



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA BIOLÓGICA Y BIOMÉDICA

INGENIERO QUÍMICO

TRABAJO DE TITULACIÓN

Diseño y montaje de una columna de absorción para
laboratorio

Autora: Jara González, María del Cisne

Director: Meneses Chamba, Miguel Ángel

LOJA - ECUADOR
2020



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2021

Aprobación del director del Trabajo de Titulación

Loja, 1 de septiembre de 2021

Mgtr.

Natalí Elizabeth Solano Cueva

Coordinador de Titulación de Ingeniería Química

Ciudad.-

De mi consideración:

El presente Trabajo de Titulación denominado: "Diseño y montaje de una columna de absorción para laboratorio" realizado por María del Cisne Jara González, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo. Así mismo, doy fe que dicho Trabajo de Titulación ha sido revisado por la herramienta antiplagio institucional.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Ph.D. Miguel Ángel Meneses Chamba

Declaración de autoría y cesión de derechos

“Yo, María del Cisne Jara González, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente:

- Ser autora del Trabajo de Titulación denominado: “Diseño y montaje de una columna de absorción para laboratorio”, de la Titulación de Ingeniería Química, específicamente de los contenidos comprendidos en: Introducción, Capítulo 1. Marco teórico, Capítulo 2. Diseño Metodológico, Capítulo 3. Resultados y Discusión, Conclusiones y Recomendaciones, siendo Ph.D. Miguel Ángel Meneses Chamba, director del presente trabajo; y, en tal virtud, eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación a la propiedad intelectual. Además, ratifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo son de mi exclusiva responsabilidad.
- Que mi obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j), de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTP, que establece: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.
- Autorizo a la Universidad Técnica Particular de Loja para que pueda hacer uso de mi obra con fines netamente académicos, ya sea de forma impresa, digital y/o electrónica o por cualquier medio conocido o por conocerse, sirviendo el presente instrumento como la fe de mi completo consentimiento; y, para que sea ingresada al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

Autor: María del Cisne Jara González

C.I.: 1150232898

Dedicatoria

A mis padres Francisco y Ligia por haberme dado su cariño, apoyo y consejos en todo momento; gracias a ellos hoy puedo culminar una etapa más en mi vida.

María del Cisne Jara González

Agradecimiento

A Dios, por todas las bendiciones recibidas hasta el momento, por ser aquella fuerza incondicional que no dejó que me diera por vencida pese a las adversidades que surgían en este arduo caminar.

A mi familia, especialmente a mis padres por apoyarme en todo momento, por ser consejeros y por todo el sacrificio que realizaron para que pueda culminar con una etapa más en mi formación académica.

A mi tutor: Ph.D Miguel Ángel Meneses, gracias por todas las enseñanzas en los años de estudio, por su guía en el desarrollo y culminación del presente trabajo,

A todo el personal docente de la carrera de Ingeniería Química, gracias por compartir su conocimiento en cada una de las materias e inspirar a cada uno de los estudiantes a conocer nuevos campos dentro de la carrera.

A la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), por ser mi centro de formación académica.

A mi amiga Gaby; por estar conmigo tantos años y porque nadie más que ella conoce lo que se tiene que batallar para conseguir lo que uno quiere; mil gracias por todas las conversaciones cuando ya no podía más.

A mis amigos gracias por enseñarme que la amistad puede estar en quienes menos lo esperas; por ser el escape de la rutina y estar en los buenos y malos momentos.

A todas las personas que de forma directa o indirecta formaron parte de este gran proceso.

Índice de Contenido

| | |
|--|-----|
| Carátula | I |
| Aprobación del director del Trabajo de Titulación..... | II |
| Declaración de autoría y cesión de derechos..... | III |
| Dedicatoria..... | V |
| Agradecimiento..... | VI |
| Índice de Contenido | VII |
| Resumen | 1 |
| Abstract..... | 2 |
| Introducción | 3 |
| Capítulo uno | 5 |
| 1 Marco Teórico..... | 5 |
| 1.1 Absorción de gases..... | 5 |
| 1.1.1 Tipos..... | 5 |
| 1.1.1.1 Absorción física. | 5 |
| 1.1.1.2 Absorción química. | 5 |
| 1.1.2 Mecanismo de absorción | 6 |
| 1.1.3 Equipos de contacto entre fases gas-líquido..... | 7 |
| 1.1.3.1 Columnas de platos. | 7 |
| 1.1.3.2 Columnas empacadas. | 7 |
| 1.2 Diseño de columnas empacadas | 8 |
| 1.2.1 Selección de Disolvente..... | 9 |

| | | |
|---------|---|----|
| 1.2.2 | Selección de Datos de Equilibrio | 9 |
| 1.2.3 | Balances de Materia | 10 |
| 1.2.3.1 | Líneas de operación para el proceso de absorción..... | 11 |
| 1.2.3.2 | Relación mínima gas-líquido..... | 12 |
| 1.2.3.3 | Solución Analítica: Ecuación de Kremser..... | 12 |
| 1.2.4 | Empaque de Relleno | 13 |
| 1.2.5 | Caída de presión y diámetro de columna..... | 13 |
| 1.2.6 | Altura de la columna | 15 |
| 1.2.6.1 | Altura de una unidad de transferencia. | 15 |
| 1.2.7 | Balance de energía..... | 16 |
| 1.3 | Aplicación industrial de la absorción gaseosa | 17 |
| 1.3.1 | Control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV's)..... | 18 |
| 1.4 | Estudios relacionados con la absorción gaseosa | 18 |
| 1.4.1 | Diseños de columnas de absorción para laboratorio..... | 19 |
| 1.4.2 | Equipos didácticos comerciales para absorción gaseosa | 19 |
| | Capítulo dos..... | 21 |
| 2 | Diseño metodológico..... | 21 |
| 2.1 | Dimensionamiento de la columna de absorción | 21 |
| 2.1.1 | Propuesta del sistema de absorción | 22 |
| 2.1.2 | Consideraciones de diseño..... | 23 |
| 2.1.3 | Balance de Materia..... | 26 |
| 2.1.4 | Balance de Energía | 27 |
| 2.1.5 | Determinación del Diámetro..... | 27 |

| | | |
|---------------------|--|----|
| 2.1.6 | Determinación de coeficientes de transferencia de materia | 29 |
| 2.2 | Dimensionamiento de auxiliares..... | 29 |
| 2.2.1 | Determinación de potencia de bomba..... | 29 |
| 2.2.2 | Determinación de potencia de compresor..... | 31 |
| 2.3 | Características de montaje..... | 32 |
| Capítulo tres | | 33 |
| 3 | Resultados y Discusión..... | 33 |
| 3.1 | Diseño de la columna de absorción..... | 33 |
| 3.1.1 | Balances de Materia | 33 |
| 3.1.2 | Determinación de parámetros de diseño para la columna de absorción | 38 |
| 3.2 | Montaje de columna | 39 |
| 4 | Conclusiones | 41 |
| 5 | Recomendaciones | 42 |
| 6 | Referencias..... | 43 |
| Apéndice..... | | 47 |

Índice de Tablas

| | | |
|---------|---|----|
| Tabla 1 | <i>Características para selección de disolvente.....</i> | 9 |
| Tabla 2 | <i>Resumen de especificaciones en columnas didácticas</i> | 20 |
| Tabla 3 | <i>Características del cuerpo de la columna.....</i> | 22 |
| Tabla 4 | <i>Propuesta inicial del sistema de absorción.....</i> | 23 |
| Tabla 5 | <i>Consideraciones de diseño propuestas para sistema de absorción</i> | 24 |
| Tabla 6 | <i>Propuesta de diseño para sistema de bombeo.....</i> | 30 |
| Tabla 7 | <i>Accesorios empleados para el diseño del sistema de bombeo.....</i> | 31 |
| Tabla 8 | <i>Parámetros de operación</i> | 33 |

| | |
|--|----|
| Tabla 9 <i>Resultados de composiciones de corrientes con variaciones</i> | 34 |
| Tabla 10 <i>Resultados de corrientes con variaciones</i> | 35 |
| Tabla 11 <i>Parámetros de diseño con variaciones</i> | 38 |
| Tabla 12 <i>Requerimientos elementos auxiliares</i> | 39 |
| Tabla 13 <i>Materiales empleados en la construcción de la columna de absorción</i> | 39 |
| Tabla 14 <i>Pesos moleculares componentes del sistema</i> | 48 |
| Tabla 15 <i>Propiedades a condiciones de operación</i> | 48 |
| Tabla 16 <i>Datos de Equilibrio basado en la Ley de Henry</i> | 50 |
| Tabla 17 <i>Difusividades y Número de Schmidt para las Mezcla Acetona-Aire y Acetona-Agua</i> | 57 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 <i>Mecanismo de transferencia de masa para procesos de absorción</i> | 6 |
| Figura 2 <i>Disposición interna de un absorbedor tipo columna empacada</i> | 8 |
| Figura 3 <i>Esquema básico de un sistema de absorción a contracorriente</i> | 11 |
| Figura 4 <i>Líneas de operación para un absorbedor</i> | 12 |
| Figura 5 <i>Empaques empleados en columnas</i> | 13 |
| Figura 6 <i>Gráfica de Eckert</i> | 14 |
| Figura 7 <i>Representación gráfica del cuerpo disponible para el diseño de columna de absorción</i> | 21 |
| Figura 8 <i>Algoritmo de cálculo para una columna de absorción empacada con diámetro de columna y altura de empaque especificados</i> | 25 |
| Figura 9 <i>Algoritmo de cálculo para potencia de bomba</i> | 31 |
| Figura 10 <i>Algoritmo de cálculo para potencia de compresor</i> | 32 |
| Figura 11 <i>Diagrama de flujo para la unidad de absorción</i> | 34 |
| Figura 12 <i>Líneas de operación para un absorbedor, propuesta inicial y primera variación</i> .. | 36 |
| Figura 13 <i>Líneas de operación absorbedor segunda variación</i> | 37 |
| Figura 14 <i>Módulo de absorción</i> | 40 |
| Figura 15 <i>Balances de materia para el sistema de absorción propuesto</i> | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 16 <i>Aplicación de la gráfica de Eckert</i> | 54 |
| Figura 17 <i>Características de empaque anillo Rasching</i> | 54 |
| Figura 18 <i>Hoja de Excel empleando herramienta Solver</i> | 55 |
| Figura 19 <i>Factores de empaque para empaques aleatorios</i> | 58 |

Índice de Apéndices

| | |
|---|----|
| Apéndice 1: Diagrama del sistema de absorción Acetona-Aire-Agua..... | 47 |
| Apéndice 2: Propiedades de componentes del sistema a condiciones de operación | 48 |
| Apéndice 3: Balance de Materia y Número de Unidades de Transferencia | 49 |
| Apéndice 4: Diagrama McCabe Thiele para determinar el número de etapas | 52 |
| Apéndice 5: Diámetro de columna | 53 |
| Apéndice 6: Aplicación herramienta Solver | 54 |
| Apéndice 7: Altura y coeficientes de transferencia de masa..... | 56 |
| Apéndice 8: Dimensionamiento auxiliares..... | 59 |
| Apéndice 9: Método para determinar acetona..... | 61 |

Nomenclatura

| | | |
|------------|---|-----------------------|
| A_t, S | : Área transversal columna | m^2 |
| C_f | : Factor de empaque | - |
| D | : Diámetro | m |
| D_{AB} | : Difusividad molecular | m^2/s |
| D_{equi} | : Diámetro equivalente | m |
| D_i | : Diámetro interno tubería | m |
| f_P | : Coeficiente de masa relativo | - |
| g | : gravedad | m/s^2 |
| G' | : Velocidad másica basada en la sección transversal total de la torre | $kg/m^2 \cdot s$ |
| G_1, V | : Flujo gas inerte y soluto a la entrada | $kmol \text{ Gas}/h$ |
| G_1' | : Flujo másico | kg/s |
| G_2 | : Flujo gas inerte y soluto a la salida | $kmol \text{ Gas}/h$ |
| g_c | : 1 (SI) | - |
| G_s | : Flujo gas inerte | $kmol \text{ aire}/h$ |
| h_1 | : Entalpía a T_1 | kJ/kg |
| h_2 | : Entalpía a T_2 | kJ/kg |
| H_A | : Constante de Henry | - |
| H_{OY} | : Altura de una unidad de transferencia | m |

| | | |
|---------------------|---|---|
| k'_{x_a} | : Coeficiente volumétrico de transferencia de masa, líquido | $\text{kmol/s}\cdot\text{m}^3\cdot\text{fracc. Mol}$ |
| k'_{y_a} | : Coeficiente volumétrico de transferencia de masa, gas | $\text{kmol/s}\cdot\text{m}^3\cdot\text{fracc. Mol}$ |
| K'_{y_a} | : Coeficiente volumétrico global de transferencia de masa, gas | $\text{kmol/s}\cdot\text{m}^3\cdot\text{fracc. Mol}$ |
| L' | : Velocidad másica basada en la sección transversal total de la torre | $\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$ |
| L_1 | : Flujo solvente puro y soluto a la salida | kmol líquido/h |
| L_1' | : Flujo másico | kg/s |
| L_2 | : Flujo solvente puro y soluto a la entrada | kmol líquido/h |
| L_{eq} | : Longitud equivalente | m |
| L_s | : Flujo solvente puro | kmol agua/h |
| \dot{m} | : Flujo másico | Kg/s |
| N_{OY} | : Número de unidades de transferencia | adimensional |
| N_{Sc} | : Número de Schmidt | adimensional |
| P | : Presión | atm |
| PM | : Peso Molecular | kg/kmol |
| p_{tot} | : Presión total del sistema | atm |
| Q | : Flujo volumétrico | m^3/s |
| Re | : Número de Reynolds | adimensional |
| T | : Temperatura | $\text{K}, ^\circ\text{C}$ |
| T_A | : Flujo de transferido | $\text{kmol}_{\text{acetona}}/\text{h}$ |
| V | : Velocidad | m/s |
| \dot{W} | : Potencia | W, Hp |
| x_{A1} y x_{A2} | : Fracción molar del soluto en fase líquida | $\text{kmol}_{\text{acetona}}/\text{kmol Gas}$ |
| X_{A1} y X_{A2} | : Relaciones molares del soluto en fase líquida | $\text{kmol}_{\text{acetona}}/\text{kmolGs}$ |
| y_{A1} y y_{A2} | : Fracción molar del soluto en fase gaseosa | $\text{kmol}_{\text{acetona}}/\text{kmol}$ Líquido |
| Y_{A1} y Y_{A2} | : Relaciones molares del soluto en fase gaseosa | $\text{kmol}_{\text{acetona}}/\text{kmolLs}$ |
| Z_T | : Altura total de la sección empacada | m |
| ΔP | : Caída de presión | Pa |
| μ_G | : Viscosidad del gas | $\text{Pa}\cdot\text{s}$ |
| μ_L | : Viscosidad del líquido | $\text{Pa}\cdot\text{s}$ |
| ρ_G | : Densidad del gas | kg/m^3 |
| ρ_L | : Densidad del líquido | kg/m^3 |

Subíndice

| | |
|------|--|
| 1-2 | : Base columna empacada- Domo columna empacada |
| A; B | : Componentes A, B |
| x, L | : Líquido |
| y, G | : Gas |

Resumen

La absorción gaseosa, es una de las operaciones unitarias estudiadas dentro de la carrera de Ingeniería Química, por tal motivo en el presente trabajo se enfoca en el diseño y montaje de una columna de absorción a escala de laboratorio, misma que será usada como complemento en la enseñanza de los fenómenos de transferencia de masa. Para ello se escogió como sistema de estudio la mezcla binaria acetona-aire, empleando como solvente líquido agua pura. Con ayuda de Excel, se realizaron los respectivos cálculos de balance de materia; determinación de diámetro y altura; así como el cálculo de potencia para los elementos auxiliares que forman parte del módulo. Una vez obtenidos los resultados se procedió a realizar un ajuste acorde con las dimensiones de un cuerpo cilíndrico con el que se contaba. Como resultado se tiene que los parámetros adecuados para este sistema de absorción son: Trabajar con un flujo gaseoso (G_1) de $0.12 \text{ kmol}_{\text{Gas}}/\text{h}$; flujo de solvente líquido (L_2) de $0.94 \text{ kmol}_{\text{Liq}}/\text{h}$. además la potencia de bomba y compresor es de 0.0004 HP y 0.0064 HP respectivamente.

Palabras claves: absorción, columna empacada, transferencia de materia.

Abstract

Gaseous absorption is one of the unitary operations studied in the Chemical Engineering course, for this reason, the present work focuses on the design and assembly of an absorption column at laboratory scale, which will be used as a complement in the teaching of mass transfer phenomenons. For this purpose, the binary mixture acetone-air was chosen as the study system, using pure water as liquid solvent. With the help of Excel, the respective calculations of balance of matter, determination of diameter and height, as well as the calculation of power for the auxiliary elements that are part of the module were performed. Once the results were obtained, we proceeded to make an adjustment according to the dimensions of a cylindrical body. As a result, the appropriate parameters for this absorption system are as follows: Working with a gas flow (G_1) of 0.12 kmol_{Gas}/h; liquid solvent flow (L_2) of 0.94 kmol_{Liq}/h. Furthermore, the pump and compressor power are 0.0004 HP and 0.0064 HP respectively.

Keywords: absorption, packed column, mass transfer.

Introducción

El presente proyecto se centra en el diseño y montaje de una columna de absorción para laboratorio, la cual podrá ser utilizada dentro de las instalaciones de la Universidad Técnica Particular de Loja como complemento experimental de temas teóricos referentes a operaciones unitarias dentro de la rama de Ingeniería Química, conjuntamente contribuye con la explicación de procesos ambientales que se desarrollan dentro de las diferentes secciones de la universidad.

La absorción gaseosa es una de las muchas técnicas de purificación de corrientes, la cual se caracteriza por su facilidad y economía de instalación. Existen diversas mezclas gaseosas que requieren tratamientos para eliminar contaminantes o recuperar compuestos de interés. Un ejemplo de ello es una mezcla aire-acetona, la cual es el caso de estudio dentro de este proyecto debido a su facilidad de generación y a su bajo nivel de contaminación, por lo que se considera una mezcla ideal para objeto de práctica.

El objetivo general del presente proyecto es diseñar y construir una columna de absorción para ser utilizada como herramienta educativa de transferencia de masa, para ello se realizó el diseño conceptual, la determinación de la capacidad de sistema de bombeo de agua y compresión de aire; y como punto final el montaje de la columna.

