

CAPÍTULO 5

5 SISTEMA DEPURADOR DE CONTAMINANTES GASEOSOS

En el capítulo anterior, se trató el tema relacionado con el control de emisión de partículas, sin embargo es necesario también ejercer el control sobre la emisión de los gases contaminantes que descarga el incinerador. Se puede decir que el control de emisiones contaminantes se subdivide en dos grupos: el primero dirigido al control de partículas y el segundo dirigido al control de gases y vapores. Es importante tener presente la gran diferencia que existe entre estos dos tipos de contaminantes, pues mientras que el tamaño de las partículas pueden expresarse en micrones, el tamaño de las moléculas de los gases es mucho más pequeño, de apenas unos cuantos ángstrom. En consecuencia, los sistemas utilizados para coleccionar partículas (ciclones, filtros, etc.) son muy diferentes de aquellos utilizados para la remoción de gases.

Gases como el Dióxido de Azufre (SO_2), Dióxido de Nitrógeno (NO_2), Monóxido de Carbono (CO) y Ozono (O_3) constan entre los contaminantes más importantes, debido a su peligrosidad y a su alta tasa de emisión; pero existen además numerosas sustancias en estado gaseoso que producen contaminación, ya sea por su toxicidad o porque producen un olor desagradable, por ello el campo del control de emisiones gaseosas es más amplio de lo que se podría esperar, y en algunos casos el análisis de las causas y los efectos de la contaminación por gases puede ser muy complejo, como es el caso del smog fotoquímico. En el presente capítulo se diseñará el dispositivo que permitirá controlar la emisión de SO_2 y HCl , que son los principales gases contaminantes que se desea remover; adicionalmente se tratarán los aspectos fundamentales de las principales técnicas dirigidas al control de emisiones gaseosas, destacando de manera general los principios por los cuales esas técnicas llevan a cabo la remoción de los contaminantes gaseosos.

5.1 Principales mecanismos utilizados en la remoción de contaminantes gaseosos

Los mecanismos aplicables a la remoción de gases y vapores son

- Condensación
- Adsorción

- Absorción
- Procesos de oxidación térmica
- Procesos de reducción térmica
- Desulfurización de gases de descarga
- Procesos biológicos
- Oxidación ultravioleta en ozono

Condensación

Este proceso no es muy común en el control de contaminación del aire por cuanto su aplicación no resulta conveniente a las condiciones que son expulsados la mayoría de los gases de descarga, esto es, ni la temperatura ni la presión se encuentran en valores cercanos a los de saturación que podrían permitir condensar el gas, ya sea enfriándolo o aumentando la presión externa.

La condensación es mas bien utilizada para recuperar gases que intervienen en procesos productivos, siempre y cuando las condiciones de temperatura y presión lo permitan, por lo cual se considera que este mecanismo tiene una acción indirecta en el control de contaminación del aire. Al utilizar la condensación para recuperar gases que sirven como materia prima de un proceso, se contribuye a evitar la contaminación con dichas sustancias.

Adsorción

Consiste en la adhesión de las moléculas del gas contaminante a la superficie de un material de características especiales que recibe el nombre de adsorbente. Este material posee en su estructura un número incontable de poros de tamaño microscópico, de manera que en un volumen pequeño se dispone de una gran área superficial. Cuando se hace pasar el gas contaminado a través de este material, las moléculas del contaminante se adhieren a la superficie del adsorbente y el gas resultante sale libre de las sustancias que se deseaba eliminar. Los adsorbentes más comunes utilizados en procesos industriales son: los carbonos activados, alúmina activada, sílica gel y tamices moleculares.

Es conveniente utilizar la adsorción como método de remoción de gases si:

- La concentración es pequeña
- El contaminante no puede ser oxidado
- El contaminante es venenoso
- Se requiere purificar aire en espacios cerrados

Adicionalmente, no es adecuado utilizar la adsorción cuando los gases a tratarse contienen partículas, pues ocasionaría la obstrucción del material adsorbente.

Absorción

Este mecanismo consiste en poner la corriente gaseosa en contacto directo con un líquido absorbente, de manera que el contaminante gaseoso presente en el flujo del gas abandonará la fase gaseosa para disolverse en la fase líquida. Los dispositivos en los cuales se realiza este proceso reciben el nombre de torres de absorción, aunque es común referirse a estos como lavadores (scrubbers), que es un término empleado también en dispositivos de remoción de partículas.

Una torre de absorción puede presentar diversos métodos para proveer el contacto entre el líquido y el gas, así por ejemplo en las torres de bandejas, se utilizan amplias superficies sobre las cuales cae el líquido, de manera que se forma una película de gran superficie, permitiendo el contacto entre los fluidos. Sin embargo, el tipo de absorbedor más común en el control de emisiones gaseosas es la torre de absorción rellena (packed wet scrubber), en la cual se utiliza un material de relleno, especialmente diseñado para proveer una gran superficie de contacto en un volumen reducido.

El principal líquido utilizado en equipos de absorción es agua, aunque ciertos procesos requieren otro tipo de fluido dependiendo de las ventajas que pueda brindar en cuanto a la solubilidad del contaminante o si se va a aprovechar algún tipo de reacción química.

Aunque el líquido absorbente puede ser recirculado, llegará un momento en que este debe ser desechado o dirigido hacia algún sistema de tratamiento, lo cual constituye la principal desventaja de la técnica de absorción.

Procesos de oxidación térmica (incineración)

La oxidación térmica se refiere a aquellos procesos en los que por medio de aire y combustible auxiliar se produce una región de alta temperatura para producir la oxidación del gas contaminante; también se la conoce como incineración y es comúnmente utilizada en el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles (VOC's).

Los aparatos utilizados en oxidación térmica pueden ser clasificados como: Post – quemadores, Oxidadores de flama directa con recuperación de energía (Oxidador regenerativo y Oxidador recuperativo) y Oxidadores catalíticos.

Los post – quemadores son en realidad incineradores elementales de flama directa utilizados en instalaciones pequeñas y de bajo flujo másico del contaminante, donde no se recupera energía.

En el caso de los oxidadores regenerativos, se utilizan lechos de material cerámico y cámaras de combustión, para llevar a cabo un proceso cíclico de calentamiento y liberación de calor, hacia y desde

la corriente gaseosa, de manera que el material cerámico actúa como un medio de almacenamiento de energía.

Los oxidadores o incineradores recuperativos, utilizan un intercambiador de calor para calentar el aire de combustión del aparato. Por último, los oxidadores catalíticos se valen de un material catalizador para promover reacciones químicas a temperaturas inferiores a las que normalmente ocurrirían.

Procesos de reducción térmica

Estos procesos son utilizados principalmente en el control de emisiones de NO_x (NO y NO_2) y fundamentalmente consisten en provocar una reacción química de reducción a altas temperaturas utilizando como reactivo amoníaco o compuestos formados por amoníaco.

Los procesos de reducción térmica se pueden clasificar como: Reducción catalítica selectiva y Reducción no catalítica selectiva.

En la primera se utiliza un catalizador para favorecer las reacciones químicas a temperaturas inferiores a 1370 K, pues a temperaturas más elevadas se produce un efecto contrario al que se quiere lograr, debido a la formación de óxidos de nitrógeno provenientes del amoníaco. En cambio, en la reducción no catalítica selectiva, es posible conseguir una reacción favorable introduciendo el amoníaco

en la corriente gaseosa a temperaturas más elevadas; pero para ello es necesario que las condiciones de mezcla y temperatura sean correctamente controladas.

No es recomendable utilizar la reducción catalítica cuando la corriente gaseosa a tratarse contiene elementos que pudieran causar el taponamiento o desactivación del catalizador.

Desulfurización en gases de descarga

Desulfurización es un término empleado para referirse a procesos en los cuales se utiliza como medio principal para la remoción del SO_2 presente en un gas, la reacción química del mismo con un compuesto para formar un nuevo producto, por lo general se llevan a cabo en cámaras tipo spray; en realidad estos procesos implican la absorción del contaminante y su inmediata reacción, pero podemos diferenciarla de la técnica de absorción en que ésta última está dirigida a promover la difusión del contaminante desde la fase gaseosa hacia la fase líquida aumentando el área de contacto, por lo que se utilizan torres rellenas. La clasificación más conveniente para los métodos de desulfurización en gases de descarga parece ser la siguiente

- De rechazo o regenerativa
- Seca o húmeda

En la primera se refiere a si el azufre, separado de la corriente gaseosa, es descartado o se lo puede recuperar para darle algún uso. En la segunda, se refiere a si las principales reacciones del proceso de desulfurización se realizan con un líquido o con un adsorbente seco.

