

Universidad Central de Venezuela  
Facultad de Ingeniería  
Escuela Química  
Transferencia de Masa

## **PARCIAL DE TRANSFERENCIA DE MASA**

Diseño y evaluación de una torre empacada de desorción.

PROF. Fernández, José F.

Chen C. William  
C.I.: 16.113.714

Caracas, Enero de 2005.

## Introducción

Los desorbedores de líquidos son utilizados extensamente en la industria para la separación y purificación de corrientes de líquido, como dispositivos de recuperación de producto y como dispositivos de control de la contaminación. Este parcial se enfoca en el diseño y la evaluación de una torre de desorción para el control de la contaminación en corrientes de líquidos con concentraciones muy bajas (diluidos). Los desorbedores de líquidos son ampliamente utilizados para remover contaminantes inorgánicos solubles en aire, de corrientes de agua. La desorción de gases es la operación en la cual una mezcla líquida se pone en contacto con un gas para disolver uno o más componentes del líquido y obtener una solución de estos en el gas.

El estudio se centrará en la aplicación de un método de diseño de torres empacadas, con el fin de seleccionar, entre un grupo de empaques Nor-Pac Ring y HiFlow Ring, aquel que permita lograr una remoción del 95% de  $H_2S$  (contaminante), que presente la mayor capacidad para transferir el soluto del líquido al gas con el menor costo posible. Para la realización del diseño se buscó información acerca de las condiciones de la ciudad, Puerto La Cruz, donde se va a operar la columna; al mismo tiempo se indagó información acerca de la curva de equilibrio, la cual indica la relación entre la concentración del contaminante en el gas y la concentración del contaminante en el solvente a la temperatura de operación. Y mediante referencias bibliográficas e Internet se consiguieron las propiedades de los componentes puros.

El diseño de desorbedores de torres empacadas para controlar corrientes de líquidos conteniendo una mezcla de contaminantes y solvente, depende del conocimiento de los siguientes parámetros:

- Flujo másico del gas tanto en la entrada como en la salida.
- Composición del gas y del contaminante en la corriente del gas.
- Eficiencia de remoción requerida.
- Relación de equilibrio entre el contaminante y el solvente.

- Propiedades del contaminante, del gas y del solvente: difusividad, viscosidad, densidad, y peso molecular.

Los objetivos principales a cumplir en el procedimiento de diseño es determinar el diámetro de columna y la caída de presión a través de la columna. Para determinar estos parámetros, deben realizarse los siguientes pasos:

- Determinar las condiciones de la corriente de gas y de líquido entrando y saliendo la columna.
- Determinar el diámetro ( $D_{\text{Columna}}$ ) de la columna.
- Determinar la altura del lecho ( $H_{\text{LechoEmpacado}}$ ).
- Determinar la caída de presión ( $\Delta P$ ) de la columna empacada.

En el momento de la selección del tipo de relleno, se analizará si los empaques estudiados cumplen con una serie de criterios, que van desde las propiedades del empaque hasta el costo de la misma.

Para simplificar el procedimiento de diseño, se ha hecho varias suposiciones. Por ejemplo, se supone que la corriente líquida contiene una mezcla líquida de dos componentes (contaminante/solvente), donde el contaminante consiste de un solo compuesto presente en cantidades diluidas y sin reacción química. Se supone que el gas se comporta como un gas ideal y que el solvente se comporta como una solución ideal. Se considera que los efectos asociados al calor con la desorción son mínimos para las concentraciones de contaminantes encontradas. También se supone, el gas a la entrada es puro, es decir, contiene únicamente aire; cambios despreciables en el contenido de humedad; y la relación de flujo de gas libre es 1,6 veces el flujo de de gas mínimo libre soluto.

Posterior a la selección del empaque a emplear en el proceso, se desea evaluar la torre, con diámetro y altura conocida, con un flujo de líquido mayor, a la entrada, que el empleado para la realización de diseño.

## **Planteamiento del problema:**

El agua puede contener una variedad de minerales y materia orgánica, así como gases disueltos. La remoción de dichos gases puede hacerse en una columna empacada, en la cual el agua se introduce por el tope y se permite que fluya a través del empaque en contracorriente con un gas que sea capaz de llevarse consigo al gas disuelto. Comúnmente se emplea aire para remover gases disueltos tales como dióxido de carbono, dióxido de azufre, amoníaco, sulfuro de hidrógeno, monóxido de carbono o metano.

Se trata una corriente de 25 m<sup>3</sup>/h de agua, que contiene sulfuro de hidrogeno en una concentración de 0.0015% molar, esperándose una remoción del 95%. Las condiciones atmosféricas promedio anual de la ciudad de Puerto La Cruz son T= 27,4 °C <sup>[1]</sup> y P= 760.56 mmHg <sup>[2]</sup> (ciudad donde se instalará la columna empacada). Se emplearán para el diseño empaques de Nor-Pac Ring y HiFlow Ring.

## **Descripción del Proceso**

La desorción es la operación de transferencia de masa en la cual, uno o más componentes solubles de una mezcla de líquidos se disuelven en un gas que tiene baja volatilidad bajo las condiciones del proceso. El contaminante se difunde desde el líquido hacia el gas. La diferencia entre la concentración real y la concentración al equilibrio, proporciona la fuerza impulsora para la desorción. Un desorbedor de líquido diseñado apropiadamente, proporcionará contacto completo entre el gas y el solvente, para facilitar la difusión del contaminante. Funcionará mejor que un desorbedor diseñado pobremente. La razón de la transferencia de masa entre las dos fases depende mayormente del área de superficie expuesta y del tiempo de contacto. Otros factores que gobiernan la razón de desorción, tales como la solubilidad del gas en el solvente particular, son características de los constituyentes involucrados y son relativamente independientes del equipo utilizado.

Una unidad de torre empacada básica se compone de una envoltura de la columna, eliminadores de rocío, distribuidores de líquido, material de empaque, soporte del empaque y puede incluir un retenedor del empaque. Cuando se utilizan solventes o gases altamente corrosivos, para los interiores de la columna se requieren de aleaciones resistentes a la corrosión o materiales plásticos. La envoltura de la torre puede estar hecha de acero o de plástico o una combinación de estos materiales, dependiendo de la corrosividad de las corrientes del gas y del líquido y de las condiciones de operación del proceso. Puede utilizarse una aleación que sea resistente a las sustancias químicas y a la temperatura o múltiples capas de materiales diferentes menos caros. A veces, la envoltura está recubierta con una membrana protectora, en ocasiones hecha de un polímero resistente a la corrosión.

A altas velocidades del gas, el gas que sale por la tapa de la columna puede acarrear pequeñas gotas de líquido como rocío. Para prevenir esto, puede instalarse en la tapa de la columna un eliminador de rocío en forma de hojas corrugadas o de una capa de malla, para recolectar las gotitas de líquido, las cuales coalescen y caen de nuevo en la columna.

Un distribuidor de líquido está diseñado para mojar el lecho de empaque uniformemente iniciar un contacto uniforme entre el líquido y el vapor. El distribuidor de líquido debe esparcir el líquido uniformemente, resistir taponamiento y ensuciamiento, proporcionar espacio libre para el flujo de gas y permitir flexibilidad de operación. Las torres grandes frecuentemente tienen un redistribuidor de líquido para recolectar el líquido de la pared de la columna y dirigirlo hacia el centro de la columna para redistribuirlo y mejorar el contacto en la sección más baja del empaque. Generalmente se requieren redistribuidores de líquido por cada 8 a 20 pies de profundidad de empaque al azar.

## Procedimiento de Diseño

A partir de los datos de las tablas N° 1, N° 2, N°3 y N° 4, que son las condiciones de operación y propiedades de los compuestos, se puede realizar un balance de masa para calcular los flujos y composiciones de salida, para luego determinar el diámetro de la columna, altura de lecho empacado y caída de presión para cada uno de los empaques. Se puede apreciar el diagrama del equipo de desorción a estudiar en la figura N° 1.

Los desorbedores de gas se diseñan en base a la relación líquido libre de soluto a gas libre de soluto entrando a la columna  $(L_s/G_s)_{op}$ , a la pendiente de la curva de equilibrio  $(m)$ , y a la eficiencia de remoción requerida  $(\gamma)$ . Estos factores se calculan de las variables de la corriente de entrada y salida del gas y del líquido:

- Flujo del gas, kilogramos por segundo, entrando y saliendo la columna ( $G_i$  y  $G_o$ , respectivamente).
- Composición del contaminante (*moles* de contaminante por *mol* de gas libre de contaminante), entrando y saliendo de la columna en el gas ( $Y_i$  y  $Y_o$ , respectivamente).
- Flujo del solvente, kilogramos por segundo, entrando y saliendo la columna ( $L_i$  y  $L_o$ , respectivamente).
- Composición del contaminante (*moles* de contaminante por *mol* de solvente libre de contaminante) entrando y saliendo de la columna en el líquido ( $X_i$  y  $X_o$ , respectivamente).

La constante de Henry se determinó mediante un ajuste a los datos de la constante tabuladas en el referencia [3], ver tabla N° 8.

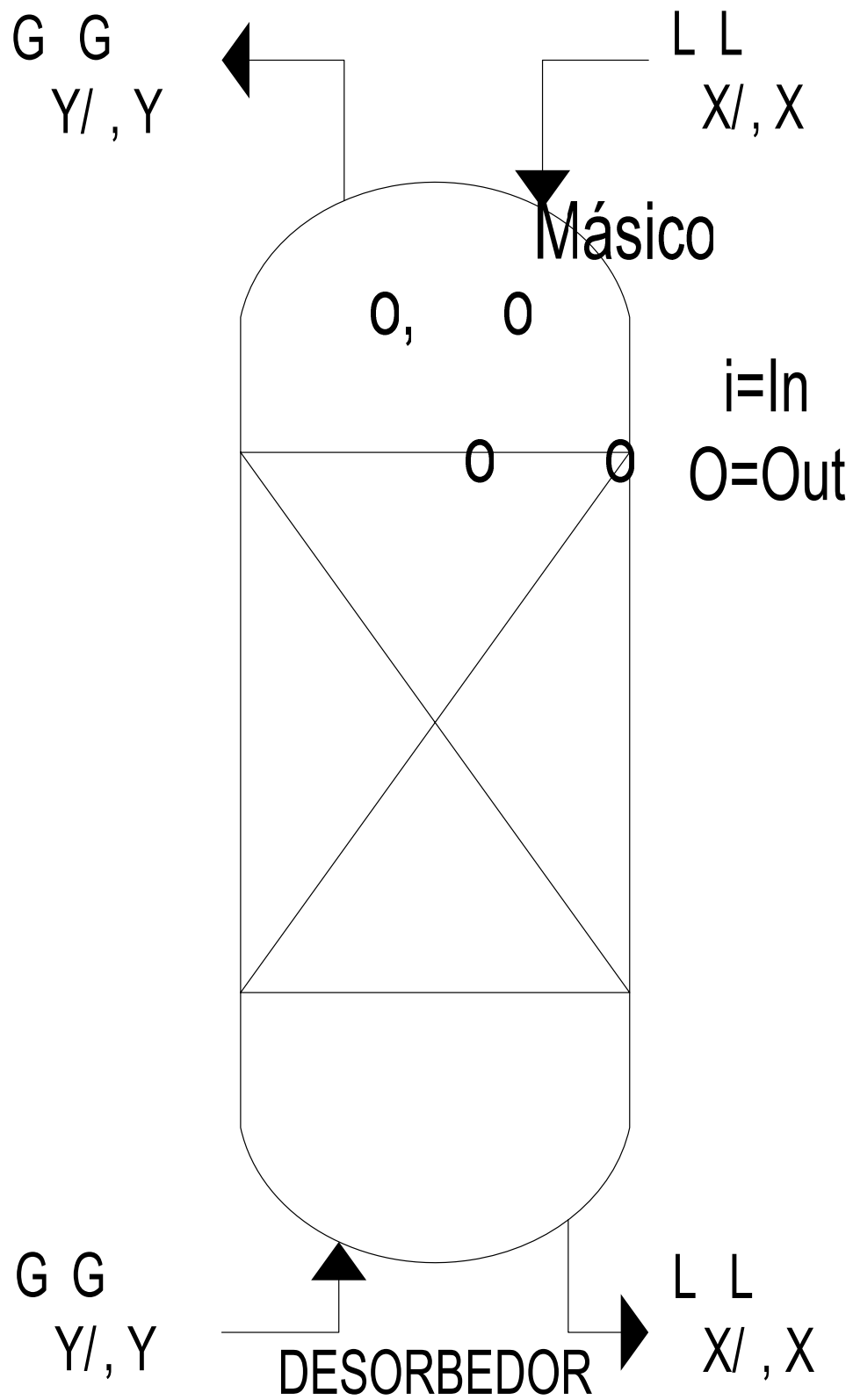


Figura 1. Diagrama Esquemático de la operación de desorción a estudiar.

