

UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN



FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y METALÚRGICA

ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERIA

QUIMICA

TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO

QUIMICO

IMPORTANCIA DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE

MASA EN UN SISTEMA DE ABSORCIÓN DE GASES

AUTOR:

ERICK RONALD PIZAN ALVARADO

ASESOR:

M(º) VÍCTOR RAÚL COCA RAMÍREZ

VÍCTOR RAÚL COCA RAMÍREZ

INGENIERO QUÍMICO

Reg. del Colegio de Ingenieros N° 48944

HUACHO-PERÚ

2020

INDICE

INDICE.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
INDICE DE TABLAS	V
RESUMEN.....	VI
SUMMARY	VII
INTRODUCCIÓN.....	VIII
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 Descripción de la realidad problemática	1
1.2 Formulación del Problema	1
1.2.1 Problema General.....	1
1.2.2 Problemas específicos.....	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Justificación de la Investigación	2
1.5 Delimitaciones del estudio	2
1.6 Viabilidad del estudio	3
CAPITULO II: MARCO TEORICO	4
2.1 Antecedentes	4
2.1.1 Antecedentes internacionales	4
2.1.2 Investigaciones nacionales	8
2.2 Bases teóricas.....	11
2.2.1 Transferencia de masa	11

2.2.2 Absorción de gases.....	25
2.2.3 Proceso de absorción	25
2.2.4 Aplicaciones de la absorción.....	26
2.2.5 Elección del disolvente para la absorción.....	27
2.2.6 Equipos utilizados para la absorción de gases	27
2.2.7 Solubilidad de gases en líquidos en el equilibrio.....	27
2.2.8 Sistemas de dos componentes	27
2.2.9 Soluciones líquidas ideales	28
2.2.10 Soluciones líquidas no ideales.....	28
2.2.11 Operación a contracorriente en varias etapas transferencia de un componente.....	29
2.2.12 Determinación gráfica de etapas ideales	29
2.2.13 Eficiencia y etapas reales.....	29
2.2.14 Mezclas diluidas de gases	30
2.3 Definición de términos	39
CAPITULO III: METODOLOGÍA	43
3.1 Diseño Metodológico.....	43
3.1.1 Tipo de Investigación	43
3.1.2 Nivel	43
3.1.3 Diseño.....	43
3.1.4 Enfoque	43
3.2 Técnicas e instrumentos para la obtención de datos.....	44
3.3 Técnicas para el procesamiento de la información.....	44
3.4 Procedimiento y funcionamiento del equipo.....	44
3.5 Determinación y correlación experimental	46

3.5.1 Flujo Interno	46
3.5.2 Flujo Externo.....	46
CAPITULO IV: RESULTADOS.....	49
CAPITULO V: DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
5.1 Discusión	53
5.2 Conclusiones	53
5.3 Recomendaciones	53
CAPITULO VI: BIBLIOGRAFÍA	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Columna con la pared mojada	15
Figura 2: Cambios de concentraciones en la transferencia de materia en un accesorio con un flujo de turbulencia de la fase gas.	18
Figura 3: Cambio de concentración de los componentes liquido-gaseoso al estar en contacto:	23
Figura 4: Coeficientes globales y de superficies de contacto en la destilación.	24
Figura 5: Esquema de una torre de absorción de platos	31
Figura 6: Tipos de empaque. (Alonso Jaques, 2010)	33
Figura 7: Torre empacada y sus constituyentes. (Alonso Jaques, 2010).....	34
Figura 8: Torre Empacada.....	38
Figura 9: Columna de esferas y cilindros	47
Figura 10: Ajuste de datos por mínimos cuadrados	52

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores obtenidos por Costa Novela en la absorción de gases	49
Tabla 2: Valores obtenidos en la absorción de oxígeno.....	49
Tabla 3: Valores de K_1 , Nu_{AB} y Re	51

RESUMEN

El estudio que se presenta tiene el objetivo de establecer la relación existente del coeficiente de transferencia de masa en la absorción de líquido - gas. Por medio de la operación de transferencia de materia (líquido – gas) en una columna de absorción para esto se hicieron 5 ensayos, la columna de esferas y cilindros trabajó con una concentración de oxígeno de 2,184 g/m³.

Los resultados que se obtuvieron del caudal de mojado se encuentra en intervalo de 0,221 – 0,408 (m³/h*m) y los resultados obtenidos de la concentración oxígeno en la corriente de agua que abandona la columna se encuentran en intervalo de 6,39 – 6,81 (g/m³) de la experiencia Se concluye que no habría necesidad de buscar otros métodos indirectos como del análisis dimensional o de las analogías de transferencia de calor, cantidad de movimiento y masa ya que si es posible determinar un coeficiente medio de transferencia de masa de un componente gaseoso a una fase líquida

Palabras claves: coeficiente de transferencia de materia, columna de esferas y cilindros y absorción de líquido – gas.

SUMMARY

The phenomenon of mass transfer of the liquid - gas system in an absorption column was studied in order to establish a dimensionless correlation of the mass transfer coefficient in liquid - gas absorption. For this 5 tests were made, the spheres and cylinders column worked with an oxygen concentration of 2,184 g/m³.

The results obtained from the wet flow rate are in the range of 0.221-0.408 (m³/h*m) and the results obtained from the oxygen concentration in the water stream leaving the column are in the range of 6.39 - 6.81 (g/m³) of the experience It is concluded that if it is possible to determine an average mass transfer coefficient of a gaseous component to a liquid phase without resorting to the use of indirect methods such as dimensional analysis or analogies of heat transfer, amount of movement and mass.

Keywords: matter transfer coefficient, column of spheres and cylinders and liquid - gas absorption.

INTRODUCCIÓN

En estos procesos existen los movimientos o también llamados flujos ya sean de las propiedades como masa o energía en las diversas direcciones que puedan existir, que dependerá la fuerza que se le da, los fenómenos de transporte tienen lugar en estos tipos de procesos.

Los procesos químicos que requieren de diferentes tipos de este como la purificación inicial de las materias primas o también las separaciones finales de productos o subproductos para estos el proceso en donde se realiza la transferencia de materia son muy importantes para la mayoría de estos.

Generalmente para poder saber cuál será el costo del producto es importante la separación que pueda tener, se hacen usos frecuentemente de operaciones de separación, en donde se incluyen los costos que se generaran en esta operación que tendrá una dependencia de la relación que existe entre las concentración es iniciales, final de la sustancia que participa en esta etapa y también el tiempo en que se desarrolle la transferencia; en cuyo caso que sí la relación es mayor al igual será el costo de producción.

Con la importancia que se da en estos tiempos de la actualidad a las operaciones de transferencia de masa, para un sistema líquido – gaseoso en una columna de esferas y cilindros, se tomó como estudió al fenómeno de transferencia de masa en donde se obtuvieron valores de caudal de mojado y concentración oxígeno en la corriente de agua que abandona la columna con esto se obtiene para el coeficiente de transferencia de materia y la absorción líquida – gaseosa con el logro de la determinación la correlación adimensional.

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

Mayormente existen problemas en los cálculos de transferencia de masa entre fases, porque sigue siendo parte para la obtención del coeficiente de transferencia de masa y más complicado aún con algunos de los coeficientes locales de transferencia de masa líquido o gas. Esto último de acuerdo a la teoría de Whitman o de doble capa ayuda algo, pero por ser coeficientes internos es más complicado que los coeficientes globales y siempre se recurre a métodos indirectos que incrementan el error, por ejemplo, se recurre al análisis dimensional o al de las analogías de transporte de calor, cantidad de movimiento y masa. Este método experimental propuesto por Costa Novella para medir los coeficientes locales de transferencia de masa ya que en este panorama resulta muy importante un proceso de absorción de gases; de allí nuestro interés en verificar esta información y así mostrar no solo con interés académico, sino práctico este procedimiento.

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema General

¿Cómo medir experimentalmente el coeficiente de transferencia de masa del lado de la fase líquida en un proceso de absorción de gases?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es el procedimiento para medir el coeficiente de transferencia de masa del lado de la fase líquida en un proceso de absorción de gases?
- ¿Cuál es el nivel de concordancia entre los resultados experimentales de este estudio y el del procedimiento tomado como base?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar un procedimiento para para medir el coeficiente de transferencia de masa del lado de la fase líquida en un proceso de absorción de gases.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Verificar si el procedimiento tomado como base (costa Novella) es procedimiento para medir el coeficiente de transferencia de masa del lado de la fase líquida en un proceso de absorción de gases
- Obtener el nivel de concordancia entre los resultados experimentales de este estudio y el del procedimiento tomado como base.

1.4 Justificación de la Investigación

Para esta investigación se justifica considerando importante que hace una pequeña contribución a la importancia que le debe presentar a los coeficientes de transferencia de masa en la absorción de gases, permitiendo una mejora en la absorción de gases, el mismo que podría usarse en otras operaciones que involucre transferencia de masa. Esto le permitiría mayor eficiencia.

Es necesario dar a conocer que también se justifica desde el punto de vista académico que se comprende los principios analíticos químicos, técnicas estadísticas, mecánica y procesamiento en general con el estudio de los principios fisicoquímicos en la operación y proceso.

1.5 Delimitaciones del estudio

En este estudio actual se hará realizado en los entornos de la “Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho”, en 2019.

El presente estudio podrá servir como modelo de aplicación para la correcta manipulación de los coeficientes de transferencia de masa, especialmente en la absorción de gases desarrollada en los laboratorios de química.

1.6 Viabilidad del estudio

Este trabajo de tesis es viable ya que el presente consta con recursos suficientes en tema financieros para la investigación y ponerlo en desarrollo, recibirá asesoramiento de expertos en el campo, y la tesis tiene recopilado información de buenas fuentes y tiempo disponible para el estudio de la investigación.

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes

2.1.1 Antecedentes internacionales

Suarez (2004) en su trabajo de investigación “Influencia de las variables hidrodinámicas y de transferencia de masa, en la corrosión del sistema oxígeno-agua-cloruro de sodio y acero al carbono” que fue realizada en la Universidad industrial de Santander, y tuvo las conclusiones siguientes:

Se pudo presenciar una variación con respecto a la corrosión ya que depende de la velocidad de flujo con la velocidad de corrosión con lo ocurrido se descartó el control por completo de difusión y se planteó un control mixto sobre la corrosión que afecta al material de acero al carbono AISI 1020 \pm oxígeno \pm agua y cloruro de sodio. (Suarez, 2004)

Se tuvo en cuenta la información para poder determinar el coeficiente de transferencia de materia y esfuerzo que se aplica a la pared para en corte de las diferentes geometrías donde se encontraron correlaciones que no tienen siempre buenos resultados. En el cuyo caso para la transferencia de masa las correlaciones de Newman y Wranglen (electrodo de cilindro rotatorio), Harriot-Hamilton (flujo a través de un tubo) dieron una buena aproximación y la correlación de Rao y Trass para la celda de impacto, presentó un ajuste aceptable principalmente a bajos números de Reynolds. Las correlaciones de Silverman para electrodo de cilindro rotatorio y flujo a través de un tubo que mostraron un buen acuerdo a las velocidades de flujo más bajas, para el caso del esfuerzo de corte en la pared y lo mismo ocurrió con la correlación de Giralt y Trass para la celda de impacto. (Suarez, 2004)

Se pudo conseguir ajustes favorables con respecto a las correlaciones de las geometrías evaluadas para cada una de ellas en las que se pueden pronosticar en la velocidad de corrosión teniendo al respecto las variables. (Suarez, 2004)

Se establecieron metodologías de laboratorio para realizar estudios de corrosión en cada una de las geometrías evaluadas: flujo por medio de los tubos, electrodo de cilindro rotatorio y celda de impacto, considerando además de la velocidad de flujo y temperatura, transferencia de materia y esfuerzo de corte en una superficie. (Suarez, 2004)