Existen diversas formas de llevar a cabo la desulfurización de gases, por ello algunos métodos reciben un nombre específico, sin embargo el principio de remoción del contaminante es el mismo. La cal y la piedra caliza son los reactivos mas utilizados, aunque el óxido de magnesio (MgO) y el carbonato de sodio (Na₂CO₃) también pueden ser utilizados.

Procesos biológicos

Estos mecanismos de remoción consisten en la utilización de microorganismos y procesos naturales de degradación biológica, para metabolizar los contaminantes. Las reacciones de biodegradación producen la oxidación de los contaminantes, obteniéndose de esta forma nuevos productos a partir de los gases de entrada, o por lo menos la oxidación parcial del contaminante.

Los dispositivos empleados para la ejecución de procesos biológicos son llamados biorreactores, los mismos que pueden ser clasificados

según el lugar donde los microorganismos residen. Esta clasificación y sus respectivos tipos de reactores, son los siguientes

- Crecimiento en suspensión: Biolavadores
- Biorreactores de película fija: Reactores de lecho de goteo y Biofiltros

Los biolavadores son básicamente torres de absorción rellenas, en las cuales el líquido utilizado contiene los microorganismos necesarios para el proceso. El material de relleno proveerá la mayor superficie de contacto para favorecer la transferencia de masa, pero es esencialmente en un tanque externo, de lodo activado, donde se produce el metabolismo de los contaminantes.

En cambio, en los biofiltros los microorganismos se hallan en una delgada película húmeda que rodea a un sustrato sólido. Es decir consiste de uno o varios lechos de un material biológicamente activo, como por ejemplo corteza, abono, desechos municipales, hojas o inclusive tierra; éste material va a proveer de nutrientes a los microorganismos y además debe de conservar cierto grado de humedad para favorecer la existencia de los microorganismos.

Un reactor de lecho de goteo es muy parecido a un biolavador, pero se diferencia en que el líquido fluye lentamente a través del material de relleno del dispositivo, y además los procesos de absorción y

metabolismo ocurren más bien en la película biológica que rodea al material de relleno.

Oxidación ultravioleta en ozono

Básicamente esta técnica consiste en introducir ozono (O_3) en la corriente gaseosa a tratarse para luego someterlos a radiación ultravioleta (UV). El efecto será la generación de radicales libres que darán lugar a reacciones químicas por medio de las cuales, hidrocarburos y compuestos orgánicos serán transformados en dióxido de carbono y agua.

La oxidación ultravioleta en ozono es una tecnología de oxidación avanzada, la cual puede llevarse a cabo a presión y temperatura ambiente, por lo cual no se requerirá el uso de combustible para crear zonas de alta temperatura ni se generará contaminación adicional con NO_x como en otras técnicas de oxidación.

El rompimiento de los enlaces químicos por acción de luz ultravioleta se conoce como fotólisis y es el mecanismo fundamental del cual se vale la técnica UV / O_3 para producir los radicales peróxido ($HO_2\cdot$) e hidroxilo ($HO\cdot$), que posteriormente darán inicio a las reacciones que transformarán los contaminantes.

5.2 Torres de absorción rellenas

Los dispositivos mas utilizados en operaciones de absorción son las torres rellenas (packed tower), las cuales son cámaras en las que se deposita un material que posee gran superficie de contacto por unidad de volumen. Para absorber los contaminantes se utiliza un líquido, usualmente agua, el cual es vertido sobre el material de relleno, de manera que se distribuye sobre éste generando una gran superficie de contacto.

La difusión o transferencia de masa desde el gas hacia el líquido, se ve favorecida con el aumento de la superficie de contacto, por lo cual, cuando el gas contaminado es forzado a pasar a través del relleno, el contaminante se difundirá en el líquido, de manera que el gas saliente estará limpio o por lo menos con una concentración menor del contaminante.

Los principales componentes de una torre de absorción rellena son: la coraza ó cámara, el relleno, el distribuidor del líquido absorbente y el eliminador de arrastre (figura 5.1). La coraza es la estructura que aloja el relleno y en la cual se desarrollará el proceso de absorción, además de que el fondo de esta puede ser utilizado como reservorio del líquido absorbente.

Para obtener un buen desempeño de la torre de absorción, es muy importante que el líquido absorbente sea correctamente distribuido

sobre el material de relleno, pues en las zonas que permanezcan secas no se llevará a cabo ningún proceso de absorción.

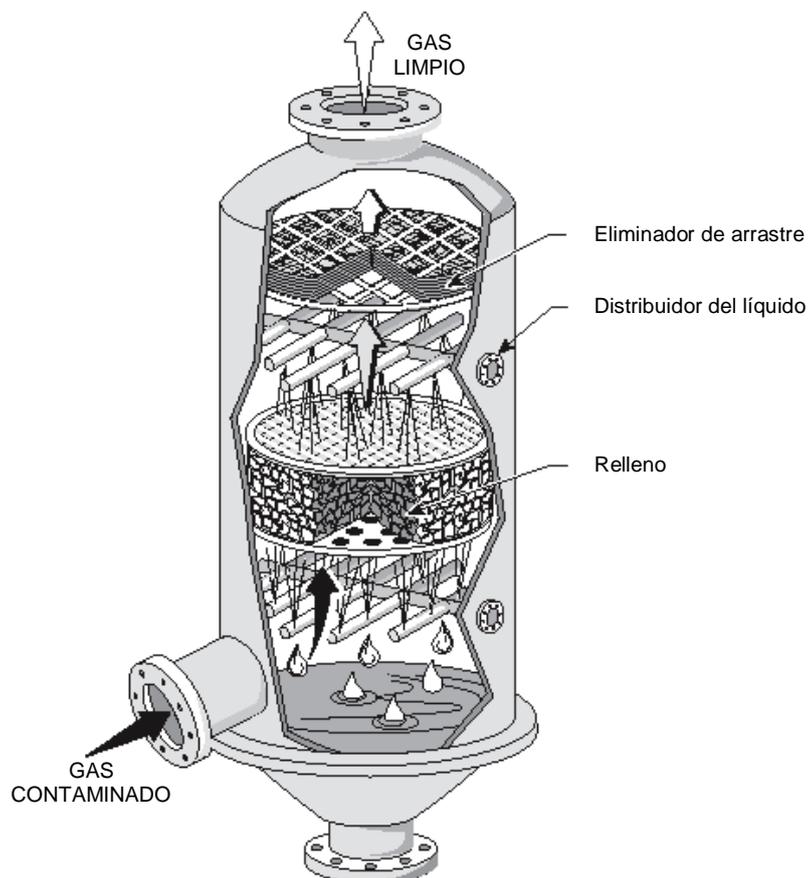


Figura 5.1 Torre de absorción rellena en contraflujo

En una torre de absorción se puede distribuir el líquido mediante simples tubos perforados, o bien utilizar boquillas rociadoras del líquido, aunque cabe indicar que no es adecuada la atomización fina, pues se incrementarían los problemas de arrastre del líquido hacia el exterior.

El relleno que se utiliza en estos dispositivos puede ser de dos tipos: ordenado y desordenado. El primero se refiere a estructuras sólidas bien definidas y relativamente grandes, colocadas en la trayectoria del flujo gaseoso, de manera que constituye un solo bloque en el interior de la torre (figura 5.2).

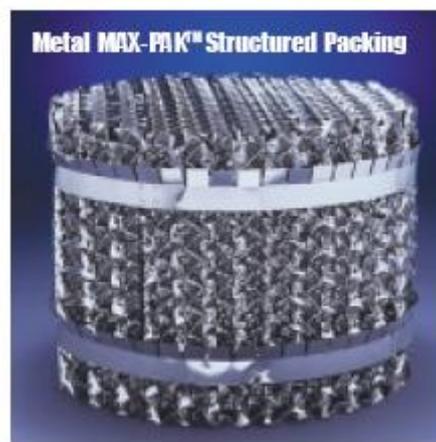


Figura 5.2 Relleno tipo ordenado

Para el tipo de relleno desordenado existen materiales especialmente diseñados para ese propósito, los cuales son estructuras pequeñas, independientes, con una gran superficie de contacto, que son depositadas en el interior de la torre de manera aleatoria. Existen diversos tipos de relleno, y muchos de ellos han sido estudiados ampliamente en cuanto a su desempeño en operaciones de transferencia de masa, por tal razón se encuentra disponible en numerosos textos la información necesaria que permitirá llevar a cabo

el diseño de una torre de absorción. Aunque se pueden utilizar otros materiales como relleno, la falta de conocimiento en cuanto a las características de transferencia de masa o caída de presión, llevaría a la necesidad de evaluar dichas características de forma experimental, usualmente en modelos a escala. Algunos materiales de relleno aleatorio utilizados en torres de absorción se presentan a continuación en la figura 5.3.

