

# Diseño de una columna de absorción de gases en la Planta de Producción del Centro de Bioactivos Químicos

M. I. Díaz Molina<sup>a</sup>, C. Lago Durán<sup>a</sup>, Z. Rodríguez Negrín<sup>a</sup> y I. Gallardo Aguilar<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Centro de Bioactivos Químicos. <sup>b</sup>Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química Farmacia. Universidad Central de Las Villas. Carretera a Camajuaní Km 5 ½ Santa Clara. CP 54830, Villa Clara, Cuba

*Design of a gas absorption column in the Production Plant of the Chemical Bioactive Center*

*Disseny d'una columna d'absorció de gasos a la Planta de Producció del Centre de Bioactius Químics*

RECEIVED: 4 DECEMBER 2017; REVISED: 22 FEBRUARY 2018; ACCEPTED: 6 MARCH 2018

## SUMMARY

The production process of 2-(2-nitrovinyl-furan) as an intermediate product for the preparation of the pharmaceutical ingredient 2-bromo-5-(2-bromo-2-nitrovinyl-furan) It is carried out through chemical synthesis from the condensation of the Furfural, a stage through which nitrous gases that because pollution is released in the workshop. In the present work, a new nitrous gas washing process was proposed by incorporating a filled absorber column that replaces the absorption traps previously used in the process. With the measurements of gases made in the work environment, it was shown that for one hour of exposure, the gas concentration exceeds 0,16 mg/m<sup>3</sup> as established in the current environmental regulations. The fundamental parameters that defined the design of the absorber column were determined and the equipment was installed in the production workshop with a packing height of 20 cm and an inside diameter of 2,4 cm.

**Keywords:** Design; absorption column; allowable concentrations; pollution reduction.

## RESUMEN

El proceso de producción del 2-(2-nitrovinil-furano) como producto intermedio para la elaboración del ingrediente farmacéutico 2-bromo-5-(2-bromo-2-nitrovinil-furano) se lleva a cabo a través de síntesis química a partir de la condensación del Furfural, etapa mediante la cual se liberan gases nitrosos causantes de la contaminación en el taller. En el presente trabajo se propuso un nuevo proceso de lavado de gases nitrosos mediante la incorporación de una columna absorbidora rellena que sustituye a las trampas de absorción que se utilizaban anteriormente en el proceso. Con las mediciones de gases realizadas en el ambiente de tra-

bajo se demostró que para una hora de exposición la concentración de gases supera a 0,16 mg/m<sup>3</sup> según se establece en la normativa ambiental vigente. Se determinaron los parámetros fundamentales que definieron el diseño de la columna absorbidora y el equipo quedó instalado en el taller de producción con una altura de empaque de 20 cm y diámetro interior de 2,4cm.

**Palabras claves:** Diseño; columna de absorción; concentraciones admisibles; reducción de la contaminación.

## RESUM

El procés de producció del 2- (2-nitrovinil-furà) com a producte intermedi per a l'elaboració de l'ingredient farmacèutic 2-bromo-5- (2-bromo-2-nitrovinil-furà) es porta a terme a través de síntesi química a partir de la condensació del furfural, etapa mitjançant la qual s'alliberen gasos nitrosos causants de la contaminació al taller. En el present treball es va proposar un nou procés de rentat de gasos nitrosos mitjançant la incorporació d'una columna absorbidora farcida que substitueix les trampes d'absorció que s'utilitzaven anteriorment en el procés. Amb els mesuraments de gasos realitzats en l'ambient de treball es va demostrar que per a una hora d'exposició la concentració de gasos supera 0,16 mg/m<sup>3</sup> segons s'estableix en la normativa ambiental vigent. Es van determinar els paràmetres fonamentals que van definir el disseny de la columna absorbidora i l'equip va quedar instal·lat al taller de producció amb una alçada de presència de 20 cm i diàmetre interior de 2,4 cm.

