fin de estudiar el contacto gas-líquido en contracorriente. El trabajo se fundamentó en la utilización de conocimientos de ingeniería para el desarrollo de un equipo destinado para uso académico y a la realización de prácticas experimentales. Por su parte, el diseño fue de tipo experimental, debido a que se construyó físicamente el prototipo y posteriormente se sometió a pruebas de funcionamiento con el propósito de verificar la integración y operación de los sistemas que lo conforman.

Diseño y construcción del prototipo

El desarrollo del equipo inició con la elaboración de bocetos, mediante los cuales se estableció la distribución general de la columna de absorción y de los componentes auxiliares requeridos para su funcionamiento. Por ello, resultó importante considerar las dimensiones generales de la torre, la ubicación de la bomba, el compresor, el recipiente de almacenamiento del líquido y el tanque de CO_2. Asimismo, se tomaron en cuenta otros factores, como la disponibilidad de espacio en laboratorios y las condiciones de transporte, por lo que se planteó una estructura desmontable y móvil para que facilitara tanto el traslado como el montaje del equipo. La selección de los materiales se realizó considerando sus características de uso y disponibilidad.

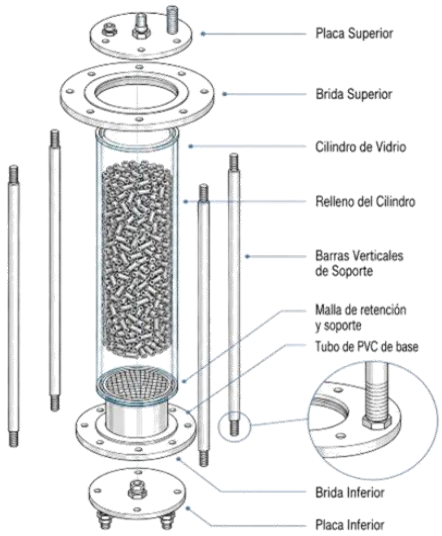
Columna de absorción

La columna de absorción se construyó empleando un cilindro vertical de vidrio de 190 cm de altura y 11.43 cm de diámetro, seleccionado con el propósito de facilitar la visualización del comportamiento de las fases durante la operación, figura 1. El cilindro fue acondicionado mediante la colocación de bridas y placas metálicas en sus extremos superior e inferior, las cuales funcionaron como elementos de soporte, fijación y conexión. Las bridas fueron fabricadas en acero inoxidable, con un diámetro de 22.86 cm y un espesor de 2.54 cm, mientras que las placas superior e inferior presentaron un diámetro de 20.32 cm y un espesor aproximado de 1 cm. La unión y alineación de estos elementos se realizó mediante barras roscadas de acero inoxidable de 190 cm de longitud, figura 1.

Posteriormente, se acondicionaron las placas de la columna con las conexiones necesarias para establecer las líneas de alimentación y descarga de las corrientes gaseosa y líquidas. En la placa superior se instalaron una conexión central para manguera de ½ in, una conexión lateral para manguera de 5/16 in y una conexión de ¼ in con tapón de acero inoxidable. En la placa inferior se incorporó una conexión central de 1 in y dos conexiones laterales de ¼ in. Una vez instalados estos elementos, la columna se montó sobre una estructura metálica y se aseguró mediante las bridas, placas y barras roscadas, verificando su posición vertical y alineación para reducir posibles movimientos durante su funcionamiento.

Figura 1

Componentes principales de la columna de absorción



Material de empaque

Para favorecer el contacto entre las fases gaseosa y líquida se incorporó un lecho de material de empaque dentro de la columna. Se utilizaron 86 m de manguera flexible de polietileno de 5/16 in de diámetro, la cual fue cortada en segmentos pequeños para obtener un material de empaque tipo Rasching, con el objetivo de ocupar al menos el 80% de capacidad del espacio de la columna de absorción. Antes de introducir el material en la columna se colocó una malla de retención en el fondo, zona baja, cuya función es evitar el deslizamiento del material de empaque hacia la conexión de salida durante la circulación de los fluidos.