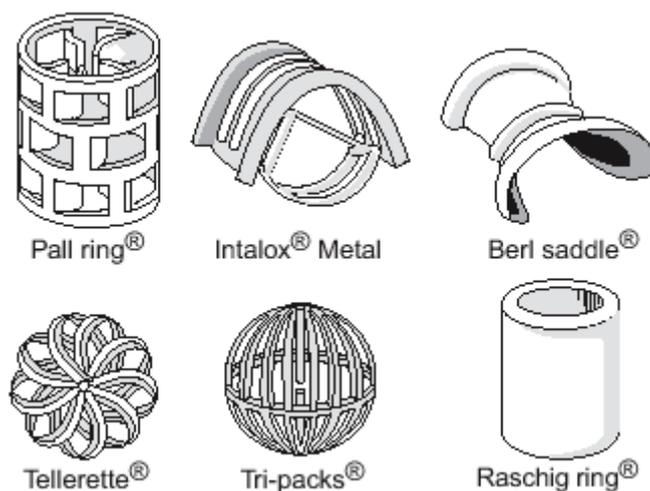


Figura 5.3 Diferentes tipos de material de relleno para torres de absorción

La selección del relleno es uno de los aspectos mas importantes, pues de ello dependerá el desempeño de la torre de absorción. Pero además se debe considerar el costo del relleno, el que puede variar según el tipo de material del cual esté construido, así por ejemplo

existen rellenos hechos de plástico, acero inoxidable o material cerámico. Además del costo, deberá tomarse en cuenta si el material del relleno es adecuado para las condiciones a las que fluye el gas, pues las altas temperaturas y las propiedades corrosivas de algunos gases, podrían causar daños irreparables en su estructura. Aunque un relleno con mayor área por unidad de volumen puede proveer mejores condiciones para la transferencia de masa, también dará lugar a una mayor caída de presión a través del dispositivo, lo cual significa un mayor consumo de energía para mover el gas.

Por último, se debe considerar el peso total del relleno, lo cual debería de incluirse en el diseño de la estructura del dispositivo.

La forma más adecuada de hacer fluir el líquido y el gas en una torre de absorción es en contraflujo, pues con esta configuración se puede conseguir la mayor eficiencia de remoción posible. Otros tipos de arreglo como el de flujo cruzado y flujo paralelo también pueden ser utilizados.

Cualquiera sea el tipo de configuración de la torre, siempre habrá arrastre del líquido absorbente, por ello es necesario incluir en el diseño un eliminador de arrastre, el cual básicamente es una superficie desviadora del flujo con la finalidad de que las gotas impacten en ella, se acumulen y por efecto de la gravedad regresen al flujo del líquido. Estos eliminadores de arrastre se pueden

conseguir fabricados, aunque existen otras opciones, tales como la utilización de malla de alambre de varias pulgadas de espesor, o inclusive el mismo material de relleno. Obviamente el eliminador de arrastre deberá ser colocado por encima del distribuidor del líquido.

5.3 Diseño de la torre de absorción

Uno de los procesos más utilizados en el campo de la ingeniería química es la absorción; ésta se encuentra ligada a la transferencia de masa, por ello es necesario incluir en este trabajo los fundamentos teóricos que describen el proceso. Aunque la teoría relacionada con la transferencia de masa puede ser muy amplia y compleja, es posible simplificarla en aplicaciones al control de contaminación del aire. En esta sección se presentarán los fundamentos necesarios para el diseño de la torre de absorción; para fines de esta tesis, se presentarán solo aquellas ecuaciones que se considera son importantes para la ejecución del trabajo.

Transferencia de masa

Este proceso, también conocido como difusión, consiste en el movimiento a nivel molecular de una sustancia a través de otra, ocasionado por la diferencia de concentración de dicha sustancia a través del medio en el cual se difunde. El modelo que mejor se

adapta al proceso de absorción es la teoría de dos películas, la cual establece que para un sistema conformado por un líquido y un gas; la difusión de determinada especie se llevará a cabo a través de dos películas (figura 5.4). Básicamente esas películas, constituyen un tipo de resistencia a la transferencia de masa, de manera que si determinado contaminante se difunde desde la fase gaseosa, deberá primero vencer la resistencia de la película gaseosa hasta llegar a una zona conocida como interfase, desde la cual pasará a difundirse a través de otra resistencia debida al componente líquido, hasta alcanzar la parte interna del líquido. La interfase representa el límite físico que divide el líquido del gas; es conveniente asumir que las sustancias que se difunden, lo hacen desde una zona alejada de la interfase, esa zona se conoce como el campo lejano.

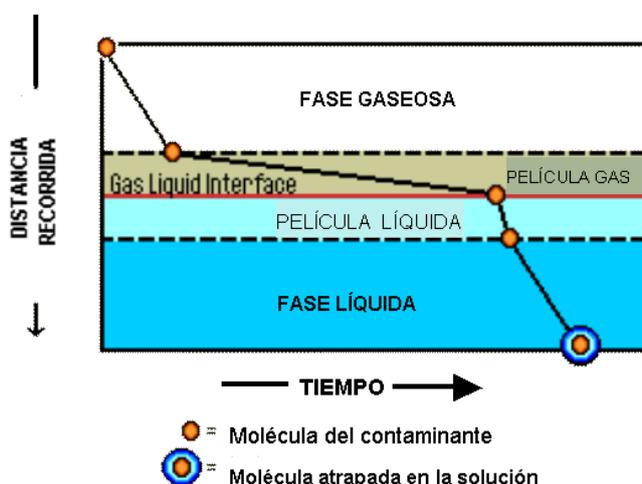


Figura 5.4 Proceso de difusión

Si un contaminante se difunde desde y hacia el campo lejano a través de las dos películas aquí descritas, y si el líquido y el gas se encuentran confinados en un espacio determinado, entonces llegará un momento en que la difusión cesará y por lo tanto se habrá alcanzado un estado de equilibrio en un punto (x_j, y_j) donde x_j es la concentración del contaminante j en la fase líquida y y_j es la concentración del mismo contaminante en la fase gaseosa.

El punto en el cual se alcanza el equilibrio, dependerá de la temperatura y presión a las cuales está sometido el sistema, pero también de la concentración inicial en ambos componentes (líquido y gas); por ello, al analizar un sistema de temperatura y presión iguales, pero con una concentración inicial diferente, entonces se obtendrá un punto de equilibrio diferente. La serie de puntos que pueden ser obtenidos de esta forma da origen a lo que se conoce como curva isotérmica de equilibrio. Por lo general, los puntos que definen estas curvas se encuentran disponibles en diferentes textos para cada uno de los sistemas más comunes en la industria. Sin embargo, en aplicaciones al control de contaminación del aire, las bajas concentraciones permiten hacer uso de la constante de Henry, que puede sustituir los datos de las curvas de equilibrio, resultando

$$y_j = m_j \cdot x_j = \frac{H'}{P} \cdot x_j \quad (5.1)$$

donde m es la pendiente de la línea recta que representa la curva de equilibrio, H' es la constante de Henry y P es la presión de operación; la constante H' puede encontrarse expresada en diferentes unidades, para la ecuación anterior debería ser expresada en unidades de presión.

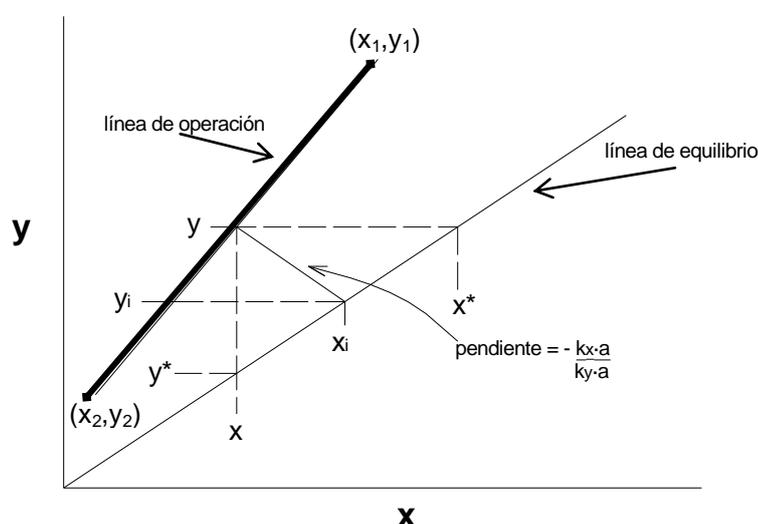


Figura 5.5 Líneas de operación y equilibrio en un sistema de absorción.