**Paraules claus:** Disseny; columna d'absorció; concentracions admisibles; reducció de la contaminació.

\*Corresponding autor: [midiaz@uclv.edu.cu](mailto:midiaz@uclv.edu.cu)

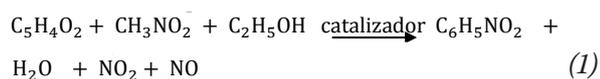
## INTRODUCCIÓN

El 2-(2-nitrovinil-furano) es uno de los productos que se sintetiza en el Centro de Bioactivos Químicos y constituye la materia orgánica fundamental para la síntesis del bactericida fungicida de amplio espectro denominado Furvina.

Un primer paso en la síntesis química es la reacción del nitrometano ( $CH_3NO_2$ ) en contacto con una amina primaria como catalizador ( $C_4H_{11}N$ ). En un segundo momento de la reacción química se adiciona el furfural ( $C_5H_4O_2$ ) que reacciona con el nitrometano a través de un mecanismo complejo, obteniéndose como producto fundamental el 2-(2-nitrovinil-furano)<sup>1</sup>, según la (ecuación 1).

La reacción de síntesis se realiza en un reactor discontinuo de vidrio de 6 litros de capacidad en condiciones no isotérmicas - no adiabáticas, aunque se acerca bastante a condiciones isotérmicas por estar el reactor sumergido en un baño de aceite termostado mantenido a temperatura constante de (115°C)<sup>2</sup>.

La ecuación correspondiente a la formación del 2-(2-nitrovinil-furano) es:



Tal y como se muestra en la (ecuación 1)<sup>3</sup>, durante la síntesis del principio activo 2-(2-nitrovinil-furano) se desprenden gases nitrosos de color pardo que son los responsables de la contaminación en el taller de trabajo. La ecuación 2 demuestra que el  $NO_2$  y el  $N_2O_4$  se encuentran en equilibrio, considerando al  $N_2O_4$  como dímero del  $NO_2$ , coexistiendo uno con otro en distintas proporciones en función de la temperatura. Dicho compuesto es un poderoso oxidante, altamente tóxico y corrosivo<sup>4</sup>.



El dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) es un compuesto químico de color rojizo-marrón. Es un potente agente oxidante y actúa como comburente frente a materiales combustibles. Se disuelve en muchos compuestos orgánicos (sulfuro de carbono, hidrocarburos halogenados, etc.), a elevadas temperaturas se descompone en NO y oxígeno<sup>5</sup>.

Para analizar los resultados de las inmisiones de  $NO_2$  se tuvo en cuenta el cumplimiento de la NC 1020:2014 Calidad del aire - contaminantes -Concentraciones Máximas Admisibles y valores. Guías en zonas habitables, donde se establece el incumplimiento de los valores admisibles superiores a 0,16 mg/m<sup>3</sup> para una hora de exposición de gases.

Los gases nitrosos (NOx) representan a una familia de siete compuestos. En realidad, la EPA (Environmental Protection Agency) regula sólo el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) porque dentro de estos compuestos es la forma más predominante de los NOx en la atmósfera. El  $NO_2$  no es sólo un contaminante importante del aire por sí sólo, sino que también reacciona en la atmósfera para formar ozono ( $O_3$ ) y lluvia ácida<sup>5,6</sup>.

La depuración de los óxidos de nitrógeno está recibiendo cada día mayor atención debido a la intervención de estos compuestos en procesos atmosféricos, lluvia ácida e incluso, según la altura, parecen interactuar en la compleja cadena de reacciones que afectan o pueden afectar a la capa de ozono estratosférico. Todo ello hace y hará, en el futuro, que la presión legislativa sea cada vez más exigente en lo relativo a los niveles de emisión<sup>7,8</sup>.