**Determinación de las condiciones de la corriente de gas y de líquido entrando y saliendo la columna.** (Todos los cálculos realizados en esta sección es con respecto al empaque Nor-Pac Ring Plástico 50 mm con punto de estudio el tope de la torre) Para observar los resultados, ver tabla N° 6, N°7, N°8.

La concentración de salida del contaminante en líquido,  $X_o$ , puede calcularse utilizando la siguiente ecuación:

$$X_o = X_i \times \left(1 - \frac{\gamma}{100}\right) \quad (1.1)$$

Para calcular la composición del contaminante en la entrada en base libre de soluto, se emplea la siguiente ecuación:

$$X_i = \frac{X_i}{(1 - X_i)} \quad (1.2)$$

$$X_i = \frac{0,000015}{(1 - 0,000015)} = 1,500023 \times 10^{-5}$$

Por lo tanto,  $X_o = 1,500023 \times 10^{-5} \times \left(1 - \frac{95}{100}\right) = 7,500113 \times 10^{-7}$

Aplicando la siguiente ecuación 1.3, se logra llevar la composición del contaminante a la salida en base libre de soluto a composición molar:

$$X_o = \frac{X /_o}{(1 + X /_o)} \quad (1.3)$$

$$X_o = \frac{7,500113 \times 10^{-7}}{(1 + 7,500113 \times 10^{-7})} = 7,500107 \times 10^{-7}$$

Para el determinar las propiedades de las mezclas líquido y vapor se deben conocer las composiciones másicas del soluto en cada fase, mediante:

$$X_i^{Másico} = \frac{-X_i}{M_{H_2O} \left( \frac{X_i}{M_{H_2S}} - \frac{X_i}{M_{H_2O}} - \frac{1}{M_{H_2S}} \right)} \quad (1.4)$$

$$X_i^{Másico} = \frac{-0,000015}{18,015 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}} \times \left( \frac{0,000015}{34,079 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}} - \frac{0,000015}{18,015 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}} - \frac{1}{34,079 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}} \right)} = 2,8375 \times 10^{-5}$$

$$X_o^{Másico} = \frac{-X_o}{M_{Aire} \left( \frac{X_o}{M_{H_2S}} - \frac{X_o}{M_{H_2O}} - \frac{1}{M_{H_2S}} \right)} \quad (1.5)$$

$$X_o^{Másico} = \frac{-7,500107 \times 10^{-7}}{18,015 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}} \times \left( \frac{7,500107 \times 10^{-7}}{34,079 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}} - \frac{7,500107 \times 10^{-7}}{18,015 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}} - \frac{1}{34,079 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}} \right)} = 1,418795 \times 10^{-6}$$

Para conseguir la composición de salida del contaminante en la fase gas, se emplea la curva de equilibrio, la cual indica la relación entre la composición del contaminante en el gas y la composición del contaminante en el solvente a una temperatura especificada; también se requiere la recta de operación, la cual indica la relación entre la concentración del contaminante en el gas y el solvente en cualquier lugar en la columna del desorbedor.

Se puede observar en la gráfica N° 1, que la cantidad mínima de gas que puede ser usada para desorber el contaminante en la corriente de líquido corresponde a una línea de operación dibujada desde la concentración de salida en la corriente de líquido ( $X/o$ ) y la concentración de entrada en la corriente de gas ( $Y/i$ ), al punto en la curva de equilibrio que corresponde a la concentración del contaminante entrante en la corriente de líquido ( $X/i$ ). En el punto de intersección en la curva de equilibrio, las fuerzas impulsoras difusionales son cero, el tiempo de contacto requerido para el cambio de concentración es infinito y resulta una torre infinitamente alta. La pendiente de la curva de operación intersectando la curva de equilibrio es igual a la relación máxima  $(L_s/G_s)_{\text{Max}}$  en base a una mol de solvente libre de contaminante por mol de gas libre de contaminante. En otras palabras, los valores  $L_s$  y  $G_s$  no incluyen los moles de contaminante en las corrientes de líquido y gas. Los valores de  $L_s$  y  $G_s$  son constantes a través de la columna si se transfiere una cantidad insignificante de humedad de la fase gas a la líquida. La pendiente puede calcularse de la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{Ls}{Gs}\right)_{Máx} = \frac{(Y/I_i^* - Y/I_o)}{(X/I_i - X/I_o)} \quad (1.6)$$

Como se conoce que la ecuación de equilibrio es:

$$Y = \frac{1}{S \times P} \times X \quad [3] \quad (1.7)$$

Entonces,

$$\frac{Y/I}{(1 + Y/I)} = \frac{1}{S \times P} \times X, \text{ despejando } Y/I \text{ se tiene:}$$

$$Y/I = \frac{\frac{1}{S \times P} \times X}{\left(1 - \frac{1}{S \times P} \times X\right)}$$

$$\left(\frac{Ls}{Gs}\right)_{Máx} = \frac{\left(\frac{\frac{1}{S \times P} \times X_i}{\left(1 - \frac{1}{S \times P} \times X_i\right)}\right) - Y/I_o}{X/I_i - X/I_o}$$

$$\left(\frac{Ls}{Gs}\right)_{Máx} = \frac{\left(\frac{\frac{1}{0,00174 \frac{\text{FraccionMol}}{\text{atm}} \times 0,9986 \text{atm}} \times 0,000015}{\left(1 - \frac{1}{0,00174 \frac{\text{FraccionMol}}{\text{atm}} \times 0,9986 \text{atm}} \times 0,000015}\right)}\right) - 0}{1,500023 \times 10^{-5} - 7,500113 \times 10^{-7}}$$

$$\left(\frac{Ls}{Gs}\right)_{Máx} = 611,8710$$

Para determinar  $(G_S)_{Op}$  se debe conocer primero  $(L_S)_{Op}$  el cual puede se obtenido mediante:

$$(L_S)_{Op} = L_i \times (1 - X_i) \quad (1.8)$$

$$(L_S)_{Op} = 0,376397 \frac{\text{Kmol}}{\text{s}} \times (1 - 0,000015) = 0,376391 \frac{\text{Kmol}}{\text{s}}$$

Una vez conocida  $(L_s)_{Op}$  se procede a calcular  $(G_s)_{Min}$  por:

$$(G_s)_{Min} = \frac{L_{s_{Op}}}{\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{Máx}} \quad (1.9)$$

$$(G_s)_{Min} = \frac{0,376391 \frac{Kmol}{s}}{611,8710} = 6,151476 \times 10^{-4} \frac{Kmol}{s}$$

Se calcula  $(G_s)_{Op}$ , conocida la relación de flujo de gas libre de operación con el flujo de gas libre soluto mínimo:

$$(G_s)_{Op} = (G_s)_{Min} \times 1,6 \quad (1.10)$$

$$(G_s)_{Op} = 6,151476 \times 10^{-4} \frac{Kmol}{s} \times 1,6 = 9,984240 \times 10^{-4} \frac{Kmol}{s}$$

Conocido  $(L_s)_{Op}$  y  $(G_s)_{Op}$  se calcula la pendiente de la recta de operación:

$$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{Op} = \frac{Y /_i - Y /_o}{X /_i - X /_o} = \frac{(L_s)_{Op}}{(G_s)_{Op}} = \frac{0,376391 \frac{Kmol}{s}}{9,984240 \times 10^{-4} \frac{Kmol}{s}} = 382,4194 \quad (1.11)$$

Con toda la información anterior se realiza el balance en moles de soluto:

$$L_i \times X_i = N_A \times A + L_o \times X_o \quad (1.12)$$

Sabiendo que, a)  $L_o = \frac{L_s}{(1 - X_o)}$  y b)  $L_i = \frac{L_i^{VOL} \times \overline{\rho}_i^{Liq}}{M_i^{Liq}}$  se despeja  $N_A \times A$ :

$$N_A \times A = L_i \times X_i - L_o \times X_o$$

Antes de calcular  $N_A \times A$  se debe determinar las propiedades de la mezcla líquida, conociendo que las propiedades de una mezcla varía con la composición de sus componentes se emplean las siguientes ecuaciones:

Densidad de la mezcla de líquido en el punto i:

$$\bar{\rho}_i^{Liq} = \frac{1}{\frac{X_i^{Másica}}{\rho_{H_2S}} + \frac{(1 - X_i^{Másica})}{\rho_{H_2O}}} \quad [9] \quad (1.13)$$

$$\bar{\rho}_i^{Liq} = \frac{1}{\frac{2,8375 \times 10^{-5}}{1,3820 \frac{Kg}{m^3}} + \frac{(1 - 2,8375 \times 10^{-5})}{996,402 \frac{Kg}{m^3}}} = 976,4473 \frac{Kg}{m^3}$$

Peso Molecular de la mezcla de líquido en el punto i:

$$\bar{M}_i^{Liq} = \frac{1}{\frac{X_1^{Másica}}{M_{H_2S}} + \frac{(1 - X_1^{Másica})}{M_{H_2O}}} \quad [9] \quad (1.14)$$

$$\bar{M}_i^{Liq} = \frac{1}{\frac{2,8375 \times 10^{-5}}{34,079 \frac{Kg}{Kmol}} + \frac{(1 - 2,8375 \times 10^{-5})}{18,015 \frac{Kg}{Kmol}}} = 18,0152 \frac{Kg}{Kmol}$$

Viscosidad de la mezcla de líquido en el punto i:

$$\bar{\mu}_i^{Liq} = \exp(X_i \times \ln(\mu_{H_2S}) + (1 - X_i) \times \ln(\mu_{H_2O})) \quad [3] \quad (1.15)$$

$$+ 2 \times X_2^{H_2S.Molar} \times (1 - X_2^{H_2S.Molar}) \times G_{12}$$

$$\bar{\mu}_i^{Liq} = \exp(0,000015 \times \ln(1,32 \times 10^{-4} Pa.s) + (1 - 0,000015) \times \ln(8,55 \times 10^{-4} Pa.s))$$

$$+ 2 \times 0,000015 \times (1 - 0,000015) \times (-0,22)$$

$$\bar{\mu}_L^{Entrada} = 8,5497 \times 10^{-4} Pa.s$$

Conocidas las propiedades de la mezcla de líquido en el punto i se procede a calcular  $N_A \times A$ :

$$N_A \times A = \left( \frac{40 \frac{m^3}{s} \times 976,4473 \frac{Kg}{m^3}}{18,0152 \frac{Kg}{Kmol}} \right) \times 0,000015 - \left( \frac{0,376391 \frac{Kmol}{s}}{1 - 7,500107 \times 10^{-7}} \right) \times 7,500107 \times 10^{-7}$$

$$N_A \times A = 5,363659 \times 10^{-6} \frac{Kmol}{s}$$

Una vez determinada la cantidad de soluto que se transfiere del líquido a gas, se determina el flujo de gas de salida:

$$G_o = (Gs)_{op} + N_A \times A \quad (1.16)$$

$$G_o = 9,984240 \times 10^{-4} \frac{Kmol}{s} + 5,363659 \times 10^{-6} \frac{Kmol}{s} = 9,896010 \times 10^{-4} \frac{Kmol}{s}$$