El estudio se divide en 3 capítulos, el primero denominado marco teórico presenta el sustento teórico para la realización del proyecto; en el capítulo dos se describe la metodología empleada para realizar el diseño y los materiales seleccionados para la construcción del módulo. Finalmente en el tercer capítulo, se muestran los resultados y su respectiva discusión basado en datos comparativos variando parámetros de operación

Con el propósito de dar cumplimiento con los objetivos planteados, la metodología empieza con el dimensionamiento de la columna de absorción, de la cual se cuenta con datos de altura y diámetro; estos permiten ajustar los flujos de corrientes. Seguidamente se realizan los cálculos para los auxiliares, como son bomba y compresor. Para el cálculo del equipo y la realización de diagramas de flujo se emplearon los softwares Excel y AutoCAD Plant 3D, respectivamente.

Partiendo de los datos de diseño se buscan las mejores opciones de materiales disponibles y con ello se procede con el montaje del equipo, esto permite conocer algunas de las limitantes dentro del desarrollo del proyecto como son la disponibilidad de materiales en el mercado local, ya que se debe procurar acercarse lo más que se pueda al diseño teórico, por lo que se buscaron nuevas opciones para sustituir algunos de los materiales propuestos.

Finalmente se espera que el uso de este módulo de laboratorio pueda contribuir de forma positiva con la formación de los estudiantes, incentivándolos a buscar nuevas formas para complementar el estudio práctico de las diferentes operaciones unitarias que existen.

Capítulo uno

Marco Teórico

1.1 Absorción de gases

Es aquella operación unitaria que permite disolver, uno o varios componentes presentes en una mezcla de gases, en un solvente líquido adecuado (Wankat, 2008). Ampliamente usada en la industria química para procesos de purificación y recuperación de productos valiosos que se encuentren en una corriente gaseosa (Seader et al., 2005).

Kohl et al., (1997, como se citó en Alvarado, 2013), mencionan que “la absorción es considerado el proceso más importante de purificación de gases” (p. 9). Se caracteriza por su costo relativamente bajo y la capacidad de funcionamiento sin necesidades extremas.

1.1.1 Tipos

En función de la interacción entre los componentes de la mezcla de gas y el líquido absorbente, se puede clasificar en:

1.1.1.1 Absorción física.

El gas eliminado cuenta con mayor solubilidad en el solvente que otros gases presentes en la mezcla, y no se dan reacciones químicas entre las sustancias. La concentración en el equilibrio, de la sustancia absorbida guarda una estrecha relación con la presión parcial en la fase gaseosa por lo que es necesario un adecuado control de presión y temperatura. Al no existir cambios químicos en las sustancias, el soluto se lo puede recuperar mediante procesos de desorción, el cual corresponde a la operación contraria a la absorción, dicho de otra forma, la transferencia de masa se da de la fase líquida hacia la gaseosa (Alvarado, 2013)

1.1.1.2 Absorción química.

Involucra la presencia de una reacción química entre el soluto y solvente, y pueden ser reversibles o irreversibles. La recuperación del soluto en solución se lo puede realizar por procesos de regeneración y a diferencia de la absorción física, no se puede hacer suposiciones básicas, por lo que el proceso resulta más complejo, además es muchos de los

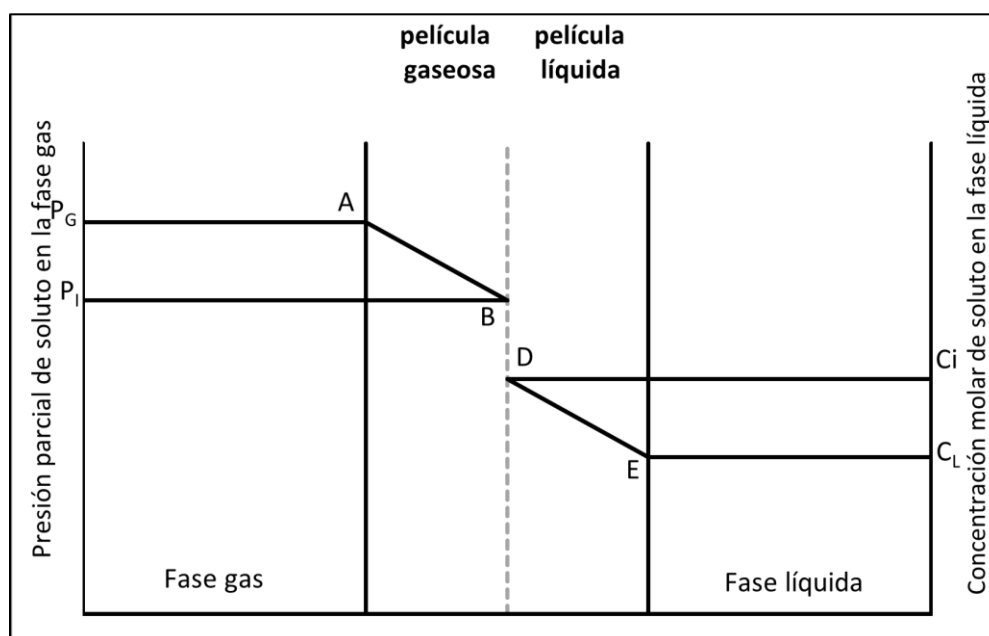
casos se requiere el uso de softwares adecuados para su correcto modelamiento (Smith, 2005).

1.1.2 Mecanismo de absorción

En varios procesos de separación, el paso de materia va de una fase a otra, y la velocidad de difusión de cada una de ellas influye directamente a la velocidad global de transferencia. Según Marcilla (1999), el proceso de absorción se puede describir mediante la teoría de dos películas planteada por Whitman, la cual indica que la materia se transfiere en el seno de las fases en sistemas bifásicos por convección. Como se puede ver en la Figura 1, las diferencias de las concentraciones se consideran en las proximidades de la interfase, además en cada uno de los lados la convección es interrumpida y existen películas en las cuales la difusión es del tipo molecular. Se hace referencia a la Ley de Fick, la cual menciona que la velocidad de transferencia será proporcional al gradiente de concentración y al área.

Figura 1

Mecanismo de transferencia de masa para procesos de absorción



En este caso, las relaciones de equilibrio y la diferencia de concentraciones de las fases respecto al equilibrio tienen dependencia sobre la dirección de la transferencia de masa

a través de la interfase; de tal modo que esta diferencia de concentraciones entre fases no es responsable de la transferencia de masa.

En varios procesos de separación, el paso de materia va de una fase a otra, y la velocidad de difusión de cada una de ellas influye directamente a la velocidad global de transferencia.

1.1.3 Equipos de contacto entre fases gas-líquido

Son aquellos equipos que se diseñan con la finalidad de poner en contacto íntimo dos fases diferentes, con el objetivo de conseguir la separación de los componentes de una fase, por acción de la otra (Marcilla Gomis, 1999). Esto se consigue cuando los equipos cuentan con una gran superficie interfacial, la cual permite la dispersión de dichas fases.

1.1.3.1 Columnas de platos.

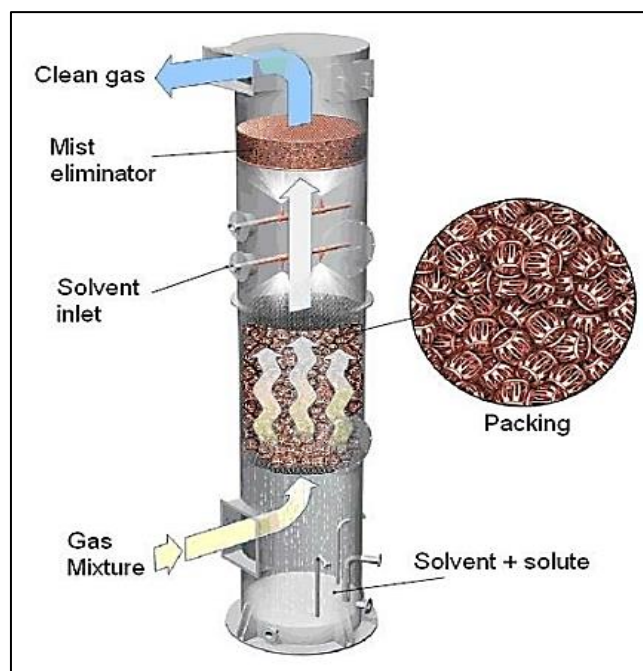
Son equipos por etapas, consiste en un cilindro en cuyo interior se encuentra una serie de platos perforados los cuales permiten el contacto de las fases. Tiene un contacto múltiple a contracorriente y cada plato consta como una etapa (Wankat, 2008).

1.1.3.2 Columnas empacadas.

Gainza (2012, como se citó en Morales y Pérez, 2015) describe: “Las torres empacadas son equipos de transferencia de masa gas-líquido ampliamente usados en operaciones tales como: absorción (física y química), desorción, extracción, deshumidificación, entre otras. Sus constituyentes internos son: sistemas de alimentación, distribución y redistribución; retenedores y soporte de empaques; colectores de líquido y eliminadores de arrastre” (p. 22). De manera general, la fase líquida mojará el empaque y fluirá en forma de películas, mientras que la fase gaseosa atraviesa el volumen que resta de la columna (Richardson, Harker, & Backhurst, 2002). Por tal motivo es apropiado su uso en sistemas donde cualquier fase genera una resistencia predominante. En la Figura 2, se muestra la distribución interna con la que cuentan las columnas empacadas para el proceso de absorción, así como la dirección de cada una de las fases presentes en el proceso.

Figura 2

Disposición interna de un absorbedor tipo columna empacada



Nota. Adaptado de *Design of a packed-bed absorption column considering four packing types and applying matlab* [Ilustración], por Pérez Sánchez, et al., 2016, CAMJOL (<https://doi.org/10.5377/nexo.v29i2.4577>). CC BY-NC-ND 2.0

1.2 Diseño de columnas empacadas

Para las columnas que cuentan con material de relleno en su interior, los diseños se basan en la transferencia de masa en función de expresiones de velocidad en la interfase. Perry & Green (2008), describen un procedimiento general para el diseño de sistemas de absorción:

Por lo general se requiere que el diseñador determine: 1) el mejor disolvente; 2) la velocidad óptima del gas a través del absorbedor, es decir, el diámetro del recipiente; 3) la altura del recipiente y sus miembros internos, o sea, la profundidad y tipo de empaque o número de bandejas; 4) la velocidad óptima de circulación del disolvente a través del absorbedor y del separador; 5) las temperaturas de las corrientes que entran y salen del absorbedor y la cantidad de calor a extraer, considerando el calor de disolución y otros efectos térmicos; 6) las presiones a las que operará el absorbente

y el separador, y 7) el diseño mecánico de las torres de absorción y separación, que incluye los distribuidores de flujo, los apoyos de los empaques, etc. (p. 14-7)

Wankat (2008) describió algunas suposiciones necesarias para los sistemas de absorción: “1. El gas de arrastre, o portador, es insoluble; 2. El solvente es no volátil; 3. El sistema es isotérmico e isobárico” (p. 387).

1.2.1 Selección de Disolvente

La selección depende del objetivo principal por el cual se va a realizar el proceso de absorción, bien sea para producir una disolución específica o para eliminar un determinado componente presente en la fase opuesta. En la Tabla 1 se describen algunas de las consideraciones tomadas para la selección de un solvente adecuado.

Tabla 1

Características para selección de disolvente

| Característica | Descripción |
|-----------------------|--|
| Solubilidad del gas | Debe ser elevada para aumentar la velocidad de absorción. |
| Volatilidad | Baja presión de vapor, para evitar pérdida por arrastre. |
| Corrosividad | Necesaria para evitar altos costes de construcción. |
| Costo | Bajo, para poder aceptar posibles pérdidas y el disolvente debe fácil de disponer. |
| Viscosidad | Una baja viscosidad genera velocidad rápida de absorción. |

Nota. Adaptado de *Operaciones de transferencia de masa* por Treybal, 1980

1.2.2 Selección de Datos de Equilibrio

Comprender el comportamiento de mezclas que se encuentran en equilibrio, tiene su importancia para una correcta elaboración de diagramas del sistema de separación, estos diagramas sientan las bases para diseños conceptuales, análisis y control de procesos de separación (Chasoy Rojas, 2012). Es común el uso de diagramas de equilibrio que representen la relación de las composiciones del gas y líquido a temperatura y presión fijas. Los datos para elaborar dichos diagramas son obtenidos de forma experimental y se los puede encontrar en diversos libros de ingeniería, o en bases de datos en 3 formas diferentes: Como datos de solubilidad en peso, en porcentaje en moles o como constantes de la Ley de

Henry; en función de las presiones parciales del componente puro; o en forma de coeficientes de distribución de equilibrio (Perry & Green, 2008). El grado de absorción de un gas en cualquier mezcla es determinado por su presión parcial y se tiene tres tipos de gases: uno muy soluble, moderadamente soluble y poco soluble.

Cuando los datos de equilibrio son representados a partir de constantes de Ley de Henry, se debe considerar que la misma es válida solamente para bajas concentraciones o sistemas ideales. La Ecuación 1, responde a la Ley de Henry.

$$y_A = \frac{H_A}{p_{tot}} x_A \quad 1$$

Muchos de los métodos experimentales necesarios para obtener los datos de equilibrio, requieren estrictas condiciones que permitan obtener valores con una elevada precisión, esto resulta costoso en muchos de los casos; para evitar estos elevados costos se emplea programación basada en modelos termodinámicos y ecuaciones de estado (Sandoval Martinez et al., 2020).

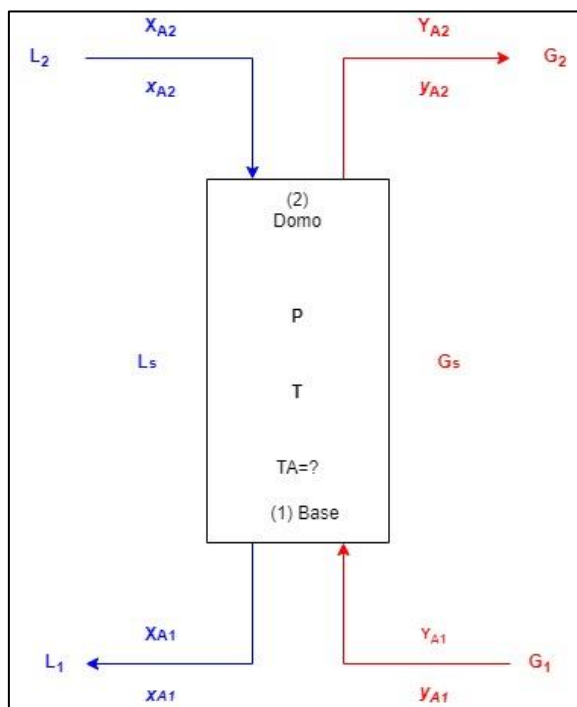
La construcción de curvas que relacionen presión y composiciones en fase líquida-vapor requieren: Determinación de coeficientes de fugacidad obtenidos a partir de ecuaciones de estado como Van der Waals, Readlich Kwong, Readlich Kwong-SOave, Peng Robinson (Finalyson, 2006); y calcular coeficientes de actividad empleando expresiones simples como las ecuaciones de Margules, Van Laar, entre otros. (Castellanos-Suárez & Lozsán, 2019)

1.2.3 Balances de Materia

Los balances de materia permiten conocer la cantidad de gas y líquido necesarios para el proceso de absorción, los cuales a su vez son importantes para poder determinar el diámetro de la columna y conocer la relación que guardan entre las corrientes (McCabe et al., 2007). Para los dos fluidos, la composición va variando continuamente a lo largo del equipo de absorción, en la Figura 3, se muestra un esquema del proceso junto con la nomenclatura empleada para los balances.

Figura 3

Esquema básico de un sistema de absorción a contracorriente



Los balances para cada una de las corrientes se muestran en las siguientes

ecuaciones:

$$L_2 = L_s(1 + X_{A2}) \quad 2$$

$$L_1 = L_s(1 + X_{A1}) \quad 3$$

$$G_2 = G_s(1 + Y_{A2}) \quad 4$$

$$G_1 = G_s(1 + Y_{A1}) \quad 5$$

1.2.3.1 Líneas de operación para el proceso de absorción.

Utilizadas dentro de los diagramas de McCabe-Thiele, con la finalidad de determinar el número de etapas necesarias para conseguir la separación del soluto requerido. En el caso de la absorción, la línea de operación se ubica por encima de la línea de equilibrio ya que la concentración de soluto que se encuentra en el gas es siempre mayor, dando así la fuerza impulsora de la transferencia de masa (Seader et al., 2005)

Para poder obtener una línea de operación recta, es necesario el cumplimiento de los balances de energía y que la relación entre el solvente no volátil y el gas insoluble sea

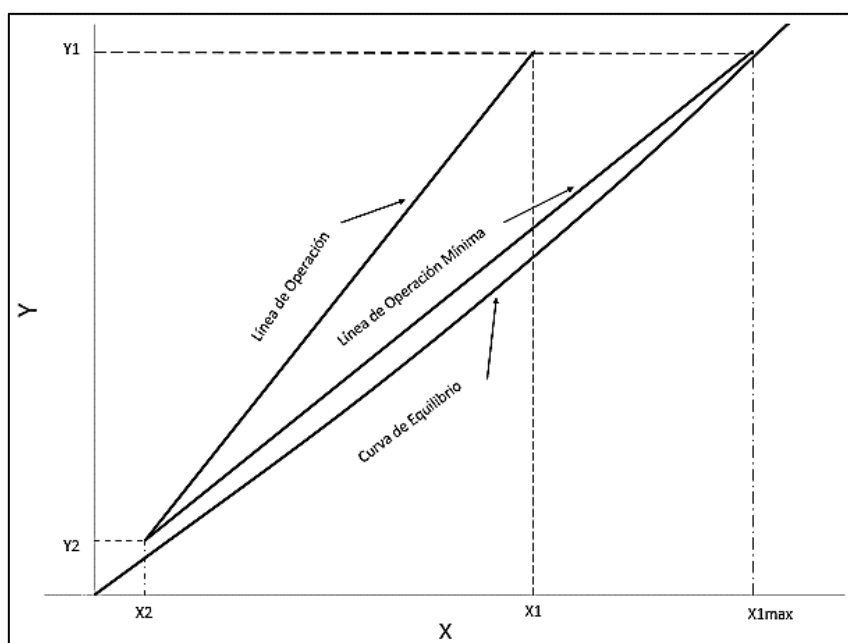
constante; en sistemas diluidos se puede suponer una operación isotérmica y es posible despreciar el calor de absorción (Wankat, 2008).

1.2.3.2 Relación mínima gas-líquido.

En la Figura 4, muestra como la reducción del flujo del líquido, da como resultado una disminución en la pendiente de la línea de operación; cuando esta línea toca la curva de equilibrio, se obtiene la máxima concentración del líquido y la mínima velocidad del mismo; esto significa que es necesaria una altura infinita de la sección empacada. En un caso real, es necesario que la velocidad del líquido supere el valor mínimo para cumplir con su objetivo de cambio en la composición del gas (McCabe et al., 2007).