Posteriormente, el material de empaque fue introducido y distribuido dentro del cilindro de manera uniforme para formar el lecho de empaque, evitando una compactación excesiva que pudiera interferir con el paso de las corrientes.

Construcción de la estructura de soporte

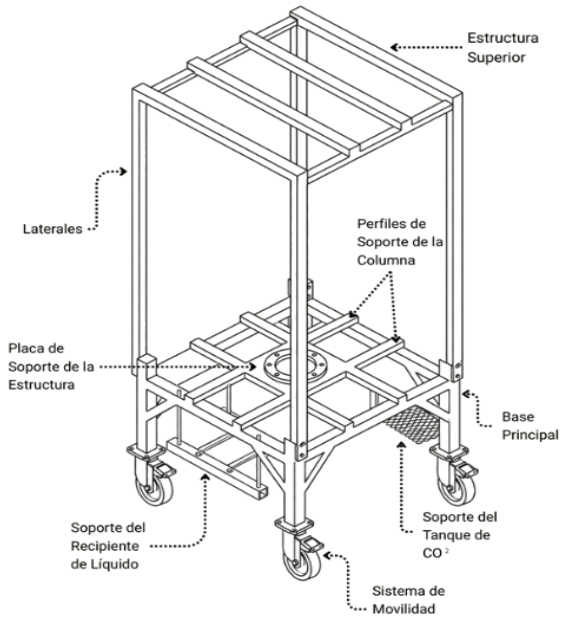
La estructura metálica se construyó con el objetivo de proporcionar estabilidad, soporte y movilidad al conjunto de la torre. La base principal fue fabricada con perfil PTR de 1.5 x 1.5 in y con dimensiones generales de 16.14 x 40.71 x 33.86 in. Sobre esta estructura se incorporaron perfiles Zintro de 2 x 1 in para conformar la superficie de apoyo de la columna. La unión de los perfiles se realizó mediante soldadura, formando una estructura rígida capaz de soportar el peso de la columna y sus componentes auxiliares.

Para distribuir el peso de la columna se instaló una placa de acero al carbono de 33 x 33 cm y 5 mm de espesor en la parte central de la base. Se colocaron cuatro soportes laterales de perfil Zintro de 2 x 1 in y 205 cm de longitud para mantener la columna en posición vertical. En la parte superior se instaló un marco fabricado con perfil Zintro de 2 x 2 in, fijado mediante tornillos hexagonales de medida 1/4 × 3 in, tuercas y arandelas de presión, lo que permitió

conservar la estabilidad de la columna y facilitar su desmontaje cuando fuera necesario realizar un mantenimiento, figura 2.

Figura 2

Diseño estructural desmontable de la torre de absorción



Con la finalidad de facilitar el desplazamiento del prototipo dentro del laboratorio, se instalaron cuatro ruedas giratorias de 15 cm de diámetro y 100 kg de capacidad cada una, figura 2. Una vez concluido el ensamble estructural, se realizaron actividades de acondicionamiento superficial, incluyendo limpieza, eliminación de residuos de soldadura y preparación de las superficies metálicas, seguida de la aplicación de pintura como protección de la estructura.

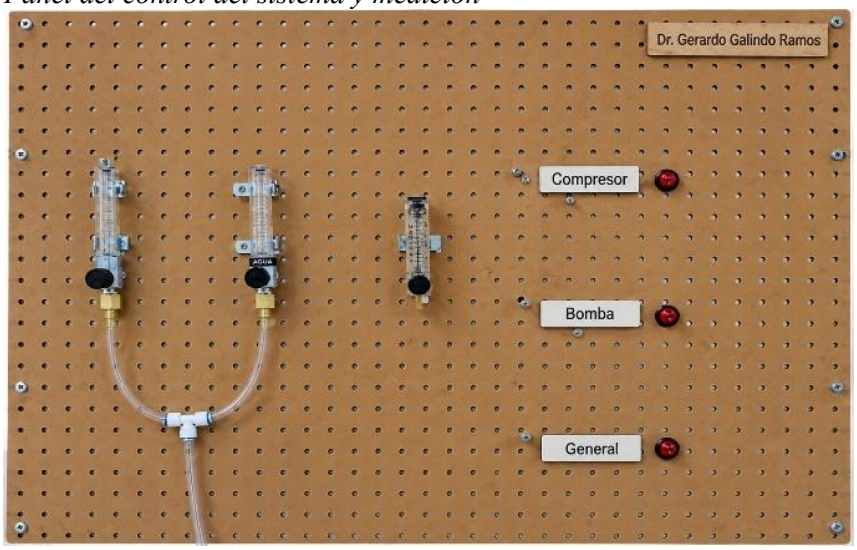
Integración del sistema de control y medición