Seguidamente se calcula la composición de soluto en la salida del gas:

$$Y_o = \frac{G_o - (Gs)_{op}}{G_o} \quad (1.17)$$

$$Y_o = \frac{9,896010 \times 10^{-4} \frac{Kmol}{s} - 9,984240 \times 10^{-4} \frac{Kmol}{s}}{9,896010 \times 10^{-4} \frac{Kmol}{s}} = 5,420021 \times 10^{-3}$$

Entonces la composición másica de salida del gas es:

$$Y_o^{Másico} = \frac{-Y_o}{M_{Aire} \left( \frac{-Y_o}{M_{H_2S}} - \frac{-Y_o}{M_{Aire}} - \frac{1}{M_{H_2S}} \right)} \quad (1.18)$$

$$Y_o^{Másico} = \frac{-5,420021 \times 10^{-3}}{28,97 \frac{Kg}{Kmol} \times \left( \frac{5,420021 \times 10^{-3}}{34,079 \frac{Kg}{Kmol}} - \frac{5,420021 \times 10^{-3}}{28,97 \frac{Kg}{Kmol}} - \frac{1}{34,079 \frac{Kg}{Kmol}} \right)} = 6,369780 \times 10^{-3}$$

Como se mencionó anteriormente, las propiedades de la mezcla varían con las composiciones de los componentes en la misma, por lo tanto se deben calcular las propiedades de la mezcla de gas:

Densidad de la mezcla de gas en el punto de salida:

$$\bar{\rho}_o^{Gas} = \frac{1}{\frac{Y_o^{Másica}}{\rho_{H_2S}} + \frac{(1 - Y_o^{Másica})}{\rho_{Aire}}} \quad [9] \quad (1.19)$$

La densidad de los gases puros se calculó por gas ideal, tabla N° 2.

$$\rho_{H_2S} = \frac{P \times M_{H_2S}}{R \times T} \quad \rho_{Aire} = \frac{P \times M_{Aire}}{R \times T}$$

$$\bar{\rho}_o^{Gas} = \frac{1}{\frac{6,369780 \times 10^{-3}}{1,3820 \frac{Kg}{m^3}} + \frac{(1 - 6,369780 \times 10^{-3})}{1,174 \frac{Kg}{m^3}}} = 1,176 \frac{Kg}{m^3}$$

Peso Molecular de la mezcla de gas en el punto de salida:

$$\bar{M}_o^{Gas} = \frac{1}{\frac{Y_o^{Másica}}{M_{H_2S}} + \frac{(1 - Y_o^{Másica})}{M_{Aire}}} \quad [9] \quad (1.20)$$

$$\bar{M}_o^{Gas} = \frac{1}{\frac{6,369780 \times 10^{-3}}{34,079 \frac{Kg}{Kmol}} + \frac{(1 - 6,369780 \times 10^{-3})}{28,970 \frac{Kg}{Kmol}}} = 28,998 \frac{Kg}{Kmol}$$

Viscosidad de la mezcla de gas en el punto de salida:

$$\bar{\mu}_o^{Gas} = \frac{Y_o \times \mu_{H_2S}}{(1 - Y_o) \times \phi_{H_2S-Aire} + Y_o \times \phi_{H_2S-H_2S}} + \frac{(1 - Y_o) \times \mu_{Aire}}{(1 - Y_o) \times \phi_{Aire-Aire} + Y_o \times \phi_{Aire-H_2S}} \quad [3] \quad (1.21)$$

$$\phi_{H_2S-Aire} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{\mu_{H_2S}}{\mu_{Aire}} \right)^{1/2} \times \left( \frac{M_{Aire}}{M_{H_2S}} \right)^{1/4} \right]^2}{\left[ 8 \times \left( 1 + \frac{M_{H_2S}}{M_{Aire}} \right) \right]^{1/2}}$$

$$\phi_{Aire-H_2S} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{\mu_{Aire}}{\mu_{H_2S}} \right)^{1/2} \times \left( \frac{M_{H_2S}}{M_{Aire}} \right)^{1/4} \right]^2}{\left[ 8 \times \left( 1 + \frac{M_{Aire}}{M_{H_2S}} \right) \right]^{1/2}} \quad (1.22)$$

$$\phi_{H_2S-Aire} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{1,3200 \times 10^{-4}}{1,7500 \times 10^{-5}} \right)^{1/2} \times \left( \frac{28,970 \frac{Kg}{Kmol}}{34,079 \frac{Kg}{Kmol}} \right)^{1/4} \right]^2}{\left[ 8 \times \left( 1 + \frac{34,079 \frac{Kg}{Kmol}}{28,970 \frac{Kg}{Kmol}} \right) \right]^{1/2}} = 3,1704$$

Realizando lo mismo para  $\phi_{Aire-H_2S}$  se obtiene que:

$$\phi_{Aire-H_2S} = 0,4994$$

Y para  $\phi_{Aire-Aire} = \phi_{H_2S-H_2S} = 1$ ; entonces la viscosidad queda como:

$$\begin{aligned} \mu_o^{Gas} &= \frac{5,420021 \times 10^{-3} \times 1,3200 \times 10^{-4}}{(1 - 5,420021 \times 10^{-3}) \times 3,1704 + 5,420021 \times 10^{-3} \times 1} \\ &+ \frac{(1 - 5,420021 \times 10^{-3}) \times 1,7500 \times 10^{-5}}{(1 - 5,420021 \times 10^{-3}) \times 1 + 5,420021 \times 10^{-3} \times 0,4994} \\ \mu_o^{Gas} &= 1,767948 \times 10^{-5} Pa.s \end{aligned}$$

Una vez conocido todas las propiedades de la mezcla en el tope y en el fondo se puede calcular los flujos másicos de líquido y vapor en el tope y en el fondo de la columna, ya que las propiedades del líquido en la salida de la columna se calcula de la misma manera como se calculó para el tope de la columna usando las ecuaciones (1.13), (1.14), (1.15).

$$L_o^{Másico} = L_o \times \overline{M_o^{Gas}} = \frac{Ls}{(1 - X_o)} \times \overline{M_o^{Gas}} = \frac{0,376391 \frac{Kmol}{s}}{(1 - 7,500107 \times 10^{-7})} \times 28,998 \frac{Kg}{Kmol} = 0,028696 \frac{Kg}{s}$$

$$L_i^{Másico} = L_i^{VOL} \times \overline{\rho_i^{Liq}} = 40 \frac{m^3}{s} \times 976,4473 \frac{Kg}{m^3} = 6,7808 \frac{Kg}{s}$$

$$G_i^{Másico} = G_s \times \overline{M_{AIRE}} = 9,984240 \times 10^{-4} \frac{Kmol}{s} \times 28,97 \frac{Kg}{Kmol} = 0,028513 \frac{Kg}{s}$$

$$G_o^{Másico} = G_o \times \overline{M_o^{Gas}} = 9,896010 \times 10^{-4} \frac{Kmol}{s} \times 28,998 \frac{Kg}{Kmol} = 0,028696 \frac{Kg}{s}$$

**Determinación del diámetro (D) de la columna.** *(Todas las ecuaciones empleadas en ésta sección fueron tomadas de la referencia [7], a excepción de las que tienen indicaciones)*

Para el diseño de una columna de desorción con empaques al azar, específicamente en la determinación del diámetro de la torre, se debe realizar su estudio en el punto más desfavorable de la misma. Por conocimientos teóricos se conoce que la zona más desfavorable es la sección del tope de la torre, esto debido a que encuentra la mayor cantidad de flujo durante toda la operación. Sin embargo se procedió a realizar los cálculos en la zona del fondo también para corroborar la información teórica encontrada.

Una vez que las condiciones de las corrientes han sido determinadas, se puede estimar el diámetro de la columna. El diseño presentado en esta sección se basa en el método indicado por Billet <sup>[7]</sup>, el cual requiere el conocimiento de la relación de flujo de gas total de las mezclas y propiedades de las mezclas en el punto de estudio, y las constantes de empaques. Las constantes y datos del empaque que se van a emplear en esta sección se pueden conseguir en la tabla N° 5.

Debido a la complejidad de la determinación del diámetro se procede a mostrar los cálculos únicamente para el empaque Nor-Pac Ring Plástico 50mm en la zona del tope de la torre, por lo tanto todas las propiedades empleadas en esta sección pertenecen a los flujos de gas y líquido en el tope de la columna. Sin embargo, se puede apreciar los diámetros de columna obtenidos para otros empaques en ambas zonas, fondo y tope, en la tabla N° 13 y N° 14, no tienen discrepancias debido a que se está trabajando con soluciones diluidas. Se sigue la siguiente secuencia de cálculo, desde ecuación (1.23) hasta (1.26) para la determinar los parámetros que influyen en el funcionamiento de la torre:

I. Determinación del coeficiente de resistencia en el punto de carga:

Para la determinación de éste coeficiente de resistencia, se debe primero calcular el valor de  $n_s$ , el cual depende de la magnitud de la relación de los flujos másicos y densidad del gas y líquido.

$$\text{Si } \frac{L_i^{\text{Másico}}}{G_o^{\text{Másico}}} \times \sqrt{\frac{\rho_o^{\text{Gas}}}{\rho_i^{\text{Liq}}}} \leq 0,4 \text{ entonces } n_s = -0,326 \text{ si no } n_s = -0,723$$

$$\frac{6,7808 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}}{0,028696 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}} \times \sqrt{\frac{1,176 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}{976,4473 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}} = 8,199 \Rightarrow n_s = -0,723$$

$$\xi_s = \frac{g}{C_s^2 \times \left[ \frac{L_i^{\text{Másico}}}{G_o^{\text{Másico}}} \times \sqrt{\frac{\rho_o^{\text{Gas}}}{\rho_i^{\text{Liq}}}} \times \left( \frac{\mu_i^{\text{Liq}}}{\mu_o^{\text{Gas}}} \right)^{0,4} \right]^{2 \times n_s}} \quad (1.23)$$

$$\xi_s = \frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{2,959^2 \times \left[ \frac{6,7808 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}}{0,028696 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}} \times \sqrt{\frac{1,176 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}{976,4473 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}} \times \left( \frac{8,5497 \times 10^{-4} \text{Pa.s}}{1,767948 \times 10^{-5} \text{Pa.s}} \right)^{0,4} \right]^{2 \times -0,723}}$$

$$\xi_s = 221,302$$

II. Cálculo de la velocidad superficial de gas en el punto de carga:

$$v_{V,S} = \sqrt{\frac{g}{\xi_s}} \times \left[ \frac{\varepsilon}{a^{1/6}} - \sqrt{a} \times \left( \frac{12}{g} \times \frac{\eta_i^{\text{Liq}}}{\rho_i} \times \frac{L_i^{\text{Másico}}}{G_o^{\text{Másico}}} \times \rho_o^{\text{Gas}} \times v_{V,S} \right)^{1/3} \right] \quad (1.24)$$

$$\times \left( \frac{12}{g} \times \frac{\eta_i^{\text{Liq}}}{\rho_i} \times \frac{L_i^{\text{Másico}}}{G_o^{\text{Másico}}} \times \rho_o^{\text{Gas}} \times v_{V,S} \right)^{1/6} \times \sqrt{\frac{\rho_i^{\text{Liq}}}{\rho_o^{\text{Gas}}}}$$