Además de la curva de equilibrio, es necesario conocer también lo que se denomina línea de operación, la cual representa las condiciones a las cuales ingresan y salen de la torre de absorción las corrientes gaseosa y líquida. La línea de operación queda definida conociendo dos puntos (x,y) a través del aparato; obviamente lo más adecuado es tomar tales puntos a la entrada y salida de la torre de

absorción operando en contraflujo, así el punto (x_2, y_2) representará la parte superior de la torre mientras que el punto (x_1, y_1) el fondo de la misma. La figura 5.5 presenta de manera clara los conceptos aquí expuestos.

La fuerza impulsora para la transferencia de masa será la diferencia de concentración entre la interfase y la masa del fluido en el campo lejano, por lo tanto la velocidad de absorción vendrá dada por

$$N_A = k_L \cdot (x - x_i) = k_G \cdot (y - y_i) \quad (5.2)$$

Donde N_A es la tasa de transferencia de masa en lbmol/h-ft^2 , k_L es el coeficiente de transferencia de masa para la fase líquida en lbmol/h-ft^2 , k_G es el coeficiente de transferencia de masa para la fase gaseosa en lbmol/h-ft^2 , x e y son las fracciones molares en la fase líquida y gaseosa respectivamente, y el subíndice i se refiere a la interfase.

No es común trabajar con las fracciones molares en la interfase, lo que en la figura 5.5 equivale a trabajar con la línea diagonal que conecta (x, y) con (x_i, y_i) . En su lugar, lo que se hace es trabajar con las fracciones molares que estarían en equilibrio con un punto (x, y) de la línea de operación, o sea los valores x^* e y^* , es decir las líneas horizontales y verticales de la figura. Pero para ello es necesario

definir un coeficiente global de transferencia de masa K_G que permita hacer los cálculos en función de una fuerza impulsora $y - y^*$, o sea

$$N_A = k_L \cdot (x - x_i) = k_G \cdot (y - y_i) = K_G \cdot (y^* - y)$$

manipulando la expresión anterior es posible obtener

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{m}{k_L} \quad (5.3)$$

Tal ecuación puede modificarse de la manera siguiente

$$\frac{G_M}{K_G \cdot a} = \frac{G_M}{k_G \cdot a} + \frac{m \cdot G_M}{k_L \cdot a} \cdot \frac{L_M}{L_M}$$

donde los nuevos términos que se han introducido son

a = área por unidad de volumen, $\text{ft}^2 / \text{ft}^3$

G_M = flujo molar del gas, mol / h

L_M = flujo molar del líquido, mol / h

Entonces:

$$\frac{G_M}{K_G \cdot a} = \frac{G_M}{k_G \cdot a} + \frac{m \cdot G_M}{L_M} \cdot \frac{L_M}{k_L \cdot a}$$

Cada término de la ecuación anterior puede ser remplazado utilizando la notación HTU que significa "altura de unidades de transferencia" (Height of Transfer Unit), es decir

$$HTU = HTU_c + \frac{m \cdot G_M}{L_M} \cdot HTU_s \quad (5.4)$$

Donde HTU es la altura total de unidades de transferencia, HTU_c es la altura de unidades de transferencia debida a la fase gaseosa, y HTU_s es la altura de unidades de transferencia debida a la fase líquida; todas vienen dadas en pies. La ecuación 5.3 puede interpretarse como la sumatoria de las resistencias a la transferencia de masa debidas a la fase gaseosa y líquida, dando como resultado una resistencia global a la difusión; en esta tesis solo se trabajará con el primer miembro del lado derecho de la ecuación 5.4, lo cual implica que no hay resistencia en la fase líquida. Para hallar el valor correspondiente a la altura de unidades de transferencia de la fase gaseosa, se hace uso de la siguiente ecuación experimental

$$HTU_c = \frac{\alpha (Sc_g)^{0.5} (G')^\beta}{(L')^\gamma} \quad (5.5)$$

donde

α, β, γ = constantes que dependen del tipo de relleno

G' = flujo másico superficial del gas, lb/h-ft²

L' = flujo másico superficial del líquido, lb/h-ft²

Sc_G = número de Schmidt del gas

El número de Schmidt puede determinarse con la siguiente ecuación

$$Sc_G = \frac{\mu}{D \cdot \rho} \quad (5.6)$$

donde

μ = viscosidad del fluido, lb/ft-h

D = difusividad del contaminante en el fluido, ft²/h

ρ = densidad del fluido, lb/ft³

Las difusividades de un contaminante, tanto en el líquido como en el gas, son requeridas a la temperatura de operación de la torre de absorción. La difusividad de una sustancia 1 en un gas 2, puede determinarse mediante la siguiente ecuación.

$$D_{12} = \frac{0.01498 \cdot T^{1.81} \cdot \left(\frac{1}{MW_1} + \frac{1}{MW_2} \right)^{-0.5}}{P \cdot (T_{cr1} \cdot T_{cr2})^{0.1405} \cdot \left[Vo_{cr1}^{0.4} + Vo_{cr2}^{0.4} \right]^2} \quad (5.7)$$

donde D_{12} es la difusividad del contaminante 1 en el gas 2 (cm²/s), T es la temperatura de operación (K), MW es el peso molecular de la sustancia, P es la presión de operación (atm), T_{cr} es la temperatura crítica (K), Vo_{cr} es el volumen crítico molar (cm³/mol) y los subíndices 1 y 2 se refieren al contaminante y al gas respectivamente.

A partir de la siguiente figura se desarrolla un balance de masa que permite hallar la altura requerida del aparato

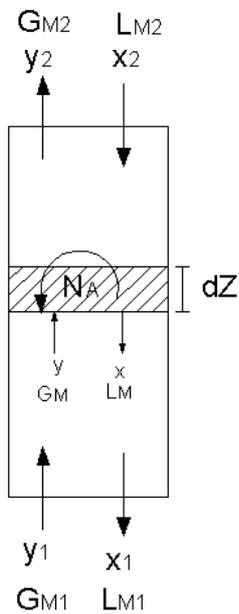


Figura 5.6 Nomenclatura para balance de masa en una torre de absorción

Para un diferencial de altura dZ , un balance de masa a través de un diferencial de volumen es:

$$-d(G_M \cdot y) = N_A \cdot a \cdot dZ \quad , \text{ donde}$$

$$-d(G_M \cdot y) = -G_M \cdot dy - y \cdot dG_M$$

Si solo se difunde aquella sustancia que se desea absorber, es decir que el gas portador no se difunde, entonces la variación en el flujo molar se deberá solamente a la transferencia de masa de la sustancia que se difunde, o sea:

$$dG_M = - N_A \cdot a \cdot dZ$$

Combinando las dos últimas ecuaciones por medio de dG_M se tiene

$$-d(G_M \cdot y) = -G_M \cdot dy + y \cdot N_A \cdot a \cdot dZ$$

$$\rightarrow N_A \cdot a \cdot dZ = -G_M \cdot dy + y \cdot N_A \cdot a \cdot dZ$$

$$(1 - y) \cdot N_A \cdot a \cdot dZ = -G_M \cdot dy$$

$$\rightarrow dZ = \frac{-G_M \cdot dy}{(1-y) \cdot N_A \cdot a} \rightarrow Z = \int_{y_2}^{y_1} \frac{-G_M \cdot dy}{(1-y) \cdot N_A \cdot a} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{G_M \cdot dy}{(1-y) \cdot N_A \cdot a}$$

En aplicaciones en las que se difunden pequeñas cantidades de soluto, es posible eliminar el término $(1 - y)$ que es aproximadamente igual a 1; entonces, sustituyendo $N_A = k_G \cdot (y - y_i)$ (ecuación 5.2) se obtiene finalmente:

$$Z = \frac{G_M}{k_G \cdot a} \cdot \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y - y_i} \quad (5.8)$$

La ecuación 5.8 es suficiente para hallar la altura del aparato; el término que aparece fuera de la integral es el mismo que aparece en la ecuación 5.4, o sea HTU_c . El valor que aparece dentro del símbolo de integración se conoce como el “Número de Unidades de Transferencia” o NTU y debe ser evaluado conociendo el valor de y_i .

Absorción con reacción química

La pendiente de la línea de equilibrio en la figura 5.4, es un indicador de la cantidad de líquido que se requerirá en una torre de absorción para depurar una determinada cantidad de gas; es decir que cuanto mas grande sea la pendiente de la línea de equilibrio, mayor será la

relación L/G y por lo tanto mayor será la cantidad de líquido requerido para tratar el gas. Dicha pendiente aumenta junto con la temperatura, pues la constante de Henry también aumenta con la temperatura.

