

## **Diseño y evaluación hidrodinámica de una minicolumna empacada**

### **Hydrodynamic design and evaluation of a mini packed column**

**Yarilys Gainza Delgado; Armando Rojas Vargas; María Elena Trujillo Nieves; Juan C. Rodríguez Hernández**

Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQU). ygainza@sn.moa.minbas.cu

---

#### **RESUMEN**

Se diseñó una columna empacada de altura 1970 mm, altura de empaque 1200 mm y diámetro 75 mm. El relleno fue colocado al azar, desordenado, es de anillos Raschig de cerámica y diámetro de 16 mm. Para la selección del relleno y fabricar los constituyentes internos, se consideraron recomendaciones de la literatura y se compararon las dimensiones con instalaciones semejantes. Se investigó experimentalmente la hidrodinámica de la columna y se obtuvo la capacidad de operación: flujo de líquido hasta 10 L/min. y de gas, 50 L/min. Se ajustó la pérdida de carga en Régimen de Precarga y empaque húmedo a la ecuación de Leva y la curva de inundación, según correlaciones de Eckert y Lobo. La pérdida de carga en la columna fue semejante a la reportada en la literatura, aunque el cambio de pendiente entre el Régimen de Precarga y Carga no fue brusco, sino lo alcanzó de manera gradual.

**Palabras clave:** columna empacada, hidrodinámica, inundación.

---

#### **ABSTRACT**

A packed column of height 1970 mm, packing height 1200 mm and diameter 75 mm was designed. The packing were placed at random, it is of Raschig rings, ceramic and diameter 16 mm. For the selection of the packing and to fabricate the internal constituents, recommendations of the literature were considered, and the dimensions were compared with similar installations. The hydrodynamics in a counter-current gas-liquid flow was experimentally investigated and the operation

capacity was obtained: flow of liquid up to 10 L/min. and gas, 50 L/min. The load loss was adjusted in Preloading Regimen and humid packing to the equation of Leva and the inundation curve, according to Eckert and Lobo correlations. The load loss in the columns was similar to the one reported in the literature, although the slope change among the Preloading Regimen and Loads it was not abrupt, but rather it was reached it in a gradual way.

**Keywords:** packed columns, hydrodynamic, inundation.

---

## INTRODUCCION

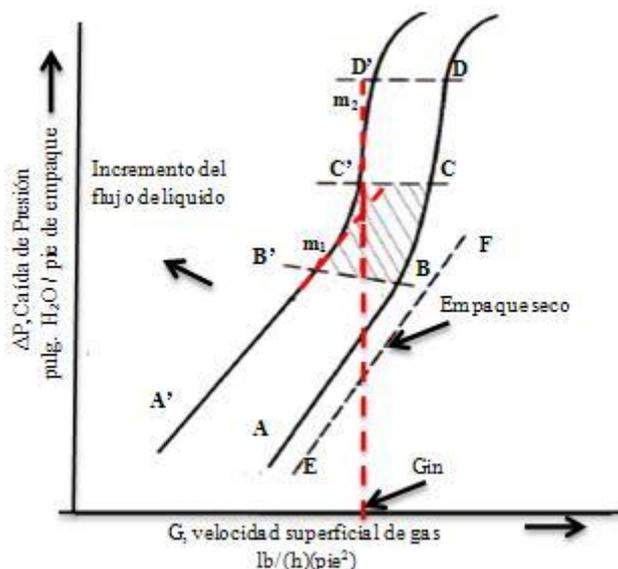
Las torres empacadas son equipos de transferencia de masa gas-líquido ampliamente usados en operaciones tales como: absorción (física y química), desorción, extracción, deshumidificación, entre otras. Sus constituyentes internos son: sistemas de alimentación, distribución y redistribución; retenedores y soportes de empaques; colectores de líquido y eliminadores de arrastre.

En una torre empacada, operación a contracorriente, se identifican varios regímenes de operación [1].