Figura 4

Líneas de operación para un absorbedor



1.2.3.3 Solución Analítica: Ecuación de Kremser.

Empleada cuando las soluciones son muy diluidas, lo que implica que los flujos de gas y líquido no tiene una variación importante. Se la usa para conocer el número de etapas de equilibrio que necesita el proceso para realizar la separación en base a las composiciones en el fondo y en el equilibrio mediante el uso de la Ecuación 6:

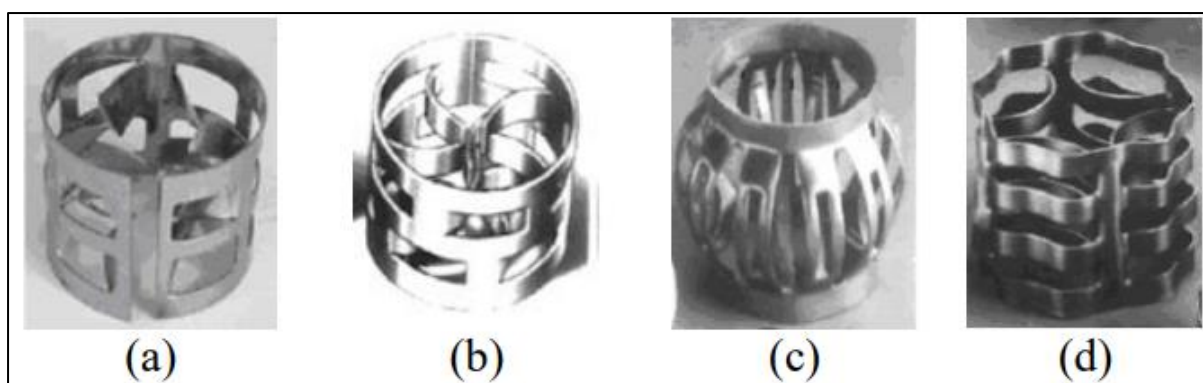
$$N = \frac{\ln [(y_{N+1} - y_{N+1}^*) / (y_1 - y_1^*)]}{\ln [(y_{N+1} - y_1) / (y_{N+1}^* - y_1^*)]} \quad 6$$

1.2.4 Empaque de Relleno

El empaque permite tener una gran área de contacto entre los fluidos, de forma que se favorezca el contacto entre las fases (McCabe et al., 2007). Cuando se diseña una columna empacada, elegir el material de empaque se basa en consideraciones económicas, ya que en el mercado se puede encontrar una amplia gama de empaques, como los aleatorios y estructurales (Wankat, 2008). Por otra parte, al momento de diseñar y optimizar un equipo de absorción, el empaque tiene dependencia sobre la velocidad del proceso y permite determinar diámetro y altura para un adecuado funcionamiento (García & Reyes, 2015). En la Figura 5, se muestran algunos ejemplos de empaques.

Figura 5

Empaques empleados en columnas



Nota. Adaptado de *Design of a packed-bed absorption column considering four packing types and applying matlab* [Fotografía], por Pérez Sánchez, et al., 2016, CAMJOL (<https://doi.org/10.5377/nexo.v29i2.4577>) CC BY-NC-ND 2.0. a) Anillos Metal Hiflow; b) Anillo metálico Pall; c) Metal Top Pak; d) Metal VSP

1.2.5 Caída de presión y diámetro de columna

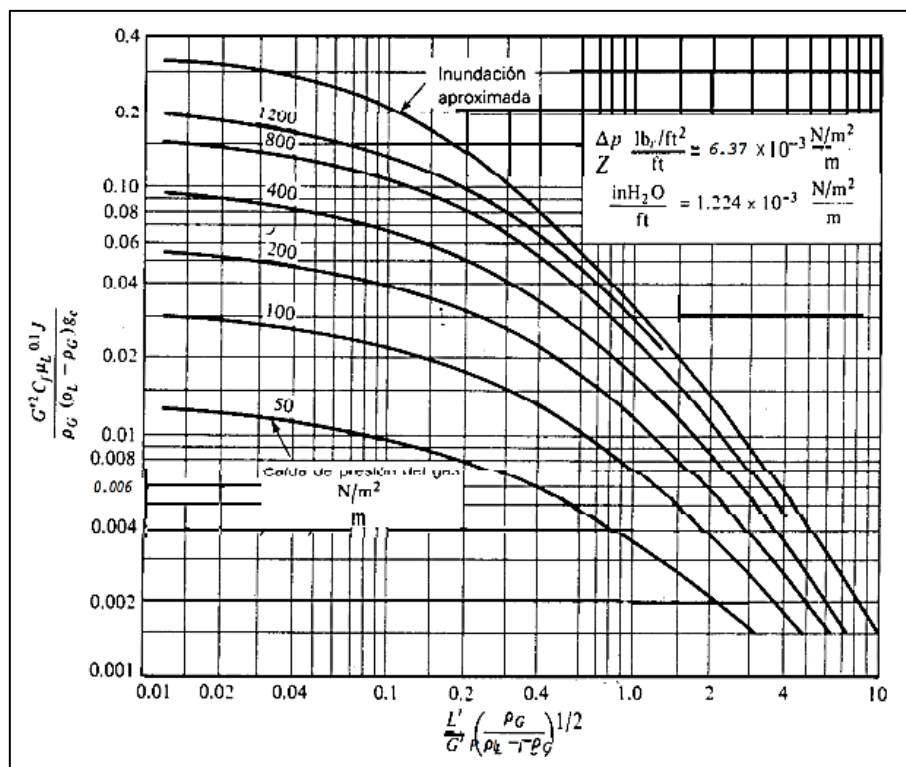
McCabe et al. (2007), describieron: “La caída de presión por unidad de longitud (o profundidad) del empaque se debe a la fricción del fluido” (p. 598). Mientras más se aumenta

la velocidad del gas, la caída de presión aumentará más rápido puesto que el gas impide el paso el flujo del líquido que desciende, esto provoca la inundación de la columna.

Para cálculos de diseño es común suponer que la columna trabaja en un rango de 65 a 90% de inundación (Wankat, 2008) o con una caída de presión que va desde los 200 a 400 Pa (Treybal, 1980). La Figura 6, llamada gráfica de Eckert relaciona flujos máscicos de las corrientes líquida y gaseosa en función de características del empaque de relleno, de esta forma se determina el flujo máscico permitido para que no exista inundación de la columna.

Figura 6

Gráfica de Eckert



Nota. Adaptado de *Operaciones de transferencia de masa* (p. 224) [Gráfica], por Treybal, 1980.

Para el proceso de absorción se tiene que los flujos de líquido y gas son máximos cuando las relaciones molares también lo sean, esto se da en el fondo de la columna, por lo que es recomendable que el diseño se lo realice para la base de la columna (Wankat, 2008).

La caída de presión debe encontrarse entre los rangos previamente descritos, para de esta forma poder obtener el valor de la ordenada usando la abscisa y el parámetro de

caída de presión. El valor de la ordenada será el nuevo valor de velocidad másica en fase gaseosa, con el cual se puede calcular el área y posteriormente el diámetro (Wankat, 2008).

1.2.6 *Altura de la columna*

Una columna empacada se puede analizar de forma similar a una torre de etapas a pesar de que su contacto entre vapor y líquido se da de manera continua, para ello se debe suponer que la sección empacada se la puede dividir en segmentos de igual altura. Tomando en cuenta que al analizarlo de este modo no es exactamente lo que ocurre en la vida real, pero es importante para el diseño de los equipos. Para obtener la altura de la sección empacada, se debe obtener la cantidad de etapas de equilibrio, las cuales se obtienen con el método gráfico de McCabe-Thiele o mediante el método analítico que emplea las ecuaciones de Kremser. Una vez obtenido este valor, la altura se la calcula multiplicando el número de etapas por la altura equivalente a una unidad de transferencia (Wankat, 2008). La Ecuación 7 muestra de forma sencilla esta expresión.

$$Z_T = H_{Oy} N_{Oy} \quad 7$$

1.2.6.1 *Altura de una unidad de transferencia.*

Es la altura de una sección empacada necesaria para poder conseguir el cambio de la concentración que iguale a la fuerza impulsora que existe en dicha sección. Se puede obtener este valor de bibliografía o de ensayos experimentales en plantas piloto. Es común la estimación mediante correlaciones empíricas que relacionan los coeficientes individuales de transferencia de masa (McCabe et al., 2007). Existen cuatro tipos de unidades de transferencia, basados en fuerzas impulsoras individuales y globales. Las siguientes ecuaciones muestran su forma de expresión para fase líquida y gaseosa.

$$H_y = \frac{V/S}{k'_y a} \quad 8$$

$$H_{Oy} = \frac{V/S}{K'_y a} \quad 9$$

$$H_x = \frac{L/S}{k'_x a} \quad 10$$

$$H_{Ox} = \frac{L/S}{K'_{xa}} \quad 11$$

Según Geankoplis et al. (2018) los coeficientes individuales, dependen del número de Schmidt, velocidades de masa en la fase líquida y gaseosa, además de la forma y tamaño de empaque. Relacionar todos estos factores resulta complejo, lo que conlleva a que estas correlaciones sean empíricas en un alto grado. La Ecuación 12 y Ecuación 13 muestran las correlaciones para predecir coeficientes de película de gas y líquido respectivamente

$$H_G = H_y = \left(\frac{0.226}{f_p}\right) \left(\frac{N_{Sc}}{0.660}\right)^{0.5} \left(\frac{G_x}{6.782}\right)^{-0.5} \left(\frac{G_y}{0.678}\right)^{0.35} \quad 12$$

$$H_L = H_x = \left(\frac{0.357}{f_p}\right) \left(\frac{N_{Sc}}{372}\right)^{0.5} \left(\frac{\frac{G_x}{\mu}}{\frac{6.782}{0.8937e^{-3}}}\right)^{0.3} \quad 13$$

Las correlaciones para determinar coeficientes globales de transferencia de masa en función de los coeficientes individuales se muestran en la Ecuación 14 y Ecuación 15.

$$\frac{1}{K'_{ya}} = \frac{1}{k'_{ya}} + \frac{m}{k'_{xa}} \quad 14$$

$$\frac{1}{K'_{xa}} = \frac{1}{k'_{xa}} + \frac{1}{mk'_{ya}} \quad 15$$

1.2.7 Balance de energía

Cuando existe una concentración alta de soluto en la corriente gaseosa, la temperatura puede variar desde la parte superior hasta la inferior de una columna de absorción (Geankoplis et al., 2018), además puede ocurrir en procesos de absorción en los cuales existen reacciones químicas con liberación de calor (Richardson et al., 2002). Como menciona Seader et al. (2005), al existir una variación de temperatura, se invalida la suposición de temperatura constante y genera errores directos en la curva de equilibrio por lo que es necesario el uso de simuladores en aquellos procesos donde es necesario un balance de energía (Geankoplis et al., 2018; Richardson et al., 2002; Seader et al., 2005).

Cuando existen los efectos de calor, se puede suponer que el calor es absorbido por la corriente líquida pero esto significa sobreestimar el temperatura de salida del líquido (Richardson et al., 2002), lo que conlleva a alterar la solubilidad del soluto en equilibrio, se

reduce la capacidad del absorbedor y es necesaria una columna más alta; por otra parte, si la cantidad liberada es demasiado alta es necesario enfriar el líquido usando espirales o el mismo puede ser eliminado por intervalos, enfriado y regresado al absorbedor (Treybal, 1980).

1.3 Aplicación industrial de la absorción gaseosa

Entre las principales aplicaciones de este proceso a nivel industrial, se encuentra la recuperación de componentes valiosos presentes dentro de corrientes gaseosas o a su vez en el tratamiento de efluentes gaseoso con un grado considerable de contaminación (García & Reyes, 2015). Por ejemplo, se puede absorber óxidos de nitrógeno con agua, para formar ácido nítrico; de igual forma en el gas natural se encuentran presentes propanos y butano que puede ser absorbidos mediante este proceso (Albright, 2009).

La contaminación del aire es uno de los principales problemas generado debido a las emisiones de gases nocivos, es por tal motivo que la absorción para estos casos es empleada como un método de control de emisiones (Albright, 2009). Uno de los indicadores de contaminación son los compuestos orgánicos volátiles (COV's) los cuales permiten la formación de amonio y ozono (Mihelcic & Zimmerman, 2011)..

Sawyer (1997, como se citó en en Melo Cruz, 2016), menciona “los COVs como compuestos formados por carbono e hidrógeno, que puede contener otros elementos como oxígeno, cloro, nitrógeno, bromo” (p. 15). Muchos de ellos participan en reacciones fotoquímicas en la atmósfera, y son responsables de la retención de calor en la misma. Su origen puede ser primario o secundario y tiene una gran incidencia en el cambio climático y salud del ser humano (Melo Cruz, 2016). Los COV's son el resultado de las emisiones de residuos municipales, vehículos, disolventes en industrias químicas y alimentarias. Algunos ejemplos de estos compuestos son: isopreno, pineno, clorobenceno, xileno, acetona (Villacres Manzano, 2015).

1.3.1 Control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV's)

Mihelcic & Zimmerman (2011), describen distintas tecnologías para el control de emisiones gaseosas, una de ellas es el uso de torres de absorción, en las cuales el contaminante gaseoso se trasfiere a un líquido absorbente, su uso común es para eliminación de COV's y SO₂.

Dentro de estos compuestos se incluye la acetona, usada en el medio doméstico como removedor de esmalte o en el ámbito industrial como reactivo para los procesos productivos de metil-metacrilato y bisfenol (Pérez García, 2013); es importante mencionar que según lo descrito por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO] (s.f) la acetona se clasifica según su peligrosidad, como un compuesto clase B, debido a que tiene un menor impacto ambiental. (Bósquez & Yumi, 2012; Pérez García, 2013; MITECO, s.f.)

1.4 Estudios relacionados con la absorción gaseosa

La absorción gaseosa, ha llamado mucho la atención al ser considerada como una alternativa ecológica, con un bajo consumo energético necesario para su aplicación (Bósquez & Yumi, 2012), en vista de ello muchos trabajos se han centrado en el estudio de esta operación unitaria, como método de control de contaminación (Díaz Molina et al., 2018) de SO₂ en gases de combustión (Bósquez & Yumi, 2012) o bien llamada desulfuración (Rueda Maíllo, 2018), de igual forma como menciona Rahbar & Kaghazchi (2005) su aplicación se puede dar en la absorción de COV's del aire (Bósquez & Yumi, 2012; Díaz Molina et al., 2018; Rahbar & Kaghazchi, 2005; Rueda Maíllo, 2018).

Por otra parte autores como Pérez Sánchez et al. (2016), basan sus estudios de absorción en análisis comparativos entre empaques aleatorios, con la finalidad de seleccionar el más idóneo y así mejorar la transferencia de materia. Barrios et al.(2011) centran sus investigaciones en el comportamiento y control de columnas empacadas, empleando para ello simuladores y así validar procesos de separación de CO₂ del aire, usando agua. Existen estudios dentro de los laboratorios de la Universidad de Milán, los cuales comparan datos experimentales con aquellos obtenidos mediante software de simulación (Pirola, 2019), de

este modo se garantiza que los estudiantes pueden integrar sus conocimiento teóricos con aquellos prácticos, e incrementan el interés de los estudiantes por el uso de simuladores.

1.4.1 Diseños de columnas de absorción para laboratorio

García & Reyes (2015), proponen el diseño, construcción y puesta en marcha de una columna empacada para la absorción de CO₂ del aire, empleando como solvente NaOH, un sistema de absorción química debido a la reacción producida entre los fluidos participantes; este proyecto se llevó a cabo dentro de las instalaciones de la Escuela Politécnica de Litoral (ESPOL) como contribución con los estudiantes y dotación de nuevos equipos a la institución. El cuerpo de la columna ha sido elaborado en acrílico, con altura de relleno de 1m plásticos de Anillos Rasching ½"; diámetro de 20 cm y una altura total de la columna de 1.87 m. Para la determinación de concentraciones se emplean métodos basados en determinación de pH y titulación de muestras.

El diseño desarrollado por Bósquez & Yumi (2012), busca la purificación de una corriente gaseosa contaminada con SO₂ empleando como solvente agua, este trabajo se localiza en las instalaciones de la Escuela Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). El material del cuerpo es acero AISI 304, y el relleno corresponde a picos de botella de 1", la altura del empaque es de 1.31 m y cuenta con un diámetro de 30 cm.

La mayoría de los sistemas diseñados tiene aplicación industrial y al realizarlo en pequeña escala, contribuye con la formación de los estudiantes, puesto que así se unifican sus conocimientos prácticos, teóricos y fortalecen su formación profesional al vivir de cerca la operación de los equipos.

1.4.2 Equipos didácticos comerciales para absorción gaseosa

Para poder demostrar y analizar el principio de absorción gaseosa, es necesario emplear equipos didácticos los cuales permitan realizar experimentaciones usando diferentes mezclas (Scitech-Didactic, 2018). En la Tabla 2 se muestra de forma resumida las especificaciones de diferentes equipos didácticos.

Tabla 2*Resumen de especificaciones en columnas didácticas*

| Especificaciones columnas didácticas | | |
|---|-----------------------|--|
| Parámetro | Didacta | Scitech |
| Material | Vidrio borosilicato | Acrílico transparente |
| Relleno | Anillos Rasching 8 mm | Anillos Rasching 10 mm |
| Altura total | 1.6 m | Total: 1.4 m |
| Diámetro | 8 cm | 7.5 cm |
| Sistema gaseoso | No especificado | CO2-Aire SO2-Aire H2S-Aire NH3-Aire NOx-Aire |
| Sistema líquido | Flujo de agua | Flujo de agua |

Nota. Adaptado de Didacta (s.f) & Scitech-Didactic (2018)

A diferencia de los equipos diseñados por estudiantes, los que se denominan didácticos tienen incorporado un software que permite el control de equipo, en el caso de que existan parámetros que no se encuentren dentro del rango para que puedan operar (Didacta, s.f); además que la determinación de concentraciones es mediante analizadores digitales, agilizando el funcionamiento de los equipos.

Capítulo dos

Diseño metodológico

2.1 Dimensionamiento de la columna de absorción

Para el presente trabajo, se buscó diseñar y construir un equipo para el desarrollo de prácticas de laboratorio que permitan explicar los fenómenos de transferencia de materia y de este modo se pueda complementar los conocimientos teóricos con los prácticos.

Como punto de partida, se contó con un cuerpo cilíndrico de dimensiones determinadas, el cual se empleó como cuerpo de la columna a diseñar. La Figura 7 y Tabla 3 muestran las especificaciones del mismo.