“Se implementó el uso de la celda de impacto para realizar estudios de corrosión a nivel de laboratorio como un aporte a la implementación de nuevas técnicas de experimentación en este campo en nuestro país” (Suarez, 2004)

Caicedo y Orozco (2012), en su trabajo de investigación titulada “Diseño de una columna empacada para el estudio de la transferencia de masa en un sistema de absorción isotérmica” desarrollada en la Universidad industrial de Santander, llegó a las conclusiones siguientes:

“Se hizo el diseño de un equipo de absorción a una escala de laboratorio, la cual brindara apoyo en temas pedagógicos a la carrera profesional de Ingeniería Química, en donde se brindan conocimiento acerca de la transferencia de materia y energía” (Caicedo & Orozco, 2012)

El equipo está constituido por una columna humidificadora que se encuentra a una escala laboratorio, la cual tiene un flujo de agua de 0,012 kg/s que se alimenta a 45°C y tiene una salida a 25°C, con material de acero inoxidable con una altura de 1,70 m y un diámetro de 0,20 m. El aire es saturado a la salida del equipo, luego ingresa a la etapa de mezcla que es de un diámetro de 0,38 m y una altura de 0,45 m, la cual sale con la concentración de 7,5% p/p de etanol. El aire-etanol ingresa por una corriente a la torre de absorción, en donde el acero inoxidable tiene un diámetro de 0,16 m y una altura de 1,40m. (Caicedo & Orozco, 2012)

Las relaciones son utilizadas para trabajar correctamente y sobre todo aplicarlas adecuadamente en los cálculos de las variables del proceso gracias a esos suponemos que el tamaño de los equipos este de acuerdo a la simulación desarrollada en Hysys. (Caicedo & Orozco, 2012)

El costo promedio del equipo de absorción de gases tiene un valor total de \$10.316.038 considerando la función que desarrollar en el laboratorio, se puede decir que el costo no tiene un valor muy alto por lo cual puede cambiar porque no se tomó en consideración el costo de la importación e instalación, la cual dependerá del fabricante. (Caicedo & Orozco, 2012)

De la Torre y Vaca (2018), en su trabajo de investigación titulada “Determinación del coeficiente de transferencia de masa en lechos de contacto de carbonato de calcio para la estabilización química de aguas corrosivas” realizada en la Escuela Politécnica Nacional, llego a las conclusiones siguientes:

Se determinó que el porcentaje de pureza del mármol granular comercializado por la empresa “LA ROCA S.A. es mayor a 95,56%, lo que indica que las impurezas son mínimas y este puede ser utilizado como material de empaque en lechos de contacto para la estabilizar químicamente las aguas que tienen componentes corrosivas” (De la Torre & Vaca, 2018)

La acidificación del agua potable para el ensayo del proceso de estabilización con HNO_3 y manteniendo el sistema cerrado a la atmósfera logró ser efectiva ya que se comprobó que las condiciones iniciales del agua de abastecimiento no variaron significativamente a lo largo de la fase de experimentación. El agua sintética preparada en laboratorio con un I.L.=3,13 llegó a la condición de estabilización química en un periodo

de 6 horas resultando un I.L.= 0,13 con un $D_p = 1,18$ mm y una tasa de aplicación de 0,094 L/min. (De la Torre & Vaca, 2018)

El coeficiente de transferencia de masa obtenido para la condición de estabilización química fue de $=0,879$ Kg/h.m², parámetro requerido para el dimensionamiento a escala industrial del proceso con lechos empacados de diámetro de partícula de 1,19 mm. La relación que existe entre la tasa de aplicación y granulometría con la transferencia de masa en el proceso fue que a medida que se incrementa la tasa de aplicación, la masa transferida disminuye debido a que a mayor granulometría disminuye el área interfacial del material en contacto con el fluido. (De la Torre & Vaca, 2018)

Esta técnica puede ser utilizada en el país en lugares donde la única fuente de abastecimiento de agua sean fuentes de aguas subterráneas que no requieran un tratamiento adicional, de ser necesario un tratamiento, esta técnica debe utilizarse al final del proceso de tratamiento después de la remoción de hierro y desinfección. (De la Torre & Vaca, 2018)

La estabilización química de las aguas de la cooperativa Nueva Aurora no se logró completamente debido a la presencia de altas concentraciones de $Fe^{2+} = 6,95$ mg/l el cual al oxidarse puede precipitar sobre el material de empaque inhibiendo el proceso de estabilización. Pese a la existencia de Fe^{2+} el IL obtenido para las aguas subterráneas fue de -0,98 valor que indica que la estabilización puede lograrse sometiendo el agua a un proceso de aireación para la oxidación del hierro soluble a Fe^{3+} que es precipitable y seguidamente como hierro coloidal por lo que se requiere de proceso de coagulación-floculación y sedimentación y como proceso final la estabilización química propuesta en este estudio. (De la Torre & Vaca, 2018)

Debido a que el tiempo de retención fue corto para cada tasa de aplicación se tuvo que realizar muestreos cada 30 minutos para asegurar que el flujo inunde todo el lecho y por lo tanto que esté en contacto con toda el área superficial disponible y además se corroboró

experimentalmente que tanto en G1 y G2 se formaron siempre para cada condición de experimentación una película de agua de altura constante que aseguraba que el fluido entre en contacto con toda la superficie interfacial del lecho; es por esto que estas condiciones de experimentación mostraron I.L. en un rango de -0,5 y 0,5. (De la Torre & Vaca, 2018)

2.1.2 Investigaciones nacionales

Mendoza y Pérez (2011), en su trabajo de tesis titulada “Correlación adimensional para la predicción del coeficiente de transferencia de masa en los sistemas ácido benzoico - aguay ácido salicílico-agua en un tanque agitado” llevada a cabo en Universidad Nacional del Centro del Perú, llegaron a las siguientes conclusiones:

“Para preparar el Ácido salicílico y Ácido Benzoico, se debe hacer uso de los EPPS ya que las partículas que se encuentran dispersas en el aire pueden generar mezclas explosivas” (Mendoza & Pérez, 2011)

“Es muy importante verificar que los platos se encuentren en buenas condiciones para que el desarrollo de la transferencia de materia se dé adecuadamente con un buen rendimiento” (Mendoza & Pérez, 2011)

“la necesidad de la instalación de un estabilizador en la corriente de alimentación con la finalidad de mantener una velocidad de forma constante (se encuentra con el eje de agitación)” (Mendoza & Pérez, 2011)

“Instalar el enchaquetado al tanque para un trabajo a distintas temperaturas” (Mendoza & Pérez, 2011)

Guzmán y Mayta (2012), en su proyecto de tesis titulada “Correlación adimensional del coeficiente de transferencia de masa de acuerdo a la temperatura para pronosticar el

tiempo en la que se disuelve el sistema ácido cítrico-agua” realizada en la Universidad Nacional del Centro del Perú, llegaron a las siguientes conclusiones:

“Se llego a establecer la relación del coeficiente de transferencia de materia de acuerdo a la temperatura para poder pronosticar el tiempo en la que se disuelve el ácido cítrico–agua” (Guzmán & Mayta, 2012)

Se desarrollo en calentamiento del tanque que posee un eje de agitación, también esta dimensionada de acuerdo al artículo Johnson,A,I. and Chen – Jung Huangois. Mass Transfer Studies in an Agitated Vessel 195 6; el material con la que esta construido es de acero inoxidable N° 304 AISI – 2 – B y también cuenta con un selector orientada a la velocidad de 100 a 500 RPM, para ser uso en la tesis de W. Mendoza y L. Pérez.

Para el coeficiente de transferencia de materia de cuerdo a la velocidad de agitación y temperatura que se llegó a plantear se calcula de la siguiente forma:

Para el sistema Ácido Cítrico – Agua:
• El promedio de k_c a la temperatura 20° C y velocidad 200 RPM es $1,42657 \times 10^{-05}$ m/s
• El promedio de k_c a la temperatura 20° C y velocidad 250 RPM es $1,58735 \times 10^{-05}$ m/s
• El promedio de k_c a la temperatura 20° C y velocidad 350 RPM es $2,81069 \times 10^{-05}$ m/s
• El promedio de k_c a la temperatura 40° C y velocidad 200 RPM es $2,19052 \times 10^{-05}$ m/s
• El promedio de k_c a la temperatura 40° C y velocidad 250 RPM es $2,47041 \times 10^{-05}$ m/s
• El promedio de k_c a la temperatura 40° C y velocidad 350 RPM es $4,40169 \times 10^{-05}$ m/s
• El promedio de k_c a la temperatura 65° C y velocidad 200 RPM es $3,30384 \times 10^{-05}$ m/s
• El promedio de k_c a la temperatura 65° C y velocidad 250 RPM es $3,86170 \times 10^{-05}$ m/s
• El promedio de k_c a la temperatura 65° C y velocidad 350 RPM es $6,68765 \times 10^{-05}$ m/s

“Los resultados que se obtuvieron en el cálculo del coeficiente de transferencia de materia se encuentra representada por $h = 0,000164621 \cdot ()^{1,2407} \cdot ()^{0,623}$ y el coeficiente que es de regresión multivariable y se encuentra representada por $R = 0,9579$ ” (Guzmán & Mayta, 2012)

En estos casos se diseñó un gráfico de la concentración del soluto vs tiempo, que se encarga de ver la proporción acerca del incremento de la concentración en el transcurso del

tiempo, con diversas velocidades de agitación, área de transferencia y temperatura, también se realizó un gráfico de la transferencia de materia vs temperatura en cuyo caso se puede apreciar que al ser mayor la temperatura, el aumento del coeficiente es lineal. (Guzmán & Mayta, 2012)

“Se la determinación de la siguiente correlación basadas en números adimensionales de manera gráfica, la cual da a conocer sobre la capa limite ($h = 0,00007003 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1,2949$) con un $R=0,9554$; estos resultados confirman con lo que se obtuvo en la correlación multivariable” (Guzmán & Mayta, 2012)

Bravo (2009), en su proyecto de investigación titulada “EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DEL FLUJO DE HIDRÓXIDO DE SODIO Y LA CONCENTRACIÓN EN LA ABSORCIÓN QUÍMICA DEL CO₂ PURO EN UNA TORRE DE RELLENO DEL LABORATORIO DE OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS DE LA FIQ” desarrollado en la Universidad Nacional del Centro del Perú, llego a las conclusiones siguientes:

La utilización del factor de reacción en la columna de relleno se realizó con la finalidad de estudiar los efectos de la concentración y el flujo de NaOH que en ello se verifico el funcionamiento verídico acerca del equipo con respecto al desarrollo del proceso. (Bravo A. , 2009)

“Se desarrollo un matemático acerca del sistema que va a estudiar incluyendo la transferencia de materia y las reacciones que se desarrollen” (Bravo A. , 2009)

“Los datos recogidos de concentración de solvente fueron en dos niveles las cuales son: 0,15 y 0,30 N y al igual los datos de velocidad alimentación fueron dos la cuales son: 0,5586 y 0,881 cm/s” (Bravo A. , 2009)

“Se demostró que la velocidad de transferencia de materia aumentaba de acuerdo a la concentración de solvente y a la interacción química” (Bravo A. , 2009)

En este caso el cambio de 1,5 y 2,5 para 0,15 *N* y 0,30 *N* de igual manera para las velocidades en este caso de la solución absorbente, se quiso que la aceleración fuera afectada por las propiedades hidrodinámicas que ofrece el sistema que se obtuvo crecimiento en la reacción 5,1 y 6,1, esto se debió a que se mantuvieron constantes las velocidades y concentraciones de la solución (Bravo A. , 2009).