Como la ecuación (1.24) es una ecuación trascendente, no se puede despejar la velocidad superficial de gas en el punto de carga, por lo tanto se realiza una iteración de la velocidad superficial hasta que se cumpliera la igualdad d ambos lados de la ecuación. Ésta iteración se realiza mediante la ayuda de una herramienta de cálculo llamada Microsoft Excel, el cual es una hoja de cálculo. Se emplea la función Solver, el cual itera internamente, para hallar la solución correcta de velocidad superficial que cumpla con la ecuación (1.24), entonces:

$$v_{V,S} = \sqrt{\frac{9,81 \frac{m}{s^2}}{221,302} \times \left[ \frac{0,947}{86,8^{1/6}} - \sqrt{86,8} \times \left( \frac{12}{9,81 \frac{m}{s^2}} \times \frac{8,5497 \times 10^{-4} Pa \cdot s}{976,4473 \frac{Kg^2}{m^3}} \times \frac{6,7808 \frac{Kg}{s}}{0,028696 \frac{Kg}{s}} \times 1,176 \frac{Kg}{m^3} \times v_{V,S} \right)^{1/3} \right]}$$

$$\times \left( \frac{12}{9,81 \frac{m}{s^2}} \times \frac{8,5497 \times 10^{-4} Pa \cdot s}{976,4473 \frac{Kg^2}{m^3}} \times \frac{6,7808 \frac{Kg}{s}}{0,028696 \frac{Kg}{s}} \times 1,176 \frac{Kg}{m^3} \times v_{V,S} \right)^{1/6} \times \sqrt{\frac{976,4473 \frac{Kg}{m^3}}{1,176 \frac{Kg}{m^3}}}$$

Aplicando Solver, se obtiene que:  $v_{V,S} = 0,151429 \frac{m}{s}$

III. Conocida la velocidad superficial del gas, se procede a calcular el área transversal de la columna:

$$A_s = \frac{G_o^{Másico}}{v_{V,S} \times \rho_o^{Gas}} \quad (1.25)$$

$$A_s = \frac{0,028696 \frac{Kg}{s}}{0,151429 \frac{m}{s} \times 1,176 \frac{Kg}{m^3}} = 0,1612 m^2$$

IV. Determinado el área transversal de la torre, se puede calcular el diámetro para operar a las condiciones de flujo de gas y líquido en el tope de la torre empleando como relleno empaques Nor-Pac Ring 50 mm.

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times A_s} \quad (1.26)$$

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times 0,1612 m^2} = 0,453 m$$

Por regla práctica, el diámetro de la torre se especifica con centímetros como unidad más pequeña, por lo tanto se aproxima el valor del diámetro calculado hasta la longitud entera, en centímetros, inmediatamente superior a la calculada, por lo tanto:

$$D = 45,3 cm; \text{ al redondear se tiene que } D_{Columna} = 46,0 cm = 0,46 m$$

### Determinación de la altura del lecho empacado [7].

Para determinar la altura del lecho empacado, se debe realizar un cálculo riguroso, es decir se aplica el estudio en toda la columna punto a punto, debido a que los flujos molares de la mezcla líquida y vapor cambian en cada punto de la columna. Por lo tanto se debe aplicar las ecuaciones siguientes, del (1.27) al (1.45) para cierta cantidad de puntos distribuidos uniformemente en toda la columna entre el tope y el fondo. Se escogió la cantidad de 200 puntos, con los  $X_i$  equiespaciados, dentro la columna para realizar el cálculo de la altura del lecho empacado, de esta manera el valor de la altura de lecho será más exacta para el diseño. Se emplea la herramienta de cálculo, Excel, de nuevo para resolver las ecuaciones, esta vez con la ayuda de los macros para facilitar el proceso de iteración. El punto escogido para mostrar los cálculos es:  $X_i = 2,175033 \times 10^{-6}$  y con el mismo empaque que se utilizó para mostrar los cálculos de la determinación del diámetro, es decir, Nor-Pac Ring. A partir de ahora todas las propiedades y variables van a ser del punto escogido, anterior, de la columna.

Empleando la ecuación (1.3), se calcula la fracción molar líquida:

$$X = 2,175028 \times 10^{-6}$$

Con la ecuación (1.12) a), se calcula el flujo de líquido molar:

$$L = 3,763923 \times 10^{-1} \frac{\text{Kmol}}{\text{s}}$$

Lo mismo pero con la ecuación (1.11), se calcula la fracción libre de soluto en gas:

$$Y_i = 5,449558 \times 10^{-4}$$

Empleando la ecuación (1.3), se calcula la fracción molar del gas:

$$Y = 5,446590 \times 10^{-4}$$

Empleando la siguiente ecuación se tiene el flujo mola de gas:

$$G = \frac{G_s}{(1 - X)} = \frac{9,984240 \times 10^{-4} \frac{\text{Kmol}}{\text{s}}}{(1 - 2,175028 \times 10^{-6})} = 9,847738 \times 10^{-04} \frac{\text{Kmol}}{\text{s}} \quad (1.27)$$

Empleando la ecuación (1.4), se calcula la fracción másica del líquido:

$$X^{Másico} = 4,114495 \times 10^{-6}$$

Empleando la ecuación (1.13), (1.14), (1.15) se calcula la densidad, peso molecular y la viscosidad del líquido:

$$\rho^{-Liq} = 993,458 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\overline{M}^{Liq} = 18,015 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$\mu^{-Liq} = 8,549957 \times 10^{-4} Pa.s$$

Empleando la ecuación (1.18), se calcula la fracción másica del gas:

$$Y^{Másico} = 46,409998 \times 10^{-4}$$

Empleando la ecuación (1.19), (1.20), (1.21) se calcula la densidad, peso molecular y la viscosidad del gas:

$$\rho^{-Gas} = 1,175 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\overline{M}^{Gas} = 28,973 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$\mu^{-Gas} = 1,751797 \times 10^{-5} Pa.s$$

Conociendo el flujo de gas y líquido molar se puede calcular el másico:

$$L^{Másico} = L \times \overline{M}^{Liq} = 3,763923 \times 10^{-1} \frac{Kmol}{s} \times 18,015 \frac{Kg}{Kmol} = 6,7807 \frac{Kg}{s}$$

$$G^{Másico} = G \times \overline{M}^{Gas} = 9,847738 \times 10^{-04} \frac{Kmol}{s} \times 28,973 \frac{Kg}{Kmol} = 0,028531 \frac{Kg}{s}$$

I. Velocidad Superficial del gas:

$$U_v = \frac{4 \times G^{Másico}}{\pi \times D_{Columna}^2 \times \rho^{-Gas}} \quad (1.28)$$

$$U_v = \frac{4 \times 0,028531 \frac{Kg}{s}}{\pi \times 0,46m^2 \times 1,175 \frac{Kg}{m^3}} = 0,146165 \frac{m}{s}$$

II. Carga de líquido:

$$U_L = \frac{4 \times L^{Másico}}{\pi \times D_{Columna}^2 \times \rho^{-Liq}} \quad (1.29)$$

$$U_L = \frac{4 \times 6,7807 \frac{Kg}{s}}{\pi \times 0,46m^2 \times 993,458 \frac{Kg}{m^3}} = 0,040990 \frac{m}{s}$$

III. Número de Reynolds para el líquido:

$$Re_L = \frac{U_L \times \rho_L}{a \times \eta_L} \quad (1.30)$$

$$Re_L = \frac{0,040990 \frac{m}{s} \times 993,458 \frac{Kg}{m^3}}{86,8 \frac{m^2}{m^3} \times 8,549957 \times 10^{-4} Pa.s} = 548,711$$

IV. Tensión superficial:

$$Q = 0,1196 \times \left[ 1 + \frac{Tb_R \times \ln\left(\frac{P_c}{1,01325}\right)}{(1 - Tb_R)} \right] - 0,279 \quad (1.31)$$

Las propiedades críticas del agua pueden ser encontradas en la tabla N° 3.

$$Tb_R = \frac{T_{ebull}}{T_c} = \frac{(100 + 273,15)k}{647,35k} = 0,58 \quad (1.32)$$

$$Q = 0,1196 \times \left[ 1 + \frac{0,58 \times \ln\left(\frac{221,19 \text{ bar}}{1,01325}\right)}{(1 - 0,58)} \right] - 0,279 = 0,7172$$

$$\sigma_{H_2O} = P_c^{2/3} \times T_c^{1/3} \times Q \times (1 - T_R)^{11/9} \quad (1.33)$$

$$\sigma_{H_2O} = (221,19 \text{ bar})^{2/3} \times (647,35)^{1/3} \times 0,7172 \times \left( 1 - \left( \frac{27,4 + 273,15}{647,35} \right) \right)^{11/9} = 105,820 \frac{\text{dina}}{\text{s}}$$

$$\sigma_{H_2O} = 0,10582 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} = \sigma_L$$

V. Número de Weber para el líquido:

$$We_L = \frac{U_L^2 \times \rho_L}{a \times \sigma_L} \quad (1.34)$$

$$We_L = \frac{\left( 0,040990 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \times 993,458 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}{86,8 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3} \times 0,10582 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}} = 0,1817$$

VI. Número de Froude para el Líquido:

$$Fr_L = \frac{U_L^2 \times a}{g} \quad (1.35)$$

$$Fr_L = \frac{\left( 0,040990 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \times 86,8 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,0149$$

VII. Área interfacial específica:

$$\frac{a_{ph}}{a} = 3 \times \sqrt{\varepsilon} \times Re_L^{-0,2} \times We_L^{0,75} \times Fr_L^{-0,45} \quad (1.36)$$

$$\frac{a_{ph}}{a} = 3 \times \sqrt{0,947} \times (548,711)^{-0,2} \times (0,1817)^{0,75} \times (0,0149)^{-0,45} = 1,5293$$

VIII. Diámetro hidráulico:

$$d_h = 4 \times \frac{\varepsilon}{a} \quad (1.37)$$

$$d_h = 4 \times \frac{0,947}{86,8 \frac{m^2}{m^3}} = 0,04364m$$

IX. Coeficiente de difusividad de la fase líquida:

Las variables para el cálculo de la difusividad de la fase líquida se encuentran en la tabla N° 5.

$$D_{H_2S-H_2O} = \frac{(117,3 \times 10^{-18}) \times (\varphi \times M_{H_2O})^{0,5} \times T}{\mu_L \times \nu_A^{0,6}} \quad [6] \quad (1.38)$$

$$D_{H_2S-H_2O} = \frac{(117,3 \times 10^{-18}) \times \left(2,26 \times 18,015 \frac{Kg}{Kmol}\right)^{0,5} \times (27,4 + 273,15) K}{8,549957 \times 10^{-4} Pa.s \times \left(0,0329 \frac{m^3}{Kmol}\right)^{0,6}} = 2,040809 \times 10^{-9} \frac{m^2}{s}$$