El sistema de control se integró mediante un panel de perfocel con el objetivo de alojar los elementos eléctricos y los instrumentos de medición de flujo. Se realizaron las perforaciones necesarias de acuerdo con las dimensiones de los componentes y se instalaron tres interruptores de balancín para controlar de manera independiente el suministro general de energía, la bomba y el compresor. El circuito eléctrico se conformó mediante cable de cobre THW calibre 12, terminales, contactos eléctricos y cable de uso rudo 3 x 12. En la configuración se buscó establecer una secuencia de operación en la que primero se habilita el suministro general y posteriormente se accionan la bomba y el compresor.

En el mismo panel se incorporaron tres flujómetros destinados a las corrientes de CO_2, aire comprimido y agua. El instrumento utilizado para CO_2 trabaja en un intervalo de medición de 0-12 L/min, el correspondiente al aire, entre 0-15 L/min y el destinado al agua, entre 0-70 GPH. Los flujómetros se incorporaron al sistema con la finalidad de permitir la medición y regulación de los caudales de las corrientes de alimentación, figura 3.

Figura 3

Panel del control del sistema y medición



Integración de los sistemas hidráulico y gaseoso

El sistema hidráulico se conformó de un recipiente de almacenamiento de 24 L fabricado de polietileno de alta densidad (PEAD), tuberías de PVC, manguera flexible transparente y diferentes accesorios de conexión. Para el transporte y suministro de líquido se instaló una bomba periférica Truper modelo BOAP-1/2A2 de ½ Hp, con la finalidad de impulsar el líquido desde el recipiente de almacenamiento hacia la parte superior de la columna, figura 4. En la conectividad del sistema de bombeo se incorporó un manómetro tipo Bourdon para la medición de la presión del sistema; mientras que, la descarga se conectó al flujómetro correspondiente antes de conducir el líquido hacia la columna. Después de atravesar el lecho de empaque, el líquido retorna al recipiente de almacenamiento, estableciendo un circuito de recirculación. Antes de iniciar las pruebas se revisaron las conexiones y se realizaron ajustes y sellados en los puntos donde se identificaron pequeñas fugas.

Figura 4

Integración de los sistemas hidráulicos



El suministro de la corriente gaseosa quedó integrado por un cilindro de CO_2 a presión, un regulador, un compresor y las líneas de conducción correspondientes, figura 5. El tanque se colocó en un soporte metálico independiente integrado a la estructura de la torre y se incorporaron elementos de fijación para proporcionar estabilidad. El CO_2 se hace fluir mediante su línea de alimentación y, antes de llegar al sistema de medición de flujo, se realiza su incorporación y mezclado con la corriente de aire comprimido proveniente del compresor; formando la mezcla gaseosa que posteriormente pasa por el flujómetro correspondiente. De esta manera, el flujo de la mezcla gaseosa fue medido antes de su ingreso a la columna. Durante la operación, la corriente gaseosa ingresó por la parte inferior de la columna y ascendió a través del material de empaque, mientras que el líquido descendió en sentido contrario, estableciendo el contacto gas-líquido en contracorriente.

Ensamble y verificación funcional

Una vez construidos e instalados los componentes de manera independiente, se realizó el ensamble final del prototipo. La columna fue colocada sobre la estructura metálicas y asegurada mediante los elementos de fijación previamente instalados. Posteriormente, se integraron el recipiente de almacenamiento, la bomba, el compresor, el tanque de CO_2 y el panel de control.