Se puede apreciar que hubo un incremento en la velocidad absorción de CO_2 puro en una solución de NaOH a diferencia del aspecto físico, también la reacción tiene un factor que se encuentra entre 7,23 y 14,89, se cuantifica por medio de este, en donde dependerá de la concentración de NaOH que se utilice. Ante este tipo de reacción se logró comprobar el mecanismo de reacción instantáneo. (Bravo A. , 2009)

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Transferencia de masa

Los procesos que se desarrollan después de haber ocurrido la transferencia de los diferentes componentes de la parte interna de una determinada fase hasta finalizar la misma gracias a la transferencia de masa que le permite dar lugar a este que a continuación presentaremos desde la parte fase dos.

La transferencia de la materia es explícita en diferentes áreas ya sea tanto en la ingeniería y la ciencia.

El componente de una combinación migra estando en la misma fase o cambiando con otra fase esto lo verifica la transferencia de masa que es causada por las variaciones de las concentraciones que existe en dos puntos diferentes.

La mezcla de la sustancia líquida con el agua se ebulle en el aire que no se encuentra en movimiento, esto se debe a la diferencia que existe entre la concentración del líquido y vapor de agua, y también del aire que esta presente en el proceso. Para muchos de estos fenómenos comunes implican una transferencia de masa donde está presente la “fuerza impulsadora” que bien hacer la del aire. Una cierta cantidad de azúcar se añade a una taza de café, esta se llega a disolver y se difunde, sin ningún movimiento, en la solución que se encuentras.

En la fermentación, el oxígeno que se encuentra disuelto en mezcla o solución y al igual los nutrientes tienden a difundirse a los microorganismos. En la reacción de tipo catalítica, los reactivos tienden a difundirse de la parte media y baja a la superior en donde se desarrollará la reacción. Por ejemplo, cuando hablamos de unas acciones de cortar una madera verde recientemente sabemos que está expuesta a la acción de la atmosfera y a medida que la madera se va secando el agua se dirige de la parte interna a la superficie que se cortó y por último a atmosfera.

Cuando se basa en la transferencia de masa existen diferentes procesos de purificación. Se tiene un disolvente orgánico que separa la sal de uranio de la solución por medio de un procesamiento del uranio. Como también se hace mención que para una destilación para dar separación del alcohol y agua se requiere de la transferencia de materia. La separación de SO_2 a partir de los gases que se generan en la combustión se desarrolla mediante la absorción de la solución en este caso será líquida.

2.2.1.1 Coeficiente de transferencia de masa

El movimiento del fluido de la naturaleza prevalecerá en diferentes regiones necesariamente ya que esta se hace que de la rapidez dependa de la transferencia de materia de la sustancia que se encuentre disuelta en la solución.

En la región turbulenta, la subcapa laminar hace referencia de todo lo contrario que se espera del componente que forma parte del fluido que no se encuentra en movimiento de manera sistemática. Por otro lado, grandes cantidades de fluida se movilizan generando remolinos; también existen componentes ofrecen resistencia al movimiento del fluido. En los llamados remolinos existe la presencia de materiales que se encuentran disueltos; por este motivo la contribución de los remolinos es considerable al proceso de transferencia de materia, en la turbulencia la transferencia se desarrolla de forma rápida, puesto que el movimiento del remolino también es rápido, más que la difusión de las moléculas, los cambios de concentraciones en las zonas de turbulencia son menores debido al movimiento que se realiza de manera rápida.

La difusión tiene una velocidad menor en la mayoría de los casos y se necesita que se desarrolle rápida la transferencia. Para que sea más turbulenta la transferencia se requiere que el fluido incremente su velocidad.

En muchos casos se busca que un fluido tenga contacto con el otro que sea insoluble o también en la superficie que encuentre en la fase sólida todo esto es para que un fluido tenga un flujo convectivo. También se tiene la formación de los remolinos de un determinado fluido que se mueve de forma desordenada la cual se le conocen como movimientos turbulentos donde sus corrientes no son rectas.

Si el soluto A se llega a disolver en la parte externa, la concentración es mayor del mismo fluido, y mayormente en estos casos se hace menor la concentración según va aumentando la distancia con la pared. Pero no siempre tienen concentraciones parecidas para las cantidades bajas de porciones de fluido adyacentes.

Del coeficiente de transferencia de masa veremos las medidas experimentales realizados.

Se realizó estudios experimentales en dispositivos para el coeficiente k , en donde el área de contacto de las fases fue conocida y en donde se desarrolla la separación de la capa limitante. La columna que se encuentra con la pared mojada mostrada en la figura 1, como práctica es necesaria y a veces es utilizada, ya por el diseño de este equipo. Se sabe que por el fondo de la torre se hace ingreso el gas que fluye recorre en contra del líquido, y este también se puede realizar la operación en paralelo. Pero si en la columna que tiene una pared y esta mojada se conoce como área de superficie A , con excepción que muestra alguna complicación como que no hay fricción de forma dadas a por la información de ondulaciones.

Se ha utilizado materiales como el tubo que estaba realizada a partir de un sólido poco miscible y calculando las velocidades de disolución de la fase sólida con las distintas velocidades del líquido. Para lo mencionado se estudió la transferencia del material de la fase líquida con una turbulencia en la parte interna del tubo. Haciendo menciones de una técnica alternativa que consiste en poner una parte como electrodo y realizar una reducción electroquímica de la pared del tubo con la finalidad de limitar la velocidad de la corriente para de transferencia de iones desarrollada en la pared.

La difusión que se realiza con dirección a las partículas y a la parte exterior del accesorio del equipo de transferencia esto se debe a que existe una capa en la parte superior, requiere correlaciones diferentes de la transferencia de materia interna. El estudio de la ebullición de fase líquida por medio de los poros sólidos mojados es para determinar el coeficiente de transferencia. Sin embargo, la resistencia de la transferencia interna no resultaría asegurar que no habría efectos. También existe una variedad de métodos que permite determinar los coeficientes en este caso de transferencia.

Finalmente, mediante los equipos que existen en la industria como son las columnas de burbujas, empacadas y platos con perforaciones, en donde existe una variación el área de transferencia a causa de las concentraciones propias de la operación se ha realizado experimentos de transferencia de masa. Aquí se desarrolla una conversión primeramente en el coeficiente de volumen a la velocidad de transferencia. En diferente caso estos se determinan mediante fotografías. En la mayoría de los casos las resistencias de las fases se desprecian, ya que los casos están presentes en fases fluidas. Cabe resaltar que se elimina la resistencia de la película gracias a la separación de un gas que se encuentra puro en agua esto permite estudiar al coeficiente de película de la fase líquida.

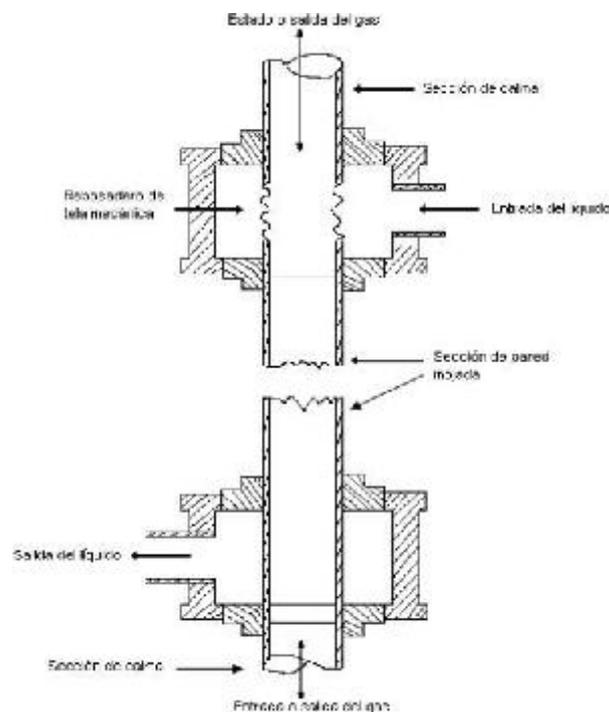


Figura 1: Columna con la pared mojada.

El comportamiento de coeficiente de transferencia, tienen distintas maneras que lo intentan explicar como en los siguientes puntos:

2.2.1.2 Teoría de transferencia de masa

Cuando no exista movimiento del fluido en la película que se encuentra estable, en la transferencia de masa se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$N_A = J_A = \frac{D_{AB} \rho_M}{B_T} (y_{Ai} - y_A) \quad (1.16)$$

ó

$$N_A = \frac{D_{AB} \rho_M}{B_T} \ln \frac{1 - y_A}{1 - y_{Ai}} \quad (1.17)$$

En la transferencia de masa, se puede predecir su velocidad siempre en cuando, siempre que conozca B_T . Es muy importante un flujo con turbulencia para incrementar la velocidad de la transferencia, sin embargo, no es una situación frecuente como lo se puede observar en lo descrito; Además, existe un cambio de concentraciones y de la misma manera para las velocidades de transferencia, porque se sabe que la transferencia se desarrolla de manera frecuente a la superficie del fluido. A pesar de estas diferencias, el coeficiente que definiremos será la velocidad de transferencia la cual está basado en flujo molar la cual también esta referenciada con el *coeficiente de transferencia de material* (k_c):

$$k_c = \frac{J_A}{C_{Ai} - C_A} \quad (1.18)$$

ó

$$k_y = \frac{J_A}{y_{Ai} - y_A} \quad (1.19)$$

Se presenta unidades de velocidad como metros por segundo o centímetros por segundo, puesto que a esto se debe que k_c es la densidad del flujo moles y se encuentra dividida con la frecuencia de las concentraciones.

$$k_c = \frac{\text{mol}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mol} / \text{cm}^3} = \text{cm} / \text{s}$$

Para las unidades que se requiere de J_A van a ser de las mismas unidades de k_y o k_c , mol por área sobre tiempo, ya que es la misma como fuerza de impulso del fraccionamiento de las moles. Aquí se puede notar que k_c y k_y se encuentran relacionadas con la densidad molar de acuerdo a la expresión que se muestra a continuación:

$$k_y = k_c \rho_M = \frac{k_c P}{RT} \quad (1.20)$$

$$k_x = k_c \rho_M = \frac{k_c P_x}{M} \quad (1.21)$$

En este caso se denota k_g a los diferentes coeficientes gaseosos, en donde esta orientadas en la fuerza impulso de la presión individual del componente.

$$k_B = \frac{J_A}{P_{A_i} - P_A} \quad (1.22)$$

Por lo tanto:

$$k_B = \frac{k_y}{P} = \frac{k_c}{RT} \quad (1.23)$$

El significado de k_c se da a conocer combinado la ecuación $J_A = -(D_{AB} + \epsilon_N) \frac{dc}{db}$ con

la siguiente $N_A = J_A = \frac{D_{AB}}{B_T} (c_{A_i} - c_A)$ para determinar la difusión molecular de un estado estable en una película sin movimiento, esto genera el resultado:

$$k_c = \frac{J_A}{c_{A_i} - c_A} = \frac{D_{AB} (c_{A_i} - c_A)}{B_T} \frac{1}{c_{A_i} - c_A} = \frac{D_{AB}}{B_T} \quad (1.24)$$

Por ello, el coeficiente k_c es similar a la difusión molecular que se encuentra dividida por el espesor que tiene la película. Se puede utilizar la ecuación ec. (1.21) para determinar

el espesor adecuado de la película en base a los valores de D_{AB} y k_c ; cuando la difusión se encuentra en un estado estable o en movimiento.

2.2.1.2.1 Teoría de película

La diferencia de $c_A - c_{Ai}$ que viene a hacer la fuerza de impulso, desde c_A ; donde c_A tiene como valor mayor en la parte central del tubo y la cual no usa para el cálculo de transferencia. Para ello la concentración que se obtenga ser de acuerdo a cuan mezclada esta el fluido. Todo lo mencionado para esta concentración calcula que tendrá el flujo, también será utilizado para el cálculo de balance de materia. (Se usará una temperatura regular que viene dada por h , este es un valor análogo la cual será utilizado en la transferencia térmica).