La absorción gaseosa es una operación en la cual se pone en contacto una mezcla gaseosa con un líquido para disolver uno o más componentes del gas y obtener una solución de estos en el líquido. Por lo tanto, se considera la aplicación simultánea del mecanismo de difusión de cada fase. En esta operación la velocidad de difusión dentro de cada fase depende del gradiente de concentración existente dentro de ella<sup>6</sup>. Los gases se mueven desde la zona de mayor concentración hacia donde existe menor concentración, cesando la transferencia cuando la concentración es igual en todos los puntos<sup>9</sup>.

Los absorbedores en húmedo pueden controlar las emisiones de NOx utilizando un líquido químicamente inerte como solvente para el proceso de lavado de los gases NOx, según<sup>7</sup>. El absorbedor en húmedo opera por medio de un líquido fluyendo por gravedad a través de un medio de empaque, opuesto por un flujo de gas donde ocurre un intercambio de sustancias entre el gas y el líquido. La operación de absorción de gases en este trabajo es aplicable porque en las mezclas de NO y  $NO_2$  ocurre una disolución simultánea seguida por una rápida reacción con agua para formar  $HNO_3$  y  $HNO_2$ .

## MATERIALES Y METODO

### Cuantificación de los gases nitrosos en el taller

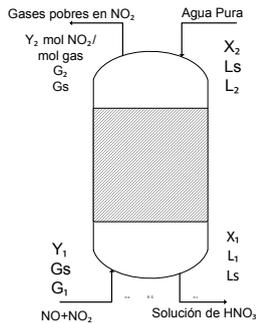
Para examinar la calidad del aire y obtener los niveles de concentración en la atmósfera que alcanzan los gases nitrosos en el taller de G-0, se utiliza el equipo Aeroqual serie 500, equipo encargado de procesar y almacenar los datos obtenidos de concentración de  $NO_2$ , tiempo, temperatura del medio, humedad relativa y compuestos orgánicos volátiles (VOC).

Para este análisis se toman 300 muestras de las concentraciones emitidas de  $NO_2$  en cada una de las síntesis realizadas, midiendo la concentración cada un minuto de reacción. Con los valores promedios obtenidos se realiza una comparación para ver su cumplimiento con los valores promedios admisibles reglamentados para mantener la atmósfera limpia y se analiza el cumplimiento de estos valores según las normas cubanas NC 872: 2011 y la NC 1024: 2014. Los resultados evidencian la presencia de gases nitrosos en el ambiente de trabajo<sup>10</sup>.

### Consideraciones para el diseño del absorbedor relleno

Para el diseño del absorbedor relleno se parte del resultado de las concentraciones que se miden mediante el equipo Orsat portátil modelo *SKU: AG-3* (equipo para el análisis de gases y vapores), como se muestra en la tabla 1 y a la salida del condensador de reflujo<sup>11</sup>.

El proceso de absorción que tiene lugar en este equipo es una operación de separación por contacto continuo a régimen como se muestra en la figura 1.

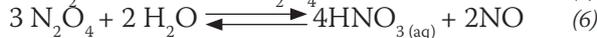


**Fig. 1** Representación de las corrientes de entrada y de salida de la columna de absorción.

**Tabla 1.** Composición del gas de entrada

Propiedades		
Compuestos	Concentración molar (g/L)	Peso Molecular (g/mol)
NO	42,35	30,01
NO <sub>2</sub>	17,05	46,10

Las alternativas de absorción de gases nitrosos en agua, peróxidos o hidróxidos están vinculadas con las reacciones químicas esenciales que ocurren durante la absorción de los óxidos de nitrógeno con el H<sub>2</sub>O, utilizadas para la determinación de las presiones parciales de los gases<sup>12</sup>.



La reacción de NO<sub>2</sub> o N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> con agua ocurre según las ecuaciones (3) y (6) y el remanente es descargado en la fase gaseosa como NO. El monóxido de nitrógeno muestra gran reactividad hacia el oxígeno (ecuación 4) y cuando una muestra de monóxido de nitrógeno incoloro se expone al aire, se forman nubes café rojizas de dióxido de nitrógeno<sup>13</sup>.