Las líneas hidráulicas y de suministro gaseoso se conectaron a sus entradas y salidas correspondientes, verificando que las mangueras y conexiones quedaran correctamente posicionadas y no interfirieran con la estructura ni con el desplazamiento del equipo. Finalmente, se revisó la fijación mecánica de los componentes y la estabilidad general del prototipo.

Figura 5

Componentes del sistema gaseoso



Para comprobar el funcionamiento correcto del sistema integrado, se realizaron pruebas funcionales de los sistemas hidráulico, neumático, eléctrico y estructural. Inicialmente se realizó

una inspección de las conexiones y se verificó la ausencia de fugas importantes. Posteriormente, se activó la bomba para comprobar la circulación del líquido desde el recipiente de almacenamiento hasta la parte superior de columna y se verificó el funcionamiento del compresor y el suministro de la corriente gaseosa. Durante las pruebas se observó el desplazamiento y circulación de ambos fluidos a través del lecho de empaque, se evidenció un funcionamiento correcto tanto del flujo líquido descendente como del fluido gaseoso ascendente en contracorriente, así como la permanencia del material de empaque dentro de la columna. Las fugas menores identificadas durante esta etapa fueron corregidas mediante un reajuste y sellado de las conexiones.

Mediante la observación directa durante las pruebas de funcionamiento de la torre se pudo obtener y registrar información que nos permitieron estudiar y analizar el comportamiento real de los componentes y la integración de los sistemas durante la operación del equipo. Debido al alcance establecido para el proyecto, la metodología se centró en la construcción y comprobación funcional del prototipo. No se desarrolló una etapa experimental destinada a la obtención y análisis de datos de absorción de CO_2 o de parámetros de transferencia de masa, propiamente considerada en una segunda etapa.

Limitaciones

Las principales limitaciones estuvieron relacionadas con las dimensiones y el peso de la torre, los cuales dificultaron su traslado y manipulación dentro del laboratorio. Esta situación requirió considerar y fabricar, desde la etapa de diseño, de una estructura desmontable y móvil. Asimismo, la integración de los diferentes sistemas dentro de una misma estructura requirió realizar ajustes en la distribución y configuración de lo componentes para mantenerlos como una unidad desplazable.

Recomendaciones y medidas de seguridad

Para la operación segura de la torre de absorción empacada, se recomienda verificar previamente que el depósito de alimentación contenga un volumen suficiente de agua y que las conexiones hidráulicas, eléctricas y de gas se encuentren correctamente ajustadas y en buen estado. Antes de poner en funcionamiento la bomba, se debe realizar el purgado o cebado de la línea hidráulica para evitar su operación en seco.

La alimentación eléctrica debe encontrarse dentro del rango de operación establecido para el equipo y no se deben manipular conexiones, interruptores o controles con las manos húmedas. Asimismo, se debe respetar la secuencia establecida para el encendido y apagado de la bomba y el compresor, evitando activar los equipos de manera simultánea o fuera de un orden previamente analizado y establecido.

En el sistema de suministro de gas, se debe comprobar que la válvula del tanque de CO_2 comprimido permanezca cerrada antes del arranque y abrirla gradualmente durante la operación,

monitoreando su flujo mediante el regulador y el flujómetro. El equipo debe utilizarse en un área con ventilación adecuada, evitando la exposición directa a posibles fugas de CO_2.

Durante la operación se debe vigilar continuamente la presencia de fugas, vibraciones excesivas, ruidos anormales o acumulación de líquido en la columna. En caso de detectar alguna anomalía, se debe detener la operación y corregirse. Al finalizar, se debe cerrar el suministro de CO_2, apagar el compresor y la bomba, y posteriormente desenergizar completamente el equipo antes de realizar actividades de limpieza, inspección o mantenimiento. Se recomienda utilizar el equipo de protección personal correspondiente y mantener despejada el área de trabajo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diseño e integración de la torre de absorción

El prototipo final integró la columna empacada con los elementos necesarios para establecer la circulación de las fases gaseosa y líquida, incorporando sistemas de bombeo, suministro de aire, medición de flujo y una estructura de soporte. La integración de estos componentes permitió disponer de un sistema organizado para la operación de la torre y facilitó el control de las principales variables asociadas con el movimiento de los fluidos. Asimismo, se realizaron adecuaciones en las conexiones hidráulicas de la bomba y en el panel de control, incluyendo la disposición de los flujómetros para mantenerlos estables durante la operación.