En algunos casos, la pendiente de la línea de equilibrio es tal, que el sistema exige la utilización de cantidades excesivas de líquido, lo cual es un factor decisivo en el diseño de una torre de absorción. En estos casos, una forma efectiva de reducir la pendiente de la curva de equilibrio es utilizar la absorción seguida de una reacción química en la fase líquida; el efecto es la reducción drástica de la fracción molar de equilibrio y_i en la fase líquida.

Según el Manual del Ingeniero Químico de Perry en su séptima edición [5], sistemas de absorción como el de SO_2 en soluciones alcalinas, NH_3 en agua, HCl en agua o soluciones alcalinas, entre otros, operan bajo un estado conocido como “condición de transferencia de masa limitada por la fase gaseosa”. Esta condición se expresa como

$$N_A = k_L \cdot (x - x_i) = k_G \cdot y \quad (5.9)$$

lo cual implica que la concentración del soluto en el gas en la zona de la interfase y_i es igual a cero; el sistema se comportará según dicha

condición si la reacción química es rápida, irreversible y de segundo orden. Bajo la mencionada condición de difusión limitada por la fase gaseosa, la ecuación 5.8 se ve ligeramente modificada obteniéndose lo siguiente

$$Z = \frac{G_M}{k_G \cdot a} \cdot \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y}$$

$$Z = \frac{G_M}{k_G \cdot a} \cdot \text{LN} \left(\frac{y_1}{y_2} \right)$$

o bien,

$$Z = HTU_c \cdot \text{LN} \left(\frac{y_1}{y_2} \right) \quad (5.10)$$

El valor de HTU_c no puede ser hallado sin conocer el flujo del líquido en el aparato. Aunque en absorción con reacción química la cantidad del reactivo requerido es determinada estequiométricamente, es necesario determinar la cantidad mínima de líquido que debería verse sobre el relleno para garantizar que éste se mojará por completo, y por lo tanto estará en condiciones de brindar la transferencia de masa para la cual fue diseñado. Documentación de la EPA [16] sugiere la siguiente ecuación para hallar el flujo mínimo

$$L' = MWR \rho_L \cdot a \quad (5.11)$$

donde ρ_L es la densidad del líquido en ft^3/lb , a es la relación área por volumen del relleno en ft^2/ft^3 , y MWR es la razón mínima de humedecimiento en ft^2/h . El valor de MWR recomendado para rellenos ordenados y rellenos aleatorios en forma de anillo mayores a 3 pulgadas, es $0.85 \text{ ft}^2/\text{h}$. Para cualquier otro tipo de relleno, el valor recomendado es $\text{MWR} = 1.3 \text{ ft}^2/\text{h}$.

El diámetro de la torre de absorción dependerá de los flujos de gas y líquido que se tenga previstos en el aparato, además de las características del material de relleno. El diámetro del dispositivo puede determinarse gráficamente utilizando la figura 5.7, que se presentará más adelante en la sección correspondiente a los cálculos; en dicha figura se debe ingresar conociendo el valor de la abscisa, el cual corresponde a

$$\text{abscisa} = \frac{L'}{G'} \cdot \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \quad (5.12)$$

El procedimiento consiste en hallar la intersección de la abscisa con la línea de inundación (flooding) y determinar la correspondiente ordenada, la cual equivale a

$$\text{ordenada} = \left[\frac{G'^2 \cdot F \cdot \mu_L^{0.2}}{g_c \cdot \rho_G \cdot \rho_L} \right] \cdot \left[\frac{\rho_{H_2O}}{\rho_L} \right] \quad (5.13)$$

donde las densidades ρ deben ser expresadas en lb/ft^3 , la viscosidad del líquido μ_L en centipoises, el flujo superficial del gas G' en lb/s-ft^2 , F es el factor de empaque y g_c es igual a 32.2. Después de hallar la ordenada, debe despejarse el valor de G' , el cual corresponde al flujo del gas en condiciones de inundación. Hay que señalar que la línea de inundación representa el estado en el cual el líquido absorbente es retenido en el relleno por la acción del flujo del gas en sentido contrario, por lo que el relleno literalmente se inunda. Por eso, el valor de G' debe ser corregido por un factor f que usualmente está entre 0.60 y 0.75. De esta forma, el área transversal de la torre de absorción se calcula por

$$A = \frac{m_G}{f_c \cdot G'} \quad (5.14)$$

donde m_G es el flujo del gas en lb/h .

Caída de presión

La caída de presión a través del dispositivo también puede determinarse gráficamente encontrando la curva que corresponde a la intersección de la abscisa y la ordenada a las condiciones de

diseño del aparato; el valor obtenido será la caída de presión en pulgadas de agua por pie de altura del relleno. De esta forma, la caída de presión total será el producto de la altura del relleno por el valor determinado gráficamente.

5.3.1 Parámetros de diseño

Para el relleno, se ha decidido utilizar Novalox Saddles de 1 ½ pulgada de tamaño nominal (características en apéndice F), manufacturadas en material cerámico. Como bien indica su nombre en inglés, estas piezas tienen la forma de sillas de montar; poseen características adecuadas para su uso en aplicaciones de absorción de gases ácidos, así como también son adecuadas para trabajar a altas temperaturas.

El relleno seleccionado no es del tipo tradicional, razón por la cual no se encuentran con facilidad los valores de las constantes α , β y γ requeridas para hallar HTU_c ; sin embargo se tomó la decisión de utilizar este relleno por cuanto la misma empresa que distribuye este componente de la torre de absorción, provee diversas facilidades en cuanto a información técnica y disposición de otros materiales que serán necesarios en la construcción del aparato. Parte de la información técnica que proporcionó la empresa Jaeger Products Inc, con sede en

Houston, Texas (EE.UU.), fue la altura total de unidades de transferencia de masa, o bien HTU (que en transferencia de masa limitada por la fase gaseosa es igual a HTU_c); sin embargo como medida para corroborar tal información se hará los cálculos para HTU_c utilizando las constantes α , β y γ que corresponden al relleno tipo Berl Saddles cerámicos de 1 ½" (apéndice G). Los rellenos del tipo "silla de montar" son muy similares entre sí en cuanto a su forma, por eso consideramos que la utilización de las constantes de las sillas Berl, arrojarán resultados aproximados del valor de HTU_c para las sillas Novalox.

De esta forma, las constantes a utilizarse en los cálculos posteriores de la torre de absorción son:

Factor de empaque: $F_p = 52 \text{ ft}^{-1}$

Área geométrica superficial: $a = 61 \text{ ft}^2/\text{ft}^3$

Constantes de empaque: $\alpha = 5.05$, $\beta = 0.32$, $\gamma = 0.45$

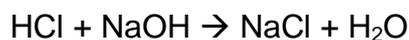
Sobre el relleno se deberá verter una solución de hidróxido de sodio (NaOH) en agua; se llegó a la conclusión de que la utilización de un reactivo era necesaria, pues el agua por sí sola no provee las condiciones adecuadas para la transferencia de masa, esto es, la pendiente de la curva de equilibrio es muy

elevada a temperaturas superiores a 50°C, lo cual se traduce en un flujo requerido de agua excesivo (superior a 100 gpm).

Ciertamente, el hidróxido de sodio es una sustancia que debe manejarse con cuidado, pero su utilización es una práctica común en la depuración de gases ácidos, pues las soluciones acuosas son lo suficientemente diluidas para no ocasionar problemas.

La utilización de ésta solución alcalina hace posible asumir la condición de transferencia de masa limitada por la fase gaseosa ($y_i=0$) para realizar el diseño, además de que se puede conseguir una alta eficiencia de remoción, tanto del SO_2 como del HCl , sin que se produzcan problemas significativos de incrustaciones en el material de relleno, pues la reacción química producirá sales que no van a tender a precipitarse, sino a permanecer en estado acuoso.

Para el diseño, se consideran las siguientes reacciones químicas de los gases con el líquido de absorción.



El HCl es normalmente soluble en agua pura, por lo que el diseño se llevará a cabo en base al SO_2 , que es más difícil de absorber en agua.

Podemos establecer a partir del capítulo 1, que se espera remover por lo menos un 98% de HCl y un 65% de SO₂; sin embargo, es una práctica común diseñar los equipos para que éstos provean una eficiencia superior, con el fin de aprovechar la capacidad de remoción que puede ofrecer el aparato. Por eso establecemos arbitrariamente que se dimensionará la torre de absorción para que provea un 80% de remoción del SO₂.