Dentro del mecanismo de reacción la ecuación 5 es una reacción que ocurre instantáneamente y la cantidad de N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> presente se determina de la constante de equilibrio de la ecuación 7 que permite calcular la concentración de gases de entrada a la columna.

$$\log K = \log \frac{p(\text{NO}_2)^2}{p(\text{N}_2\text{O}_4)} = -\frac{2866}{T} + \log T + 6,257 \quad (7)$$

Para una temperatura de trabajo de 30°C (T=303K) se obtiene un valor de

$$\text{Log } K = \log \frac{p(\text{NO}_2)^2}{p(\text{N}_2\text{O}_4)}$$

Como se muestra en la ecuación 8, se puede determinar la presión parcial del NO<sub>2</sub> por la relación con la presión total del sistema.

$$\begin{aligned} p\text{NO}_2 &= \text{NO}_2 * P_T \\ p\text{NO}_2 &= \text{NO}_2 * 1\text{atm} = 0,21\text{atm} \\ p(\text{N}_2\text{O}_4) &= 0,23 \approx p(\text{NO}_2) \end{aligned} \quad (8)$$

Como en la literatura especializada<sup>12</sup>, se refiere indistintamente a la absorción de NO<sub>2</sub> o de N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, la presión parcial teórica de NO<sub>2</sub> que se utiliza es de:

$$3p(\text{NO}_2) = 0,63 \text{ bar}$$

Como se considera que el NO de la reacción se desprende en el gas, se trabaja con una concentración relativa  $Y_1 = \frac{p(\text{NO}_2)}{p(\text{NO})} = 0,7975 \text{ mol/mol}$

### Metodología de Diseño del equipo

Para el diseño del equipo se parte de la composición del gas de entrada (Tabla 1) y de su fracción molar (Y<sub>1</sub>). El parámetro fundamental de diseño es la altura de empaque de la columna (Z) que se calcula por la altura de una unidad de transferencia (H<sub>tog</sub>) y el número de unidades de transferencia (N<sub>tog</sub>)<sup>6</sup>, como se muestra en la ecuación 9.

$$Z = H_{\text{tog}} * N_{\text{tog}} \quad (9)$$

El número de unidades de transferencia está dado por la ecuación 10.

$$N_{\text{tog}} = \frac{A}{A-1} * \ln \left[ \frac{y_1 - mx_2(A-1)+1}{y_2 - mx_2} \right] \quad (10)$$

Dónde A = Ls/Gs \* m, siendo A: factor de absorción y m: pendiente de la curva de equilibrio.

La altura de una unidad de transferencia se calcula según la ecuación 11.

$$H_{\text{tog}} = \frac{G'}{K_{ya}} \quad (11)$$

Y se expresa el coeficiente global de transferencia de masa en función de los coeficientes individuales.

$$1/K_{ya} = \frac{1}{k_{ya}} + \frac{m}{k_{xa}} \quad (12)$$

Se considera una reacción rápida en el líquido, donde predomina la resistencia en la fase gaseosa y el coeficiente total es igual al de la fase gaseosa, ecuación 13.

$$\frac{1}{K_{ya}} = \frac{1}{k_{ya}} \quad (13)$$

La determinación del coeficiente individual de transferencia de masa viene dada por las ecuaciones 14 y 15.

$$k_{ya} = k_y * \sigma \quad (14)$$

$$k_y * \frac{p_{BM}}{P_t} = k_c * \frac{P_t}{RT} \quad (15)$$

Donde σ es la superficie específica del relleno (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) Tabla 6,2<sup>6</sup> y D<sub>AB</sub>=1,42 \* 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s.

R: Constante Universal de los Gases; T: temperatura absoluta en K; P<sub>t</sub>: presión total del sistema; p<sub>BM</sub>: presión media log de B.