Desde el punto de vista funcional, la integración de los componentes resulta relevante porque el desempeño de una torre empacada depende de que las fases puedan ingresar, distribuirse y circular de manera adecuada a través de la columna. La literatura señala que la distribución del líquido y las condiciones hidráulicas influyen directamente sobre el área interfacial disponible y sobre los fenómenos de transferencia de masa que tienen lugar en el empaque (Flagiello et al., 2021). Por ello, la configuración obtenida constituye una condición necesaria para posteriores estudios de transferencia de masa, aunque por sí misma no permite determinar la eficiencia de absorción.

Funcionamiento del sistema de circulación

Durante las pruebas de operación se observó que la bomba permitió mantener una recirculación continua y estable del líquido. Las adecuaciones realizadas en sus conexiones hidráulicas facilitaron la operación del circuito y permitieron mejorar el control del flujo, sin observarse interrupciones en el desplazamiento del fluido durante las pruebas.

El comportamiento observado es consistente con la función que desempeña el circuito líquido en una torre empacada, ya que la fase líquida debe distribuirse y desplazarse a través del material de empaque para establecer contacto con la corriente gaseosa. Una circulación irregular podría generar zonas con menor contacto entre las fases y modificar las condiciones de transferencia. En este sentido, la estabilidad observada durante las pruebas constituye un resultado

favorable desde la perspectiva hidráulica del sistema, aunque no representa por sí misma una medición de la transferencia de masa.

Por otra parte, el compresor presentó un funcionamiento estable y suministró aire de manera continua hacia la columna. El sistema incorporó además un mecanismo de interrupción automática al alcanzar el nivel máximo de trabajo establecido, lo que contribuyó al control de la operación.

La operación conjunta de la bomba y el compresor permitió establecer las dos corrientes necesarias para evaluar el contacto gas-líquido dentro de la columna. Esta condición resulta fundamental debido a que las torres empacadas funcionan mediante la interacción de ambas fases y, en configuración contracorriente, la fase gaseosa asciende mientras la líquida desciende a través del empaque.

Establecimiento del flujo en contracorriente

Durante la operación se verificó la circulación del gas en sentido ascendente y del líquido en sentido descendente a través de la zona empacada. Asimismo, se observó una circulación continua y estable, sin obstrucciones significativas en las mangueras o conexiones. El empaque favoreció la distribución del líquido dentro de la columna y permitió establecer la interacción entre ambas fases.

El establecimiento de este patrón de flujo constituye uno de los principales resultados funcionales del sistema, debido a que el contacto contracorriente es una configuración característica de las torres empacadas para operaciones de absorción. Bajo este arreglo, las fases circulan en sentidos opuestos, favoreciendo el contacto continuo a lo largo de la zona empacada.

La función del empaque consiste en proporcionar una superficie sobre la cual el líquido pueda distribuirse, incrementando el área disponible para la interacción gas-líquido (Geankoplis, 2006; Flagiello et al., 2021).

No obstante, la observación visual del flujo no permite establecer directamente la magnitud de la transferencia de masa. El propio protocolo señala que este fenómeno no es perceptible visualmente y que su comprobación requiere pruebas experimentales y químicas posteriores. Por esta razón, los resultados obtenidos deben interpretarse como una verificación del funcionamiento hidráulico y del establecimiento del contacto entre fases, y no como una determinación de la eficiencia de absorción.

Control de flujo y comportamiento de los flujómetros

Los flujómetros presentaron un funcionamiento adecuado durante las pruebas, permitiendo visualizar y regular el paso de los fluidos. Además, fue posible realizar ajustes en el caudal de las corrientes de líquido y aire, mientras que las conexiones de mangueras y adaptadores permanecieron estables y sin fugas significativas durante la operación.