- Régimen de Carga insuficiente: bajas velocidades del líquido donde la torre se comporta como si el empaque estuviera seco. (Fig. 1, entre AB y EF)
- Régimen de precarga: La caída de presión se incrementa uniformemente con el incremento del flujo de gas. La eficiencia de la columna es independiente del flujo de gas. La retención de líquido es razonablemente constante con el régimen de gas. (Fig. 1, A-B; A'-B')
- Régimen de Carga: Se alcanza la máxima eficiencia; pero algunas formas de inestabilidad pueden conducir al régimen de inundación, dada la vecindad existente entre estos dos regímenes. La retención de líquido aumenta con el régimen de gas y por consiguiente, aumenta el área interfacial efectiva en el lecho empacado; el área libre para el flujo de gas se hace menor e incrementa la caída de presión. Es un punto deseado para la operación debido a que hay un tránsito óptimo de las fases sin provocar una excesiva caída de presión (Fig. 1, (B-C; B'-C'))
- Régimen de Inundación: Se caracteriza por: (1) la conversión del líquido en la fase continua (el líquido llena la torre) y el gas, en la fase dispersa, (2) el arrastre excesivo de líquido por el gas ascendente, (3) pobre eficiencia y elevada caída de presión. Se considera el límite superior de operación de la columna. (Fig. 1, C-C')
- Punto de operación estable: Punto de operación por encima de la región de inundación en el cual la torre opera como una columna de burbujeo, de poco interés práctico. (Fig. 1, D-D' hacia arriba)

El cambio en las condiciones de A y B es gradual, por lo que la carga inicial y la inundación frecuentemente se determina por el cambio de pendiente de la curva de caída de presión más que a través de cualquier punto visible [1, 4]. La mayor parte de las torres operan en la parte más baja de la zona de carga, en el Punto de Carga. En la Fig. 1 se muestra con líneas discontinuas de color rojo, el cambio de pendiente entre los Regímenes de Precarga ( $m_1$ ), Carga e Inundación ( $m^2$ ). Se

denomina Punto de Carga a la transición entre el Régimen de Precarga y Carga (Fig. 1, B-B').



**Fig. 1** Pérdida de carga en una columna de empaque.

Este trabajo tuvo como objetivo realizar el diseño, fabricación, montaje y evaluación hidrodinámica de una minicolumna empacada.

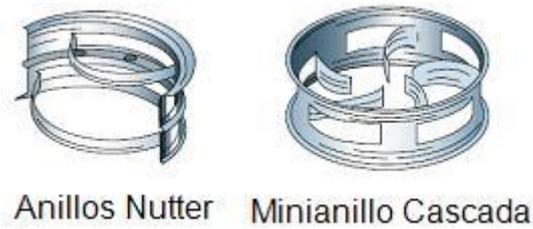
## FUNDAMENTACION TEORICA

Las torres empacadas son columnas verticales llenas con empaque o con dispositivos de superficie grande, utilizadas para el contacto continuo del líquido y del gas, tanto en el flujo a contracorriente como a corriente paralela [1]. Para el funcionamiento correcto de una columna empacada, requiere varios constituyentes, los que se describen a continuación:

- Empaque.

La función del relleno es maximizar el área de contacto gas - líquido (superficie específica) y el espacio vacío por unidad de volumen (porosidad del lecho), minimizar la retención de líquido y las incrustaciones, entre otros.

En los rellenos desordenados, para evitar la tendencia del líquido a segregarse hacia las paredes y a fluir por el centro de la columna (canalización), se recomienda que el diámetro de las piezas individuales sea menor que 1/8 del diámetro de la torre. Para diámetro inferior a 0,3 m, tamaño del empaque inferior a 25 mm; entre 0,3 - 0,9 m, entre 28 - 38 mm; superior a 0,9 m, entre 50 - 75 mm. En la Fig. 2 se muestran algunos tipos de rellenos al azar [1, 4].



**Fig. 2** Algunos tipos de empaques al azar.

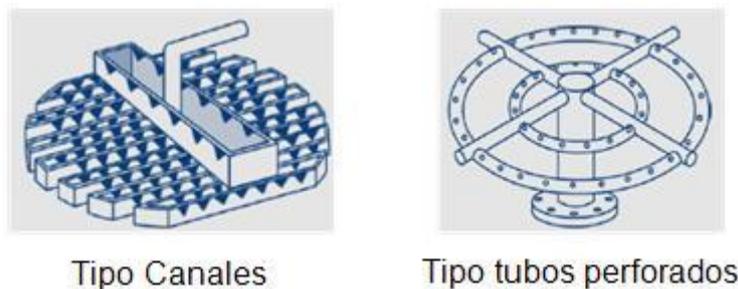
- Soporte y contenedores del empaque

La función de los platos de soporte es sostener el peso del empaque seco y tener una amplia área libre para permitir el flujo de líquido y del gas con un mínimo de refrenado y caída de presión. Se emplean rejillas con espaciados anchos; pero se prefiere un soporte donde las entradas del gas son proporcionadas sobre el nivel donde el líquido fluye desde el lecho, proporcionando paso separado del líquido y del gas [1, 4].