Por último, se asume que el líquido utilizado en el proceso de absorción estará libre de partículas, pues se utilizará un tanque de recirculación exclusivo para la torre de absorción.

5.3.2 Condiciones de operación

En las etapas previas a la torre de absorción, e inclusive en esta última, el gas es sometido a un intenso contacto con agua, por lo tanto se puede asumir que finalmente en la torre de absorción, la descarga gaseosa alcanzará su condición de saturación, o sea: $Y = 0.168$ y $T = 142^{\circ}\text{F}$ (61°C); por otro lado, el líquido utilizado será recirculado, por lo cual se considera que tanto la temperatura del gas como la del líquido, se estabilizarán en 142°F y se tomará ésta como la temperatura de operación del sistema; se asume que el aparato opera a una presión de 1 atm.

La variación en la humedad de los gases desde que salen de la cámara de enfriamiento con agua, hasta que ingresan a la torre de absorción, es muy pequeña, por tal razón, se trabajará con el mismo flujo másico establecido en el lavador de partículas, o sea $G = 15281.13 \text{ mol/h}$; el flujo del gas en la torre de absorción permanecerá constante, ya que no habrá evaporación, pues el gas está saturado.

El diseño se basa en la remoción del SO_2 (80%), por ello es necesario determinar las fracciones molares de esa sustancia en el gas, tanto a la entrada como a la salida del aparato, esto es:

$$y_1 = 1.855 / 15281.13 = 0.000121 \text{ mol SO}_2 / \text{mol gas}$$

$$\eta = 0.80 \rightarrow$$

$$y_2 = y_1 \cdot (1 - \eta) = 0.000024 \text{ mol SO}_2 / \text{mol gas}$$

Normalmente el HCl puede ser removido con relativa facilidad en agua (la mayor parte de la solución es agua), por eso se asume que se removerá el 100% de esa sustancia. Entonces, se removerán conjuntamente las siguientes cantidades de los contaminantes.

$$n_{\text{SO}_2} = 0.8 \cdot \frac{1.855 \text{ mol SO}_2}{\text{h}} = 1.484 \frac{\text{mol SO}_2}{\text{h}}$$

$$n_{\text{HCl}} = 1 \cdot \frac{8.233 \text{ mol HCl}}{\text{h}} = 8.233 \frac{\text{mol HCl}}{\text{h}}$$

La cantidad de NaOH que se requiere para neutralizar las cantidades halladas de los contaminantes se calcula en base a las reacciones químicas que describen el proceso, entonces

Para el SO₂:

$$m_{\text{NaOH}} = \frac{1.484 \text{ mol SO}_2}{\text{h}} \cdot \frac{2 \text{ mol NaOH}}{1 \text{ mol SO}_2} \cdot \frac{39.98 \text{ g NaOH}}{1 \text{ mol NaOH}}$$

$$m_{\text{NaOH}} = 118.66 \text{ g NaOH} / \text{h} = 0.261 \text{ lb NaOH} / \text{h}$$

Para el HCl:

$$m_{\text{NaOH}} = \frac{8.233 \text{ mol HCl}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ mol NaOH}}{1 \text{ mol HCl}} \cdot \frac{39.98 \text{ g NaOH}}{1 \text{ mol NaOH}}$$

$$m_{\text{NaOH}} = 329.15 \text{ g NaOH} / \text{h} = 0.725 \text{ lb NaOH} / \text{h}$$

El hidróxido de sodio reaccionará también con otras sustancias presentes en los gases de descarga, y su combinación con un ácido formará una sal y agua. Es difícil predecir la cantidad extra que se requerirá por tal situación, sin embargo, para asegurar que existirá la cantidad suficiente del reactivo en la solución, se tomará un 10% adicional de la cantidad

estequiométrica requerida, entonces la cantidad total de NaOH requerida es:

$$m_{\text{Na(OH)}} = 1.1 \cdot (0.261 + 0.725)$$

$$m_{\text{Na(OH)}} = 1.08 \text{ lb NaOH / h}$$

Esta es la cantidad de hidróxido de sodio que deberá tener disuelta la solución en agua antes de ser distribuida sobre el material de relleno. Con los valores obtenidos, se procede a dimensionar el aparato.

5.3.3 Diámetro de la torre

Para hallar el diámetro de la torre de absorción se utiliza la figura 5.7; básicamente éste diagrama establece como límite de operación la línea de inundación (flooding), en la cual no debe operarse por cuanto el líquido queda atrapado en el material de relleno por la acción del flujo del gas en sentido contrario.

Para corregir el estado de inundación se utilizará un factor $f_c = 0.60$; se considerará que el gas y el líquido tienen aproximadamente las mismas características del aire y agua. Ésta última suposición es válida por cuanto el gas tiene un alto porcentaje de los componentes básicos del aire, y además la

solución acuosa que se utilizará será lo suficientemente diluida como para asumir que tiene las propiedades del agua.

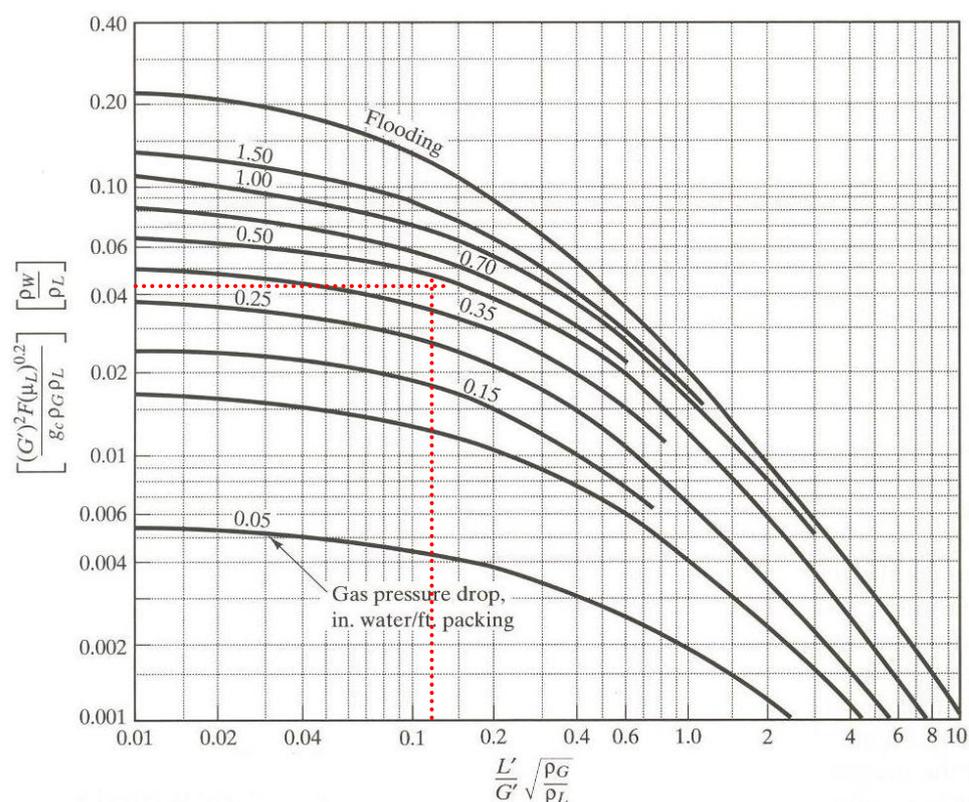


Figure 10-22 Pressure drop in random packed towers as a function of the packing and liquid and gas mass flow rates. The variables G' and L' are expressed in $\text{lb}_m \text{ s}^{-1} \text{ ft}^{-2}$, $g_c = 32.2 \text{ lb}_m \text{ ft lb}_f^{-1} \text{ s}^{-2}$, μ_L is expressed in centipoise and ρ_G , ρ_L and ρ_W are expressed in lb_m/ft^3 . F is a packing factor obtained from Table 10.1 (permission has been granted by American Institute of Chemical Engineers)

Figura 5.7 Diagrama para determinar las condiciones de inundación en la torre de absorción

Adicionalmente, el Manual del Ingeniero Químico de Perry [5], establece que soluciones acuosas de NaOH al 1% en masa, a

60°C tienen una densidad de 0.99 g/cc, por lo cual la última suposición es válida.

Antes de utilizar la figura 5.6 para determinar el diámetro de la torre de absorción, se deberá tomar en cuenta el flujo mínimo de líquido requerido para lograr la distribución completa de éste en el material de relleno.