Si es lineal el cambio que existe en la pared, se extrapola hasta c_A , por lo general cuando están más cercas a la pared, y B_T es poco superior al espesor que tiene la capa, el valor de B_T dependería de la difusividad D_{AB} , por llevarse a cabo un distanciamiento de la pared y no como se debería por las variables de flujo tanto como el valor de B_T y número de Reynolds estos son muy diferentes a los valores reales de espesor de la capa, solamente porque el espesor de la película se útil.

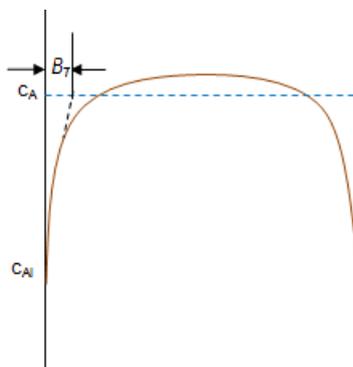


Figura 2: Cambios de concentraciones en la transferencia de materia en un accesorio con un flujo de turbulencia de la fase gas.

2.2.1.2.2 Teoría de capa límite

En la transferencia de la materia existe una capa limitante la cual es delgada en donde el flujo es laminar, aunque existan algunas difusiones que se desarrollan por las películas de un fluido que es estancada. La resolución de ecuaciones de difusión y flujo se desarrolla con el objetivo de determinar el cambio de concentraciones y el coeficiente de transferencia media, si el cambio de velocidad es lineal entonces la velocidad en la superficie es igual a cero. Al incrementar la distancia en la parte superior el coeficiente tendrá que depender de la potencia de la difusión, es por esto que se incrementó la distancia.

Se puede afirmar que la velocidad es lineal en la parte superior, la variación se va reduciendo cuando la velocidad esta próxima a la corriente principal en la parte externa, esto hace referencia al flujo del cilindro, placa y una esfera la cual esta relacionado a lo mencionado. El números de Schmidt en donde los valores sean próximos al 1, las cuales son para los gases, se da a conocer que un cálculo preciso genera una variación en la transferencia de materia con $D^{2/3}$ si D_{AB} es menor o el número de Schmidt / D_{AB} sea 1.0, o mucho más, con esto habrá una variación del coeficiente con una potencial menor de D_{AB} , si la potencial de difusión es de 1,0 entonces con este valor no se puede aumentar la velocidad de transferencia, así como se menciona en la teoría de película, ya para los flujos que tengan que ver con la capa límite, no se toma en cuenta las velocidades y ni las propiedades. Con ello ya podemos decir que con esta teoría podemos aplicar en la estimación de k_C en las situaciones existentes, hay casos que se dan que cuando la capa límite tiene una turbulencia o se genera la separación, la estimación de k_C se vuelven dificultosas, por se puede mencionar que esta teoría sirve para realizar correlaciones experimentales. Las correlaciones desarrolladas en el caso de la transferencia térmica se puedan usar para transferencia de materia, con esto se puede mencionar que es la analogía de las transferencias de calor y materia en esta teoría la cual

está permitido, a continuación se muestra el coeficiente promedio de la transferencia de materia de la capa limitante en una placa que tiene una superficie plana:

$$Nu = 0,664 \sqrt[3]{Pr} \sqrt{Re_{x_1}} \quad (1.25)$$

Luego reemplazando Pr por Sc y Nu por Sh, obtenemos:

$$Sh = \frac{k_c D_T}{D_{AB}} = 0,664 (Sc)^{1/3} (Re_b)^{1/2} \quad (1.26)$$

En la que:

b : longitud total de la placa.

2.2.1.2.3 Teoría de penetración

Cuando la velocidad de difusión no se mantiene constante en una materia de fluido grueso con una concentración estable en la parte superior, la teoría de la penetración lo utiliza como una expresión. La segunda ley de Fick está basada en la concentración y tiempo.

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial b^2} \quad (1.27)$$

Las condiciones limite son:

$$C_A = \begin{cases} C_{A0} & \text{para } t = 0 \\ C_{Ai} & \text{en } b = 0, t > 0 \end{cases}$$

La transferencia térmica en un régimen no estacionario en un material sólido ya que en este caso la solución particular de la ecuación es regida por la segunda ley de fick (1.27) es la misma, la ecuación del sólido semiinfinito viene dada de la siguiente manera.

$$J_A = \sqrt{\frac{D_{AB}}{\pi t_T}} (C_{Ai} - C_A) \quad (1.28)$$

Aquí se presenta el flux medio para un rango de tiempo de 0 y t_T es:

$$\bar{J}_A = \frac{1}{t_T} \int_0^{t_T} J_A dt = \frac{c_{A1} - c_A}{t_T} \sqrt{\frac{D_{AB}}{\pi}} \int_0^{t_T} \frac{dt}{t^{1/2}} = 2 \sqrt{\frac{D_{AB}}{\pi t_T}} (c_{A1} - c_A) \quad (1.29)$$

Obtendremos el coeficiente transferencia media en un tiempo t_T , al combinar las ecuaciones (1.18) y (1.29).

$$\bar{k}_c = 2 \sqrt{\frac{D_{AB}}{\pi t_T}} = 1,13 \sqrt{\frac{D_{AB}}{t_T}} \quad (1.30)$$

Fue demostrado, que la difusión de las moléculas no llega alcanzar a la otra capa cuando el tiempo es menor, gracias a Higbie que uno de los primeros en haber aplicado la ecuación la ecuación para el proceso de la absorción de gas en la fase líquido. La penetración tiene una profundidad que está definida como la variación de la concentración en 1% en determinada distancia, es $3,6 \sqrt{D_{AB} t_T}$. Para $D_{AB} = 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ y $t_T = 10\text{s}$, el valor obtenido de la penetración es de 0,036 cm. La poca vida que tiene las burbujas y gotas, esto se debe a la coalescencia por los equipos de absorción de gases y por ello es viable su aplicación de esta teoría.

Existe aparte donde los componentes de un fluido ubicados en la parte superficial de la transferencia son cambiados de manera aleatoria por otros componentes que viene de la corriente la cual es l global, esta alternativa de la teoría de penetración fue dada por Danckwerts, que de esta forma esta teoría tiene la forma exponencial de tiempo en la que se desarrolla el contacto, y en donde el coeficiente de transferencia media está dado por la siguiente:

$$\bar{k}_c = \sqrt{D_{AB} s} \quad (1.31)$$

En la cual:

s : es velocidad fraccionada del cambio de la superficie, en s^{-1} .

Las ec. (1.30) y (1.31) predicen que los coeficientes cambiaran a la mitad de potencia de difusión y conducen al valor similar en un tiempo regular de contacto. En un punto de vista distinta se da a conocer que el remolino generado por el fluido global, penetra distintas superficies, es se debe a un punto de vista ya modificada de esta teoría. Con ello se dice que se manejan potencias no muy altas de lo regular para la difusión, esto quiere dar a conocer que esta teoría es aplicable en la transferencia de materia con dirección a la pared de los dispositivos o superficies que son planas de la masa de la fase líquida.

La clasificación como modelos de renovación superficial son por las diversas teorías que existen como la de penetración y que a esto se implica la generación de una superficie nueva dependiente del tiempo, y en estos tipos de casos es poco probable predecirse con exactitud en unos cuantos casos. La renovación de modelos superficiales se da aun cuando t_T se determina en forma empírica.

2.2.1.2.4 Teoría de doble película

En la gran mayoría de los procesos que consiste la separación, en donde alguno de los componentes de una fase pasa formar parte de la otra fase de acuerdo a la solubilidad que existe entre estas dos fases, en este proceso tiene mucha influencia la velocidad con la que se difunden estos materiales. En esta teoría se da a conocer que en el contacto se en equilibrio y es ahí donde se desarrolla la transferencia de masa como también la de calor entre las dos fases. Lo opuesto del coeficiente global es la resistencia global, el coeficiente es mucho más sencillo de utilizarlo a la hora de calcular los coeficientes de diseño.

De acuerdo con esta teoría se puede mencionar que la velocidad con la se realiza el contacto es igual a la velocidad con la que se desarrolla la transferencia:

$$r = k_x(x_A - x_{Ai}) \quad (1.32)$$

$$r = k_y(y_A - y_{Ai}) \quad (1.33)$$

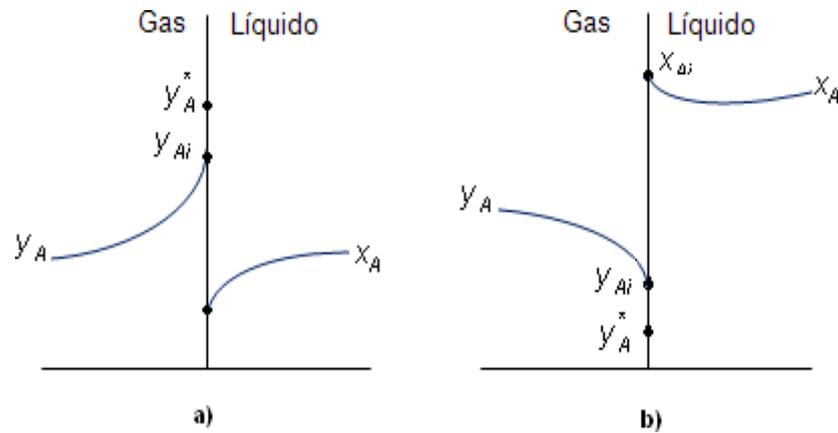


Figura 3: Cambio de concentración de los componentes líquido-gaseoso al estar en contacto:

a) en la destilación; b) en la absorción del gas.

Se puede mencionar que la velocidad es igual al coeficiente global k_y debido a la fuerza de impulso global $y_A^* - y_A$, donde y_A^* viene a ser la cantidad de vapor que se encuentra en equilibrio con la otra fase que es líquido x_A :

$$r = k_y(y_A^* - y_A) \quad (1.34)$$

Para expresar k_y en función de k_x y k_y se reordena la ecuación (1.34) y el término

$y_A^* - y_A$, se sustituye por $(y_A^* - y_{Ai}) + (y_{Ai} - y_A)$:

$$\frac{1}{k_y} = \frac{y_A^* - y_A}{r} = \frac{y_A^* - y_{Ai}}{r} + \frac{y_{Ai} - y_A}{r} \quad (1.35)$$

Para la sustitución de r de la ec. (1.35) se hará uso de las ec. (1.32) y (1.33)

$$\frac{1}{k_y} = \frac{y_A^* - y_{Ai}}{k_x(x_A - x_{Ai})} + \frac{y_{Ai} - y_A}{k_y(y_{Ai} - y_A)} \quad (1.36)$$

La pendiente es m , por lo tanto la ecuación es la siguiente:

$$\frac{1}{k_y} = \frac{m}{k_x} + \frac{1}{k_y} \quad (1.37)$$

Donde:

- $1/k_y$ (resistencia global).
- m/k_x y $1/k_y$ (resistencia de la película)

Para la aplicación de la teoría de doble película, no tiene nada que ver que sean capas de cierto espesor. En las dos películas la transferencia de masa se puede desarrollar mediante la difusión por medio de la capa límite laminar y por medio de la ec. (1.37) se calcula el coeficiente global.

El método que es empleado para el análisis de los datos de laboratorio y para el diseño de los diversos equipos que tienen como función desarrollar la transferencia de masa. Es este método que también se emplea en la teoría de la doble película en donde permite que el soluto combine su coeficiente con el disolvente en el contacto para generar el coeficiente global.