Figura 7

Representación gráfica del cuerpo disponible para el diseño de columna de absorción

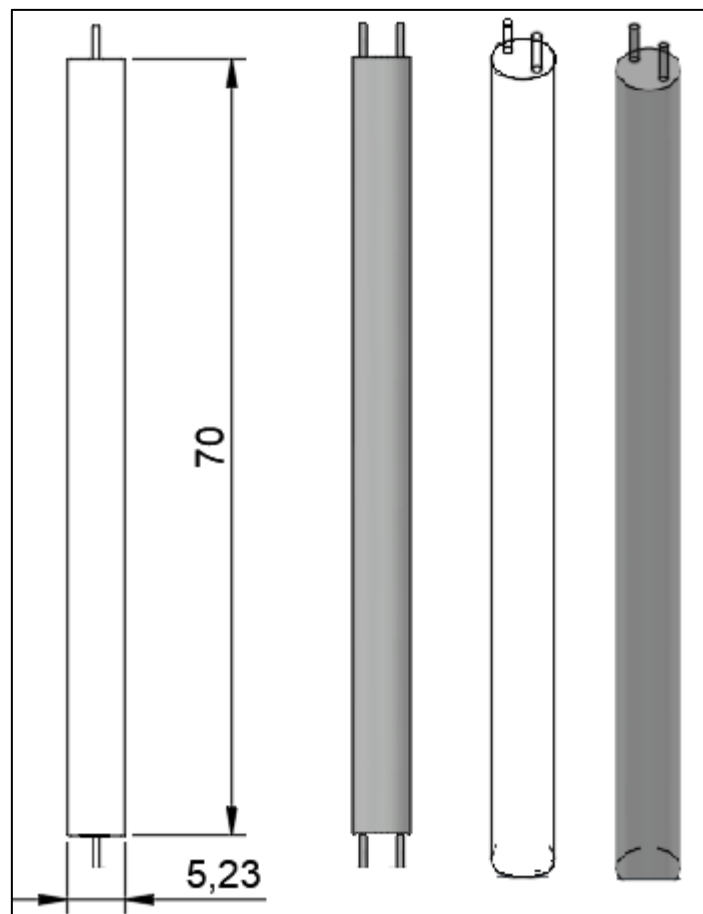


Tabla 3*Características del cuerpo de la columna*

| Especificaciones | |
|-------------------------|------------------------|
| Material | Acero inoxidable 304 |
| Diámetro | 5.23 cm |
| Altura | 70 cm |
| Entradas para fluidos | Conexión a manguera ¼" |

2.1.1 Propuesta del sistema de absorción

La selección del sistema de absorción, se realizó a partir de la búsqueda bibliográfica de aplicaciones que tiene el proceso de absorción; para este caso se optó por emplear una mezcla acetona-aire para la corriente gaseosa, la elección del soluto se justifica según lo mencionado en el Marco Teórico, apartado 1.3 Aplicación industrial de la absorción gaseosa; donde se señala que esta operación es empleada en procesos de purificación de corrientes gaseosas, por ejemplo para el control de emisiones por COV's, de la cual la acetona forma parte (Bósquez & Yumi, 2012); además en el ámbito comercial, la recuperación de acetona es un ejemplo de absorción física (Albright, 2009).

Otro punto importante para el sistema de absorción es contar con un solvente apropiado, el cual se escogió en función de las consideraciones de la Tabla 1, con ello la corriente líquida estará conformada por agua pura, la cual según Treybal (1980) cuenta con propiedades adecuadas para ser considerada como solvente universal.

Dentro del diseño es necesario conocer las composiciones de las corrientes a tratar, para ello se consideraron los efectos a la salud que provoca la exposición a la acetona, la cual resulta peligrosa cuando se está expuesto a altas concentraciones por un tiempo prolongado (Pérez García, 2013); además los límites máximos de exposición laboral, cuentan con los valores de TLV:250 ppm; TWA: 500 ppm, respectivamente (ICSC: 0087-Acetona, 2018). Por ello, se optó por emplear mezclas diluidas para las corrientes.

Considerando lo antes mencionado, el uso de este sistema de absorción dentro del módulo didáctico es óptimo ya que se cuenta con una operación con aplicación industrial; lo cual favorece el aprendizaje de los estudiantes, ya que en su formación estudian los diferentes fenómenos de transporte y dimensionamiento de equipos (Ovejero et al., 2007)

En la Tabla 4, se muestra de forma detallada la propuesta del sistema de absorción, considerando las corrientes y las especificaciones para la corriente gaseosa.

Tabla 4

Propuesta inicial del sistema de absorción

| Especificación | Parámetro | |
|------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| Sistema de estudio | Corriente gaseosa: | Mezcla acetona-aire |
| | Corriente líquida: | Agua pura |
| Condiciones de Operación | Presión: | 1 atm |
| | Temperatura: | 25 °C |
| Corriente gaseosa de entrada | Base de cálculo inicial-Caudal | 30 kmol/h |
| | Composición %Mol | Acetona: 1% |
| | | Aire 99% |
| | | Agua 0% |

2.1.2 Consideraciones de diseño

Como se observa en la Tabla 5, el objetivo se centró en diseñar un equipo, el cual permita obtener una recuperación del 90% de acetona en la corriente de líquido; para lograrlo fue necesario realizar un ajuste de parámetros de forma que se obtengan valores óptimos que permitan trabajar con el cuerpo de la columna ya disponible; el ajuste y los cálculos relacionados con el dimensionamiento de los elementos que conforman el módulo, fueron realizados en hojas de cálculo del software Microsoft Excel, programa que cuenta con la herramienta Excel Solver, que permite encontrar una solución óptima de modelos determinados (Hillier & Lieberman, 2010); además los diagramas y esquemas fueron realizados empleando el software AutoCAD 2021.

Ion et al. (2014) mencionan que para el diseño de equipos se debe considerar un trabajo en estado estacionario y demás simplificaciones como:

- Transferencia de la especie del gas a la fase líquida.

- Vaporización del absorbente insignificante (caudal del líquido inerte constante).
- Solubilidad insignificante del gas en el líquido (caudal del gas inerte constante).
- Relaciones lineales de equilibrio en la interfase (Ley de Henry), sistema diluido (Wankat, 2008).
- Condiciones isotérmicas e isobáricas (Ion et al., 2014).

En la Tabla 5 se presenta un resumen de las consideraciones basadas de referencias bibliográficas para el diseño de columnas de absorción.

Tabla 5

Consideraciones de diseño propuestas para sistema de absorción

| Consideraciones de diseño | |
|----------------------------------|----------------|
| Caída de presión | 400 Pa |
| Porcentaje de Recuperación | 90% de acetona |
| Flujo de solvente | 50% el mínimo |
| Altura de empaque* | 60 cm* |

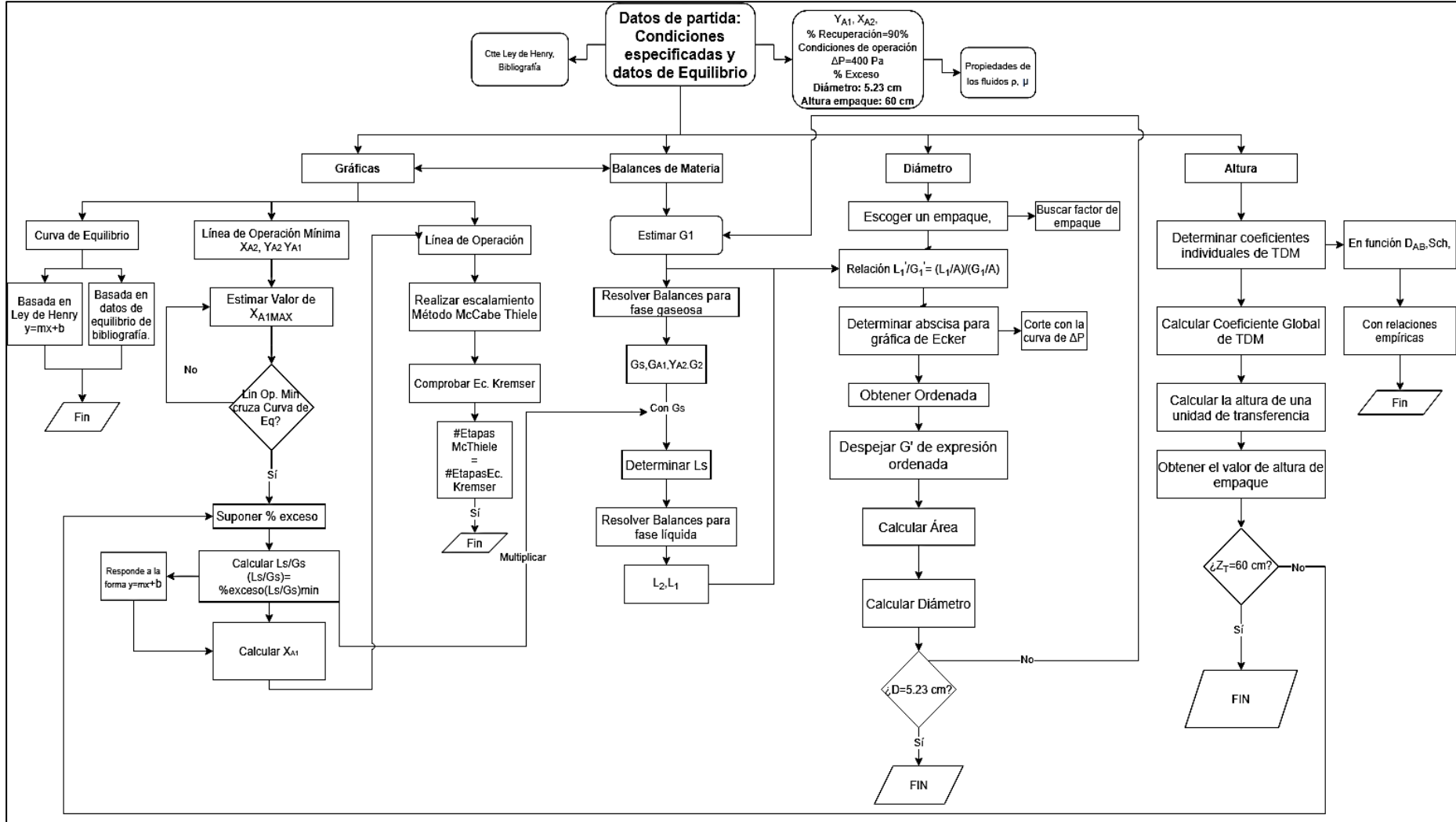
Nota. * El valor ha sido propuesto por la autora.

De forma resumida, el algoritmo de cálculo de la Figura 8 muestra el proceso empleado para el diseño del equipo; se debe mencionar que el mismo fue elaborado con diferentes metodologías de diseño encontradas dentro de bibliografía y agregando los pasos realizados para cumplir con el dimensionamiento ya especificado. Para este caso, los pasos a seguir para los balances de materia y las gráficas de líneas de operación fueron tomados de la metodología empleada por Geankoplis et al. (2018); con los balances de materia obtenidos, se procedió con la determinación del diámetro, usando para ello el método descrito por Treybal (1980); aquí se realizó la primera iteración, con la cual se busca cumplir con la especificación de diámetro dado.

Para la altura de empaque, se empleó el cálculo de los coeficientes individuales de transferencia de masa, mediante relaciones empíricas, el método en el cual se basa dicha parte fue el descrito por Geankoplis et al. (2018). Realizando este proceso se buscó obtener como resultado el valor de altura de empaque definido en la propuesta de diseño.

Figura 8

Algoritmo de cálculo para una columna de absorción empacada con diámetro de columna y altura de empaque especificados.



En el Apéndice 1 se muestra el diagrama de flujo del sistema de absorción y el Apéndice 2 las propiedades de los componentes del sistema a las condiciones de operación propuestas.

2.1.3 Balance de Materia

Considerando el algoritmo de la Figura 8, los primeros pasos de izquierda a derecha corresponden a los balances de materia y graficas de líneas de operación, en primer lugar se tomó una base de cálculo inicial (Tabla 4) para el flujo de mezcla gaseosa a la entrada del sistema, y con la ayuda de la Figura 3, se obtuvo las ecuaciones necesarias para los balances de materia en cada una de las corrientes que forman parte del proceso. De forma general el balance responde a la Ecuación 16.

$$T_A = Ls(X_{A1} - X_{A2}) = Gs(Y_{A1} - Y_{A2}) \quad 16$$

Para este caso los datos conocidos fueron: la composición de la acetona a la entrada del gas (Tabla 4) y el porcentaje transferido (Tabla 5), los cuales permitieron calcular la composición de la acetona en la corriente gaseosa de salida, mediante la Ecuación 17.

$$Y_{A2} = (1 - \%TA)Y_{A1} \quad 17$$

A lo referente a datos de equilibrios usados para este trabajo, se optó por usar aquellos basados en la Ley de Henry dado que el sistema propuesto corresponde a una mezcla diluida (Wankat, 2008). El agua, usada como solvente, es pura por lo tanto su concentración de acetona es cero.

Al trabajar con condiciones límite, se obtuvo el flujo de agua mínimo para que ocurra la separación planteada y la composición máxima de acetona que puede recuperar esta corriente, es necesario aumentar el flujo de líquido como lo menciona McCabe et al. (2007), quienes indican que para el diseño de absorbedores se debe trabajar con un 50% de exceso del flujo mínimo. Para completar el balance de materia, se empleó la Ecuación 18, usada para la determinación de la composición de acetona en la corriente de salida del agua una vez calculado el nuevo flujo de líquido.

$$L_S(X_{A1} - X_{A2}) = L_{Smin}(X_{A1MAX} - X_{A2}) = TA \quad 18$$

Al conocer las composiciones de cada entrada y salida que participan en el proceso, se obtuvo la línea de operación con la cual se realizó un escalamiento mediante el método gráfico de McCabe-Thiele; así se conoció el número de etapas de equilibrio necesarias para que se produzca la separación (Geankoplis et al., 2018). Por otra parte, mediante la solución analítica de Kremser (Wankat, 2008), presentada en la Ecuación 6, fue posible corroborar el valor del método gráfico. En el Apéndice 3 y Apéndice 4, se muestran los cálculos a detalle y el diagrama del escalamiento respectivo.

2.1.4 Balance de Energía

El sistema propuesto corresponde a un sistema de mezcla gaseosa y líquido diluidos, por la misma razón se pudo suponer una operación isotérmica; el balance energético no se considera ya que no cuenta con influencia directa para el diseño de la columna. Un método de diseño simplificado que considera los efectos de calor en un sistema de absorción fue descrito por Geankoplis et al.(2018): El método toma en cuenta el calor de solución del soluto y calcula la temperatura del líquido a la salida mediante un balance total de entalpía, el cual incluye calor sensible para las temperaturas de gas a la entrada y salida; calor de solución del soluto; calor de vaporización del solvente; calor sensible para entrada y temperatura desconocida del líquido a la salida. De manera general el balance para una columna sigue la forma presentada en la Ecuación 19:

$$L_2H_{L2} + G_1H_{G1} = L_1H_{L1} + G_2H_{G2} + Q_T \quad 19$$

Dónde H representa la entalpía molal de la corriente a condiciones particulares, se debe emplear una temperatura base para para obtener las entalpías.

2.1.5 Determinación del Diámetro

Continuando con el algoritmo de la Figura 8, luego de realizados los balances de materia se procedió a determinar el diámetro de la columna, esto según Treybal (1980) se realiza en la base (fondo) de la misma puesto que ahí se encuentra la mayor composición de

acetona y por ende los mayores valores de flujo para líquido y gas; como primer paso se tiene escoger un empaque para este caso se optó por Anillos Rasching Metálicos, de 6 mm de diámetro, con factor de empaque igual a 700 (Treybal, 1980); para la elección del empaque se consideró el diámetro del cuerpo de la columna, ya que como mencionan Geankoplis et al.(2018) para empaques aleatorios la relación entre el diámetro de la columna y el tamaño del empaque debe ser de 10/1 o mayor (p. 973); otros puntos considerados fueron la posibilidad de adquisición del elemento dentro del mercado y su posible sustitución con material económico y/o artesanal.

Se empleó la Figura 6 y se consideró la caída de presión presentada en la Tabla 5 la cual se usa por efectos de diseño, el valor de la abscisa y el cruce con la línea de caída de presión permitió obtener el valor de la ordenada, el cual se igualó a la expresión que se encuentra en la misma gráfica. Con ello, se despejó de la expresión un nuevo valor de la velocidad másica del gas, esto se observa en la Ecuación 20, el valor se encuentra en función del empaque escogido y de propiedades de los fluidos como viscosidad y densidad.

$$G' = \sqrt{\frac{\text{Ordenada} * \rho_G * (\rho_L - \rho_G) * g_c}{C_f * \mu_L^{0.1} * J}} \quad 20$$

Las unidades de la nueva velocidad másica son Kg/m².s, con ayuda de la Ecuación 21 se obtuvo el valor del área transversal y con las dimensiones del cuerpo cilíndrico se calculó el diámetro con la Ecuación 22. Los cálculos detallados se presentan en el Apéndice 5

$$A_t = \frac{G_{1t}}{G'} \quad 21$$

$$D = \sqrt{\frac{4A_t}{\pi}} \quad 22$$

El valor que se calculó fue en función de la base de cálculo seleccionada como punto de partida, fue necesario realizar la corrección de la misma de forma que se pueda obtener el diámetro de la columna ya formada, el cual tiene un valor de 5.23 cm. Esto se realizó

mediante la herramienta Solver, presente en la hoja de cálculo empleada para este diseño. La aplicación se muestra en el Apéndice 6.

2.1.6 Determinación de coeficientes de transferencia de materia

Al partir de los datos conocidos de altura de empaque y número de unidades de transferencia, se procedió a realizar cálculos a la inversa para obtener el valor de altura de una unidad de transferencia con la Ecuación 7. A la vez que se obtenía el valor del coeficiente global de transferencia de materia en fase gaseosa con la Ecuación 9.

En función de lo descrito en el algoritmo de la Figura 8; al no contar con valores de coeficientes individuales, se emplearon relaciones empíricas como las presentadas en la Ecuación 12 y Ecuación 13 para su determinación. Estos valores usados en la Ecuación 14, permitieron obtener un nuevo valor del coeficiente global de transferencia de materia, el cual se usó para calcular la altura del empaque. El cálculo detallado para la determinación de coeficientes, en función de altura de empaque y con correlaciones empíricas se presentan en el Apéndice 7. Al igual que para el flujo de gas a la entrada, se requiere un ajuste para obtener la altura óptima de acuerdo al cuerpo ya elaborado, por lo tanto este ajuste se realizó modificando el porcentaje de exceso del flujo mínimo.