Los contenedores de empaques evitan el levantamiento del empaque durante un aumento repentino del gas.

- Distribuidor y redistribuidor de líquidos

El distribuidor de líquido debe garantizar la irrigación adecuada del empaque y distribución uniforme del líquido, resistencia a la obstrucción baja caída de presión. Se considera necesario proporcionar al menos cinco puntos de introducción del líquido por cada  $0,1 \text{ m}^2$  de sección transversal para diámetros de la torre mayor a  $1,2 \text{ m}$  y un número mayor para diámetros pequeños. En la Fig. 3 se muestran distribuidores de líquidos tipo canales y tubos perforados [1, 4].



**Fig. 3** Distribuidores de líquido.

- Colectores de Líquidos

Los colectores de líquido se instalan para realizar extracciones laterales, o entre lechos sobre cada redistribuidor. No deben bloquear el flujo ascendente y deben permitir un mezclado efectivo del líquido antes de extraerlo, para evitar gradientes de concentración.

- Eliminador de arrastre

Los eliminadores de arrastre o neblina se usan para evitar que a velocidades elevadas de gas, el gas que abandona la parte superior del empaque pueda

acarrear goticas del líquido como niebla. Estos pueden ser construidos como un colchón de mallas entretejida o con empaque seco al azar.

- Sistemas de alimentación

Los sistemas de alimentación consideran la variación del flujo de alimentación y su estado de agregación (líquidos, mezcla Líquido – vapor) [1, 4].

## **Metodología**

### **Inundación de la minicolumna empacada**

Para determinar las condiciones de inundación de la minicolumna empacada, se siguieron los siguientes pasos:

1. Fijar caudal de alimentación de líquido.
2. Alimentar flujo de gas.
3. Medir caída de presión.
4. Repetir en varias ocasiones el paso dos y tres, hasta alcanzar la inundación de la minicolumna empacada. Los datos se tabulan como se refleja en la Tabla A-1 del Anexo.
5. Ajustar a la Ecuación de Leva, la correlación de Eckert y Correlación de Lobo.

Observación: es importante antes de cambiar el flujo de líquido, verificar que los manómetros tipo U mantengan su nivel en cero.

### **Ajuste de la ecuación de leva**

La Ecuación de Leva (1) está limitada por la viscosidad del líquido, se debe cumplir que sea inferior a 2 cP para la generalidad de los sistemas. La ecuación contempla dos constantes que dependen principalmente del tipo de empaque, material del que está construido y tipo de operación a la que está sometido.

$$\frac{\Delta P}{Z} = \gamma \cdot 10^{\frac{\Phi \cdot L}{\rho_l}} \cdot \frac{G^2}{\rho_g} \quad (1)$$

Donde:

$\Delta P$ : Caída de presión en el entorno de la columna (kPa)

Z: Altura empacada de la torre (m)

L: Velocidad másica superficial del líquido (kg · s<sup>-1</sup> · m<sup>-2</sup>)

G: Velocidad másica superficial del gas (kg · s<sup>-1</sup> · m<sup>-2</sup>)

$\Phi, \gamma$ : Constantes específicas del empaque (adimensionales)

$\rho_l, \rho_g$ : Densidad del líquido (kg · m<sup>-3</sup>)

Linealizando:

$$\log\left(\frac{\Delta P}{Z}\right) = \log(\gamma) + \left(\frac{\Phi \cdot L}{\rho_l}\right) + 2\log\left(\frac{G}{\rho_g}\right) \quad (2)$$

Para calcular las velocidades másicas tanto del líquido como del gas se emplean las ecuaciones (3) y (4).

$$L = \frac{\overset{0}{m}_l}{A} = v_l \cdot \rho_l \quad \text{Dimensionalmente: } L = \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{1}{\text{m}^2} = \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3)$$

$$\overset{0}{m}_l = Q_l \cdot \rho_l = v_l \cdot A \quad \text{Dimensionalmente: } \overset{0}{m}_l = \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{m}^2 \quad (4)$$

Siendo A, el área de la sección transversal de la columna.