X. Altura de unidad de transferencia en la fase líquida:

$$HTU_L = \frac{1}{C_L} \times \left(\frac{\eta_L}{g \times \sigma_L}\right)^{1/6} \times \sqrt{\frac{d_h}{D_L}} \times \left(\frac{U_L}{a}\right)^{2/3} \times \left(\frac{a_{ph}}{a}\right)^{-1} \quad (1.39)$$

$$HTU_L = \frac{1}{1,08} \times \left(\frac{8,549957 \times 10^{-4} Pa.s}{9,81 \frac{m}{s^2} \times 0,10582 \frac{Kg}{m^2}}\right)^{1/6} \times \sqrt{\frac{0,04364m}{2,040809 \times 10^{-9} \frac{m^2}{s}}} \times \left(\frac{0,040990 \frac{m}{s}}{86,8 \frac{m^2}{m^3}}\right)^{2/3} (1,5293)^{-1}$$

$$HTU_L = 1,1318m$$

XI. Retención total de líquido en el punto de carga

$$h_L = \left( 12 \times \frac{Fr_L}{Re_L} \right)^{1/3} \quad (1.40)$$

$$h_L = \left( 12 \times \frac{0,0149}{548,711} \right)^{1/3} = 0,068762$$

XII. Coeficiente de difusividad en la fase gas:

$$D_{H_2S-Aire} = \frac{0,00143 \times (T + 273,15)^{1,75}}{P \times \sqrt{M_{H_2S-Aire}} \times \left[ (\sum \nu)_{H_2S}^{1/3} + (\sum \nu)_{Aire}^{1/3} \right]^2} \quad (1.41)$$

$$M_{H_2S-H_2O} = 2 \times \left[ \frac{1}{M_{H_2S}} + \frac{1}{M_{Aire}} \right]^{-1} = 2 \times \left[ \frac{1}{34,079 \frac{Kg}{Kmol}} + \frac{1}{28,970 \frac{Kg}{Kmol}} \right]^{-1} = 31,3175 \frac{Kg}{Kmol}$$

$$(\sum \nu)_{H_2S} = 22,9 + 2 \times 2,31 = 27,52 \quad (\sum \nu)_{Aire} = 19,7$$

$$D_{H_2S-Aire} = \frac{0,00143 \times (27,4 + 273,15)^{1,75}}{(0,9986 \times 1,01325) \text{ bar} \times \sqrt{31,3175 \frac{Kg}{Kmol}} \times \left[ 27,52^{1/3} + 19,7^{1/3} \right]^2} = 1,67456 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

XIII. Altura de unidad de transferencia en la fase gas:

$$HTU_V = \frac{1}{C_V} \times \frac{\sqrt{d_h}}{a^{3/2}} \times \sqrt{\varepsilon - h_L} \times \frac{U_V}{D_{H_2S-Aire}} \times \left( \frac{a \times \eta_V}{U_V \times \rho_V} \right)^{3/4} \times \left( \frac{D_{H_2S-Aire} \times \rho_V}{\eta_V} \right) \times \left( \frac{a_{ph}}{a} \right)^{-1} \quad (1.42)$$

$$HTU_V = \frac{1}{0,322} \times \frac{\sqrt{0,04364m}}{\left( 86,8 \frac{m^2}{m^3} \right)^{3/2}} \times \sqrt{0,947 - 0,068762} \times \frac{0,146165 \frac{m}{s}}{1,67456 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}}$$

$$\times \left( \frac{86,8 \frac{m^2}{m^3} \times 1,751797 \times 10^{-5} Pa.s}{0,146165 \frac{m}{s} \times 1,175 \frac{Kg}{m^3}} \right)^{3/4} \times \left( \frac{1,67456 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s} \times 1,175 \frac{Kg}{m^3}}{1,751797 \times 10^{-5} Pa.s} \right) \times (1,5293)^{-1}$$

$$HTU_V = 0,12876m$$

XIV. Curva de fuerza motriz (cálculo de la concentración en la interfase):

$$\frac{(Y - Y_{INTERFASE})}{(X_{INTERFASE} - X)} = \frac{L^{Máscico}}{G^{Máscico}} \times \frac{HTU_V}{HTU_L} \times \frac{(1 - Y)_i \text{ Ln}}{(1 - X)_i \text{ Ln}} \quad (1.43)$$

$$\frac{\left( Y - \frac{X_{INTERFASE}}{S \times P} \right)}{(X_{INTERFASE} - X)} = \frac{L}{G} \times \frac{HTU_V}{HTU_L} \times \frac{\frac{\left( \frac{X_{INTERFASE}}{S \times P} - Y \right)}{\ln \left( \frac{1 - Y}{1 - \frac{X_{INTERFASE}}{S \times P}} \right)}}{\frac{(X_{INTERFASE} - X)}{\ln \left( \frac{1 - X}{1 - X_{INTERFASE}} \right)}}$$

$$\frac{\left( 5,446590 \times 10^{-4} - \frac{X_{INTERFASE}}{0,00173} \right)}{(X_{INTERFASE} - 2,175028 \times 10^{-6})} = \frac{3,763923 \times 10^{-1} \frac{\text{Kmol}}{\text{s}}}{9,847738 \times 10^{-04} \frac{\text{Kmol}}{\text{s}}} \times \frac{HTU_V}{HTU_L} \times \frac{\frac{\left( \frac{X_{INTERFASE}}{0,00173} - 5,446590 \times 10^{-4} \right)}{\ln \left( \frac{1 - 5,446590 \times 10^{-4}}{1 - \frac{X_{INTERFASE}}{0,00173}} \right)}}{\frac{(X_{INTERFASE} - 2,175028 \times 10^{-6})}{\ln \left( \frac{1 - 2,175028 \times 10^{-6}}{1 - X_{INTERFASE}} \right)}}$$

De la ecuación anterior sólo se desconoce  $X_{INTERFASE}$ , por lo que se puede iterar con la ayuda del Solver de Microsoft Excel hasta que se cumpla ambos lados de la igualdad. El valor que cumple con la condición es:

$$X_{INTERFASE} = 1,031408 \times 10^{-6}$$

Sabiendo que:

$$Y_{INTERFASE} = \frac{1}{S \times P} \times X_{INTERFASE} = \frac{1,031408 \times 10^{-6}}{0,00174 \frac{\text{FracciónMol}}{\text{atm}} \times 0,9986 \text{atm}} = 5,94361 \times 10^{-4}$$

Se puede apreciar en la gráfica N° 2, algunas de las curvas de fuerza motriz.

XV. Altura total del lecho empacado:

La altura total del lecho empacado se puede determinar mediante dos ecuaciones, las cuales debe arrojar un resultado similar.

$$H_{LechoEmpacado} = \int_{Y_i}^{Y_o} HTU_V \times \frac{\frac{(Y_i - Y)}{\ln\left(\frac{1 - Y}{1 - Y_i}\right)}}{(1 - Y) \times (Y - Y_i)} = \int_{Y_i}^{Y_o} A \quad (1.44)$$

$$H_{LechoEmpacado} = \int_{X_o}^{X_i} HTU_L \times \frac{\frac{(X_i - X)}{\ln\left(\frac{1 - X}{1 - X_i}\right)}}{(1 - X) \times (X - X_i)} = \int_{X_o}^{X_i} B \quad (1.45)$$

Para resolver cada una de las integrales, se debe obtener la altura de unidad de transferencia de la fase gas y la fase líquida, composiciones de interfase para cada punto de la columna, en este caso se debe repetir los pasos desde la ecuación (1.27) hasta (1.45) doscientas veces, debido a que se estableció un estudio riguroso, tratando de tomar una gran cantidad de puntos posibles para obtener la mayor exactitud.

Por lo tanto se genera una tabla donde contenga cada una de las variables de la ecuación integral, es decir, una tabla de los valores de A y otra de los valores de B para cada punto de operación, hecho esto se procede a aplicar métodos de integración numérica para obtener el área bajo la curva, el cual es la altura del lecho empacado. Se escoge el método de Simpson porque es preciso y simple de aplicar.

- Área a partir de HTU<sub>v</sub>

$$AREA_A = \frac{Paso_A}{3} \times [1^\circ Valor_A + UltimoValor_A + 2 \times \sum ValorPar_A + 4 \times \sum ValorImpar_A]^{[8]}$$

$$Paso_A = \frac{|Y /_i - Y /_o|}{200}$$

$$Paso_A = \frac{|0 - 5,449558 \times 10^{-3}|}{200} = 2,724779 \times 10^{-5}$$

$$AREA_A = -\frac{2,724779 \times 10^{-5}}{3} \times [-4,237868 \times 10^3 + -5,819 \times 10^2] \\ + 2 \times -1,34082 \times 10^5 + 4 \times -1,30985 \times 10^5$$

$$AREA_A = 7,238m$$

- Área a partir de HTU<sub>L</sub>

$$AREA_B = \frac{Paso_B}{3} \times [1^\circ Valor_B + UltimoValor_B + 2 \times \sum ValorPar_B + 4 \times \sum ValorImpar_B]$$

$$Paso_B = \frac{|X /_i - X /_o|}{200}$$

$$Paso_B = \frac{|1,50002210^{-5} - 7,50011210^{-7}|}{200} = 7,125107 \times 10^{-8}$$

$$AREA_B = \frac{7,125106 \times 10^{-8}}{3} \times [1,620642 \times 10^6 + 2,201341 \times 10^6] \\ + 2 \times 5,108329 \times 10^7 + 4 \times 4,990244 \times 10^7$$

$$AREA_B = 7,211m$$

Se puede apreciar que la altura del lecho empacado calculado por las dos maneras dan casi lo mismo, esto es una indicación de que el procedimiento de cálculo está realizado de forma correcta. Por lo tanto se toma un promedio entre los dos valores de alturas de lecho:

$$H_{LechoEmpacado} = \left( \frac{AREA_A + AREA_B}{2} \right) = 7,22m$$

### Determinación de la la caída de presión:

I. Factor de mojado:

$$W = \exp\left(\frac{Re_L}{200}\right) \quad (1.46)$$

$$W = \exp\left(\frac{548,711}{200}\right) = 15,625$$

II. Factor de pared:

$$fs = \left(1 + \frac{4}{a \times ds}\right)^{-1} \quad (1.47)$$

$$fs = \left(1 + \frac{4}{86,8 \frac{m^2}{m^3} \times 0,46m}\right)^{-1} = 0,908942$$

III. Diámetro efectivo de partículas:

$$dp = \frac{6 \times (1 - \varepsilon)}{a} \quad (1.48)$$

$$dp = \frac{6 \times (1 - 0,947)}{86,8 \frac{m^2}{m^3}} = 0,003663m$$

IV. Número de Reynolds para el gas:

$$Re_v = \frac{U_v \times dp \times \rho_v}{(1 - \varepsilon) \times \mu_v} \times fs \quad (1.49)$$

$$Re_v = \frac{0,146165 \frac{m}{s} \times 0,003663m \times 1,175 \frac{Kg}{m^3}}{(1 - 0,947) \times 1,751797 \times 10^{-5} Pa.s} \times 0,908942 = 615,99$$

V. Factor de resistencia al flujo:

$$\xi_L = Cp \times W \times \left(\frac{64}{Re_v} + \frac{1,8}{Re_v^{0,08}}\right) \times \left(\frac{\varepsilon - h_L}{\varepsilon}\right) \quad (1.50)$$

$$\xi_L = 0,35 \times 15,625 \times \left(\frac{64}{615,99} + \frac{1,8}{615,99^{0,08}}\right) \times \left(\frac{0,947 - 0,068762}{0,947}\right) = 5,9880$$

VI. Caída de presión para empaque irrigado:

$$\frac{\Delta P}{Z} = \xi_L \times \frac{a \times}{(\varepsilon - h_L)} \times \frac{U_V^2}{2} \times \rho_V \times \frac{1}{fs} \quad (1.51)$$

$$\frac{\Delta P}{Z} = 5,988 \times \frac{86,8 \frac{m^2}{m^3}}{(0,947 - 0,068762)} \times \frac{\left(0,146165 \frac{m}{s}\right)^2}{2} \times 1,175 \frac{Kg}{m^3} \times \frac{1}{0,908942} = 10,5356 \frac{Pa}{m}$$

Se conoce de las referencias consultadas la caída de presión para un equipo de desorción está en un rango de 200 a 400 Pa.m

Como la presión obtenida está fuera del rango, se debe aumentar el flujo de gas, pero al aumentar el flujo de gas necesariamente la composición de salida del contaminante el líquido es menor, ocasionando mayores costos de bombeo para llevar los flujos a la entrada del equipo de desorción.