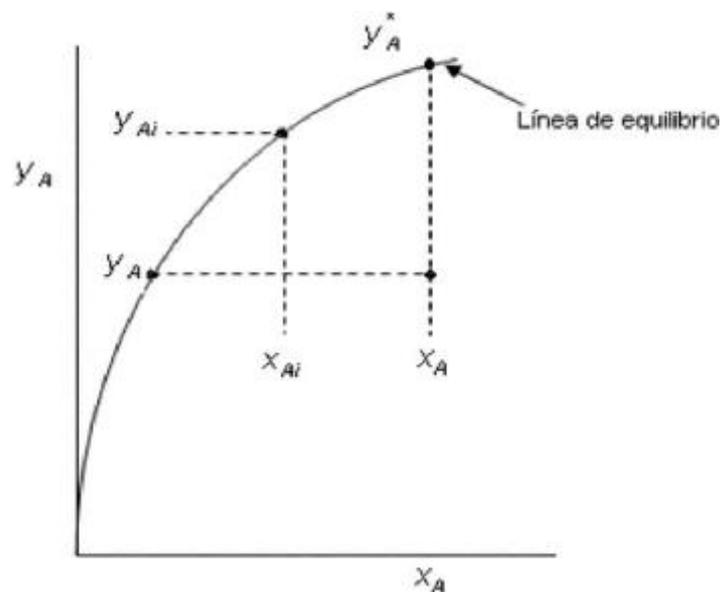


Figura 4: Coeficientes globales y de superficies de contacto en la destilación.

2.2.2 Absorción de gases

En esta etapa se desarrolla la transferencia de masa, que viene a ser la separación de algunos componentes gaseosos (solutos) por medio del líquido que viene a ser el disolvente. Es decir, alguno de los componentes del gas pasa a formar parte del líquido. En este proceso existe la difusión de las moléculas gaseosas, en donde algunos componentes que tienen las mismas características pasan a formar parte de líquido. En esto también tiene que ver lo soluble que son los componentes gaseosos con el disolvente.

La desorción o también llamada empobrecimiento es el proceso contrario de la absorción, la transferencia de materia se realiza desde la fase gaseosa.

También existe la deshumidificación, esto consiste en extraer el vapor de agua que se encuentra en el aire.

La verificación isotérmica se debe a que la gran parte de la desorción y la absorción está relacionada con la parte térmica.

Esta etapa se puede dar de dos formas:

Absorción física: en esta operación no se desarrolla ningún tipo de reacción química, los disolventes que se usan en esta operación es el hidrocarburo y agua.

Absorción química: en este tipo de absorción es donde necesariamente va haber una reacción química en el líquido, esto hará que la velocidad de transferencia incremente. Esto es muy importante cuando se requiere retirar componentes que son peligrosos en una corriente de gas.

2.2.3 Proceso de absorción

Este proceso normalmente se desarrolla en las columnas o torres de absorción que tiene la forma cilíndrica, está constituida de una corriente de entrada por la cual ingresa el

gas, esta se encuentra en la parte inferior del equipo, al igual tiene una corriente de salida del gas en la parte superior del equipo, el líquido ingresa por la parte superior y sale por parte inferior del equipo. Los equipos que contienen empaques son conocidos como torres de relleno.

Mecanismo de proceso de absorción

- La entrada del líquido, que puede ser disolvente puro o una disolución diluida del soluto en el disolvente, recibe el nombre de líquido a lado.
- Se distribuye sobre la parte superior del relleno mediante un distribuidor y, en la operación ideal, moja uniformemente la superficie del relleno.
- El gas que contiene el soluto, o gas rico, entra en el espacio de distribución situado debajo del relleno y asciende a través de los intersticios del relleno en contracorriente con el flujo de líquidos. El relleno proporciona una gran área de contacto entre el líquido y el gas, que favorece un íntimo contacto entre las fases.

Normalmente el soluto se encuentra en el gas la cual es transferida al líquido todo esto ocurre en la torre, el gas que no contiene el componente valioso abandona por una corriente que se encuentra en la parte superior del equipo. Una vez desarrollada la transferencia de masa el líquido es rico en soluto y desciende por el interior de la columna hasta llegar al fondo, en donde es retirado por una corriente.

2.2.4 Aplicaciones de la absorción

Este tipo de proceso es empleado con la finalidad de separar componentes no deseados, esto de acuerdo a las especificaciones del producto final. También las pequeñas cantidades de sustancias llegan afectar las propiedades del producto final, es por eso que se le debe tomar en cuenta.

También se emplea para separar componentes peligrosos del gas, esto se puede presentar por ejemplo en la combustión.

Entre otras aplicaciones que se le pueden dar también pueden ser para la eliminación de olores, como también humos y otros componentes peligrosos. Si se desea obtener un

producto gaseoso, entonces se puede hacer el uso de este proceso para la separación de otros componentes no deseados.

2.2.5 Elección del disolvente para la absorción

Si se requiere o se busca obtener una solución específica, entonces esto se puede realizar mediante la absorción, la elección del disolvente se desarrolla de acuerdo a las características del producto que se quiere obtener. Si requiere eliminar algunos de los componentes gaseosos existen disolventes que tienen esta función, el disolvente más accesible y completo es el agua.

2.2.6 Equipos utilizados para la absorción de gases

Entre los equipos que se utilizan con normalidad son:

- Columna de platos: En donde el contacto es discontinuo o también llamado por etapas.
- Columna de relleno: El contacto se desarrolla de manera continua.

En estos dos equipos se hace uso de la fuerza de la gravedad para que pueda circular el líquido.

2.2.7 Solubilidad de gases en líquidos en el equilibrio

Transferencia de algunos componentes gaseoso a la fase líquida (absorbente) esto dependerá del desvío que pueda haber en el equilibrio; por ello es muy importante tener en cuenta las características que presenta el equilibrio gas-líquido.

2.2.8 Sistemas de dos componentes

La cantidad de un líquido no volátil y un gas de baja calidad son llevados al Equilibrio, en donde el gas se disuelve en el líquido, por ello es conocido como la solubilidad

gaseosa a presión y temperatura dada. En una determinada temperatura la solubilidad incrementara según la presión.

Las solubilidades en el gas y líquido tienen distintas curvas solubilidad, estas se determinan a partir de los experimentos. En el equilibrio la presión es elevada de una determinada concentración de un líquido, también se da a conocer que el gas es emisible con respecto al líquido; pero no siempre llega a suceder, debido a que también se puede obtener una concentración de gas final en un líquido cuando la presión es la requerida y el gas es miscible con el líquido.

2.2.9 Soluciones líquidas ideales

Se considera ideal cuando no se necesita calcular mediante un experimento la presión parcial del gas en una solución.

características específicas de una solución ideal	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Las fuerzas intermoleculares promedio de atracción y repulsión en la solución no cambian al mezclar los componentes. ▪ El volumen de la solución varía linealmente con la composición. ▪ No hay absorción ni evolución de calor al mezclar los componentes. Sin embargo, en el caso de gases que se disuelven en líquidos, este criterio no incluye el calor de condensación del gas al estado líquido. ▪ La presión total de vapor de la solución varía linealmente con la composición expresada en fracción mol. 	

2.2.10 Soluciones líquidas no ideales

Tiene un comportamiento distinto a la solución ideal, entre las diferencias que se encuentran mediante la observación son:

Diferencia de S. Real e Ideal	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cuando un soluto es adicionado al solvente, la temperatura de la solución resultante se debe incrementar o disminuir. ▪ Hay cambios en entropía y entalpía. 	

También se debe tener en cuenta que los volúmenes de los componentes no se le debe sumar cuando se realiza una mezcla, ya que esto no dará un resultado igual a la suma de volúmenes.

2.2.11 Operación a contracorriente en varias etapas transferencia de un componente

El paso en contracorriente permite el contacto del gas y líquido, tiene un mecanismo en forma de cascada que se desarrolla a contracorriente en las diversas etapas. Esto sucede en cada plato en donde existe una interacción química del gas y el líquido, cada etapa se desarrolla en un plato. En donde se desarrolla de forma paralela en cada plato. Para que el funcionamiento sea adecuado de los platos se requiere realizar un diseño y medición de estos, muy aparte del método que se use para la operación, el plato ya sea real o teórico está definida como la composición gaseosa que llega abandonar un plato que se encuentra en equilibrio con el líquido.

2.2.12 Determinación gráfica de etapas ideales

El uso del método gráfico de McCabe-Thiele permite tener una facilidad de determinar los platos teóricos, con este método se grafica las coordenadas v/s o Y v/s X , la curva de equilibrio y la línea de operación. La cantidad de escalones vienen ser los platos teóricos.

2.2.13 Eficiencia y etapas reales

En el desarrollo real de la operación no se llega al equilibrio en los platos, es por ello que es difícil tener una eficiencia máxima en la situación de equilibrio. El diseño y la condición de la operación es muy importante para obtener una buena eficiencia, y para ello existe métodos como el semiempíricos.

2.2.14 Mezclas diluidas de gases

En casos cuando son rectas tanto la curva de equilibrio como también la línea de operación, la cantidad de platos puede ser calculada sin hacer uso de los métodos gráficos. Eso sucede cuando los líquidos y gases son relativamente mezclados. En la mayoría de las veces en las soluciones diluidas se hace uso de la ley de Henry. Si se absorbe una pequeña cantidad el gas, en flujo de entrada y salida del líquido en la torre de absorción es constante; de la misma manera el flujo de gas total es constante. Es por ello que la línea de operación es recta y se encuentra en función de la fracción molar. En esta situación se hacen uso de las ecuaciones de Kremser.

Principales equipos de absorción

Entre los equipos que se utilizan transferir componentes gaseosos a la líquida, se encuentran la columna de platos que se pueden encontrar perforadas y con tapón, las torres de relleno que normalmente se encuentran con empaques sólidos, la cámara vacía, en donde en el interior de ella se rocía el líquido, torre con paredes húmedas. En la mayoría de las veces en líquido y el gas se les pone en contacto corrientes con el objetivo de mejorar el rendimiento de la operación de absorción. Entre los mencionados los más importantes en la industria, son:

La Torre empacada y de Platos

Torres de Platos. (Universitat Politècnica de Catalunya, 2012)

Esto generalmente se puede observar en la absorción de gases, rectificación y la desorción, todo esto se desarrolla en las columnas que tiene la isma apariencia con una columna de absorción empacada. Tiene un diseño cilíndrico y se encuentra de forma vertical. La parte interna esta constituidas por las bandejas y los platos. La finalidad que tiene los platos es de generar el mayor contacto entre las fases tanto líquida como gaseosa.

Los objetos que se encuentran dentro de la columna como son las bandejas y los platos tiene la función de que las fases líquidas y gaseosas se pongan en contacto con corrientes opuestas. El intercambio químico genera un cambio de concentración.

Para diseñar la columna de platos es necesario desarrollar cálculos para determinar el número de platos ideales, así obtener la concentración adecuada mediante la absorción de gases.

Características de aplicación de la columna de platos
<ul style="list-style-type: none"> • Tienen un contacto discontinuo con el gas. • Gran diámetro del gas. • Se utilizan cuando hay sólidos en suspensión. • Se aplica en los casos que pueda haber cambios bruscos de temperatura. • Se utilizan cuando de debe trabajar con presiones elevadas.