Entonces, tomando el valor de la razón mínima de humedecimiento como $MWR = 1.3 \text{ ft}^2/\text{h}$, la densidad de la solución como $\rho_L = 61.27 \text{ lb}/\text{ft}^3$. y el valor de $a = 61$, se obtiene:

$$L'_{\min} = 1.3 \frac{\text{ft}^2}{\text{h}} \cdot 61.27 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \cdot 61 \frac{\text{ft}^2}{\text{ft}^3}$$

$$L'_{\min} = 4858.71 \frac{\text{lb}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2} = L'$$

De esta forma, el valor de la abscisa calculado según la ecuación 5. 12 queda expresado en función del área, o sea

$$\text{abscisa} = \frac{L' \cdot A}{G_M \cdot MW_G} \cdot \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} = \frac{4858.71 \cdot A}{15281.13 \cdot \left(\frac{28.94}{453.6}\right)} \cdot \sqrt{\frac{0.066}{61.27}}$$

$$\text{abscisa} = 0.163 \cdot A$$

Por otro lado, la ordenada de la figura 5.7 arroja el valor del flujo másico superficial G' . Para hallar G' en función de la

ordenada, se utiliza la ecuación 5.13; se puede asumir que la viscosidad de la solución es la misma del agua. A 142°F las propiedades requeridas son: $\rho_G = 0.066 \text{ lb/ft}^3$, $\rho_L = 61.27 \text{ lb/ft}^3$, $\mu_L = 0.48 \text{ cP}$, entonces despejando G' resulta:

$$G' = \left(\frac{\text{ordenada} \cdot g_c \cdot \rho_G \cdot \rho_L}{F \cdot \mu_L^{0.2}} \cdot \frac{\rho_L}{\rho_{H_2O}} \right)^{0.5}$$

$$G' = \left(\frac{\text{ordenada} \cdot 32.2 \cdot 0.066 \cdot 61.27}{52 \cdot 0.48^{0.2}} \cdot \frac{61.27}{61.27} \right)^{0.5}$$

$$G' = (2.89 \cdot \text{ordenada})^{0.5}$$

$$\mathbf{G' = 1.701 \cdot \text{ordenada}^{0.5}}$$

Pero G' también es función del área por lo tanto el valor de A puede encontrarse por la ecuación 5.14. El flujo molar del gas expresado en términos de masa por unidad de tiempo es 975.19 lb/h; utilizando un factor de corrección $f_c = 0.6$ para corregir las condiciones de inundación, la mencionada ecuación resulta:

$$A = \frac{975.19 \text{ lb/h}}{0.6 \cdot 3600 \cdot G'}$$

$$\mathbf{A = 0.451 / G'}$$

Como se puede ver, es necesario llevar a cabo un proceso iterativo, el cual inicia asumiendo un valor del área A, para de esta forma hallar la abscisa en la figura 5.7 y por consiguiente la ordenada. El valor del área resultante al hacer los cálculos con G' debe ser igual al valor asumido para hallar la abscisa. La siguiente tabla muestra varias iteraciones realizadas según las ecuaciones y el procedimiento descrito.

**TABLA 30 DETERMINACIÓN DEL ÁREA
DE LA TORRE DE ABSORCIÓN**

Área asumida	abscisa	ordenada	Flujo del gas	Área resultante
A (ft ²)			G' (lb / s-ft ²)	A (ft ²)
2	0.327	0.062	0.422	1.070
1	0.163	0.100	0.539	0.837
1	0.147	0.107	0.557	0.811
0.8	0.131	0.115	0.576	0.784
0.7	0.114	0.123	0.597	0.756
0.778	0.127	0.116	0.580	0.778

Por lo tanto, el área transversal que debe tener la torre de absorción es:

$$A = 0.778 \text{ ft}^2 \rightarrow \text{Área transversal de la torre de absorción}$$

que equivale a:

$$D = \left(\frac{4 \cdot A}{\pi} \right)^{0.5}$$

$$D = \left(\frac{4 \cdot 0.778 \text{ft}^2}{\pi} \right)^{0.5} = 0.9953 \text{ ft}$$

D ≈ 1 ft (305 mm) → Diámetro de la torre de absorción

En la figura 5.7 se ha marcado la solución, es decir el punto en el cual opera el dispositivo; nótese que en la tabla 30 el valor de G' corresponde a la condición de inundación, es decir al valor que intercepta la línea superior del diagrama. El factor de corrección para evitar la condición de inundación se tomó en 0.6, con el cual se corrige G' de inundación y se calcula el valor de la ordenada.

5.3.4 Altura del aparato

Aunque no cabe entrar en detalles sobre cómo se debería haber calculado la altura de la zona rellena si no se hubiera considerado la absorción seguida de una reacción química, es necesario destacar que la ecuación 5.10 es igualmente válida cuando solo se considera la absorción física, es decir sin reacción química. Sin embargo, aunque dicha ecuación es válida, no es lo suficientemente apropiada para hacer los

cálculos en absorción netamente física, pues se necesitarían las fracciones molares en la interfase; por eso, en tales casos se debe deducir una ecuación en términos del coeficiente global de transferencia de masa y las fracciones molares que estarían en equilibrio con la línea de operación, o sea y^* y x^* , es más, las concentraciones deberían estar expresadas en relaciones molares y no en fracciones molares.

Volviendo a los cálculos, cabe indicar que se contactó al departamento de ingeniería de la empresa Jaeger Products Inc., con la finalidad de solicitar el valor de HTU para el tipo de relleno Novalox® Saddles de 1 ½", manufacturados en material cerámico Duranit®, siendo las condiciones de operación: $L' = 4800 \text{ lb/h-ft}^2$, $G' = 1350 \text{ lb/h-ft}^2$, $T_{\text{operación}} = 142 \text{ }^\circ\text{F}$, Líquido utilizado= solución de hidróxido de sodio en agua, Contaminantes a removerse = SO_2 y HCl.

El valor que sugiere Jaeger Products a tales condiciones de operación es:

$\text{HTU} = 1 \text{ ft} \rightarrow$ para absorción de SO_2

$\text{HTU} = 0.6 \text{ ft} \rightarrow$ para absorción de HCl

Pero como ya se dijo, se corroborará ésta información haciendo los cálculos para el relleno tipo Berl Saddles de las características anteriormente descritas. Entonces, para hallar

la altura de la zona rellena, primero es necesario calcular el valor de HTU_c , el cual es función del número de Schmidt en la fase gaseosa, que a su vez depende de la difusividad.

Las constantes críticas requeridas para evaluar la difusividad del SO_2 en la fase gaseosa, se han obtenido del Manual del Ingeniero Químico de Perry [5], estas son:

Para el SO_2 : $V_{ocr1} = 123 \text{ cm}^3/\text{mol}$, $T_{cr1} = 430.75 \text{ K}$

Para el aire: $V_{ocr2} = 92 \text{ cm}^3/\text{mol}$, $T_{cr2} = 132.45 \text{ K}$

El proceso se llevará a cabo a $T = 334 \text{ K}$ (61°C) y $P = 1 \text{ atm}$, entonces la difusividad del SO_2 en aire es:

$$D_{12} = \frac{0.01498 \cdot 334^{1.81} \cdot \left(\frac{1}{64 + 1/28.9} \right)^{0.5}}{1 \cdot (430.75 \cdot 132.45)^{0.1405} \cdot \left[23^{0.4} + 92^{0.4} \right]^2} = 0.699 \frac{\text{ft}^2}{\text{h}}$$

Entonces, haciendo uso de la ecuación 5.6 obtenemos el número de Schmidt:

$$Sc_G = \frac{0.048 \text{ lb/ft-h}}{0.699 \text{ ft}^2/\text{h} \cdot 0.066 \text{ lb/ft}^3} = 1.04$$

Para el tipo de relleno en análisis, se conoce que los valores de las constantes que permiten hallar la altura de unidades de transferencia de la fase gaseosa HTU_c , son: $\alpha = 5.05$, $\beta = 0.32$, $\gamma = 0.45$.

Debido a que se determinó el área transversal del aparato y conociendo el flujo molar de los fluidos, se puede determinar que $G' = 1253.49 \text{ lb/h-ft}^2$ y $L' = 4858.71 \text{ lb/h-ft}^2$ (o sea L'_{min}), entonces:

$$HTU_c = \frac{\alpha \cdot (C_g)^{0.5} \cdot (G')^{\beta}}{(L')^{\gamma}}$$

$$HTU_c = \frac{5.05 \cdot (.04)^{0.5} \cdot (253.49)^{0.32}}{(4858.71)^{0.45}}$$

$$HTU_c = 1.107 \text{ ft}$$

Como se puede ver, el valor calculado (para Berl Saddles) apenas difiere en 0.1 ft (30mm) del valor sugerido por el distribuidor del relleno (para Novalox Saddles). Siendo el valor calculado el mayor de los dos, y considerando que la diferencia apenas es de 30 mm, entonces vamos a tomar el valor de HTU_c como 1.107 pies.