## Nor-Pac Ring

Los Nor-Pac Ring son empaques al azar, con una alta eficiencia y rendimiento, usados en las columnas de relleno para desorción de carbonos orgánicos volátiles y otros gases, y absorción de gases.

Una aplicación típica de desorción incluye la remoción de solventes orgánicos y gases de las aguas subterráneas. Aplicaciones de absorción de los Nor-Pac Ring incluyen la neutralización y remoción de gases como HCL, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, y otros; recuperadora de alcoholes y contaminantes solubles.; recuperadora de alcoholes y contaminantes solubles.

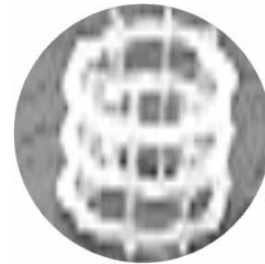
### Características principales:

- Genera caídas de presión pequeñas.
- Alta capacidad, eficiencia y rendimiento.
- Alta transferencia de masa y de calor.
- Promueve una buena distribución de líquido y gas.



### **Physical Properties:**

Type	Nor-Pac Plastic Packing				
Size Nominal	5/8"	3/4"	1"	1 1/2"	2"
Geometric Surface Area (ft <sup>2</sup> /ft <sup>3</sup> )	101	85	55	44	38
Packing Factor (1/ft)	38	32	25	17	12
Weight (lb/ft <sup>3</sup> )	7	6	4.5	3.8	3.3



### **Specifications Materials:**

Nor-Pac packings are available in three standard plastics:

- Polypropylene (PP)
- Polyethylene (PE)
- Kynar\* (PVDF)

\*Trademark of Pennwalt Corp.

### **Sizes:**

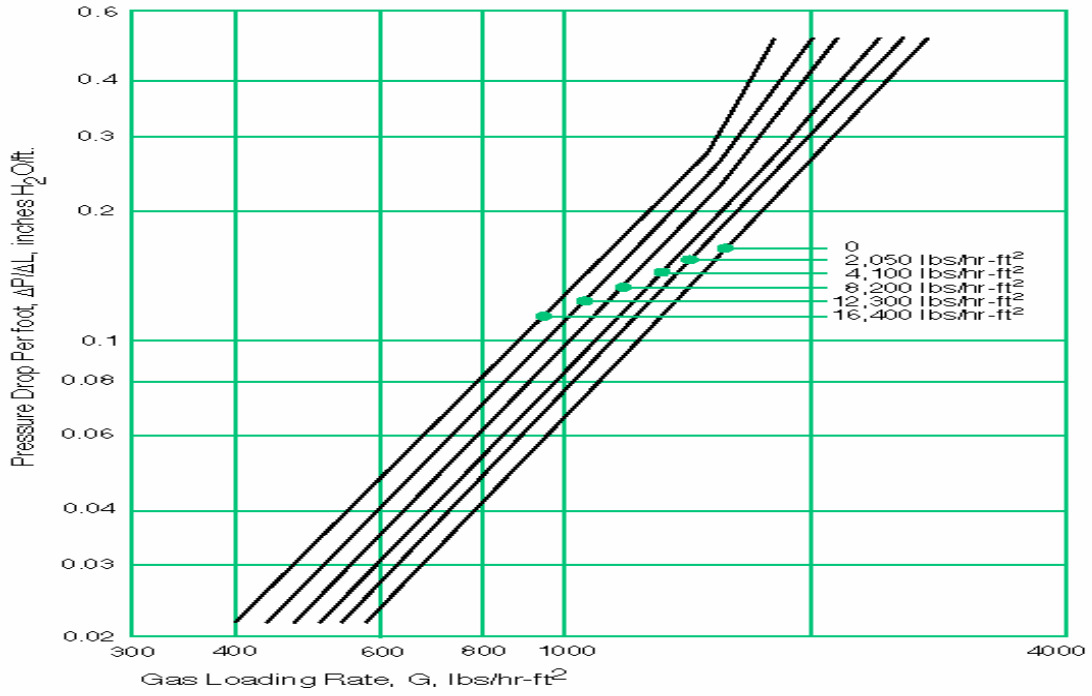
Nor-Pac plastic packings are made in 5 sizes:

- 5/8" Nominal
- 3/4" Nominal
- 1-1/2" Nominal
- 2" Nominal

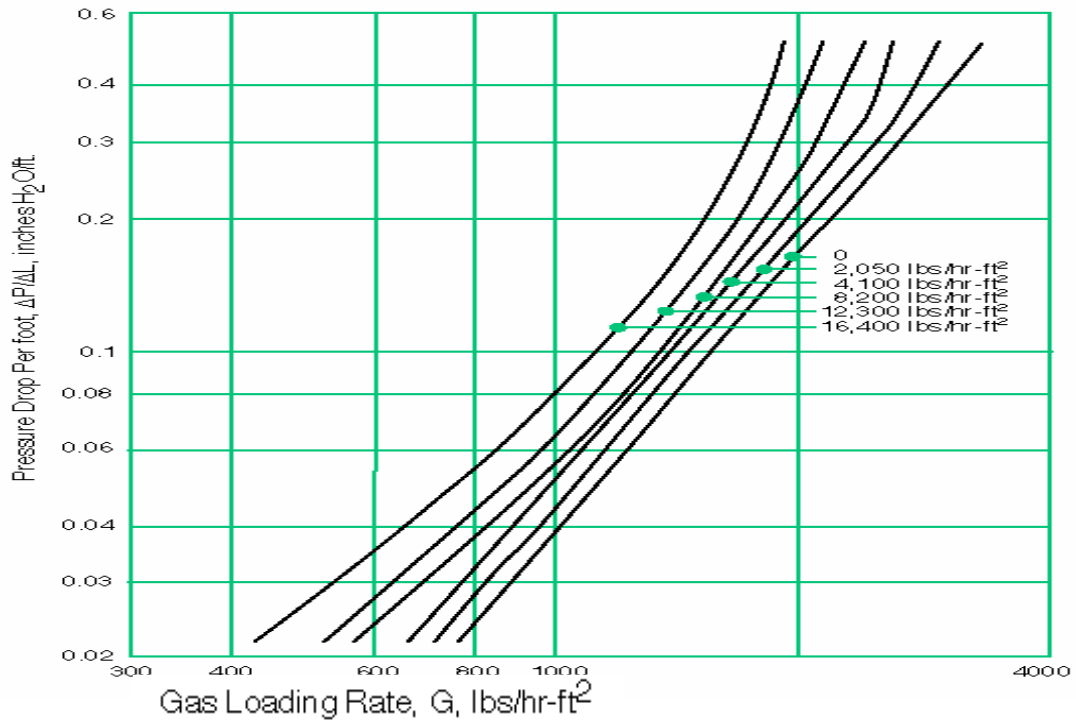
## **Nor-Pac® High Performance Tower Packings**

Gas Loading Rate, G, lbs/hr-ft<sup>2</sup>

**Pressure Drop of 1 1/2" Plastic Nor-Pac  
Air-Water System, 1 atm, 70°F**



**Pressure Drop of 2" Plastic Nor-Pac  
Air-Water System, 1 atm, 70°F**



## **HiFlow Ring**

Los HiFlow Ring son excelentes empaques al azar para altos requerimientos de transferencia de masa. La estructura de éste empaque permite una baja caída de presión y superior resistencia al ensuciamiento. Proporciona una excelente eficiencia de transferencia de masa.

### **Características principales:**

- Elevada eficiencia de transferencia de masa.
- Caídas de presiones extremadamente bajas.
- Excelente resistencia mecánica.
- Resistencia al ensuciamiento.
- Buena distribución de líquido y aire.
- Fácil de instalar y remover.
- Costo Competitivo.

### **HiFlow Ring Plásticos**

Aplicaciones típicas del HiFlow Ring Plástico:

- |                          |                                  |
|--------------------------|----------------------------------|
| ✓ Desorción de Amoníaco. | ✓ Desorción de Ozono.            |
| ✓ Bioreactores.          | ✓ Desorción de SO <sub>2</sub> . |
| ✓ Destilación            | ✓ Desorción de H <sub>2</sub> S. |
| ✓ Humidificación.        | ✓ Desorción de CO <sub>2</sub> . |

Los materiales termoplásticos ofrecen una excelente opción para la construcción de empaques al azar. Estos combinan bajo precio y alta resistencia mecánica al daño con excelente resistencia química. Proporcionan un excelente rendimiento a operaciones de alta temperatura.

## Datos Físicos para HiFlow Ring Plásticos (Polipropileno)

Type	Nominal Size		Weight		Surface Area		Void Space %
	mm	in	kg / m <sup>3</sup>	lb / ft <sup>3</sup>	m <sup>2</sup> / m <sup>3</sup>	ft <sup>2</sup> / ft <sup>3</sup>	
15-7	15	5/8	80	4.96	313	95.15	91
25-7	25	1	79	4.90	214	65.06	92
38-1	38	1 1/2	58	3.62	125	38.10	94
50-0	50	2	54	3.35	110	33.44	94
50-6	50	2	49	3.04	83	25.23	94
90-6	90	3 1/2	41	2.54	65	19.76	95

Para calcular el Weight del empaque para otros materiales plásticos, multiplicar la variable Weight del polipropileno por el factor Weight presentado a continuación.

Material	Symbol	Weight factor	Temperature Rating*	
			°C	°F
Polypropylene	PP	-	80	176
Polypropylene (heat stabilized)	PPH	1.00	100	212
Polypropylene (talc filled)	PP-talc	1.40	80	176
Polypropylene - 20% Glass filled	PPG-20	1.14	135	275
Polyvinylchloride	PVC	1.51	60	140
Polyvinylchloride - postchlorinated	C-PVC	1.69	100	212
High Density Polyethylene	HDPE	1.04	60	140
Kynar®	PVDF	1.95	140	284
Teflon®	PFA	2.35	160	320
Tefzel®	ETFE	1.84	140	284

### HiFlow Rings Plásticos



## HiFlow Ring Cerámicos

El diseño de los HiFlow Ring Cerámicos permite una alta capacidad de transferencia de masa. Al mismo tiempo minimiza las caídas de presión y el ensuciamiento.

Los materiales cerámicos proporcionan una mayor resistencia a la mayoría de los ácidos y solventes.

Su excelente resistencia a altas temperaturas permite que opere en procesos que causan fallas a otros materiales diferentes.

Las aplicaciones típicas que emplean HiFlow Ring Cerámicos:

- ✓ Absorción de HCL
- ✓ Destilación de HCL.
- ✓ Destilación de HNO<sub>3</sub>.
- ✓ Absorción de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.