2.2 Dimensionamiento de auxiliares

Con los valores de flujos de las corrientes de líquido y gas que entran al proceso, obtenidos a partir del balance de materia; se calculó la potencia de bomba y compresor con ello se escogieron los equipos que mejor se ajusten a estos requerimientos, buscando la economía del proceso. Para la determinación de cada potencia se buscó, mediante revisión bibliográfica, metodologías acordes a cada equipo y con ello se elaboró algoritmos que permitan simplificar la explicación teórica de los cálculos.

2.2.1 Determinación de potencia de bomba

En función del flujo volumétrico del agua en la entrada y con propiedades a temperatura y presión de operación. La propuesta del sistema se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6*Propuesta de diseño para sistema de bombeo*

| Datos | Especificación | Valor |
|-------------------|------------------------|--------------------|
| Tubería | Material | Acero cédula 40 |
| | Tamaño nominal | ¼ " |
| | Diámetro interior real | 0.364 pulg→0.009 m |
| | Longitud | 2 m |
| Datos del sistema | Z1 | 0 m |
| | Z2 | 1.5 m |
| | P1 | 1 atm |
| | P2 | 1.5 atm |

De esta forma, con la Ecuación 23 y Ecuación 24, se calculó el área y la velocidad de flujo a través de la tubería.

$$A_c = \frac{\pi D^2}{4} \quad 23$$

$$V = \frac{Q_{L2}}{A_c} \quad 24$$

Con el valor de velocidad se procedió a calcular el número de Reynolds (Ecuación 25) para obtener el factor de fricción de Darcy, calculado con la Ecuación 26.

$$Re = \frac{\rho_{L2} * V * D}{\mu_{L2}} \quad 25$$

$$f = \frac{64}{Re} \quad 26$$

Se consideraron pérdidas menores por tuberías y accesorios, las cuales se encuentran en función de la longitud, diámetro de la tubería y diámetros equivalentes de los accesorios, estos últimos fueron obtenidos de bibliografía. La Tabla 7, muestra los valores consultados para el sistema de bombeo propuesto.

Tabla 7

Accesorios empleados para el diseño del sistema de bombeo

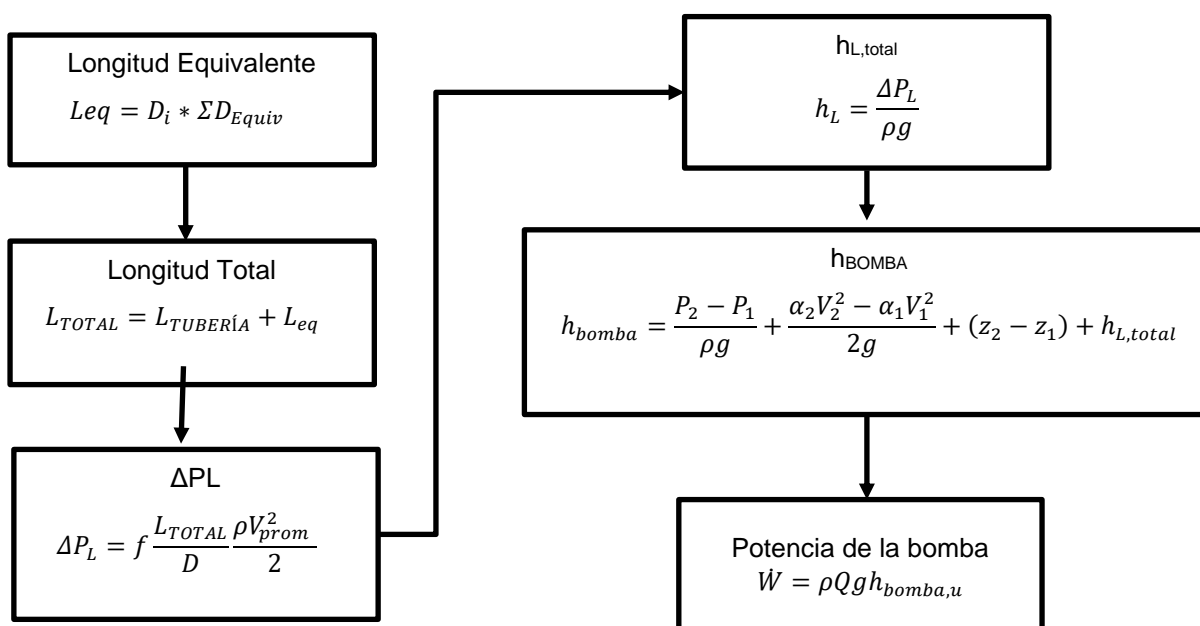
| Accesorio | Número | K | Diámetro Equivalente |
|-------------------|--------|-----|----------------------|
| Codo estándar 90° | 2 | 1.6 | 80 |
| Válvula | 1 | 6 | 300 |
| Estrechamiento | | 0.5 | 25 |
| Ensanchamiento | | 1 | 50 |
| TOTAL | | 9.1 | 455 |

Nota. Adaptado de *Coulson & Richardson's chemical engineering* (p.204) por Sinnott et al., 2005

En la Figura 9 se presenta el algoritmo empleado para calcular la potencia de bombeo necesaria para el flujo de agua de alimentación

Figura 9

Algoritmo de cálculo para potencia de bomba



Nota. Adaptado de *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*, por Çengel & Cimbala, 2010

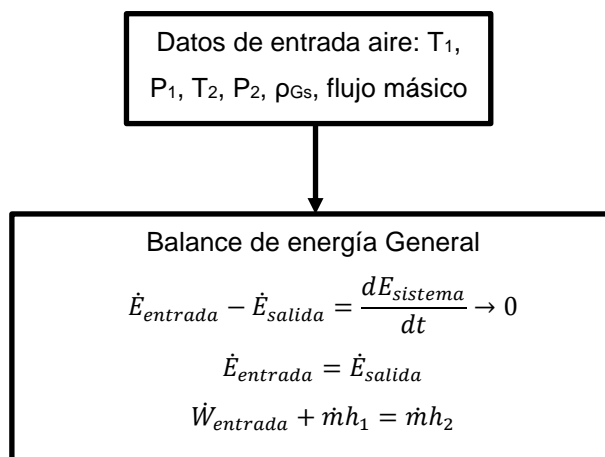
2.2.2 Determinación de potencia de compresor

Se tomó como datos referenciales condiciones de presión y temperatura del aire ambiental, el compresor eleva la temperatura del aire a las condiciones de operación de la

columna. Se considera un proceso adiabático, la **Figura 10** muestra el algoritmo usado y el **Apéndice 8** la aplicación a detalle del mismo.

Figura 10

Algoritmo de cálculo para potencia de compresor



Nota. Adaptado de *Termodinámica* por Çengel & Boles, 2011

2.3 Características de montaje

En base a los cálculos realizados, se buscaron los insumos que mejor se ajusten a los requerimientos propuestos y a la vez que se encuentren disponibles en el mercado. Se escogió la opción más factible, de modo que el montaje de equipo resulte económico.

El área que se destinó para la columna se encuentra ubicada dentro de las instalaciones de la Universidad Técnica Particular de Loja, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, en el cual se encuentran varios de los equipos que permiten el estudio de esta rama de la ingeniería. además aquí se provee de los suministros de energía eléctrica y agua requeridos para el funcionamiento del equipo.

Capítulo tres

Resultados y Discusión

3.1 Diseño de la columna de absorción

En base a las consideraciones planteadas, se procedió a realizar variaciones en los parámetros de operación para así realizar una comparativa entre los resultados, esto con la finalidad de poder observar la influencia que tienen en los parámetros de diseño, buscando mantener las dimensiones del cuerpo ya elaborado (Ver sección 2.1). La Tabla 8, muestra de forma resumida las variaciones realizadas.

Tabla 8

Parámetros de operación

| Parámetros | Propuesta inicial* | Primera Variación | Segunda variación |
|------------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| y_{A1} | 1% | 1% | 15% |
| % Recuperación | 90% | 90% | 90% |
| % Exceso | 50% | 300% | 50% |
| ΔP | 400 Pa | 400 Pa | 400 Pa |

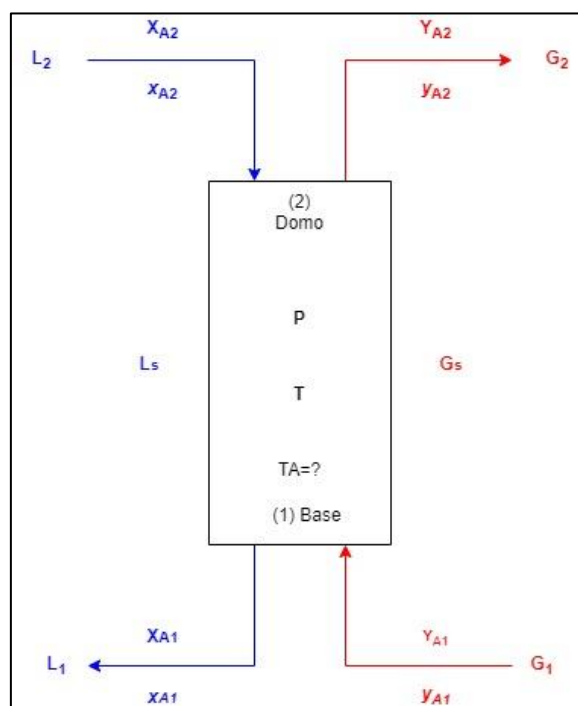
De acuerdo con lo escrito por Geankoplis et al. (2018) un proceso general de absorción, fija el flujo de gas de entrada y su composición. Las demás variables son determinadas por el diseñador mediante balances de materia; el flujo de líquido a la entrada se puede escoger de manera libre; dado que el sistema propuesto está destinado a la enseñanza didáctica de la operación, es posible modificar los valores de entrada del gas, con la finalidad de observar la operación desde diversos puntos.

3.1.1 Balances de Materia

La Figura 11, muestra las corrientes de entrada y salida consideradas dentro del balance de materia así como la nomenclatura empleada.

Figura 11

Diagrama de flujo para la unidad de absorción



Por otra parte la Tabla 9 y Tabla 10, contienen los resultados de composición y flujos de corrientes, una vez realizados los ajustes para obtener las dimensiones del cuerpo de la columna.

Tabla 9

Resultados de composiciones de corrientes con variaciones

| Corriente | Composiciones | Unidades | Propuesta inicial | Primera variación | Segunda Variación |
|-----------|---------------|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Gaseosa | Y_{A1} | kmol A/kmol Gas | 0,0100 | 0,0100 | 0,1500 |
| | Y_{A2} | | 0,0010 | 0,0010 | 0,0173 |
| | Y_{A1} | kmol A/kmol Gs | 0,0101 | 0,0101 | 0,1765 |
| | Y_{A2} | | 0,0010 | 0,0010 | 0,0176 |
| Líquida | X_{A1} | kmol A/kmol Liq | 0,0031 | 0,0012 | 0,0473 |
| | X_{A2} | | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | X_{A1} | kmol A/kmol Ls | 0,0031 | 0,0012 | 0,0496 |
| | X_{A2} | | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

Tabla 10*Resultados de flujos de corrientes con variaciones*

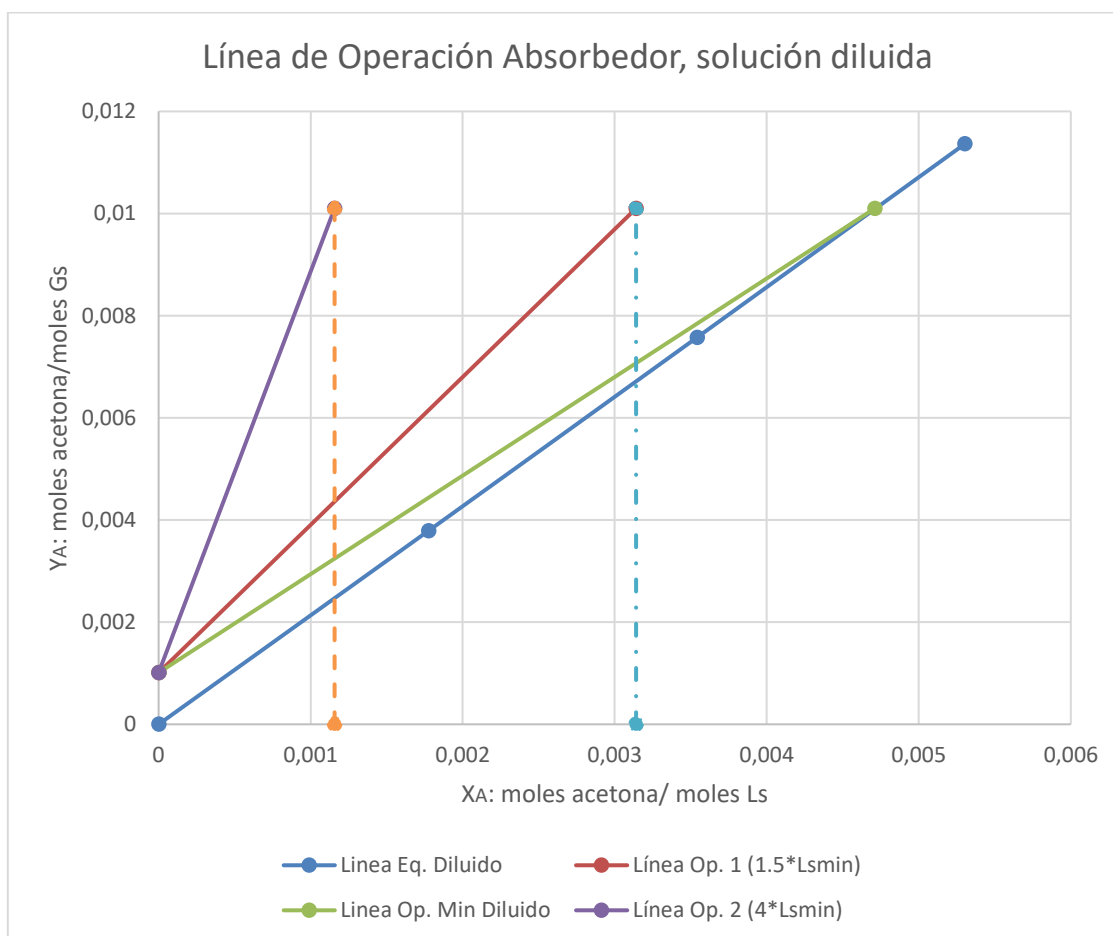
| Corriente | Unidades | Propuesta inicial | Primera variación | Segunda Variación |
|------------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| G1 | kmol Gas/h | 0.1384 | 0.1200 | 0.1275 |
| G2 | | 0.1372 | 0.1189 | 0.1103 |
| L1 | kmol Líquido/h | 0.3980 | 0.9358 | 0.3640 |
| L2 | | 0.3967 | 0.9347 | 0.3468 |

Los resultados de composiciones mostrados en la Tabla 9, evidencian que en las tres variaciones el soluto (acetona) contenido en la corriente de gas rico, disminuye al llegar al domo de la columna; por el contrario, la corriente líquida de agua se enriquece de acetona al descender a lo largo de la columna (McCabe et al., 2007). A la vez los valores de corrientes presentados en la Tabla 10, tienen los valores más altos en la base de columna, puesto que ahí se encuentra la mayor concentración del soluto, confirmando así que el balance de materia realizado es correcto para el diseño. De forma experimental estos resultados se puede corroborar con la metodología descrita en el Apéndice 9.

La Figura 12 y Figura 13 muestran de forma gráfica como el cambio en el valor de la corriente de líquido, influye en la pendiente de la línea de operación del proceso. Los valores de la línea de equilibrio se muestran en el apéndice

Figura 12

Líneas de operación para un absorbedor, propuesta inicial y primera variación



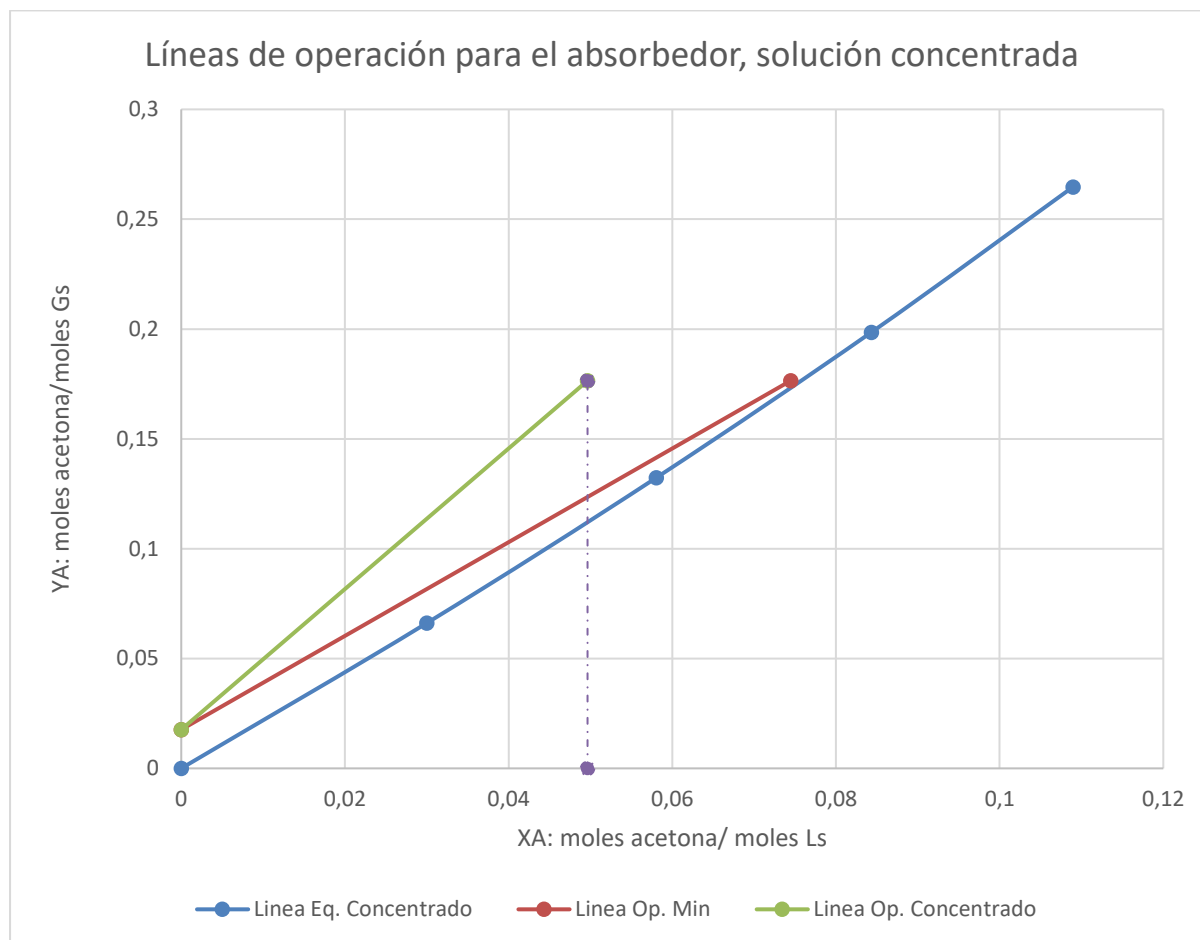
Según lo escrito por McCabe et al.(2007) la línea de operación mínima muestra la máxima concentración de líquido y el mínimo valor del flujo de líquido, en una columna real, el flujo de líquido tiene que ser mayor que el mínimo para conseguir el cambio en la composición del gas. Para la propuesta inicial del diseño se tomó como aproximación un valor de 1.5 veces el flujo mínimo así como menciona Seader et al. (2005).