La posibilidad de visualizar y modificar los caudales constituye un elemento importante para el funcionamiento de la torre, debido a que la velocidad de las fases influye sobre las

condiciones hidrodinámicas del sistema. El caudal volumétrico y la velocidad de circulación se encuentran relacionados mediante el área transversal disponible para el flujo, por lo que el control de estas variables permite establecer diferentes condiciones de operación y, posteriormente, analizar su influencia sobre el contacto gas-líquido.

Este resultado también representa una condición necesaria para estudios posteriores, ya que la evaluación de parámetros de transferencia de masa requiere conocer y controlar las condiciones de operación de las fases. Estudios sobre columnas empacadas han mostrado que variables como los caudales de gas y líquido se relacionan con parámetros hidrodinámicos y de transferencia de masa, incluyendo el área interfacial y los coeficientes de transferencia.

Seguridad, hermeticidad y estabilidad estructural

Durante las pruebas se identificaron pequeñas fugas en algunas conexiones, las cuales fueron corregidas oportunamente. Después de las adecuaciones, el sistema presentó condiciones de mayor hermeticidad durante su funcionamiento. De manera complementaria, el cableado y conexiones eléctricas fueron protegidos y organizados dentro de la estructura para reducir su exposición durante la operación.

La identificación y corrección de estos puntos constituye un resultado relevante del proceso de validación, debido a que las conexiones hidráulicas y neumáticas forman parte de las condiciones necesarias para mantener un flujo estable. En una torre empacada, alteraciones en las conexiones pueden modificar las condiciones de alimentación de las fases y dificultar la reproducción de las condiciones de operación. Por ello, la corrección de las fugas contribuyó a mejorar la confiabilidad operacional del sistema.

En cuanto a la estabilidad mecánica, la estructura permitió mantener integrados los diferentes componentes durante las pruebas, sin observarse movimientos abruptos, vibraciones excesivas o fallas mecánicas que interfirieran con la operación. La configuración estructural y la incorporación de elementos de movilidad permitieron mantener los componentes en una disposición estable y facilitaron el manejo del prototipo. Estos aspectos son relevantes debido a que las características mecánicas de una torre también pueden influir en la seguridad y en la continuidad de su operación.

Desempeño general y alcance de los resultados

En conjunto, las pruebas realizadas permitieron verificar el funcionamiento de los principales subsistemas de la torre: circulación del líquido, suministro de aire, regulación de flujos, establecimiento del contacto contracorriente y estabilidad general. Los resultados muestran que el sistema fue capaz de mantener condiciones operativas estables durante las pruebas realizadas, proporcionando las condiciones básicas para el estudio posterior de fenómenos de transferencia de masa.

La principal aportación del sistema se encuentra, por tanto, en la integración funcional de los elementos necesarios para establecer y controlar el contacto entre una corriente gaseosa y una

líquida dentro de una columna empacada. Esto resulta pertinente para el estudio de operaciones gas-líquido, debido a que permite disponer de una plataforma en la que, bajo condiciones controladas de flujo, puedan realizarse posteriormente mediciones de concentración, transferencia de masa y eficiencia de absorción.

En el diseño y construcción del prototipo Torre de Absorción empacada para el estudio del contacto en equilibrio de una sola etapa de un sistema gas–líquido, los resultados mencionados se refieren exclusivamente al comportamiento mecánico, hidráulico y operacional de la torre; es decir, la comprobación de la correcta operación del equipo. Las determinaciones destinadas a cuantificar la transferencia de masa, coeficientes de transferencia de masa o eficiencia de la absorción se tienen contempladas en una segunda etapa; la evaluación cuantitativa del fenómeno de absorción.

Como perspectiva de trabajo, la torre puede emplearse posteriormente para estudiar experimentalmente la transferencia de masa mediante la incorporación de una corriente gaseosa con un soluto de interés y un líquido absorbente distintos, junto con métodos de análisis que permitan determinar las concentraciones de entrada y salida, entre otros. De esta manera, será posible relacionar las condiciones hidrodinámicas previamente establecidas con parámetros cuantitativos de transferencia de masa y eficiencia de absorción. La literatura especializada destaca precisamente la importancia de caracterizar conjuntamente la hidráulica y la transferencia de masa en columnas empacadas para comprender y predecir su desempeño.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se considera que el diseño y construcción de la torre de absorción permitió establecer un sistema adecuado para generar las condiciones básicas de operación de una torre empacada a escala de laboratorio. La circulación continua de las fases, el movimiento en contracorriente y la estabilidad de los sistemas hidráulico y neumático permiten sostener que el diseño realizado es funcional para el contacto gas-líquido. Esto coincide con el fundamento teórico de la absorción, donde el contacto entre ambas fases y el área interfacial proporcionada por el empaque son condiciones necesarias para favorecer la transferencia de masa.