### Ajuste de la correlación de Eckert

A partir de los datos de flujo de líquido, gas y caída de presión, obtener la curva de inundación experimental según la correlación de Eckert [1].

$$\frac{L}{G} \cdot \left( \frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ vs. } G_{in}^2 \cdot \frac{c_f \cdot \mu_L^{0.2}}{g_c \cdot g_p \cdot \rho_L} \cdot \left( \frac{\rho_w}{\rho_L} \right)$$

Donde:

$G_{in}$  : Flujo de gas de inundación ( $Lb \cdot h^{-1} \cdot pie^{-2}$ )

$c_f$  : Factor de caracterización del relleno para fluido de dos fases

$g_c = 4,18 \cdot 10^8$  Constante de conversión ( $Lb \cdot pie \cdot Lbf^{-1} \cdot h^{-2}$ )

$\rho_g, \rho_L$  Densidad del gas y del líquido, respectivamente ( $lb \cdot pie^{-3}$ )

$\mu_L$  Viscosidad del líquido (cP)

$L, G$  : Flujo de líquido y gas, respectivamente ( $Lb \cdot h^{-1}$ )

$\rho_w$  : Densidad del agua ( $Lb \cdot pie^{-3}$ )

### Ajuste de la correlación de Lobo

Obtener la curva de inundación experimental según la correlación de Lobo [3].

$$\frac{L}{G} \cdot \left( \frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ vs. } \frac{V_G^2 \cdot a_p}{\varepsilon^3 \cdot g_p \cdot \rho_L \cdot g} \cdot \left( \frac{\mu_L}{\mu'} \right)^{0.2}$$

Donde:

$L, G$  : Flujo de líquido y gas, respectivamente ( $kg \cdot h^{-1}$ )

$\rho_l, \rho_g$  : Densidad del líquido ( $kg \cdot m^{-3}$ )

$V_G$  Velocidad de inundación ( $kg \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ )

$a_p$  : Superficie específica ( $m^2 \cdot m^{-3}$ )

$g = 1,27 \cdot 10^8$  Aceleración de la gravedad ( $m \cdot h^{-2}$ )

$\varepsilon$  : Porosidad

$\mu$  : Viscosidad (cP)

$\mu'$  : Viscosidad a 20 °C (cP)

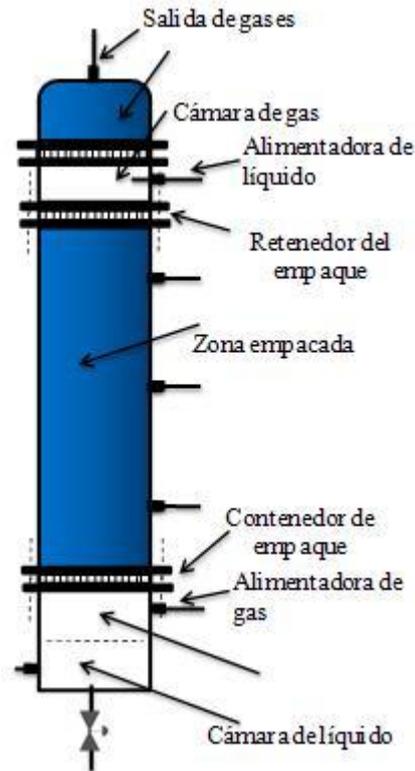
### Descripción de la instalación experimental

Las dimensiones de la minicolumna empacada se muestran en la Tabla 1 y la Fig. 4.

**Tabla 1**  
Dimensiones de la minicolumna

Ítem	U/m	valor
Diámetro interior de la columna	(mm)	75
Altura cámara eliminadora de	(mm)	220

arrastre		
Altura cámara de gas superior	(mm)	100
Altura de relleno	(mm)	1200
Altura cámara de gas inferior	(mm)	300
Altura de cámara de líquido	(mm)	150



**Fig. 4** Dimensiones de la minicolumna empacada.

El relleno es de anillos raschig de cerámica, desordenado. Se arrojaron a la torre, previamente llena de agua, para que cayeran al azar e impedir la rotura. Ver a continuación la Tabla 2.