En la Figura 12, la línea de operación 1 (1.5 veces el mínimo) muestra que al trabajar con menos flujo de líquido se obtiene una composición de acetona mayor en la corriente de salida, esto según Treybal (1980) hace que las fuerzas motrices para la difusión sean menores y la absorción es más difícil. Por otra parte, la línea de operación 2 (4 veces el mínimo), se aleja más del equilibrio, esto implica dos aspectos: un mayor gasto de líquido y

una solución líquida más diluida; esto último se consideraría un costo elevado para recuperar el soluto mediante procesos de desorción posteriores (Geankoplis et al., 2018).

Figura 13

Líneas de operación absorbedor segunda variación



La Figura 13, muestra la segunda variación en la cual se aumentó la concentración de acetona en la corriente gaseosa, se observó que los datos de equilibrio basados en la Ley de Henry solamente se aplican para las soluciones diluidas como se menciona en Wankat (2008). Además el uso de la ecuación analítica de Kremser para determinar el número de etapas de equilibrio ya no se emplea, pues según lo mencionado por Geankoplis et al. (2018) es necesario que la línea de equilibrio y la línea de operación se encuentren de forma línea recta, sin curvaturas, lo cual no sucede al aumentar a 15% mol la concentración de acetona en la corriente gaseosa.

3.1.2 Determinación de parámetros de diseño para la columna de absorción

Los parámetros de diseño con las diferentes variaciones se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11

Parámetros de diseño con variaciones

| Parámetro | Unidades | Propuesta inicial | Primera variación | Segunda variación |
|------------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|
| D | cm | 5,2300 | 5,2300 | 5,2300 |
| At | m ² | 0,0021 | 0,0021 | 0,0021 |
| N _{OY} | -- | 4,0000 | 2,0000 | 3,0000 |
| H _{OY} | m | 0,6571 | 0,3893 | 0,6660 |
| Z _T | m | 2,6038 | 0,6000 | 2,1977 |
| k' _{ya} | $\frac{\text{kmol}}{\text{s. m}^3 \text{frac. mol}}$ | 0,0340 | 0,0475 | 0,0309 |
| k' _{xa} | $\frac{\text{kmol}}{\text{s. m}^3 \text{frac. mol}}$ | 0,2905 | 0,5292 | 0,2654 |
| K' _{ya} | $\frac{\text{kmol}}{\text{s. m}^3 \text{frac. mol}}$ | 0,0272 | 0,0399 | 0,0248 |

Según lo escrito por Geankoplis et al. (2018), en la absorción de acetona del aire en agua, en la fase gaseosa ocurre la mayor resistencia a la transferencia de masa y por ello se emplea la número de unidades de transferencia en base a la fase gaseosa N_{OG}, de ahí que los resultados se muestran en función de este valor.

Al comparar los resultados obtenidos, aquellos en los cuales se trabajó con 1.5 veces el flujo mínimo de agua, tienen un valor de altura de empaque más alta y un flujo menor de agua (Geankoplis et al.,2018).

Los resultados para la primera variación, en la cual se trabaja con 4 veces el flujo mínimo muestran que al aumentar la pendiente de la línea de operación, incrementa la fuerza impulsora en toda la columna menos en la parte superior lo cual provoca que la columna no sea tan alta (McCabe et al., 2007). Usando este criterio, se justifica la variación del flujo de agua en el sistema de absorción propuesto. Por otra parte se observa que con estas modificaciones se obtienen los valores de altura y diámetro acordes al cuerpo con el que se cuenta.

3.2 Montaje de columna

Para el montaje de la columna fue necesario el cálculo de potencia de bomba y compresor empleados dentro del sistema, los resultados se muestran en la **Tabla 12**

Tabla 12

Requerimientos elementos auxiliares

| Potencia | Unidades | Propuesta inicial | Primera variación | Segunda variación |
|-----------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Bomba | HP | 0.0002 | 0.0004 | 0.0002 |
| Compresor | HP | 0.0074 | 0.0064 | 0.0059 |

Observando que los resultados de potencias para bomba y compresor se encuentra por debajo de los equipos comerciales, se optó por sustituirlos a unos de menor tamaño. De igual forma se procedió a tomar los cálculos de pérdida de presión por tuberías y accesorios como un factor de seguridad para poder realizar un cambio de tubería a manguera.

De este modo en la **Tabla 13**, se detallan los materiales que componen el equipo construido y su respectiva función.

Tabla 13

Materiales empleados en la construcción de la columna de absorción

| Material | Función |
|---|---|
| Bomba de pileta, H _{máx} = 2m | Bombear el agua de alimentación al sistema |
| Mini-Compresor de aire 140 PSI | Comprimir el aire ambiental para su uso en la mezcla problema |
| Manguera plástica ¼" | Conducir el agua hacía el sistema |
| Válvulas de paso de ¼" Acoples de manguera | Sistema de corte y regulación de paso de fluidos |
| Manguera para compresor ¼" | Conducirla mezcla aire-acetona |
| Soporte de columna | |
| Tubería acero inoxidable ¼" | Empleado para la realización del empaque de relleno |
| Recipientes plásticos 10 L | Contener y receptor las corrientes líquidas |
| Abrazaderas | Asegurar las mangueras del sistema |

La unidad de absorción con todos los elementos que la conforman se puede observar en la Figura 14.

Figura 14

Módulo de absorción



Conclusiones

Al culminar con el presente trabajo de fin de titulación y luego de cumplir con los objetivos planteados, las principales conclusiones obtenidas son las siguientes:

Fue posible realizar el diseño conceptual de una columna para la absorción de acetona presente en aire, empleando como solvente líquido agua pura; para ello se hizo uso de un algoritmo de cálculo basado en las diferentes metodologías de diseño para balances de materia, determinación diámetro y altura; mismas que se encuentran dentro de bibliografía.

Se logró adaptar el diseño conceptual del equipo y las dimensiones especificadas del cuerpo, considerando que se debe trabajar con 4 veces el flujo mínimo de agua, y con un valor para el flujo de gas de 0.12 Kmol Gas/h; siendo estos los parámetros óptimos para el tamaño de la columna.

Se obtuvo el cálculo para el dimensionamiento de elementos auxiliares, como lo son bomba y compresor, consiguiendo valores de potencia de 0.0004 HP y 0.0064 HP, respectivamente.

El uso de módulos didácticos dentro de laboratorio permite complementar el aprendizaje teórico con el práctico, logrando así que el estudiante adquiera habilidad en mira de la actividad profesional a realizar.

Recomendaciones

Realizar la puesta en marcha del equipo mediante ensayos experimentales, mismos que permitan ajustar los parámetros de diseño y con ello la elaboración del manual de funcionamiento para un uso óptimo del equipo

Agregar un sistema de calentamiento que permita estudiar los efectos de temperatura dentro del sistema de absorción.

Proponer el diseño de un sistema de control de presión y temperatura dentro de la columna de absorción, como complemento para materias especializadas en este ámbito de la ingeniería.

Estudiar la factibilidad de emplear diferentes mezclas dentro de la unidad de absorción.

Plantear el diseño de un proceso de desorción para recuperar el soluto presente en la fase líquida, en caso de ser de interés químico

Referencias

- Albright, L. F. (2009). *Albright's chemical engineering handbook*. CRC Press.
- Alvarado, J. J. (2013). *Diseño de una Columna de Absorción para la neutralización del gas clorpirifos etil en la producción de películas plásticas para fundas de banano en planta 2 de la empresa Yanber S.A.* [Tesis de grado, Universidad de Costa Rica]: Repositorio del SIBDI-UCR. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/2190>
- Barrios , O., Berroterán, P., Da Silva, V., & Roca , E. (2011). Simulación y control de una columna de absorción continua rellena con anillos tipo rasching a través del software SIMULATROL 6000. *Revista INGENIERÍA UC*, 18(2), 35-43. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70723254005>
- Bósquez, D., & Yumi, C. M. (2012). *Diseño y Construcción de una Torre de Absorción para el Análisis de SO2 en Gases de Combustión*. [Tesis de Grado, Escuela Politécnica de Chimborazo]: Respositorio Institucional DSpace ESPOCH. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/1655>
- Castellanos-Suárez, A. J., & Lozsán, A. (2019). Evaluación de un modelo simétrico para calcular los coeficientes de actividad de una mezcla líquida binaria. *Revista INGENIERÍA UC*, 26(3), 273-285. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/707/70762652003/html/index.html>
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). *Termodinámica*. McGraw-Hill.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2010). *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill.
- Chasoy Rojas, W. A. (2012). *Determinación experimental del equilibrio líquido-vapor del sistema etanol-agua-glicerina*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]: Repositorio UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/55058>
- Díaz Molina, M. I., Lago Durán, C., Rodríguez Negrin, Z., & Gallardo Aguilar, I. (2018). Diseño de una columna de absorción de gases en la Planta de Producción del Centro de Bioactivos Químicos. *Afinidad*, 75(584), 264-271. <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/347868>

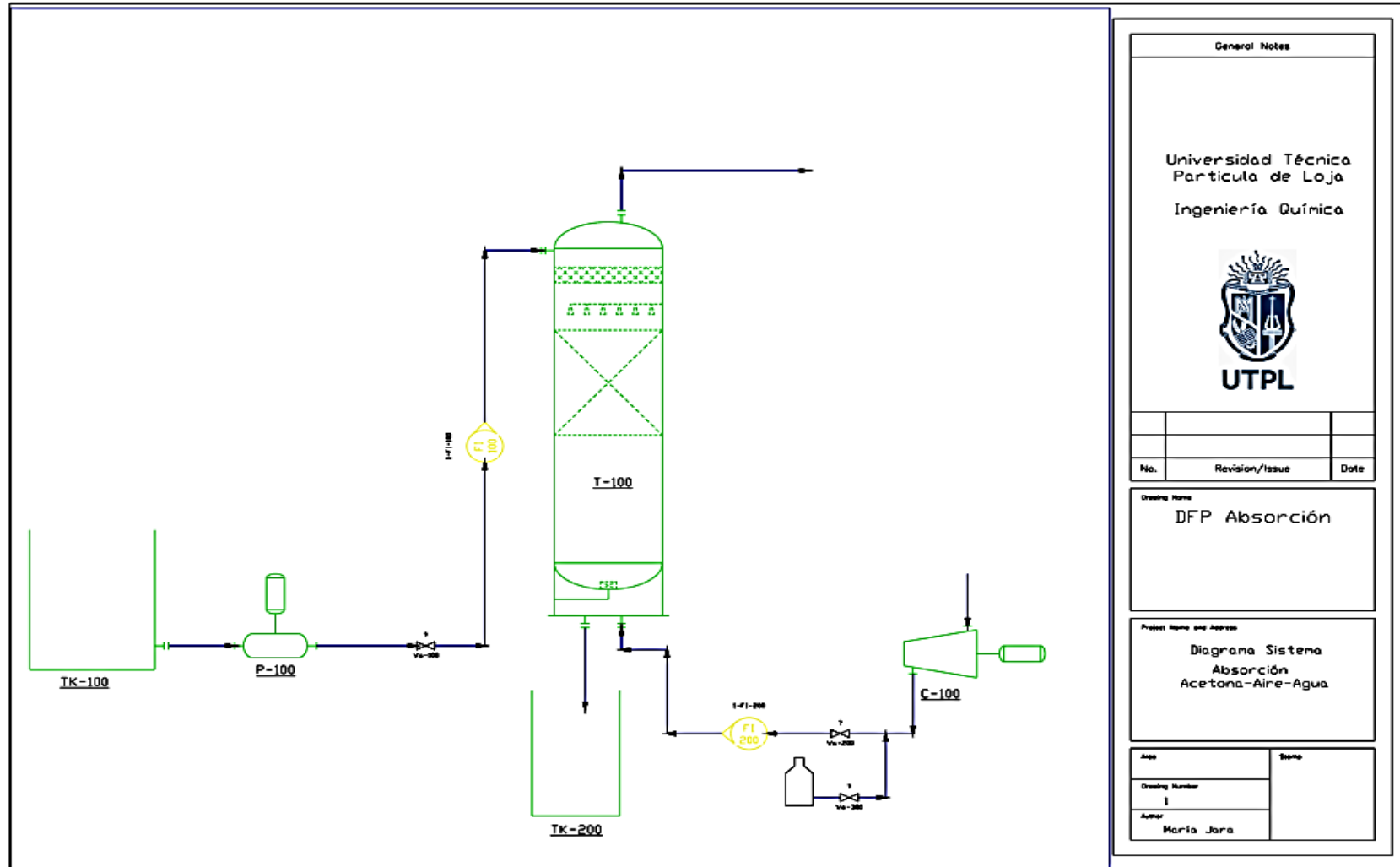
- Didacta. (s.f). *Química Industrial*.
<https://loulalprimera.files.wordpress.com/2011/01/absorcion-de-gas.pdf>
- EPA. (s.f.). *EPA Method 5030C Purge and trap for aqueous samples*.
<https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/epa-5030c.pdf>
- Finalyson, B. A. (2006). *Introduction to Chemical Engineering Computing*. John Wileys & Sons.
- García, F., & Reyes, K. E. (2015). *Diseño, construcción y puesta en marcha de una columna empacada de absorción de gases para la mezcla binaria aire-co2 empelando como solvente una solución de hidróxido de sodio*.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/38207?mode=full>
- Geankoplis, C. J., Allen Hersel, A., & Lepek, D. H. (2018). *Transport processes and separation process principles*. Prentice Hall.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones*. McGraw-Hill. https://dudasytareas.files.wordpress.com/2017/05/hillier_lieberman.pdf
- ICSC: 0087-Acetona. (2018). *International Labour Organization*.
https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_version=2&p_card_id=0087&p_lang=es
- Ion, V. A., Parvulescu, O. C., & Dobre, T. (2014). Gas-liquid Absorption of Volatile Organic Compounds from Gas Streams in a Packed-Bed Column: Modelling and Simulation. *Bulletin of Romanian Chemical Engineering Society*, 1(2). <https://bit.ly/3z72zpF>
- Marcilla Gomis, A. (1999). *Introducción a las operaciones de separación. Cálculo por etapas de equilibrio*. Espagrafic. <https://core.ac.uk/download/pdf/16358082.pdf>
- Marcilla Gomis, A. (1999). *Introducción a las Operaciones de Separación-Contacto continuo*. Espagrafic. <http://hdl.handle.net/10045/4330>
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. McGraw-Hill.
- Melo Cruz, D. E. (2016). *Evaluación de los coeficientes globales de transferencia de masa en biofiltros percoladores para el tratamiento de corrientes gaseosas residuales*

- contaminadas con xileno*. [Tesis de Maestría, Universidad del Valle].
<http://hdl.handle.net/10893/10119>
- Mihelcic, J., & Zimmerman, J. (2011). *Ingeniería Ambiental, Fundamentos-Sustentabilidad-Diseño*. Alfaomega.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO]. (s.f.). *De compuestos orgánicos volátiles*. <https://n9.cl/ub6ot>
- Morales Ramírez, E. J., & Pérez Sandoval, G. (2015). *Comportamiento de la absorción en columnas empacadas en relación a la temperatura y la carga específica*. [Tesis de grado, Instituto Politécnico Nacional]: DSpace JSPUI.
<http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/20726>
- Ovejero, G., Sotelo, J. L., Uguina, M., Romero, M. D., Rodríguez, A., Delgado, J. A., . . .
García, J. (2007). Aplicación de módulo de aprendizaje en operaciones básicas de la Ingeniería Química. *II Jornadas Nacionales de Metodologías ECTS*.
<https://bit.ly/2T93eXe>
- Pérez García, F. M. (2013). *Diseño de un sistema biológico para la eliminación de acetona y estireno en aire procedente de una industria especializada en la fabricación de equipos en poliéster reforzado con fibra de vidrio*. [Tesis de Grado, Universidad de Cádiz]. <http://hdl.handle.net/10498/15169>
- Pérez Sánchez, A., Pérez Sánchez, E. J., & Segura Silva, R. (2016). Design of a packed-bed absorption column considering four packing types and applying matlab. *Nexo, Revista Científica*, 29(2), 83-104. doi:<https://doi.org/10.5377/nexo.v29i2.4577>
- Perry, R., & Green, D. (2008). *Perry's chemical engineers' handbook*. McGraw-Hill.
- Pirola, C. (2019). Experimental and Simulated Operation of Absorption Column for the Removal of Voc from Air. *Chemical Engineering Transactions*, 74, 817-822.
doi:<https://doi.org/10.3303/CET1974137>
- Rahbar, M., & Kaghazchi, T. (2005). Modeling of packed absorption tower for volatile organic compounds emission control. *Int. J. Environ. Sci. Technol*, 2(3), 207-215.
doi:<https://doi.org/10.1007/BF03325877>

- Richardson, J., Harker, J., & Backhurst, J. (2002). *Coulson & Richardson's Chemical Engineering: Particle Technology & Separation Processes* (Vol. 2). Butterworth Heinemann. <https://www.pdfdrive.com/coulson-and-richardsons-chemical-engineering-volume-2-particle-technology-and-separation-processes-d184566173.html>
- Rueda Maíllo, F. J. (2018). *Diseño de la columna de absorción y sus auxiliares en una planta de desulfuración de gases de combustión*. [Tesis de Grado, Universidad de Sevilla]: idUS. <https://hdl.handle.net/11441/84829>
- Sandoval Martinez, M. I., Muñoz Navarro, S. F., & Martínez Jiménez, H. J. (2020). Estimación del equilibrio líquido-vapor del sistema binario acetona-cloroformo mediante el modelo termodinámico de Van Laar y Peng Robinson. *Revista ION*, 33(2), 49-60. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion>
- Scitech-Didactic. (2018). *Gas Absorption Column Model TH 082*. <https://bit.ly/3fNj6X6>
- Seader, J., Henley, E. J., & Roper, D. K. (2005). *Separation Process Principles*. John Wiley & Sons Ltd.
- Sinnott, R. K., Coulson, J. M., & Richardson, J. F. (2005). *Coulson & Richardson's chemical engineering. Chemical Engineering Design* (Vol. 6). Oxford.
- Smith, R. (2005). *Chemical Process Design and Integration*. John Wiley & Sons Ltd.
- Treybal, R. E. (1980). *Operaciones de transferencia de masa*. McGraw-Hill.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1996). *Method 8260B Volatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS)*. <https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/8260b.pdf>
- Villacres Manzano, E. S. (2015). *Análisis Toxicológico de Hidrocarburos Aplicando a la Salud Ocupacional*. [Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]: Repositorio PUCE. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/8744>
- Wankat, P. (2008). *Ingeniería de procesos de separación*. Pearson Prentice Hall


Apéndice

Apéndice 1: Diagrama del sistema de absorción Acetona-Aire-Agua



General Notes

Universidad Técnica
Particula de Loja
Ingeniería Química



UTPL

| No. | Revision/Issue | Date |
|-----|----------------|------|
| | | |

Drawing Name
DFP Absorción

Project Name and Address
Diagrama Sistema
Absorción
Acetona-Aire-Agua

| | |
|----------------------|-------|
| App | Steno |
| Drawing Number 1 | |
| Author Maria Jara | |

C:\Users\LUIS\Documents\Diagrama Absorción\DFP Absorción.dwg

Descripción del Apéndice 1: El diagrama propuesto, de izquierda a derecha muestra el sistema de bombeo que se empleara para la operación de la columna de absorción; el tanque (TK-100) es el depósito de solvente líquido (agua) el cual será transportado con ayuda de una bomba (P-100) hacia el domo de la columna (T-100), previo a su llegada se cuenta con una válvula (Va-100) la cual regula el flujo que entra. A lo referente al sistema de compresión, se observa que se cuenta con un compresor de aire (C-100), un depósito de acetona cual será evaporada para poder ser mezclada con la corriente de aire, esta sección cuenta con una válvula (Va-300) la cual regula el flujo de acetona a entrar en la corriente de aire; una vez realizada la mezcla, se cuenta con una válvula (Va-200) la cual ayudará a regular el flujo de la mezcla acetona-aire, misma que hará su ingreso por la parte inferior de la columna. Al realizar el proceso de absorción, la corriente líquida rica en acetona saldrá por la parte inferior de la columna hacia un tanque (TK-100), de aquí se podrán tomar las muestras para la aplicación del método para determinación de acetona en agua.