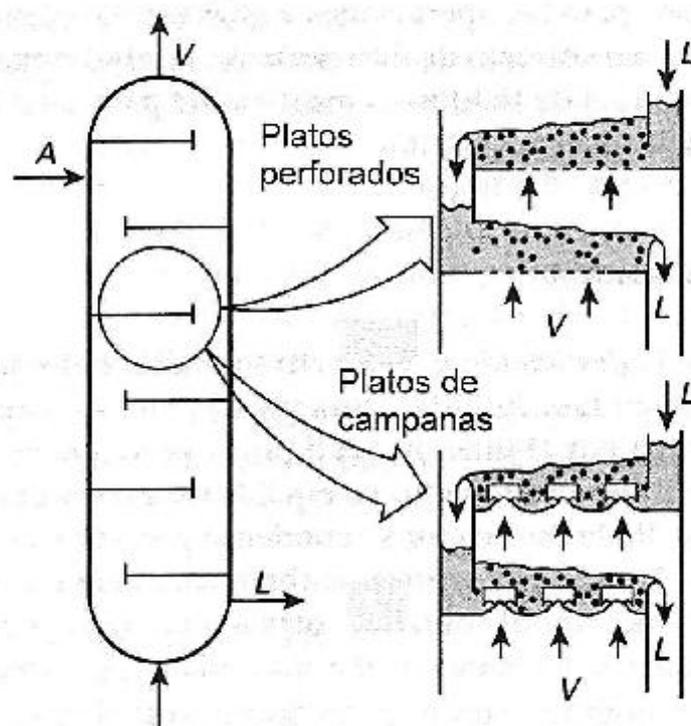


Figura 5: Esquema de una torre de absorción de platos

Torres Contactoras Empacadas

Estos equipos son empleados para poner en contacto al líquido y gas, también se ve en las operaciones de absorción.

Las columnas empacadas están constituidas por material sólido de manera aleatoria y en otros casos se le puede añadir con mucho cuidado en sus respectivos lugares. A diferencia de la columna de platos este dispositivo es mucho más simple. En el mercado existe una gran cantidad de estos equipos y cada una de ellas tiene distintas ventajas en la interacción química del líquido-gas, esto se debe por la caída de presión, costo del equipo, etc.

Características del empaque de la torre
<ul style="list-style-type: none"> • Proporcionar una superficie interfacial grande entre el líquido y el gas. La Superficie del empaque por unidad de volumen de espacio empacado debe ser grande. • Ser químicamente inerte con respecto a los fluidos que se están procesando. • Ser estructuralmente fuerte para permitir el fácil manejo y la instalación. • Tener bajo precio

a. Empaques al azar

se considera como empaque al azar cuando esta introducida a la torre de manera aleatoria. Anteriormente se hacía uso de materiales que se obtenían con gran facilidad, entre ellos se encuentra la grava, trozos de coque, piedra, pero las desventajas que presentan estos materiales son menor contacto y un mal flujo. En la actualidad estos materiales se elaboran y entre los más conocidos se presenta en la figura 4. Estos empaques también son elaborados a partir de la porcelana industrial, ya que facilita el contacto de la gran parte de los líquidos. Algunos empaques se deterioran fácilmente a mayores temperaturas, es por ello que la selección de los empaques se debe hacer con sumo cuidado. Los materiales de empaque que tienen la forma de hoja ofrecen mayor contacto.

b. Empaques regulares

Estos equipos tienen la ventaja de que la operación se desarrolla con la menor caída de presión de gas y un mayor flujo, la instalación de los empaques es más costosa que añadir aleatoriamente los empaques.



Figura 6: Tipos de empaque. (Alonso Jaques, 2010)

Principales Elementos Constituyentes de la torre empacada:

- Distribuidores de líquido
- Empaque
- Retenedores de empaque
- Sistemas de alimentación
- Soportes de empaque
- Eliminadores de arrastre
- Colectores de líquido

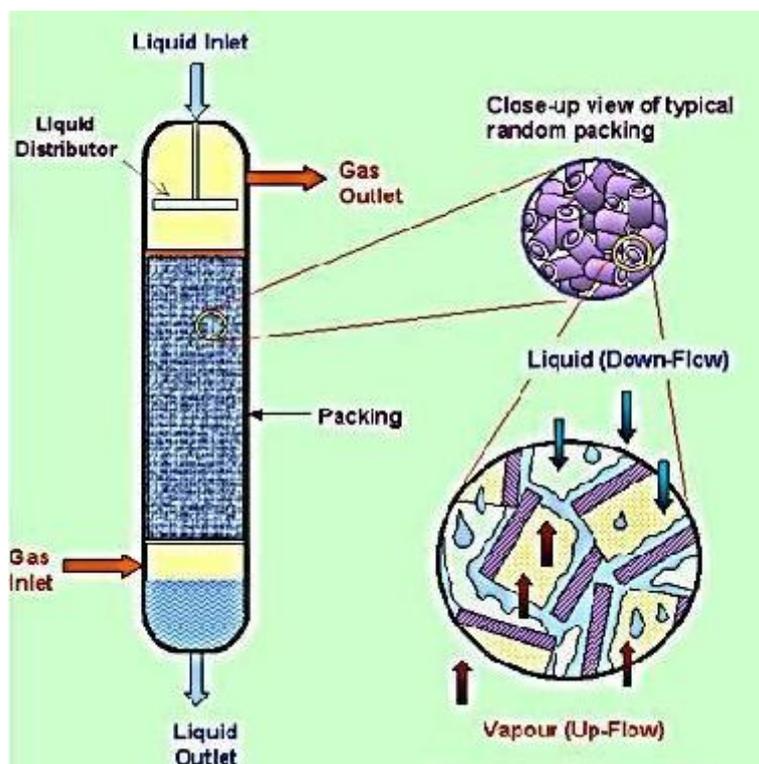


Figura 7: Torre empacada y sus constituyentes. (Alonso Jaques, 2010)

SELECCIÓN DE EQUIPO.

(Treybal, R. E., 1967) Para seleccionar un tipo de columna, entre otros, se aplican los criterios siguientes:

Criterios para la selección de una columna

- Caída de presión de gas.
- Retención del líquido.
- Retención liquido-gas.
- Enfriamiento del líquido.
- Corrientes laterales.
- Sistemas espumantes.
- Corrosión.
- Presencia de sólidos.
- Limpieza.
- Fluctuaciones de temperatura.
- Carga sobre la base y costo

Por sentido común, se seleccionan las columnas empacadas para líquidos que producen mucha espuma, para materiales muy corrosivos, para sistemas que requieren una caída muy baja de presión o una baja retención de líquido, así como para las operaciones a pequeña escala que requieren diámetros menores a 0,6m.

El diseño técnico del equipo de absorción de gas debe basarse en la aplicación adecuada de los principios de difusión, equilibrio y transferencia de masa. La finalidad del diseño del equipo es lograr un contacto íntimo del gas con el líquido, proporcionando un área grande de intercambio y reduciendo al mínimo la resistencia. Este contacto de fases se realiza en diferentes tipos de equipo, los más importantes de los cuales son las columnas de platos y las torres empacadas. La selección entre ambas depende de varios criterios, arriba enunciados. Por ejemplo, si en un sistema se originan altas caídas de presión a través de la columna, con el consiguiente costo de compresión significativo, es preferible seleccionar una torre empacada sobre la de platos, ya que la caída de presión que origina es menor.

DIÁMETRO DE LA COLUMNA Y CAÍDA DE PRESIÓN.

(PERRY Robert H., et al., 2008)

Para torres empacadas, es la inundación la que determina el diámetro mínimo posible. Por lo general, se diseña para un 50 a 70% de la velocidad de inundación. La caída de presión en la inundación para los empaques comúnmente empleados es de aproximadamente 0,167 m H₂O/m empaque (2 pulg H₂O/pie empaque). Para una operación a aproximadamente 50% de la inundación, la caída de presión es de alrededor de 0,042 m H₂O/m (0,5 pulg H₂O/pie), mientras a 70% de inundación, la caída de presión es de 0,083 m H₂O/m (1,0 pulg H₂O/pie).

Es importante señalar que las torres empacadas no deben diseñarse para caídas de presión superiores a 1,0 pulg H₂O/pie, ya que se corre el riesgo inundar la torre con incrementos pequeños de la velocidad de diseño de la alimentación del gas.

Para las torres empacadas, se cuenta con correlaciones dependientes del tipo de empaque, datos de operación y propiedades físicas de los constituyentes, con los que se estima la caída de presión a lo largo del empaque; para columnas de platos, se calcula la caída de presión por plato y se multiplica por el número de platos.

CALCULO DE LA ALTURA DE LA TORRE.

(PERRY Robert H., et al., 2008)

La altura requerida de una columna de absorción de gases, depende de los factores siguientes:

Los equilibrios termodinámicos incluidos

El grado especificado de eliminación del soluto del gas

La Eficiencia de transferencia de masa del equipo

Los dos primeros puntos determinan las unidades de transferencia requeridas en las torres empacadas, o el número de etapas teóricas para las torres de platos, El tercer punto se obtiene con base en la altura de una unidad de transferencia, en las torres empacadas, o con base en la eficiencia el espaciamiento de las bandejas, en las torres de platos.

BALANCE DE MATERIA.

A continuación se presenta la figura, en donde se puede apreciar una torre con corriente opuestas con el objetivo de que el líquido y el gas estén en contacto. La corriente

del gas está compuesta del soluto que se va difundir de abajo hacia arriba y también el gas que no se va difundir, G' moles/tiempo-unidad de área.

De acuerdo a lo expresado, el balance de masa en un elemento diferencial de altura de la torre empacada con las definiciones comunes siguientes, es:

G' = Moles por unidad de tiempo y unidad de área del componente inerte en la fase gaseosa. Es constante a lo largo de la torre.

Y' = Moles del componente que se transfiere/moles del componente inerte.

L' = Moles por unidad de tiempo y unidad de área del componente inerte en la fase líquida. Es constante a lo largo de la torre.

X' = Moles del componente que se transfiere/moles del componente inerte.

G = Moles por unidad de tiempo y unidad de área de la fase gaseosa.

y = Fracción molar del soluto, componente que se transfiere, en la fase gaseosa.

L = Moles por unidad de tiempo y unidad de área de la fase líquida.

x = Fracción molar del soluto en la fase líquida.

$$G = G' (1 + Y') \quad L = L' (1 + X')$$

$$G' = G (1 - y) \quad L' = L (1 - x)$$

$$Y' = \frac{y}{1 - y} \quad y = \frac{Y'}{1 + Y'}$$

La Figura N° 6: representa la torre de absorción considerada.

Donde:

A_i = Área interfacial.

dA = Elemento diferencial de área interfacial.

dz = Elemento diferencial de altura de torre.

a = Área interfacial/unidad de volumen de torre.

A = Área de sección transversal de la torre.

Z = Altura de la torre.

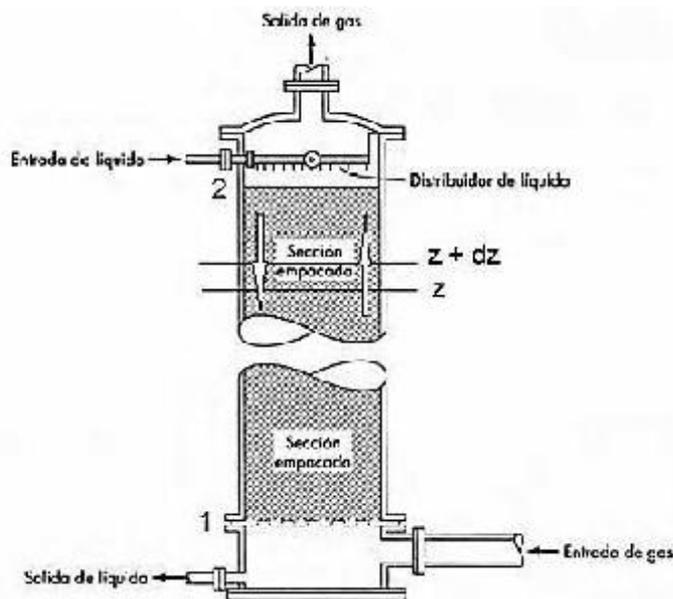


Figura 8: Torre Empacada

Para a y A constantes.

$$d(A_i) = a A dz$$

Para el elemento diferencial de altura dz , el balance total se expresa por:

$$d(L) = -d(G)$$

El componente que se absorbe, el soluto, en el elemento diferencial por unidad de área se expresa por:

$$d(N_A)/A = -d(G \cdot y) = -d(G'(1+Y') \cdot \frac{Y'}{(1+Y')}) = -d(G'Y') = -G' \cdot d(Y')$$

$$d(Y') = \frac{dy}{(1-y)^2} \quad -G' \frac{dy}{(1-y)^2} = k_y a (y_{AG} - y_{Ai}) dz$$

$$-G(1-y) \frac{dy}{(1-y)^2} = k_y a (y_{AG} - y_{Ai}) dz$$

$$-G \frac{dy}{(1-y)} = k_y a (y_{AG} - y_{Ai}) dz$$

$$dz = - \frac{G dy_{AG}}{k_y a (y_{AG} - y_{Ai}) (1 - y_{AG})}$$

Observe que la integral es negativa puesto que la concentración del gas disminuye desde el fondo al tope de la torre.