De igual manera, el proyecto permitió fortalecer habilidades de investigación, resolución de problemas y pensamiento crítico, ya que en diversas etapas del proyecto fue necesario buscar información, solicitar asesorías, comparar materiales y costos, así como encontrar soluciones prácticas ante las dificultades que surgieron durante la construcción y operación del prototipo. El trabajo en equipo también fue un aspecto fundamental para el desarrollo exitoso del proyecto, permitiendo mejorar la comunicación, organización y toma de decisiones.

No obstante, los resultados también permiten establecer una limitación importante del estudio. El funcionamiento estable de la torre no es suficiente para determinar su desempeño como equipo de absorción, por lo que se debe someter, en una segunda etapa, a la obtención de datos

reales mediante pruebas de laboratorio; con lo que será posible establecer experimentalmente la eficiencia de absorción, la cantidad de soluto transferido ni los coeficientes de transferencia de masa. En este sentido, los resultados obtenidos deben considerarse como una comprobación de las condiciones de operación del sistema y no como una evaluación cuantitativa de la absorción.

Desde el punto de vista del diseño, la integración alcanzada demuestra que es posible disponer de una plataforma experimental capaz de mantener la circulación y regulación de las fases, lo cual constituye una condición previa para estudiar posteriormente el fenómeno de transferencia de masa. La experiencia obtenida durante la construcción también permitió identificar elementos que pueden optimizarse, particularmente en los sistemas de control, válvulas y mantenimiento de los equipos. Estas mejoras podrían contribuir a obtener condiciones de operación más estables y reproducibles en trabajos posteriores.

La implementación de la segunda etapa, la etapa experimental, permitirá cuantificar y validar el proceso de absorción y analizar la influencia de variables como los caudales de gas y líquido, las características del empaque y las condiciones de operación. De esta manera, el presente trabajo establece una base experimental que puede ser ampliada para el diseño y construcción de torres de absorción y su posterior estudio de desempeño para cuantificar la transferencia de masa.

En términos generales, el proyecto representó una experiencia académica y práctica de gran valor, debido a que permitió desarrollar desde cero un prototipo funcional de gran escala, integrando conocimientos teóricos y prácticos de ingeniería. Finalmente, aunque existen aspectos susceptibles de mejora, como la modernización del panel eléctrico, el reemplazo de algunas válvulas y el mantenimiento del compresor, la torre de absorción logró cumplir satisfactoriamente con los objetivos planteados y demostró ser un sistema funcional y con potencial para futuras mejoras y pruebas experimentales.

REFERENCIAS

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones (5ª ed.). McGraw-Hill.

Flagiello, D., Parisi, A., Lancia, A., & Di Natale, F. (2021). A review on gas-liquid mass transfer coefficients in packed-bed columns. ChemEngineering, 5(3), 43. https://doi.org/10.3390/chemengineering5030043

Flagiello, D., Parisi, A., Lancia, A., & Di Natale, F. (2021). A tool for mass transfer evaluation in packed-bed columns for chemical engineering students. Education for Chemical Engineers, 37, 29–39. https://doi.org/10.1016/j.ece.2021.08.001

Geankoplis, C. J. (2006). Procesos de transporte y operaciones unitarias (4ª ed.). CECSA.

McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2007). Operaciones unitarias en ingeniería química (7ª ed.). McGraw-Hill.

Treybal, R. E. (1988). Operaciones de transferencia de masa (2ª ed.). McGraw-Hill. VVA Industrial. (s.f.). Cálculo del caudal volumétrico. https://vvaindustrial.com/calculo-del-caudalvolumetrico/