Apéndice 2: Propiedades de componentes del sistema a condiciones de operación

Tabla 14

Pesos moleculares componentes del sistema

| Gas | | Líquido | |
|---------|----|---------|----|
| Acetona | 58 | Agua | 18 |
| Aire | 29 | | |

Tabla 15

Propiedades a condiciones de operación

| Condiciones | | Densidad | | | | Viscosidad | | | |
|-------------|-----|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|------------|-----------|---------------|---------------|
| T | P | ρ Gas | ρ Gas | ρ | ρ | μ Gas | μ Gas | μ Líquido | μ Líquido |
| | | AIRE | Acetona | Líquido Agua | Líquido Acetona | AIRE | Acetona | Agua | Acetona |
| °C | atm | kg/m ³ | kg/m ³ | kg/m ³ | kg/m ³ | Pa-s | Pa-s | Pa-s | Pa-s |
| 25 | 1 | 1,184 | 2,37090741 | 998,946 | 783,7 | 1,85E-05 | 1,50E-05 | 8,91E-04 | 3,06E-04 |

Nota. Adaptado de *Perry's chemical engineers' handbook* (p. 2-209 & 2-211) por Perry & Green, 2008

El porcentaje transferido en un proceso de absorción permite saber el flujo de acetona que se puede transferir hacia la corriente líquida de salida.

$$T_A = 0.9G_{A1}$$

Si se logra limpiar el 90%, el 10% de acetona que ha quedado sale por el domo.

$$G_{A2} = 0.1G_{A1}$$

$$G_S Y_{A2} = 0.1G_S Y_{A1}$$

$$Y_{A2} = 0.1Y_{A1}$$

$$Y_{A2} = (1 - \%TA)Y_{A1}$$

$$Y_{A2} = (1 - 0.9) * 0.0101$$

$$Y_{A2} = 0.001 \frac{\text{kmol acetona}}{\text{kmol aire}}$$

Determinación del flujo de solvente puro usando condiciones límite y porcentaje en exceso

Datos

- Se trabaja con 300% de exceso en la corriente del flujo de solvente puro
- $G_1 = 0.1200 \text{ kmol Gas/h}$, I ajuste final realizado con Solver
- Curva de Equilibrio en función de la Ley de Henry $\rightarrow y_A = \frac{2.13}{p_{tot}} x_A$

En la Tabla 16, se presentan los resultados de datos de equilibrio

Tabla 16

Datos de Equilibrio basado en la Ley de Henry

| x_A | X_A | y_A | Y_A |
|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.0017 | 0.0017 | 0.0038 | 0.0038 |
| 0.0035 | 0.0035 | 0.0076 | 0.0076 |
| 0.0053 | 0.0053 | 0.0114 | 0.0114 |

Nota. Adaptado de *Perry's chemical engineers' handbook* (p. 2-131) por Perry & Green, 2008

Se grafica los datos de la curva de equilibrio y se traza la línea de operación mínima desde el punto (X_{A2}, Y_{A2}) , hasta un punto tangente con la curva de equilibrio, se obtiene el punto $(X_{A1MÁX}^*, Y_{A1})$.

- $(X_{A2}, Y_{A2}) \rightarrow (0 ; 0.001)$
- $(X_{A1M\acute{A}X}, Y_{A1}) \rightarrow (0.0047 ; 0.0101)$

Se calcula la pendiente $(Ls/Gs)_{min}$ de la línea de operación mínima la cual se relaciona con el 300% de exceso de la corriente Ls , condición que se ha tomado para efectos de diseño.

Se obtiene el valor Ls/Gs .

$$\frac{Ls}{Gs} = 4 * \left(\frac{Ls}{Gs}\right)_{min}$$

$$\frac{Ls}{Gs} = 4 * (1.9297)$$

$$\frac{Ls}{Gs} = 7.8685$$

Para obtener el flujo de solvente Ls , se multiplica la pendiente Ls/Gs por el flujo Gs , el cual se obtiene del balance de la corriente $G1$.

$$G_1 = Gs(1 + Y_{A1})$$

$$Gs = \frac{G_1}{1 + Y_{A1}}$$

$$Gs = \frac{0.1200}{1 + 0.0101} = 0.1188 \frac{\text{kmol aire}}{\text{h}}$$

$$Ls = \left(\frac{Ls}{Gs}\right) Gs$$

$$Ls = 7.8685 * 0.1188 = 0.9347 \frac{\text{kmol agua}}{\text{h}}$$

El balance empleado cuando se trabaja con exceso se representa en función del Ls_{min} y $X_{A1M\acute{A}X}$, con esto se puede obtener el valor de X_{A1} , $Ls=4*Ls_{min}$

$$Ls(X_{A1} - X_{A2}) = Ls_{min}(X_{A1M\acute{A}X} - X_{A2}) = TA$$

$$4 * Ls_{min}(X_{A1} - X_{A2}) = Ls_{min}(X_{A1M\acute{A}X} - X_{A2})$$

$$4 * (X_{A1} - X_{A2}) = (X_{A1M\acute{A}X} - X_{A2})$$

$$X_{A1} = \frac{X_{A1M\acute{A}X} - X_{A2}}{4} + X_{A2}$$

$$X_{A1} = \frac{0.0047 - 0}{4} + 0 = 0.0012 \frac{\text{kmol acetona}}{\text{kmol agua}}$$

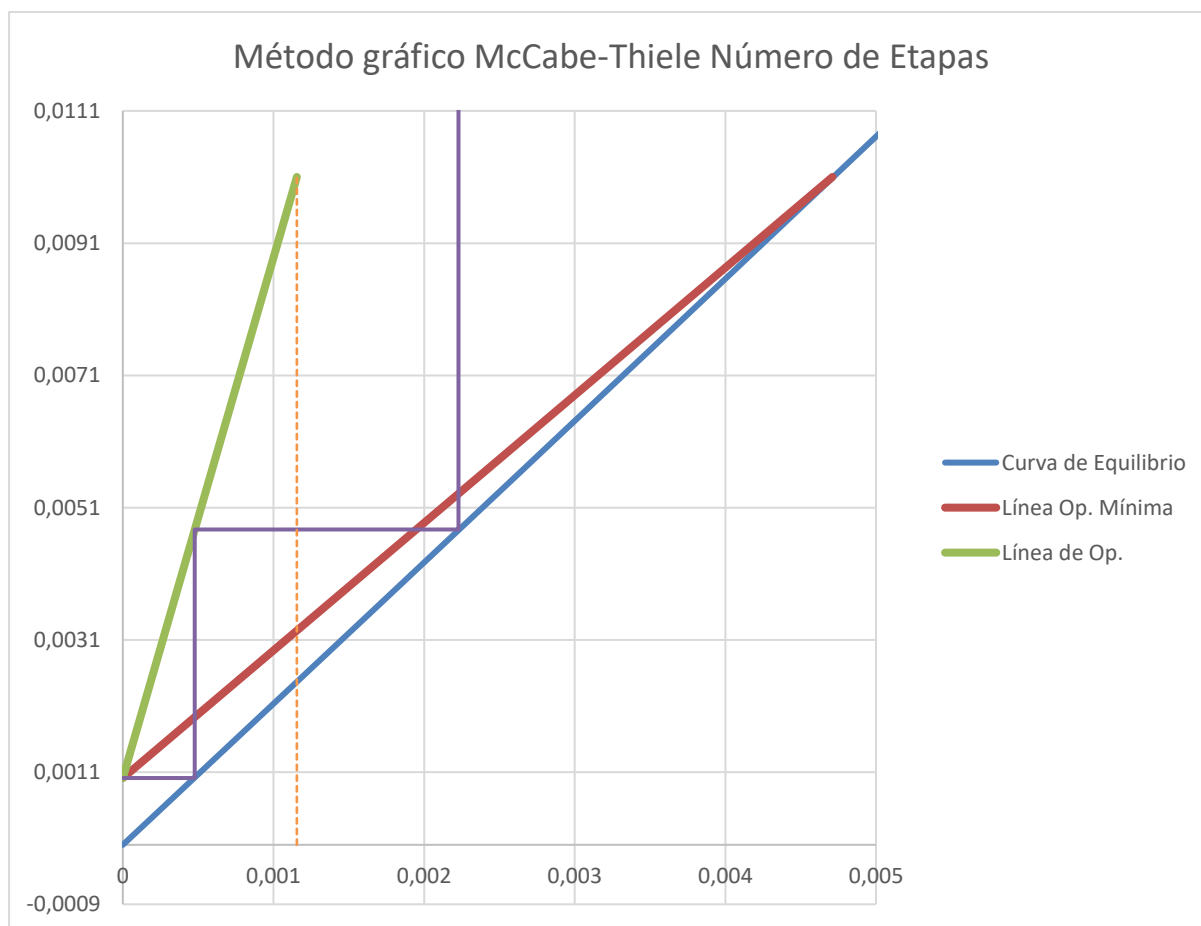
Conocidos los valores de X_{A1} , Y_{A1} , X_{A2} , Y_{A2} , se grafica la línea de operación y se procede con el escalamiento del número de unidades de transferencia a partir del punto $(X_{A2}; Y_{A2})$. También se calculan los valores de los flujos en cada una de las corrientes que forman parte del proceso de absorción.

$$L_2 = Ls(1 + X_{A2}) = 0.9347(1 + 0) = 0.9347 \frac{\text{kmol Liq}}{h}$$

$$L_1 = Ls(1 + X_{A1}) = 0.9347(1 + 0.0012) = 0.9358 \frac{\text{kmol Liq}}{h}$$

$$G_2 = Gs(1 + Y_{A2}) = 0.1188(1 + 0.001) = 0.1189 \frac{\text{kmol Gas}}{h}$$

Apéndice 4: Diagrama McCabe Thiele para determinar el número de etapas



A la par con el método gráfico, se procede a realizar el cálculo con la ecuación de Kremser para conocer el número de unidades de transferencia.

$$N = \frac{\ln [(y_{N+1} - y_{N+1}^*) / (y_1 - y_1^*)]}{\ln [(y_{N+1} - y_1) / (y_{N+1}^* - y_1^*)]} \rightarrow y_{N+1}^* = mx_N + b ; y_1^* = mx_0 + b$$

$$N = \frac{\ln\left(\frac{0.01 - 0.0024}{0.001 + 1.51e^{-5}}\right)}{\ln\left(\frac{0.01 - 0.001}{0.0024 + 1.51e^{-5}}\right)} = 1.54 \rightarrow 2$$

Apéndice 5: Diámetro de columna

Determinación de G' , con ayuda de la Figura 6, su aplicación se observa en la Figura 16

Datos

- Propiedades de los fluidos a las condiciones de operación: ρ_L , ρ_G , μ_L .
- Caída de presión: 400 kPa para efectos de diseño.
- Propiedades de empaque: Anillos Rasching Metal, tamaño 6 mm, $C_f = 700$.

Para determinar la abscisa, se deben relaciona los flujos de Líquido y Gas , en la base de la columna ya que ahí cuenta con la mayor concentración del soluto de interés, considerar que estos deben estar en función de área y en unidades másicas.

$$\frac{L'}{G'} = \frac{L_{1'} \left(\frac{1}{A}\right)}{G_{1'} \left(\frac{1}{A}\right)}$$

$$Abscisa = \frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$Abscisa = \frac{0.0047 \frac{kg}{m^2s}}{0.0010 \frac{kg}{m^2s}} * \left(\frac{1.1973 \text{ kg/m}^3}{996 \text{ kg/m}^3 - 1.1973 \text{ kg/m}^3}\right)^{\frac{1}{2}} = 0.17$$

La abscisa se lleva hasta la línea correspondiente a 400 Pa de caída de presión, se cruza hasta llegar al valor de la ordenada, el cual cuenta con una forma algebraica en función de varias propiedades, de aquí se va a despejar G' , el cuál será el nuevo valor de flujo en función del área y propiedades del empaque de relleno. La aplicación del proceso se muestra en la Figura 16.

$$G' = \sqrt{\frac{Ordenada * \rho_G * (\rho_L - \rho_G) * g_c}{C_f * \mu_L^{0.1} * J}}$$

$$G' = \sqrt{\frac{0.06 * 1.1973 \text{ kg/m}^3 * (996 \text{ kg/m}^3 - 1.1973 \text{ kg/m}^3) * 1}{700 * (8.88E^{-4} \text{ Pa} - s)^{0.1} * 1}} = 0.4545 \frac{kg}{m^2s}$$

Se determina el área y el diámetro

$$A_t = \frac{G_1'}{G'} = \frac{0.0010 \text{ kg/s}}{0.4545 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}} = 2.15e^{-3} \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4A_t}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(2.15e^{-3} \text{ m}^2)}{\pi}} = 0.0523 \text{ m} \cdot \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} = 5.23 \text{ cm}$$

Figura 16

Aplicación de la gráfica de Eckert

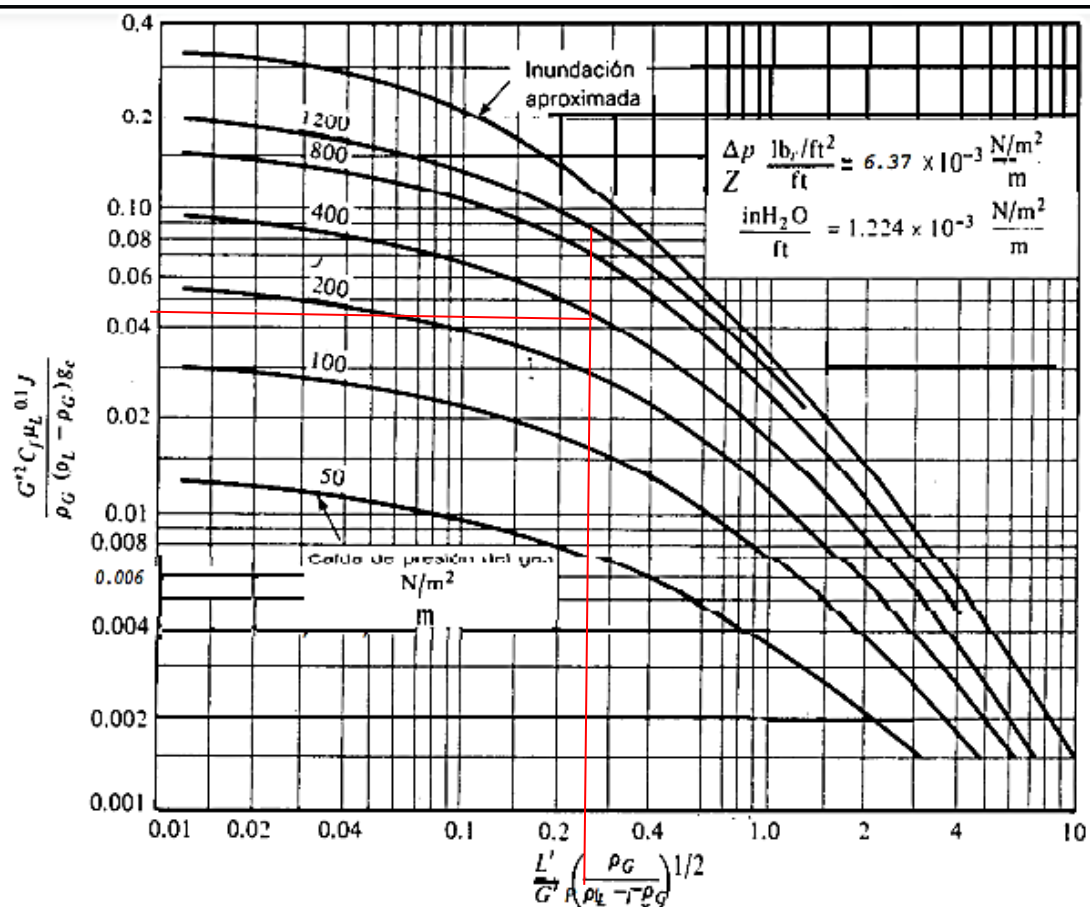


Figura 6.34 Inundación y caída de presión en torres con empaques al azar (coordenadas de Eckert [37], *Chemical Process Products Division, Norton Co.*) Para unidades SI (kg, m, s), $g_c = 1$, C_f de la tabla 6.3, y utilizar $J = 1$. Para $G' = \text{lb}_m/\text{ft}^2 \cdot \text{h}$, $q = \text{lb}_m/\text{ft}^3$, $\mu_L = \text{centip.}$, $g_c = 4.18(10^8)$, C_f de la tabla 6.3, y utilizar $J = 1.502$.