### Datos Físicos para HiFlow Ring Cerámicos:

Type	Nominal Size		Weight*		Surface Area		Void Space %
	mm	in	kg / m <sup>3</sup>	lb / ft <sup>3</sup>	m <sup>2</sup> / m <sup>3</sup>	ft <sup>2</sup> / ft <sup>3</sup>	
20-4	20	3/4	660	40.9	280	85.1	72
35-3	35	1 1/2	554	34.4	128	38.9	76
50-6	50	2	520	32.3	102	31.0	78
75-9	75	3	570	35.3	70	21.3	76

## **HiFlow Ring Metálicos**

Los empaques HiFlow Ring Metálicos son una excelente opción cuando se requieren una alta transferencia de masa de soluto entre el líquido y el gas en contacto. Los resultados que se obtienen son una caída de presión muy baja y alta resistencia al ensuciamiento.

Aplicaciones Típicas:

- Absorción y desorción de H<sub>2</sub>S.
- Absorción y desorción de CO<sub>2</sub>.
- Absorción y desorción de NH<sub>3</sub>.
- Absorción y desorción de SO<sub>2</sub>.

### **Datos Físicos para HiFlow Ring Metálicos (Acero Inoxidable):**

Type	Nominal Size		Weight*		Surface Area		Void Space %
	mm	in	kg / m <sup>3</sup>	lb / ft <sup>3</sup>	m <sup>2</sup> / m <sup>3</sup>	ft <sup>2</sup> / ft <sup>3</sup>	
25-5	25	1	364	22.57	185	56.24	97
25-5L	25	1	362	22.60	185	56.24	95
38-5	38	1 ½	285	17.79	145	44.20	96
40-5	38	1 ½	230	14.36	143	43.57	97
50-5	50	2	176	10.99	92	28.04	98
110-5	110	4 1/3	150	9,36	48	214.63	98

Los empaques HiFlow Ring metálicos son construidos con distintos tipos de materiales como:

- Acero Inoxidable.
- Titanium.
- Níkel.
- Plata.
- Aluminio.
- Acero al carbono.

A continuación se presenta el significado, símbolo y unidades de todas las variables empleadas en este parcial para el cumplimiento de los objetivos.

# TERMINOLOGÍA Y NOMENCLATURA

Lista de variables de diseño

Variable	Símbolo	Unidades
• Superficie específica del empaque	$a$	$m^2/m^3$
• Área interfacial específica	$\frac{a_{ph}}{a}$	adim
• Área de sección transversal	$A_s$	$m^2$
• Volumen fraccionario del lecho empacado	$\varepsilon$	adim
• Constante de empaque	$C_L$	adim
• Constante de empaque	$C_V$	adim
• Constante de empaque para el punto de carga	$C_s$	adim
• Diámetro del desorbedor	$D_{Columna}$	m
• Diámetro hidráulico	$d_h$	m
• Coeficiente de difusividad en la fase gas	$D_{H_2S-Aire}$	$m^2/s^2$
• Coeficiente de difusividad en la fase líquida	$D_{H_2S-H_2O}$	$m^2/s^2$
• Número de Froude para el líquido	$Fr_L$	adim
• Constante de Aceleración Gravitacional	$g$	$m/s^2$
• Parámetro ajustable para la viscosidad líquida	$G_{12}$	adim
• Flujo Molar de gas a la entrada del desorbedor	$G_i$	Kmol/s
• Flujo Másico de gas a la entrada del desorbedor	$G_i^{Másico}$	Kmol/s
• Flujo Molar de gas a la salida del desorbedor	$G_o$	Kmol/s
• Flujo Másico de gas a la salida del desorbedor	$G_o^{Másico}$	Kg/s
• Flujo Molar de gas libre de $H_2S$	$(Gs)_{Op}$	Kmol/s
• Flujo Molar de gas libre de $H_2S$ mínimo requerido	$(Gs)_{Min}$	Kmol/s
• Altura del empaque o lecho	$H_{Empaque}$	m
• Retención total de líquido en el punto de carga	$h_L$	adim
• Altura de unidad de transferencia en la fase líquida	$HTU_L$	m
• Altura de unidad de transferencia en la fase gas	$HTU_V$	m
• Flujo Molar de líquido a la entrada del desorbedor	$L_i$	Kmol/s
• Flujo Másico de líquido a la entrada del desorbedor	$L_i^{Másico}$	Kg/s

• Flujo Volumétrico de líquido a la entrada del desorbedor	$L_i^{VOL}$	$m^3/s$
• Flujo Molar de líquido a la salida del desorbedor	$L_o$	Kmol/s
• Flujo Másico de líquido a la salida del desorbedor	$L_o^{Másico}$	Kg/s
• Flujo Molar de líquido libre $H_2S$	$(Ls)_{Op}$	Kmol/s
• Parámetro para la difusividad de gas	$M_{H_2S-H_2O}$	Kg/Kmol
• Peso Molecular del Aire	$M_{Aire}$	Kg/Kmol
• Peso Molecular del $H_2O$	$M_{H_2O}$	Kg/Kmol
• Peso Molecular del $H_2S$	$M_{H_2S}$	Kg/Kmol
• Peso Molecular de la mezcla $H_2S$ con $H_2O$ a la entrada	$\overline{M}_i^{Liq}$	$Kg/m^3$
• Peso Molecular de la mezcla $H_2S$ con aire a la salida	$\overline{M}_o^{Gas}$	$Kg/m^3$
• Flujo de $H_2S$ transferido del líquido al gas	$N_{A.A}$	Kmol/s

Lista de variables de diseño (Cont.)

Variable	Simbolo	Unidades
• Presión Atmosférica de Puerto La Cruz	P	atm
• Presión crítica del $H_2O$	$P_c$	bar
• Parámetro para la tensión superficial de líquidos.	$Q$	adim
• Número de Reynolds para el líquido	$Re_L$	adim
• Solubilidad del $H_2S$ en $H_2O$ a $27,4^\circ C$ (inverso de la constante de Henry)	S	Fracción Mol / atm
• Temperatura crítica del $H_2O$	$T_c$	k
• Temperatura normal de ebullición	$Tb_R$	adim
• Velocidad superficial del gas o del vapor	$U_V$	m/s
• Carga de líquido	$U_L$	m/s
• Fracción Molar del $H_2S$ a la entrada en el líquido	$X_i$	Mol de $H_2S$ /Mol Líquido Total
• Fracción Molar del $H_2S$ a la salida en el líquido	$X_o$	Mol de $H_2S$ /Mol Líquido Total
• Fracción Másica de $H_2S$ a la entrada en el líquido	$X_i^{Másico}$	Masa de $H_2S$ / Masa Líq Total
• Fracción Másica de $H_2S$ a la salida en el líquido	$X_o^{Másico}$	Masa de $H_2S$ / Masa Líq Total
• Fracción Molar libre de soluto de $H_2S$ a la entrada en el líquido	$X_i$	Mol de $H_2S$ /Mol $H_2O$ Libre
• Fracción Molar libre de soluto de $H_2S$ a la salida en el líquido	$X_o$	Mol de $H_2S$ /Mol $H_2O$ Libre

•			
•	Fracción Molar del H <sub>2</sub> S a la entrada en el gas	$Y_i$	Mol de H <sub>2</sub> S/Mol Gas Total
•	Fracción Molar del H <sub>2</sub> S a la salida en el gas	$Y_o$	Mol de H <sub>2</sub> S/Mol Gas Total
•	Fracción Másica de H <sub>2</sub> S a la entrada en el gas	$Y_i^{\text{Másico}}$	Masa de H <sub>2</sub> S / Masa Líq Total
•	Fracción Másica de H <sub>2</sub> S a la salida en el gas	$Y_o^{\text{Másico}}$	Masa de H <sub>2</sub> S / Masa Líq Total
•	Fracción Molar libre de soluto de H <sub>2</sub> S a la entrada en el gas	$Y_i$	Mol de H <sub>2</sub> S/Mol Aire Libre
•	Fracción Molar libre de H <sub>2</sub> S en fase gas en equilibrio con fracción molar libre de H <sub>2</sub> S en la fase líquida entrada	$Y_i^*$	
•	Fracción Molar libre de soluto de H <sub>2</sub> S a la salida en el gas	$Y_o$	Mol de H <sub>2</sub> S/Mol Aire Libre
•	Eficiencia de remoción	$\gamma$	%
•	Sumatoria del volumen de difusión atómica del aire	$(\sum \nu)_{\text{Aire}}$	adim
•	Sumatoria del volumen de difusión atómica del H <sub>2</sub> S	$(\sum \nu)_{\text{H}_2\text{S}}$	adim
•	Número de Weber para el líquido	$We_L$	adim
•	Factor de mojado	$W$	adim
•	Volumen molar de H <sub>2</sub> S como líquido a su temperatura normal de ebullición	$\nu_A$	m <sup>3</sup> /Kmol
•	Factor de asociación para el H <sub>2</sub> O	$\varphi$	adim
•	Coefficiente de resistencia en el punto de carga	$\xi_s$	adim
•	Factor para la determinación de coeficiente de resistencia	$n_s$	adim

Lista de variables de diseño (Cont.)

Variable	Simbolo	Unidades
• Densidad del H <sub>2</sub> O	$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	Kg/m <sup>3</sup>
• Densidad del H <sub>2</sub> S	$\rho_{\text{H}_2\text{S}}$	Kg/m <sup>3</sup>
• Densidad de la mezcla H <sub>2</sub> S con H <sub>2</sub> O a la entrada	$\rho_i^{\text{Liq}}$	Kg/m <sup>3</sup>
• Densidad de la mezcla H <sub>2</sub> S con aire a la salida	$\rho_o^{\text{Gas}}$	Kg/m <sup>3</sup>
• Caída de presión	$\Delta P$	Pa/m

• Viscosidad del Aire	$\mu_{Aire}$	Pa.s
• Viscosidad del H <sub>2</sub> O	$\mu_{H_2O}$	Pa.s
• Viscosidad del H <sub>2</sub> S	$\mu_{H_2S}$	Pa.s
• Viscosidad del Aire		
• Viscosidad de la mezcla mezcla H <sub>2</sub> S con H <sub>2</sub> O a la entrada	$\mu_i^{Liq}$	Pa.s
• Viscosidad de la mezcla mezcla H <sub>2</sub> S con aire a la salida	$\mu_o^{Gas}$	Pa.s
• Tensión Superficial de H <sub>2</sub> O	$\sigma_{H_2O}$	Kg/m <sup>2</sup>
• Parámetro ajustable de la viscosidad de vapor	$\phi_{ij}$	adim
• Velocidad superficial del gas en el punto de carga	$v_{V,S}$	m/s
• Factor de resistencia al flujo de gas	$\xi_L$	adim
• Caída de presión para empaque irrigado	$\frac{\Delta P}{Z}$	Pa/m
• Constante de empaque para la caída de presión	Cp	adim
• Reynolds para el gas	Re <sub>v</sub>	adim
• Diámetro efectivo de partículas	d <sub>p</sub>	m
• Factor de pared	f <sub>s</sub>	adim

## **Selección de empaque a emplear como relleno de la torre:**

Para la selección del relleno más adecuado a emplear, se deben tomar en cuenta varios criterios, los cuales permiten descartar al empaque menos eficiente y obtener la mejor solución.