El punto 1 representa el fondo de la torre, la entrada del gas de composición, y_{AG1}

El punto 2 representa el tope de la torre de composición, y_{AG2}

$$\int_0^z dz = - \int_1^2 \frac{G dy_{AG}}{k_y a (y_{AG} - y_{Ai}) (1 - y_{AG})}$$

La relación (/), se considera constante, si el término $(1 - y_{AG})$ que representa la fracción molar del componente inerte en la fase gaseosa en un sistema binario, se sustituye por la media logarítmica $(1 - y_{AG})_{\log}$. Si la concentración del soluto varía mucho de un extremo a otro de la torre, el término $k_y a (1 - y_{AG})_{\log}$ se puede considerar constante.

$$\int_0^z dz = - \frac{G}{k_y a (1 - y_{AG})_{\log}} \int_1^2 \frac{(1 - y_{AG})_{\log} dy_{AG}}{(y_{AG} - y_{Ai}) (1 - y_{AG})}$$

2.3 Definición de términos

Las columnas empacadas

Son equipos que tienen la finalidad de desarrollar la transferencia de masa que se utilizan en la industria. En sus inicios se utilizó en los laboratorios, planta piloto, en las industrias, pero con un tamaño pequeño de estos equipos generando una caída de presión baja y son muy resistentes a la corrosión. En la actualidad su aplicación se desarrolla en toda

operación que tenga que ver con la transferencia de calor y masa, y cuando se quieran poner en contacto las fases.

Torre de lavado de gases

Tiene la función de la eliminación de sustancias nocivas que se encuentran en los gases que son generados en el transcurso de los procesos.

El mecanismo de funcionamiento se da cuando el gas de baja calidad ingresa por la parte inferior y va ascendiendo en la torre, en el interior de la torre se encuentra el relleno que generalmente son de plásticos y tiene la función de poner en contacto al gas con el líquido. En el mismo tiempo que ingresa el gas, también ingresa el líquido por la parte superior de este equipo, al ponerse en contacto el líquido y el gas, las sustancias no deseadas del gas forman parte del líquido. A la salida del líquido que es en la parte inferior del equipo se encuentra un depósito pequeño y una bomba para hacer circular la solución.

La absorción de gases

Es considerada una operación unitaria en donde los componentes solubles o también llamado absorbatos, de la combinación de gases se disuelven en el líquido (absorbente). Por otra parte, la operación opuesta es la desorción, tiene la finalidad de transferir al componente volátil de la mezcla líquida a la fase gaseosa. Para exista un buen rendimiento de transferencia de masa es muy importante que exista buen contacto del líquido y el gas.

Las torres o columnas

Son recipientes que tienen la forma cilíndrica en donde es colocado los platos y relleno, tiene la función de hacer circular en contracorriente, componente líquido y gaseoso

en la parte interna de esta torre. Los objetos del interior de la torre permiten el contacto de las fases generando un aumento de la transferencia de materia.

Mecanismos

Los mecanismos para el buen desarrollo de la interacción química se hace mención de los siguientes:

Equipos	Mecanismo de transferencia
Torre de burbujeo	Dividir el gas en pequeñas burbujas en una superficie líquida continua
Torre de relleno	Separar el líquido en películas que fluyan a través de una fase gaseosa continua
Torre de pulverización	Convertir el líquido en gotas de pequeño tamaño que caigan a través de una fase gaseosa continua

Estos mecanismos ofrecen diferentes tipos de transferencia, esto dependerá a la composición del producto que se quiere llegar.

Los equipos de contacto

Pueden tener la categoría de equipo de contacto por etapa, en donde se utiliza las etapas por separado para el desarrollo del contacto líquido-gas o también como equipos de contacto diferencial-continuo esto se puede apreciar en las torres de relleno, en donde se utiliza la columna en su totalidad como sistema continuo para el desarrollo del contacto líquido-gas.

La absorción.

La absorción de gases es el proceso de operaciones unitarias en donde se disuelve uno o varios componentes gaseosos en el líquido, separándose de esta última y transfiriéndose a la fase líquida.

Desorción

La operación opuesta a la absorción es conocida como desorción y esto es empleado cuando se requiere transferir una sustancia volátil de una combinación gas-líquida.

CAPITULO III: METODOLOGÍA

3.1 Diseño Metodológico

La ubicación de este estudio será en el distrito de Huacho, provincia de Huaura y Departamento de Lima. Se harán uso de laboratorios externos y el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica de la UNJFSC, para llevar acabo la parte experimental

3.1.1 Tipo de Investigación

Esta investigación será cuantitativa, ya que se busca determinar la relación causa-efecto entre la variable dependiente (absorción de gases) e independiente (coeficiente de transferencia de masa); buscando que se establezca con la precisión exacta la importancia que tiene el coeficiente de transferencia de masa en la operación unitaria de absorción de gases.

3.1.2 Nivel

La investigación será descriptiva – explicativa, de acuerdo al tipo de investigación.

3.1.3 Diseño

El diseño de la investigación es experimental, a nivel de laboratorio.

3.1.4 Enfoque

De acuerdo con la naturaleza de la investigación el enfoque es de tipo cuantitativo, deductivo y aplicado.

3.2 Técnicas e instrumentos para la obtención de datos

Se utilizarán técnicas como la observación directa y la información documental. Los instrumentos para obtener datos se basan en los libros de transferencia de masa y absorción líquido-gas.

Para la validación de la variable dependiente, se debe medir el rendimiento de la absorción de gases variando los coeficientes de transferencia de masa éste ensayo se desarrollara en un equipo de absorción y posteriormente son analizados y comparados con otras investigaciones.

3.3 Técnicas para el procesamiento de la información.

Se hará uso de Software y programas, como el Microsoft Excel, para procesar la información y así facilitar el análisis de datos.

3.4 Procedimiento y funcionamiento del equipo.

Antes de iniciar cada experimento y con el fin de asegurar que las esferas y cilindros de grafito de la columna estaban completamente mojados, se hacía circular el líquido sobre ellos con un caudal elevado, regulando después, mediante la válvula correspondiente, el que se deseaba en cada caso. En el intervalo de caudales de líquidos utilizados, el mojado de las esferas y cilindros fue siempre completo.

Una vez estabilizado el caudal de líquido, se daba paso al anhídrido carbónico puro, regulando mediante la válvula correspondiente el caudal deseado.

Todos los experimentos se realizarán con circulación de gas y líquido en sentidos opuestos.

La temperatura del líquido a la entrada se ajusta cada experimento al valor deseado.

Alcanzado el régimen estacionario, se ajustaba la posición del sifón de salida del líquido, para asegurar que el tubo selector inferior quedase totalmente lleno.

Generalmente transcurrían unos quince minutos antes de proceder a la toma de muestras y lectura simultánea de caudales, presiones y temperaturas. Al cabo de diez minutos se repetía la toma de muestras. Se desecharon todos los experimentos en los que las dos muestras sucesivas diferían en más del 2% de concentración de CO₂.

Debido a que el calor de solución del CO₂ en los distintos disolventes utilizados es muy pequeño y no existía intercambio de calor sensible entre el gas y el líquido por ser prácticamente iguales las temperaturas de ambos a la entrada de la columna, las diferencias de temperatura de entrada y salida de ambas fases fueron muy pequeñas pudiéndose tomar siempre valores medios de las mismas.

El anhídrido carbónico utilizado en los experimentos fue prácticamente puro (concentración superior a 99,5%). La posible resistencia a la transferencia de materia debida a la presencia del vapor del disolvente en la fase gaseosa, dadas las temperaturas de experimentación, (2,1% de concentración molar) es despreciable (25,26) Por consiguiente, no existió realmente resistencia a la transferencia de materia en la fase gaseosa. En estas condiciones, el coeficiente individual de transferencia de materia a través de la fase líquida resultó fácilmente calculable para cada experimento, a partir de la cantidad de anhídrido carbónico absorbido por unidad de tiempo y unidad de superficie interfacial, N , y de la diferencia de concentraciones media logarítmica, basada en las diferencias entre las concentraciones interfaciales de equilibrio y las reales de CO₂ disuelto en el líquido en los extremos de la columna.

La presión parcial de CO_2 es la presión total media de la columna menos la de vapor del disolvente a la temperatura del líquido. La diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del líquido, como ya se ha indicado, fue siempre muy pequeña.

Como quiera que para las columnas utilizadas las superficies de contacto correspondientes a los caudales mínimo y máximo de experimentación, difieren sólo en un 5%, se decidió tomar para cada una de ellas una superficie de contacto media constante, A , la que introducía un error inferior al 2,5%, pues no estaba justificada mayor precisión dada la correspondiente a los restantes datos y las irregularidades de la capa líquida al pasar de las esferas a los cilindros y de estos a aquellas.

Todos los valores experimentales de k_L se corrigieron a una temperatura de 20°C .

Se calculó para cada experimento, los módulos adimensionales de Reynolds y Schmidt.

3.5 Determinación y correlación experimental

3.5.1 Flujo Interno

Este tipo de flujo carece de interés práctico, por tal razón se prescinde del análisis de este caso, esto debido a que la transferencia de masa ocurre en zonas interfaciales.

3.5.2 Flujo Externo

Considerar el caso de dos fases líquido y una mezcla de gas que se ponen en contacto y que el líquido absorbe un componente gaseoso puro.

Supóngase una columna empacada de laboratorio, como la figura que sigue, cuya descripción es:

consiste en un rosario de esferas y cilindros de altura y superficie determinadas, colocados en un cilindro sobre el que se deja descender un

líquido a manera de lámina, en contracorriente con un gas que asciende por el espacio libre entre el relleno y la superficie del cilindro.

Se considera como diámetro equivalente del relleno como el de un cilindro de su misma altura y de su misma superficie externa.

En una serie de experimentos se variarían los líquidos absorbentes con densidad, viscosidad y difusividad de gases conocidos y sus caudales de los gases absorbibles cuyos caudales garantizan el estado estacionario.

Conociendo lo indicado anteriormente, se miden con precisión los caudales de líquido, así como su temperatura y concentraciones a la entrada y salida de la columna.