**Tabla 2**  
Relleno Anillos raschig

Ítem	U/m	valor
Tamaño nominal	(mm)	16,0
Altura	(mm)	16,2
Espesor	(mm)	3,4
masa (un anillo)	(g)	5,0
Superficie	(mm <sup>2</sup> )	18,07
Densidad real	(Kg/m <sup>3</sup> )	1,487
Densidad aparente	(Kg/m <sup>3</sup> )	0,500
Superficie específica (ap)	(m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	328*
Factor del relleno (cf)	-	380*
	%	0.68*
Porosidad del lecho huecos)	(%)	

Diámetro equivalente del relleno ( $d_e$ )	(mm)	12,16
Esfericidad	-	0.26 - 0.53*

\* datos extraídos del Treybal, 1985

El distribuidor del líquido consistió en un tubo en forma de estrella con varias perforaciones para una adecuada irrigación del empaque y transferencia de masa. La minicolumna no posee redistribución de líquido, aunque se recomienda diseñar un colector y redistribuidor a una altura de 600 mm de empaque. Para evitar el arrastre de goticas de agua, se agregó como eliminador de neblina en el tope, una cámara con empaque seco del mismo anillo. En la parte inferior se instaló un distribuidor de gas, en forma de estrella.

Como equipos auxiliares se empleó un tanque plástico de 50 L para el almacenamiento y recirculación del licor a la minicolumna, una bomba de desplazamiento positivo de flujo regulable entre 0-100 L/min., una bomba de vacío y accesorios tales como: cronómetros (1), analizador de gas Orsat (1), termostato (1), serpentín (1) y mangueras de conexión de 6 mm.

La instrumentación consistió en un manómetro tipo U de 0- 380 mm H<sub>2</sub>O para determinar la caída de presión, dos rotámetros para medir el flujo de líquido (0-20 L/min.) y de gas con doble escala (0-80 L/min.), así como un indicador de nivel (75 mm) para apreciar la inundación de la minicolumna.

En la Tabla 3 se comparan las dimensiones de la minicolumna empacada, relleno anillos raschig, con otras reportadas en la literatura.

**Tabla 3**

Dimensiones de minicolumnas empacadas. Relleno anillos raschig

Diámetro interior (mm)	Altura relleno (mm)	Diámetro Anillo (mm)	H/D	Material	Referencia
75	1200	16,0	16,0	-	-
75	1400	10, 0	18,6	vidrio	Minicolumna experimental
80	1560	-	19,5	vidrio Duran	
89	1600	12,7	18,0	vidrio Pyrex	
80	1000	8,0	12,5	vidrio borosilicato	

## RESULTADOS Y DISCUSION

Para realizar la evaluación hidrodinámica de la minicolumna empacada se alimentó aire procedente de la línea industrial a 28 °C y a contracorriente, agua a 25 °C.

Los valores correspondientes al régimen de precarga (Fig. 1, A-B; A'-B') se trasformaron y ajustaron a la ecuación de Leva. Para obtener estos valores, se

representó gráficamente para cada flujo de líquido, los flujos de gas vs.  $\Delta P/Z$  y ajustaron a la ecuación de una recta mediante el Microsoft Excel, con estadígrafos de regresión  $R^2 > 0.98$ . Se obtuvo una tendencia semejante a la reportada en la literatura [1] como se reflejan en la Fig. 5.

A una velocidad fija del gas, la caída de presión del gas aumenta al aumentar el flujo del líquido, debido principalmente a que la sección transversal libre que pueda utilizarse para el flujo del gas, es reducida como resultado de la presencia del líquido, en acuerdo con la bibliografía [1]. Al pasar de régimen de Precarga a Carga, no se obtuvo un cambio brusco de pendiente, sino se alcanza de manera gradual.

En la Fig. 5 se indican con flechas azules los valores de caída de presión en los que el nivel de agua subió por encima del nivel de la cámara de gas, alcanzando la parte inferior de la zona empacada y en consecuencia, en gas burbujeó en una columna de líquido. No se logró inundar completamente la minicolumna (o el empaque) rebosando agua por el tope.