Finalmente, para hacer uso de la ecuación 5.10, se debe recordar los valores de las fracciones molares del contaminante en el gas, a la entrada y salida del aparato. Estos son

$$y_1 = 0.000121 \text{ mol SO}_2 / \text{mol gas}$$

$$y_2 = 0.000024 \text{ mol SO}_2 / \text{mol gas}$$

Entonces, utilizando la ecuación 5.10 se obtiene:

$$Z = HTU_c \cdot \text{LN} \left(\frac{y_1}{y_2} \right)$$

$$Z = 1.107 \cdot \text{LN} \left(\frac{0.000121}{0.000024} \right)$$

$$\mathbf{Z = 1.78 \text{ ft } (543 \text{ mm }) \rightarrow \text{altura de la zona rellena}}$$

5.3.5 Caída de presión

Para hacer uso de la figura 5.7 y determinar la caída de presión a través del aparato, se debe recalcular el valor de la abscisa y la ordenada para las condiciones de flujo de diseño del aparato. La abscisa es la misma que la encontrada en la tabla 30, o sea 0.127; el nuevo valor de la ordenada se calcula como

$$\text{ordenada} = \left[\frac{G^2 \cdot F \cdot Q_L^{0.2}}{g_c \cdot \rho_G \cdot \rho_L} \right] \cdot \left[\frac{\rho_{H_2O}}{\rho_L} \right]$$

$$\text{ordenada} = \left[\frac{\left(\frac{1253.49}{3600} \right)^2 \cdot 52 \cdot 0.48^{0.2}}{32.2 \cdot 0.066 \cdot 61.27} \right] \cdot \left[\frac{61.27}{61.27} \right]$$

$$\text{ordenada} = 0.041$$

La intersección de ambas coordenadas es 0.45 in H₂O / ft de relleno; en la figura 5.7 se ha marcado dicha intersección. Entonces para una altura de relleno de 1.78 ft la caída de presión es:

$$\Delta P = (0.45 \text{ in H}_2\text{O} / \text{ft}) \cdot (1.78 \text{ ft})$$

$$\Delta P = 0.802 \text{ in H}_2\text{O} \quad (199.56 \text{ Pa}) \rightarrow \text{Caída de presión}$$

5.3.6 Requerimientos estructurales

Solamente incluyendo un sistema de emergencia para prevenir una eventual falla en el sistema de enfriamiento de los gases, sería posible utilizar materiales mas baratos en la torre de absorción; no se ha incluido tal sistema en el diseño, por lo que se debe utilizar materiales resistentes a las altas temperaturas. Aunque este trabajo no está dirigido al diseño estructural del aparato, algunos aspectos sumamente importantes deben ser tratados en esta sección.

Coraza

La coraza se construirá en plancha de acero AISI 304 de 2 mm de espesor, y será independiente del tanque de recirculación. Los detalles del diseño se muestran en la sección planos de

este trabajo (planos 17, 18 y 19). Se subdividió el aparato en cuatro segmentos que serían fijados mediante pernos, además de una compuerta de acceso para inspeccionar el estado de los componentes internos del aparato, de manera que se permitan las operaciones de mantenimiento del mismo.

El relleno ocupará un volumen $V_o = 0.73 \text{ ft}^2 \cdot 1.78 \text{ ft} = 1.3 \text{ ft}^3$; su peso por unidad de volumen es 40.3 lb/ft^3 (apéndice F), por lo que el peso que éste ejerce sobre la placa de soporte es

$$F = 1.3 \times 40.3 = 52.39 \text{ lbf} = 233.04 \text{ N}$$

Ésta fuerza es bastante pequeña como para esperar problemas de fluencia en un material tan resistente como el acero inoxidable, por lo que se estima que la placa de soporte del relleno puede ser fijada mediante unos pocos puntos de soldadura, o bien, se pueden soldar barras de acero inoxidable transversales, que sirvan como soportes internos y la mantengan en su sitio.

Placa que soporta al relleno

Aunque se podría haber utilizado una placa perforada como soporte del relleno, se ha decidido utilizar un soporte especialmente diseñado para torres de absorción, el cual deberá ser importado. Se trata de una plancha corrugada de

acero inoxidable, con los agujeros necesarios para permitir el flujo del gas y del líquido; la empresa estadounidense Jaeger Products Inc. provee estos soportes al diámetro requerido, en nuestro caso 12 pulgadas. La ventaja de utilizar este tipo de placa corrugada, es que amplifica el área disponible para el flujo en ambos sentidos, minimizando los problemas de retención y obstrucción del flujo. El soporte solicitado es del tipo PS1 construido en acero inoxidable, de 12 pulgadas de diámetro, similar al mostrado en la figura siguiente:

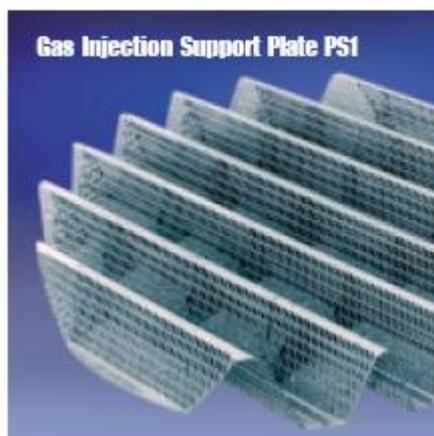


Figura 5.8 Placa soporte del relleno

Eliminador de arrastre

Las gotas más pequeñas serán arrastradas por la corriente gaseosa, por lo que deben ser separadas del flujo. Para esto se utilizará una estructura filtrante conocida como eliminador de

arrastre, la cual deberá ser fijada en la posición indicada en el plano 19, por encima del distribuidor de líquido. La empresa anteriormente mencionada proveerá también el eliminador de arrastre tipo ME1-09-085 de 3 pulgadas de espesor fabricado en malla de acero inoxidable, y limitado superior e inferiormente por una parrilla que lo mantiene como una estructura compacta; éste componente de la torre de absorción es similar al de la figura siguiente

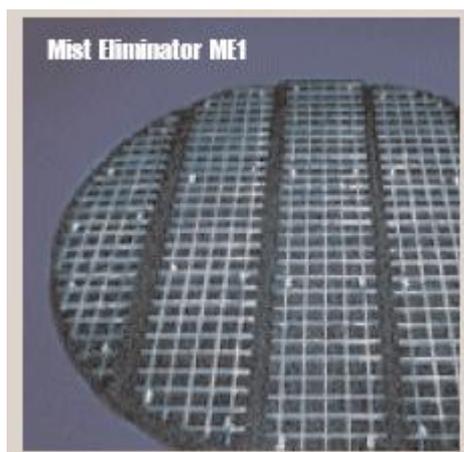


Figura 5.9 Eliminador de arrastre

Para mantener el eliminador de arrastre en su sitio, se puede utilizar malla de acero inoxidable, resistente, de gran espaciado entre sus alambres, como la utilizada en aplicaciones agropecuarias para limitar espacios. Esta malla deberá ir soldada en el interior de la sección donde se colocará el

componente mencionado, de manera que limite su movimiento en la dirección vertical.

El material de relleno es lo suficientemente pesado como para esperar que sea arrastrado (hacia arriba) por la corriente gaseosa, por lo cual no se estima necesario colocar un retenedor como el del eliminador de arrastre.

En cuanto a la caída de presión que puede ofrecer el eliminador de niebla, nos vamos a referir al diagrama del apéndice H. Al calcular el valor de C requerido en ese diagrama, se obtiene alrededor de 0.18, con lo cual resulta una caída de presión aproximadamente de 0.1 pulgadas de agua; aunque el diagrama es para el tipo de malla que se va a utilizar, el espesor no corresponde a nuestro caso, pues dicha figura es para un espesor de 6 pulgadas, o sea el doble del espesor que vamos a emplear. Sin embargo, esto prueba que la caída de presión generada por el eliminador de arrastre no es importante y la podemos despreciar.

Distribuidor del líquido

Se utilizará un distribuidor construido en tubería de acero inoxidable cédula 10s de $\frac{1}{2}$ pulgada equipado con cuatro boquillas rociadoras; éste será acoplado en la parte interna de

la torre de absorción, entre el relleno y el eliminador de arrastre, por medio de una unión con brida, tal como se muestra en el plano 18. El sistema de distribución del líquido en la torre de absorción, incluyendo el tanque de recirculación, se describe en el capítulo 6 de esta tesis.