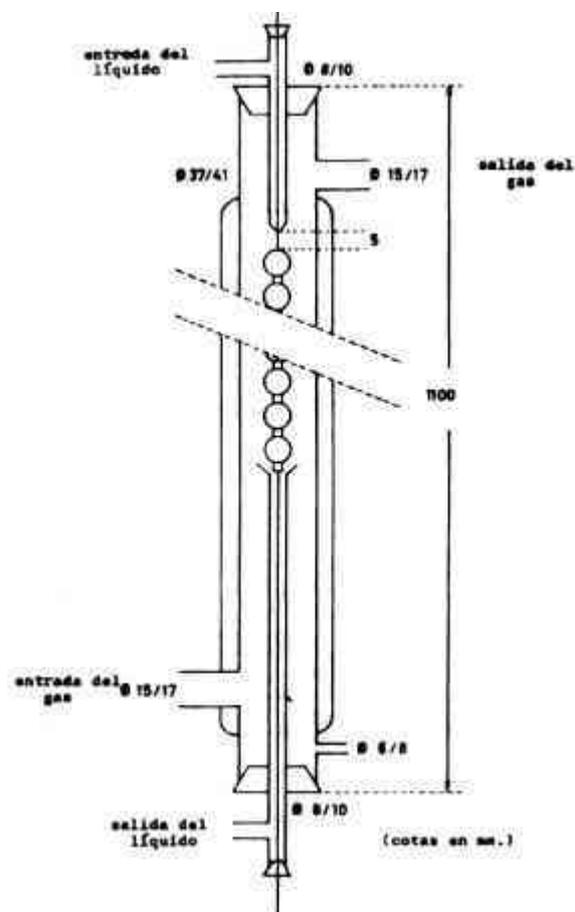


Figura 9: Columna de esferas y cilindros

Suponiendo un coeficiente individual medio k_c , se puede escribir para la transferencia de masa:

$$G_0 = \frac{1}{4} \pi D^2 L k_c (C_1 - C_2)$$

Donde G_0 representa el caudal de A absorbido por el líquido a través de la superficie interfacial;

D el diámetro equivalente y la altura del relleno y L el espesor de la capa líquida, función del caudal másico el mismo m .

El caudal másico absorbido G_0 es calculable mediante el balance de componente A:

$$G_0 = \frac{1}{4} \pi D^2 L k_c (C_1 - C_2)$$

Igualando las dos últimas, resulta:

$$k_c = \frac{G_0}{\frac{1}{4} \pi D^2 L (C_1 - C_2)}$$

Esta expresión se aplica para calcular los coeficientes medios locales de transferencia de masa. Estos coeficientes servirán como base para los coeficientes globales de transferencia de masa.

CAPITULO IV: RESULTADOS

Resultados obtenidos de la absorción de oxígeno puro en agua en una columna de laboratorio de esferas y cilindros con circulación en contracorriente de ambas fases.

Tabla 1:

Valores obtenidos por Costa Novela en la absorción de gases

Caudal de mojado, L_m ($m^3/h*m$)	Concentración oxígeno en la corriente de agua que abandona la columna. C_1 (g/m^3)
0,411	6.43
0,359	6.55
0,316	6.58
0,27	6.82
0,224	6.85
0,201	6.91
0,151	7.16

Tabla 2:

Valores obtenidos en la absorción de oxígeno

Caudal de mojado, L_m ($m^3/h*m$)	Concentración oxígeno en la corriente de agua que abandona la columna. C_1 (g/m^3)
0,408	6,39
0,355	6,52
0,314	6,55
0,271	6,83
0,221	6,81

Datos y notas:

El agua inicial tiene una temperatura de 25°C y una concentración de oxígeno de 2,1842 g/m^3 .

Caudal de mojado = caudal volumétrico/ perímetro mojado.

Área de transferencia de materia de la columna en el intervalo de caudales de mojado investigado: $1,9752 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$.

Perímetro mojado de la columna: 0,0383 m.

Diámetro equivalente del relleno: $1,232 \cdot 10^{-2}$

Propiedades físicas del agua a 25°C:

- $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$
- $\mu = 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$
- $D_{\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}} = 7,92 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$.

Solubilidad del oxígeno en el agua = 8,4 g/m³.

Para la deducción de una ecuación adimensional en donde se relacione el coeficiente de transferencia de materia medio a través de la fase líquida con las variables que lo afectan se da inicio con el cálculo del coeficiente de transferencia de materia individual medio k_L .

$$= \frac{(1 - 2)}{(0 -)} = - \frac{(1 - 2)}{(0 - 1)} = - \frac{(1 - 2)}{(0 - 1)} \dots (1)$$

Donde:

A el área total de transferencia de materia de la columna.

Q el caudal volumétrico del líquido.

C_1 , C_2 y C_0 la concentración de oxígeno en el agua en la base, parte superior de la columna y de equilibrio respectivamente.

Suponiendo despreciable la resistencia ofrecida por la superficie interfacial, la concentración de O_2 de equilibrio en la misma, será la de saturación del agua a 25°C teniendo en cuenta los datos, se llega a lo siguiente:

$$= \frac{(0,0383)}{0,01972} \frac{(8,4 - 2,1842)}{(8,4 - 1)} \dots (2)$$

Esta ecuación permitirá el cálculo de $\frac{1}{K_1}$ en cada experimento.

En el desarrollo del experimento se presentan las siguientes circunstancias:

las propiedades físicas permanecen constantes, por lo que el número de Schmidt = $\frac{\mu}{\rho D} = 454,5$.

En consecuencia, el número de Reynolds deberá expresarse en función del caudal de mojado del líquido, en lugar de la velocidad.

$$= \frac{1}{K_1}$$

al utilizarse la fuerza impulsora como diferencia de concentraciones másicas, el número de Nusselt másico toma la forma:

$$= \frac{1}{K_1}$$

Por consiguiente la ecuación es deducida de la siguiente manera:

$$\frac{1}{K_1} = \left[\frac{1}{K_1} \right] \dots (3)$$

A continuación se presenta una tabla de los valores de los coeficientes $\frac{1}{K_1}$ (ecuación 2) y de los números adimensionales de la ecuación (3) para cada uno de los experimentos desarrollados en la columna de absorción.

Tabla 3:
Valores de K_1 , Nu_{AB} y Re

K_1 (m)	Nu_{AB}	Re	$\log(Nu)$	$\log(Re)$
0,8946	1392,7346	113,3333	3,1439	2,0544
0,8245	1283,5858	98,6111	3,1084	1,9939
0,7391	1150,6132	87,2222	3,0609	1,9406
0,7242	1127,5178	75,2778	3,0521	1,8767
0,5852	911,0301	61,3889	2,9595	1,7881

Representando $\log Nu_{AB}$ frente a $\log Re$, se obtiene una línea recta, que ajustada por mínimos cuadrados conduce a:

$$= 61,4469$$

$$= 0,6611$$

$$Nu_{AB} = 61,4469 \cdot 0,6611 \dots (4)$$

Con datos más abundantes se llegó a la ecuación:

$$Nu_{AB} = 8 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,659 \dots (5)$$

Aceptando el exponente para el número de Schmidt la ecuación (4) se convierte en la:

$$Nu_{AB} = 7,99 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,6611 \dots (6)$$

Esta ecuación deducida coincidente con la (5).

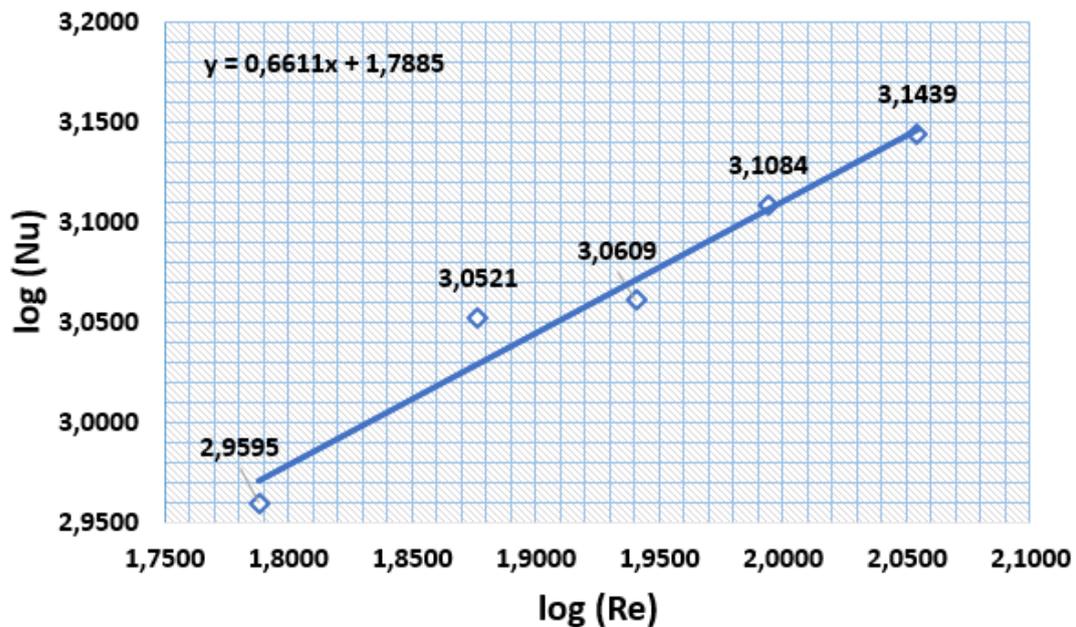


Figura 10: Ajuste de datos por mínimos cuadrados

CAPITULO V: DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Discusión

Con un equipo construido a semejanza del propuesto por Costa Novella, solo diferenciando el diámetro de las esferas y la altura del relleno (que no se pudo construir con la precisión requerida), se obtuvieron 5 puntos (lo único que nos permitió el instituto tecnológico en el cual nos brindaron las facilidades, sin autorizar usar su nombre); se observan que los valores obtenidos en la tabla 2, no distan de los obtenidos en tabla 1 de Costa Novella, por lo que se consideran aceptables, naturalmente, se requiere disponibilidad del equipo y construido con la calibración dimensional respectiva.

5.2 Conclusiones

Se concluye que si es posible determinar un coeficiente medio de transferencia de masa de un componente gaseoso a una fase líquida sin necesidad de recurrir al uso de métodos indirectos como del análisis dimensional o de las analogías de transferencia de calor, cantidad de movimiento y masa.

5.3 Recomendaciones

Se recomienda realizar el estudio para determinar la influencia de la temperatura sobre el coeficiente de transferencia de masa

Realizar el estudio para otras dimensiones de columnas, esferas y cilindros.

CAPITULO VI: BIBLIOGRAFÍA

- Bravo, A. (2009). “Evaluación del efecto de la concentración y flujo de hidróxido de sodio en la absorción química del Dióxido de carbono puro en la columna de relleno del laboratorio de operaciones y procesos unitarios de la fiq". *Pregrado*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- Bravo, A. (2009). “EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN Y FLUJODE HIDRÓXIDO DE SODIO EN LA ABSORCIÓN QUÍMICA DEL DIÓXIDO DE CARBONO PURO EN LA COLUMNA DE RELLENODEL LABORATORIO DE OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS DE LA FIQ”. *Pregrado*. Universidad Nacional del Centro Perú, Huancayo.
- Caicedo, E., & Orozco, E. (2012). “Diseño de una columna empacada para el estudio de la transferencia de masa en un sistema de absorción isotérmica”. *Pregrado*. Universidad industrial de Santander, Bucaramanga.
- De la Torre, D., & Vaca, F. (2018). “Determinación del coeficiente de transferencia de masa en lechos de contacto de carbonato de calcio para la estabilización química de aguas corrosivas”. *Pregrado*. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Quito.
- Guzmán, M., & Mayta, E. (2012). “Correlación adimensional del coeficiente de transferencia de masa en función de la temperatura para predecir el tiempo de disolución del sistema ácido cítrico-agua” . *Pregrado*. Universidad Nacional del Centro del Perú , HUANCAYO.
- Mendoza, W., & Pérez, L. (2011). “Correlación adimensional para la predicción del coeficiente de transferencia de masa en los sistemas acido benzoico-aguay ácido salicílico-agua en un tanque agitado”. *Pregrado*. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ, HUANCAYO.

Suarez, M. (2004). “Influencia de las variables hidrodinámicas y de transferencia de masa, en la corrosión del sistema oxígeno-agua-cloruro de sodio y acero al carbono” .
Pregrado. Universidad industrial de Santander, Bucaramanga.