A partir del ajuste a la ecuación (1) mediante el programa Statgraphic, se obtuvo para empaque húmedo la ecuación (5) y para empaque seco, la (6). La densidad del agua es de  $997 \text{ kg/m}^3$  y del aire,  $1,172 \text{ kg/m}^3$ .

$$\frac{\Delta P}{Z} = 21,723 \cdot 10^{-5} \frac{9,256 \cdot L}{\rho_l} \cdot \frac{G^2}{\rho_g} \quad (5)$$

$$R^2 = 95,42$$

$$R^2 \text{ (adaptado para g.l.)} = 95,33$$

$$\text{Error Estándar de la Est.} = 0,034$$

$$\text{Error absoluto de la Media} = 0,028$$

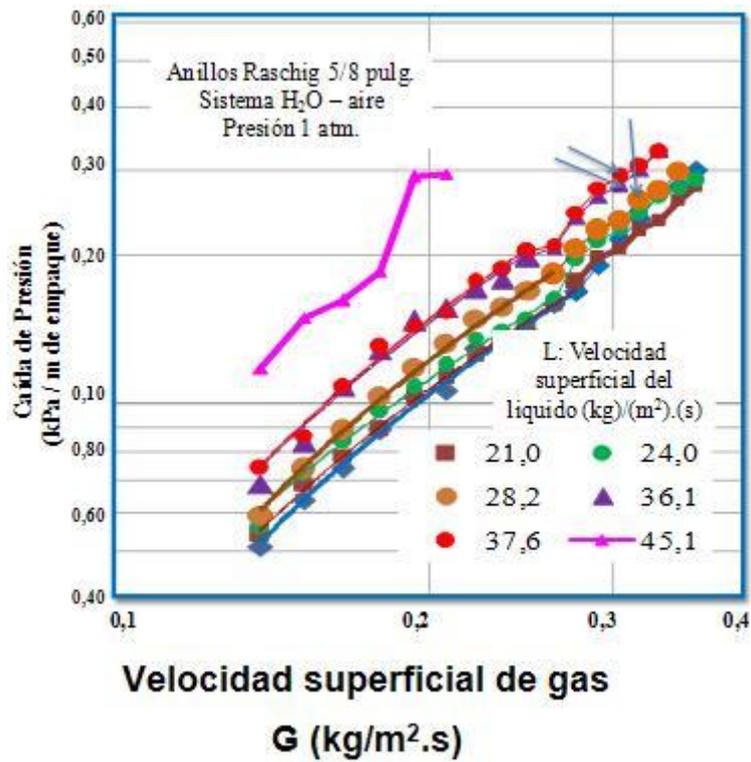
$$\frac{\Delta P}{Z} = 0,018546 \cdot \rho_g \cdot G^{1,82} \quad (6)$$

$$R^2 = 99,72$$

$$R^2 \text{ (adaptado para g.l.)} = 99,72$$

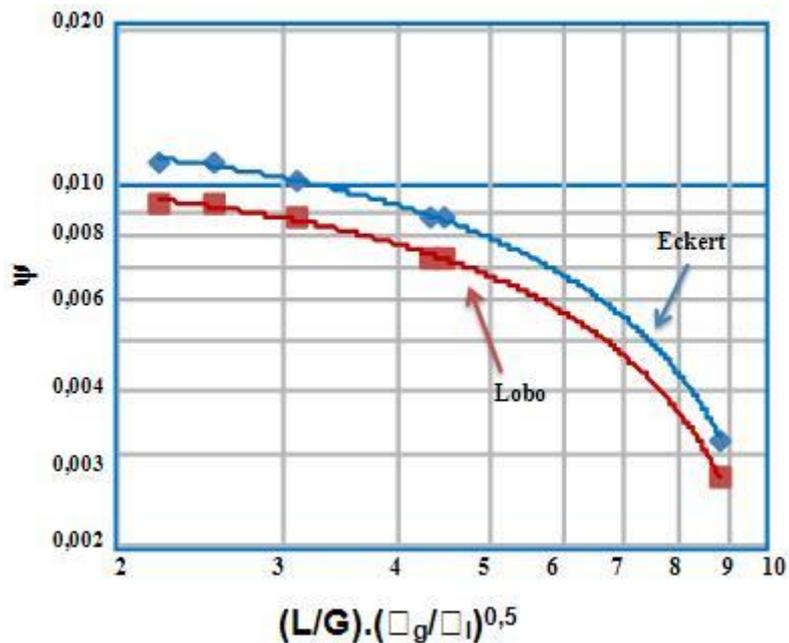
$$\text{Error Estándar de la Est.} = 0,054$$

$$\text{Error absoluto de la Media} = 0,041$$



**Fig. 5** Pérdida de carga en la minicolumna empacada (Gráfico doble logarítmico).

Se corroboró que la inundación es consecuencia del flujo de gas de alimentación a la torre. En la Fig. 6 se muestra la Curva de inundación de Eckert, en correspondencia con la reflejada en la literatura [1], ajustada para este sistema experimental a la ecuación (7) con un estadígrafo de regresión  $R^2=99,77$ .