Los materiales de empaque proporcionan una superficie húmeda grande para la corriente de gas, maximizando el área disponible para la transferencia de masa. Los materiales de empaque se encuentran disponibles en una variedad de formas, cada una teniendo características específicas con respecto al área de superficie, caída de presión, peso, resistencia a la corrosión y costo. En ambientes adversos, la vida del empaque puede ser tan corta como de 1 a 5 años debido a la corrosión, el ensuciamiento y al rompimiento. Los empaques al azar modernos consisten de formas diseñadas con ingeniería con el propósito de maximizar la relación superficie-volumen y minimizar la caída de presión. Los primeros empaques al azar diseñados específicamente para torres de absorción fueron hechos de cerámica. El uso de cerámica ha disminuido debido a su fragilidad y los mercados actuales son dominados por metal o plástico. Los empaques de metal no pueden utilizarse para contaminantes altamente corrosivos, tales como gas ácido, los empaques de plástico no son adecuados para aplicaciones a alta temperatura. Ambos empaques, de metal y de plástico, están limitados generalmente a una profundidad no soportada de 20 a 25 pies. A mayores profundidades, el peso puede deformar al empaque.

A partir de las tablas N° 1 y N° 2 del Apéndice B se realiza el estudio de la selección del empaque.

### **1. Relación entre el diámetro de la columna y el diámetro de empaque:**

Este es uno de los criterios más importante en la selección del empaque, porque ella indica de la tendencia de originar canalización dentro de la columna. La canalización es un efecto negativo para la transferencia de masa dentro de la

torre, debido a que las películas de líquido tienden a crecer de espesor en algunos lugares y disminuir en otros, de forma que el líquido se agrupa en pequeñas corrientes y descienden a través de caminos preferenciales localizados en el relleno, y por esta causa el líquido tiende a segregarse por las paredes y el gas a fluir por el centro de la torre. El orden que debe tener esta relación debe estar dentro del siguiente rango:

$$8 \leq \frac{D_{Columna}}{D_{Empaque}} \leq 15$$

Según los resultados obtenidos, mostrados en la tabla N° del Apéndice, se puede observar que el único empaque que no cumple con la condición anterior es el empaque HiFlow Ring Metal 25 mm, por lo tanto éste empaque que fuera de la selección.

## 2. Superficie específica del empaque:

Este parámetro indica la relación de área superficial que posee el empaque por volumen de empaque, es decir, la superficie que proporciona el empaque para contacto íntimo entre el líquido y el gas por volumen de empaque. Mientras mayor sea el tamaño del empaque, menor va a ser el área específica del empaque, generando menos área de interfase entre el líquido y el gas. Por lo tanto, se requiere una mayor área específica que permita mayor eficiencia de transferencia de masa. De esta manera los empaques de menor tamaño tienen un punto a su favor.

## 3. Caída de presión:

La caída de presión es un punto muy importante, ya que está relacionado con la retención de líquido en la columna. Según la teoría la caída de presión de un desorbedor debe estar entre un rango de 200 a 400 Pa/m. Como para ningún

empaques se llega a estar dentro de ese rango, se escoge el empaque que genere menor caída de presión; ya que si se desea trabajar dentro del rango de caída de presión se necesitará un menor flujo de gas adicional, generando menores costos de operación como bombeo.

#### 4. Flujo de gas:

La cantidad de flujo que se hace pasar por el desorbedor, permite tener una orientación general, del tamaño de empaque que se debe utilizar. Por lo general cuando el flujo de gas es de  $900 \text{ m}^3/\text{h}$  se emplea tamaños de empaque de 25mm o mayores, y cuando el flujo de gas es de  $3600 \text{ m}^3/\text{h}$  se emplean tamaños de empaques de 50mm o mayores. Como en nuestro caso el flujo de gas es de  $87,4 \text{ m}^3/\text{h}$  es recomendable usar empaques de 25 mm.

#### 5. Desempeño en la aplicación:

Con toda la información recavada de los empaques, se consiguió únicamente los rellenos HiFlow Ring Cerámicos no presentan o no están diseñados específicamente o no son una aplicación típica para la desorción de  $\text{H}_2\text{S}$ .

#### 6. Factor Costo:

Éste factor es determinante para la elección del empaque. El criterio de costo puede ser enfocado desde el punto de vista del tamaño del empaque; ya que al ser mayor el empaque menos va a ser la cantidad que se tendrá que pagar por ella y viceversa. El factor costo también puede ser enfocado desde otro punto de vista; dependiendo del material de cual está construido el empaque éste tendrá un costo específico. Según las informaciones consultadas empaques más costosos son los construidos con materiales metálicos como acero inoxidable, luego le sigue los materiales plásticos y por último los cerámicos.

↑ *TamañoEmpaque* ↑ *Costo*

Una vez que se conoce los parámetros, en los cuales se deben basar los criterios para la selección del empaque a emplear, se procede a realiza una tabla de comparación.

CRITERIO	Nor-Pac Ring		HiFlow Ring					
	Plásticos		Plásticos			Metálicos		Cerámicos
	50 mm	35 mm	50 mm	50 hydro mm	25 mm	50 mm	25 mm	50 mm
$D_{columna}/D_{empaque}$	+	+	+	+	-	+	-	+
Área Específica	-	+	-	-	+	-	+	-
Caída de Presión	-	-	+	+	+	-	+	-
Flujo de Gas	-	-	-	-	+	-	+	-
Aplicación	+	+	+	+	+	+	+	-
Costo Tamaño	+	-	+	+	-	+	-	+
Costo Material	+	+	+	+	+	-	-	+
TOTAL Beneficios	4	4	5	5	5	3	4	3

De la comparación realizada, se observa que tres empaques tienen la misma cantidad de puntos favorables, pero ahora se debe escoger uno.

No se debe escoger el empaque HiFlow Ring Plástico de 25 mm ya que no cumple con la relación de diámetro de columna entre diámetro de empaque, ya que si se escoge provocaría el efecto de canalización. Por lo tanto éste empaque que da descartado.

Ahora quedan dos empaques, HiFlow Ring Plástico 50mm y 50mm hydro. De estos dos selecciono el empaque **HiFlow Ring Plástico 50 mm hydro** porque presenta una mayor área superficial específica y menor altura de lecho requerida para llevar a cabo la separación especificada.

## Procedimiento de Evaluación:

Luego de haber diseñado la columna, mediante la selección del empaque HiFlow Ring Plástico 50 mm hydro, se desea evaluar la columna variando el flujo de entrada de líquido a la torre de  $25\text{m}^3/\text{h}$  a  $40\text{m}^3/\text{h}$ .

Para realizar esta evaluación se emplea la hoja de calculo, Excel, para resolver las ecuaciones; el método de cálculo es similar al procedimiento de evaluación, pero el diámetro es conocido y está fijo, el flujo de aire puro que entra a la columna se conoce; lo único que cambia es que no se conoce la composición de salida del líquido ni la del gas, debido a que el porcentaje de remoción no es del 95%.

Lo primero, es suponer una composición de salida del líquido y realizar los cálculos como en el procedimiento de diseño. Es decir, supuesta la composición de salida de  $\text{H}_2\text{S}$  en el líquido, se puede realizar un balance de masa para calcular los flujos de salida de líquido, flujo y composición de gas en la salida de la columna. Se realiza el procedimiento del calculo de la otra hasta que la altura del lecho de empaque sea igual a la obtenida en el procedimiento de diseño.

El valor obtenido de composición de  $\text{H}_2\text{S}$  en el líquido a la salida de la torre, composición de salida del gas y la caída de presión son:

$$X_o = 2,79500 \times 10^{-6}, Y_o = 7,41265 \times 10^{-3} \text{ con un } \Delta P = 24,466 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$$

Se puede concluir que al aumentar el flujo de líquido a la entrada, la composición de  $\text{H}_2\text{S}$  a la salida del líquido va a ser mayor, mientras que la composición a la salida del gas va a ser mayor y con una caída de presión mayor.

CONDICIONES DE LA CIUDAD DE PTO. LA CRUZ	
TEMPERATURA, T (°C)	PRESIÓN, P (atm)
27,4	0,9986

**Tabla N° 1.** Condiciones de la Ciudad de Puerto La Cruz, Venezuela. <sup>[1,2]</sup>

PROPIEDADES DEL AGUA		
Densidad, $\rho_{H_2O}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Peso Molecular, $M_{H_2O}$ (kg/kmol)	Viscosidad, $\mu_{H_2O}$ (Pa.s)
<b>996,402</b>	<b>18,015</b>	<b>8,5500E-04</b>
PROPIEDADES DEL SULFURO DE HIDRÓGENO		
Densidad, $\rho_{H_2S}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Peso Molecular, $M_{H_2S}$ (kg/kmol)	Viscosidad, $\mu$ (Pa.s)
<b>1,382</b>	<b>34,079</b>	<b>1,32E-04</b>
PROPIEDADES DEL AIRE		
Densidad, $\rho_{AIRE}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Peso Molecular, $M_{AIRE}$ (kg/kmol)	Viscosidad, $\mu_{AIRE}$ (Pa.s)
<b>1,174</b>	<b>28,970</b>	<b>1,75E-05</b>

**Tabla N° 2.** Propiedades de los componentes <sup>[3,4]</sup> La densidad se calcula por medio de gas ideal.

PROPIEDADES DEL AGUA	PROPIEDADES DEL H <sub>2</sub> S
Presión Crítica, P <sub>c</sub> (bar)	Presión Crítica, P <sub>c</sub> (bar)
<b>221,19</b>	<b>90,08</b>
Temperatura Crítica, T <sub>c</sub> (k)	Temperatura Crítica, T <sub>c</sub> (k)
<b>647,35</b>	<b>373,55</b>
Temperatura Reducida, Tr (adim)	Temperatura Reducida, Tr (adim)
<b>0,46</b>	<b>0,80</b>
Temperatura Ebuli Reducida, Tr (adim)	Temperatura Ebuli Reducida, Tr (adim)
<b>0,58</b>	<b>0,57</b>

**Tabla N° 3.** Propiedades críticas del H<sub>2</sub>O y H<sub>2</sub>S <sup>[5]</sup>

Solubilidad, S (fracción molar/atm)	Presión, P (atm)
0,00174	0,9986

**Tabla N° 4.** Solubilidad del H<sub>2</sub>S en agua a 24,7°C <sup>[3]</sup>

DIFUSIVIDAD DE H <sub>2</sub> S EN H <sub>2</sub> O (LIQUIDO)			
Ua(m <sup>3</sup> /Kmol)	$\psi$	$M_{H_2O}$	D (m <sup>2</sup> /s)
0,0329	2,26	18,015	2,04E-09
DIFUSIVIDAD DE H <sub>2</sub> S EN AIRE (VAPOR)			
$M_{AB}$	$\sum v_{H_2S}$	$\sum v_{Aire}$	D (m <sup>2</sup> /s)
31,31750321	27,52	19,700	1,67E-05

**Tabla N° 5.** Parámetro de solubilidad del H<sub>2</sub>S.

## Referencias

- [1] [www.mipunto.com](http://www.mipunto.com)
- [2] [www.tiempo.hispavista.com](http://www.tiempo.hispavista.com)
- [3] CD Manual del Ingeniero Químico, Perry
- [4] Bearman, Measure and Control, pág (154-157), Junio 1982
- [5] Pro II 6.0
- [6] Treybal, Rober, ***“Operaciones de Transferencia de Masa”*** 2ed, McGrawHill Book Company 1988
- [7] Alonso, Mary y Pérez A., ***“Guía para el Diseño de Torres Empacadas Operando en Contracorriente”***, 2003
- [8] Sciamanna, Rosalba y Berenice B., ***“Aspectos Teóricos Prácticos sobre Ecuaciones en Diferencias Finitas”*** Universidad Central de Venezuela, 2001
- [9] Felder