- Diámetro de columna: 5.23 cm

Se establece como función objetivo la ecuación de diámetro, la cual debe tener el valor de 5.23 cm, para esto la variable a modificar es flujo de gas a la entrada del proceso. En la Figura 18, se presenta la aplicación de la herramienta Solver.

Figura 18

Hoja de Excel empleando herramienta Solver

The image shows a screenshot of an Excel spreadsheet with the Solver tool open. The spreadsheet contains a graph and a table of parameters.

Graph (Figura 6.34): The graph plots pressure drop (Pa) on the y-axis (log scale, 0.002 to 0.4) against diameter (m) on the x-axis (log scale, 0.001 to 10). It shows curves for different flow rates (100, 200, 400, 800, 1200). A vertical line is drawn at a diameter of approximately 0.0523 m, and a horizontal line is drawn at a pressure drop of 5.23 Pa. The intersection point is labeled 'Inundación aproximada'.

Table of Parameters:

| Caída de presión | |
|------------------|----------------------------------|
| ΔP | 400 |
| SUPUESTO | |
| Absoluto | 0.061706922 |
| Densidad | 0.08 |
| Empaque | Anillos Raschig-Metal |
| Tamaño nominal | 6 mm |
| Ct | 700 |
| G' | 0.524304483 Kg/m ² .s |
| At | 2.15E-03 m ² |
| D | 0.0523 m |
| | 5.230000002 cm |

Solver Parameters Dialog:

- Establecer objetivo: \$AR\$58
- Para: Máx Min Valor de: 5.23
- Cambiando las celdas de variables: \$E\$548
- Sujeto a las restricciones: (Empty)
- Convertir variables sin restricciones en no negativas
- Método de resolución: GRG Nonlinear
- Método de resolución: Seleccione el motor GRG Nonlinear para problemas de Solver no lineales suavizados. Seleccione el motor LP Simplex para problemas de Solver lineales, y seleccione el motor Evolutionary para problemas de Solver no suavizados.

Figure Caption: Figura 6.34 Inundación y caída de presión en torres con empaques al azar (coordenadas de Eckert DP, Chemical Process Products Division, Norton Co) Para unidades SI (kg, m, s). $g_s = 1$, C_D de la tabla 6.3, y utilizar $J = 1$. Para $G' = 1000/h$, $q = 1000/H$, $g_s = \text{centrip.}$, $g_s = 4.18(10^3)C_D$ de la tabla 6.3, y utilizar $J = 1.502$.

Apéndice 7: Altura y coeficientes de transferencia de masa

Determinación de coeficiente global de transferencia de materia con la altura del empaque

Datos

- Altura de empaque, $Z_T = 60$ cm
- NUT, $N_{Oy} = 2$

Se determina la altura de una unidad de transferencia, el coeficiente global de transferencia de materia

$$Z_T = H_{Oy} N_{Oy}$$

$$H_{Oy} = \frac{Z_T}{N_{Oy}} = \frac{0.6 \text{ m}}{2} = 0.3 \text{ m}$$

$$H_{Oy} = \frac{G'}{K'_{g,a} P} \rightarrow H_{Oy} = \frac{G'}{K'_{y,a}} \rightarrow K'_{g,a} = \frac{K'_{y,a}}{P} \rightarrow H_{Oy} = \frac{G'}{K'_{y,a}}$$

$$K'_{g,a} = \frac{G'}{H_{Oy} P}$$

$$\frac{K'_{y,a}}{P} = \frac{G'}{H_{Oy} P}$$

$$K'_{y,a} = \frac{0.4545 \text{ kg/m}^2 \text{ s}}{0.3 \text{ m}} = 1.1672 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ s}} \cdot \frac{\text{kmol Gas}}{29.29 \text{ kg Gas}} = 0.0399 \frac{\text{kmol Gas}}{\text{m}^3 \text{ s}} \cdot \text{fracc. molar}$$

Determinación de altura de empaque y coeficientes de transferencia de materia con relaciones empíricas.

Datos

- $G' = 0.5243$ kg/m².s
- $L' = 0.9326$ kg/m².s
- f_p , Coeficiente de transferencia de masa relativo=1.52, se escogió el más cercano al empaque escogido. **Figura 19**
- Los datos para número de Schmidt y difusividad se presentan en la **Tabla 17**

Tabla 17

Difusividades y Número de Schmidt para las Mezcla Acetona-Aire y Acetona-Agua

| | Mezcla | Formula | Valor |
|----------|--------------|--|---------------------------|
| D_{AB} | Acetona-aire | $D_{AB} = \frac{1.00 \times 10^{-7} T^{1.75} (1/M_A + 1/M_B)^{1/2}}{P[(\Sigma v_A)^{1/3} + (\Sigma v_B)^{1/3}]^2}$ | 1.06e-5 m ² /s |
| | Acetona-agua | $D_{AB} = 1.173 \times 10^{-16} (\phi M_B)^{1/2} \frac{T}{\mu_B V_A^{0.6}}$ | 1.28e-9 m ² /s |
| NSc | Acetona-aire | $N_{Sc} = \frac{\mu}{\rho D_{AB}}$ | 1.36 |
| | Acetona-agua | | 694.72 |

Se calcula la altura de una unidad de transferencia o el coeficiente de película gaseosa con relaciones empíricas.

$$H_G = H_y = \left(\frac{0.226}{f_p} \right) \left(\frac{N_{Sc}}{0.660} \right)^{0.5} \left(\frac{L'}{6.782} \right)^{-0.5} \left(\frac{G}{0.678} \right)^{0.35}$$

$$H_G = H_y = \left(\frac{0.226}{1.52} \right) \left(\frac{1.36}{0.660} \right)^{0.5} \left(\frac{2.1867}{6.782} \right)^{-0.5} \left(\frac{0.4545}{0.678} \right)^{0.35} = 0.3269 \text{ m}$$

Con el valor de coeficiente de película gaseosa se determina el coeficiente individual de transferencia de materia en fase gaseosa

$$H_y = \frac{G'}{PM_y} \rightarrow k'_y a = \frac{G'}{H_y}$$

$$k'_y a = \frac{0.4545 \text{ kg/m}^2 \text{ s}}{29.29 \text{ kg/kmol}} = 4.75e^{-2} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3 \text{ s fracc. mol}}$$

Se calcula la altura de una unidad de transferencia o el coeficiente de película líquida con relaciones empíricas

$$H_L = H_x = \left(\frac{0.357}{f_p} \right) \left(\frac{N_{Sc}}{372} \right)^{0.5} \left(\frac{\frac{L'}{\mu}}{6.782/0.8937e^{-3}} \right)^{0.3}$$

$$H_L = H_x = \left(\frac{0.357}{1.52} \right) \left(\frac{694.72}{372} \right)^{0.5} \left(\frac{\frac{2.1867}{8.91e^{-4}}}{6.782/0.8937e^{-3}} \right)^{0.3} = 0.2287 \text{ m}$$

Con el valor de coeficiente de película gaseosa se determina el coeficiente individual de transferencia de materia en fase gaseosa

$$H_x = \frac{L'}{PM_x} \rightarrow k'_x a = \frac{L'}{H_x}$$

$$k'_x a = \frac{0.9326 \text{ kg/m}^2\text{s}}{18.12 \text{ kg/kmol}} = 0.53 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3\text{s fracc. mol}}$$

Se obtiene el coeficiente global en función de coeficientes individuales

$$\frac{1}{K'_y a} = \frac{1}{k'_y a} + \frac{m}{k'_x a}$$

$$\frac{1}{K'_y a} = \frac{1}{4.75e^{-2}} + \frac{2.13}{0.53}$$

$$K'_y a = \frac{1}{25.09} = 0.04 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3\text{s fracc. mol}}$$

Se calcula la altura de una unidad de transferencia y con ello la altura total del empaque

$$H_{Oy} = \frac{G'}{K'_y a} = \frac{0.4545 \text{ kg/m}^2\text{s}}{0.04 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3\text{s fracc. mol}}} = 0.3879 \text{ m}$$

$$Z_T = H_{Oy} N_{Oy} = 0.3879 * 1.54 = 0.6 \text{ m}$$

Figura 19

Factores de empaque para empaques aleatorios

Tabla 10.6-1. Factores de empacamiento para empaques aleatorios y estructurados

| Tipo | Material | Tamaño nominal en pulg. | Fracción vacía, de ϵ | Área superficial, a, pie ² /pie ³ (m ² /m ³) | Factor de empaque, F_p , pie ⁻¹ (m ⁻¹) | Coeficiente de transferencia de masa relativo, f_p |
|-------------------------------|----------|-------------------------|-------------------------------|---|---|--|
| <i>Empacamiento aleatorio</i> | | | | | | |
| Anillos Raschig | Cerámica | 1/2 | 0.64 | 111 (364) | 580 (1 900) | 1.52 |
| | | 1 | 0.74 | 58 (190) | 179 (587) | 1.20 |
| | | 1 1/2 | 0.73 | 37 (121) | 95 (312) | 1.00 |
| Sillas Berl | Cerámica | 2 | 0.74 | 28 (92) | 65 (213) | 0.85 |
| | | 1/2 | 0.62 | 142 (466) | 240 (787) | 1.58 |
| | | 1 | 0.68 | 76 (249) | 110 (361) | 1.36 |
| Anillos Pall | Metal | 2 | | 32 (105) | 45 (148) | |
| | | 1 | 0.94 | 63 (207) | 56 (184) | 1.61 |
| | | 1 1/2 | 0.95 | 39 (128) | 40 (131) | 1.34 |
| | | 2 | 0.96 | 31 (102) | 27 (89) | 1.14 |

Apéndice 8: Dimensionamiento auxiliares

Datos para determinación de potencia de bomba

- Flujo volumétrico agua a la entrada $Q_{L2} = 4.6786e-6 \text{ m}^3/\text{s}$
- Propiedades del fluido a condiciones de operación, ρ_L , μ_L
- Tipo de tubería: Acero cédula 40, $\frac{1}{4}$ "
- Datos del sistema: Longitud 2 m, altura 1.5 m, $P_1 = 1 \text{ atm}$; $P_2 = 1.5 \text{ atm}$

Se calcula el área y velocidad del flujo a través de la tubería

$$A_c = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.0092 \text{ m})^2}{4} = 6.7137e^{-5} \text{ m}^2$$

$$V = \frac{Q_{L2}}{A_c} = \frac{4.6787e^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{6.7137e^{-5} \text{ m}^2} = 0.0697 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Se obtiene Re y factor de fricción de Darcy

$$Re = \frac{\rho_{L2} * V * D}{\mu_{L2}} = \frac{998.9456 \text{ kg/m}^3 * 0.0697 \text{ m/s} * 0.0092 \text{ m}}{8.91e^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}} = 722.37 \blacktriangleright \text{Laminar}$$

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{722.27} = 0.0886$$

Con la sumatoria de diámetro equivalentes de la **Tabla 7**, se procede a calcular la potencia de bomba con el algoritmo de la **Figura 9**

$$L_{eq} = D_i * \Sigma D_{Equiv} = 0.0092 \text{ m} * 455 = 4.2068 \text{ m}$$

$$L_{TOTAL} = L_{TUBERÍA} + L_{eq} = 2 \text{ m} + 4.2068 \text{ m} = 6.2068 \text{ m}$$

$$\Delta P_L = f \frac{L_{TOTAL}}{D} \frac{\rho V_{prom}^2}{2} = 0.0886 \frac{6.2068 \text{ m}}{0.0092 \text{ m}} * \frac{998.946 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(0.0697 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 145 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = \frac{145 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{998.9456 \text{ kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/s}^2} = 0.0148 \text{ m}$$

$$h_{bomba} = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2 - \alpha_1 V_1^2}{2g} + (z_2 - z_1) + h_{L,total}$$

$$h_{bomba} = \frac{(1.5 - 1) \text{ atm} * \frac{101325 \text{ Pa}}{1 \text{ atm}}}{998.9456 \text{ kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/s}^2} + \frac{-2 * (0.0256 \text{ m/s})^2}{2 * 9.81 \text{ m/s}^2} + (1.5 - 0) \text{ m} + 0.0148 \text{ m}$$

$$h_{bomba} = 6.68 \text{ m}$$

$$\dot{W} = \rho Q g h_{bomba,u}$$

$$\dot{W} = 998.9456 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1.7211e^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 6.67 \text{ m} = 0.3064 \text{ W} \cdot \frac{1 \text{ HP}}{746 \text{ W}} = 0.0004 \text{ HP}$$

Datos para determinación de potencia de compresor

- Flujo molar aire a la entrada $G_s = 0.1188 \text{ kmol Gs/h}$
- Peso molecular del aire: 29 kg/kmol
- Temperaturas: $T_1: 20 \text{ }^\circ\text{C}; T_2: 25 \text{ }^\circ\text{C}$
- Presiones: $P_1: 0.98 \text{ atm}; P_2: 1 \text{ atm}$
- Entalpía de aire, Tabla A-17 Çengel

Se calcula el valor de flujo másico

$$0.1188 \frac{\text{kmol Gs}}{\text{h}} \cdot \frac{29 \text{ Kg}}{\text{kmol}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 0.0009 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Balance de energía general

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = \frac{dE_{sistema}}{dt} \rightarrow 0$$

$$\dot{E}_{entrada} = \dot{E}_{salida}$$

$$\dot{W}_{entrada} + \dot{m}h_1 = \dot{m}h_2$$

$$\dot{W}_{entrada} = 0.0009 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (298.18 - 293.17) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{W}_{entrada} = 0.0047 \text{ kW} \cdot \frac{1 \text{ HP}}{0.7457 \text{ kW}} = 0.0064 \text{ HP}$$

Apéndice 9: Método para determinar acetona

EPA Method 5030C-Purge-and-Trap for Aqueous Samples

Procedimiento de purga y trampa para análisis de compuestos orgánicos volátiles en muestras acuosas y muestras líquidas miscibles en agua. Entre los compuestos evaluados mediante esta técnica se encuentra la acetona

| Compuesto | No. CAS | Repuesta | Estabilidad |
|-----------|---------|----------|-------------|
| Acetona | 64-64-1 | pp/ht | hs |

Las muestras de agua se analizan directamente para búsqueda de COV's mediante la extracción con purga-trampa y cromatografía de gases. Si la muestra presenta alta concentración del analito se debe realizar una inyección directa al sistema cromatográfico o con una dilución antes del proceso de purga y trampa.

- Resumen del método para muestras acuosas

Se burbujea gas inerte a través de la porción de una muestra acuosa a temperatura ambiente o a una temperatura elevada, dependiendo del analito deseado, y los componentes volátiles se transfieren eficazmente de la fase acuosa a la fase vapor. El vapor pasa a través de una columna de sorbente donde se adsorben los componentes volátiles. Después se completa la purga, la columna del sorbente se calienta y se lava con gas inerte para desorber el componente en una columna cromatográfica de gases

- Equipos y suministros

- Recipientes de muestra: Pueden emplearse viales transparentes de 40 ml con una frita especial y equipados con dos septos de silicona con cara de PTFE; se puede emplear cualquier vial de vidrio de buena calidad, lo suficientemente grande para contener la muestra y que se pueda sellar con un tampón de rosca que contenga un tabique de silicona con cara de PTFE.
- Sistema de purga y trampa: Consiste en una unidad que muestrea manual o automáticamente un volumen apropiado; 5 mL o 25 mL; agrega sustitutos, picos de matriz y estándares internos (si corresponde) a la muestra y la transfiere al

dispositivo de purga, el cual purga los COV's con una corriente de gas inerte y atrapa los COV'S para su posterior desorción en el cromatógrafo de gases.

- Calentador o baño de aceite: Debe mantener la cámara de purga en un rango de temperatura ambiente hasta 100 °C.
 - Columna de GC capilares: Columnas de gran calibre cuentan con capacidad de aceptar flujos de gas estándar de trampa durante la desorción térmica y la cromatografía puede iniciar durante la desorción. Columnas con calibre estrecho necesitan flujos de gas más bajos, es por ello que los analitos de elución temprana necesitan ser reenfocados y para ello es necesario utilizar una interfase criogénica.
 - Jeringa y válvulas de jeringa
 - Microjeringas: 10 µL, 25 µL, 100 µL, 250 µL, 500 µL y 1000 µL. La longitud de la aguja debe ser suficiente de forma que se pueda extender desde la entrada de la muestra hasta dentro de un cm de la frita de vidrio en el dispositivo de purga
 - Válvulas de jeringa
 - Tapón rosca, revestido de PTFE, sellado con tabique.
 - Matraces aforados, Clase A- 10 mL y 100 mL,
- **Reactivos y estándares**
- Agua de reactivo libre de orgánicos.
 - Conservante de muestra
 - Consultar método 5000 para orientación sobre estándares que se pueden emplear en este procedimiento. Los sustitutos recomendados son: 4-bromofluorobenzene, 1,4-difluorobenzene, 1,2-dichloroethane-d4, and toluene-d8. Los compuestos usados como sustitutos dependen de los requisitos del análisis. Como estándares internos se puede emplear chlorobenzene-d5, 1,4-dichlorobenzened4, and fluorobenzene. Si se requiere emplear otros patrones internos es necesario que cuenten con tiempos de retención similares a los de los analitos que se detectan.
- **Recogida, conservación y almacenamiento de muestras**

- Las muestras deben almacenarse en viales tapados con un área libre para vapores de solventes; si la muestra presenta fugas o si se ha sellado incorrectamente se debe desechar.
 - Preparación de viales de muestra: Depende del objetivo deseado, la conservación de la muestra puede ser o no necesaria y el tiempo de retención del analítico estará en función de la presencia de conservantes. Los mismos deben ser preparados en un laboratorio fijo y enviados a la ubicación de análisis.
 - Recolección de muestras: Se debe tener cuidado para minimizar la perturbación de la muestra y así minimizar la pérdida de compuestos volátiles.
 - Para la conservación de la muestra consultar el método 5035.
- **Procedimiento**
- Configuración inicial: Cualquier método de CG/MS debe ser calibrado, revisar Método 800.
 - Ensamblar el equipo de purga y trama y conectarlo al cromatógrafo
 - Preparar las soluciones de estándares para calibración
 - Verificación de calibración
 - Selección de muestras
 - Introducción y purga de muestras: La muestra puede ser introducida con un muestreador automático o un procedimiento manual
 - Desorción de la muestra: Mediante interfaz no criogénica o criogénica
 - Interpretación y cálculos de datos: Análisis cualitativos y cuantitativos según las pautas del método 8000. Si el análisis inicial de una muestra o una dilución de la muestra tiene una concentración de analitos que excede la inicial o rango de calibración, la muestra debe volver a analizarse con una dilución mayor (EPA, s.f.)