**Fig. 6** Curva de inundación (Gráfico doble logarítmico).

$$\psi_E = -1,217 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{L}{G}\right) \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_L}\right)^{0,5} + 1,404 \cdot 10^{-2} \quad (7)$$

**Coefficiente de Correlación = -0,998**

**R<sup>2</sup> = 99,77**

**R<sup>2</sup> (ajustado para g.l.) = 99,71**

**Estadístico de Durbin-Watson = 2,56 (P=0,0809)**

Para la correlación de Lobo se tuvo la ecuación (8), como se refleja en la Fig. 6.

$$\psi_L = -1,021 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{L}{G}\right) \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_L}\right)^{0,5} + 1,1787 \cdot 10^{-2} \quad (8)$$

Las capacidad de operación de la columna entre el 50 al 70 % de inundación (Fig. 1, C-C'), para algunos datos de prueba se muestran en la Tabla 4

**Tabla 4**  
Capacidad de operación de la minicolumna

Q H <sub>2</sub> O(L/min.)	Q gas (L/min.)		
	mín.	máx.	Operación
5,6	36,0	55,0	46,0
7,5	35,0	53,0	44,0
9,5	33,0	48,0	41,0

## CONCLUSIONES

1. Se ajustó la pérdida de carga en la minicolumna empacada, lecho húmedo, a la ecuación de Leva con un 95,3 % de estadígrafo de regresión y la curva de inundación según correlación de Eckert y Lobo.
2. Aunque la pérdida de carga en la minicolumna fue semejante a la reportada en la bibliografía, el cambio de pendiente entre el Régimen de Precarga y Carga no fue brusco, sino se alcanzó de manera gradual.
3. La capacidad de operación de la minicolumna es: flujo de líquido entre 0 – 10 L/min. y de gas entre 0 – 50 L/min.

## BIBLIOGRAFIA

1. TREYBAL, ROBERT E. Operaciones con Transferencia de Masa. Edición Revolucionaria, La Habana, 1985. Págs.. 213-225.

2. DIMA, R.; SOARE, G. Gas-liquid hydrodynamics in counter-current columns with katapak-s and bx structured packing. Revue Roumaine de Chimie. Vol. 51, No 3, 2006, págs. 219–226.

3. MCCABE WARREN L; SMITH, JULIAN, C. "Unit Operation of Chemical Engineering". Edición Revolucionaria, La Habana, 1966. Pág. 635.

4. De la Hoz, S. H. Diseño de un módulo para el dimensionamiento hidráulico de torres empacadas.

## ANEXO

**Tabla A-1. Tabulación resultados experimentales para prueba**

Q H <sub>2</sub> O (L/min.)	L (kg/m <sup>2</sup> .s)	Q gas (L/min.)	G (kg/m <sup>2</sup> .s)	□ P gas (Pa)	□ P / Z (kPa/m)
0	0	28,3	0,1253	509,91	0,4249
		31,2	0,1378	637,39	0,5312
		34,0	0,1503	735,45	0,6129
		36,8	0,1628	882,54	0,7355
		39,6	0,1753	1029,63	0,8580
		42,5	0,1878	1059,05	0,8825
5,6	21,1	45,3	0,2003	1294,39	1,0787
		28,3	0,1253	539,33	0,4494
		31,2	0,1378	686,42	0,5720
		34,0	0,1503	784,48	0,6537
		36,8	0,1628	882,54	0,7355
		39,6	0,1753	1029,63	0,8580
6,4	24,1	42,5	0,1878	1127,69	0,9397
		28,3	0,1253	558,94	0,4658
		31,2	0,1378	715,84	0,5965
		34,0	0,1503	833,51	0,6946
		36,8	0,1628	960,99	0,8008
		39,6	0,1753	1078,66	0,8989
7,5	28,2	42,5	0,1878	1196,33	0,9969
		28,3	0,1253	588,36	0,4903
		31,2	0,1378	735,45	0,6129
		34,0	0,1503	882,54	0,7355
		36,8	0,1628	1029,63	0,8580
		39,6	0,1753	1176,72	0,9806
		42,5	0,1878	1323,81	1,1032

Recibido: Mayo 2012  
Aprobado: Septiembre 2012

*Yarilys Gainza Delgado.* Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ).  
ygainza@sn.moa.minbas.cu