Para determinar los números adimensionales: Sherwood (Sh), Reynolds (Re) y Schmidt (Sc) se emplea la ecuación 16, según<sup>14</sup>.

$$\text{Sh} = \frac{k_c * p_{BM} * \text{deq}}{P_t * D_{AB}} \quad (16)$$

Para la fase gaseosa se emplea la ecuación 17 en función del cálculo de los números adimensionales referidos en la ecuación 18.

$$\text{Sh} = 0,407 * \text{Re}^{0,65} * \text{Sc}^{0,33} \quad (17)$$

$$\text{Re} = \frac{4w * \rho_G}{\sigma * \mu_G} \quad \text{Sc} = \frac{\mu_G}{\rho_G * D_{AB}} \quad (18)$$

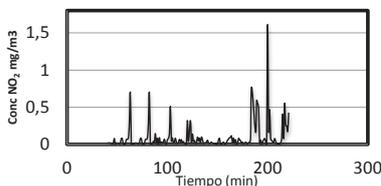
Finalmente se determinan los parámetros de diseño teórico del absorbedor: H<sub>tog</sub> igual a 0,02 m y N<sub>tog</sub> igual a 14,7 para obtener una altura total de empaque de la columna (Z) de 0,28 m. El tiempo de permanencia de los gases en la columna es de 1,34 minutos.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Resultados de la cuantificación de la concentración de NO<sub>2</sub>

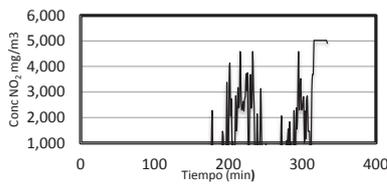
Durante la determinación de las mediciones de NO<sub>2</sub>, realizadas en la primera síntesis se obtuvo una concentración promedio de 0,088 mg/m<sup>3</sup> y un valor máximo de 1,407 mg/m<sup>3</sup>, valores inferiores a la Concentración Promedio Admisible (CPA) y las Concentraciones Máximas Admisibles (CMA) respectivamente, cumpliendo con los Límites Admisibles de Exposición establecidos en el anexo de la NC 872: 2011<sup>15</sup>. Seguridad y Salud del Trabajo-Sustancias Nocivas en el Aire de la Zona de Trabajo.

Para analizar el cumplimiento de la NC 1020:2014<sup>16</sup>, se graficaron los resultados de las inmisiones de NO<sub>2</sub> (Fig.2), obteniéndose una concentración promedio de 0,189 mg/m<sup>3</sup> superior a 0,16 mg/m<sup>3</sup>, incumpliendo con los requisitos establecidos en la norma, para una hora de exposición.



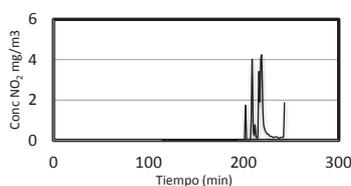
**Fig. 2** Comportamiento NO<sub>2</sub>, primera síntesis del 2-(2-nitrovinil-furano)

Igualmente, para el análisis de las mediciones en una segunda síntesis se graficaron los valores de las inmisiones (Fig.3), observándose que, durante el intervalo de tiempo de 1 h y 40 minutos, la concentración promedio fue de 1,76 mg/m<sup>3</sup>, superior al valor establecido (0,16 mg/m<sup>3</sup>) por la NC 1020:2014 para una hora de exposición.



**Fig. 3** Comportamiento NO<sub>2</sub>, segunda síntesis del 2-(2-nitrovinil-furano)

Aunque en las mediciones anteriores se demuestra que los niveles de gases están por encima de los establecidos por la norma referida, se realiza una última medición para demostrar la veracidad de los resultados. Para esta última síntesis, Fig.4, se muestran los resultados de las inmisiones de NO<sub>2</sub> graficados, obteniéndose valores de concentración superiores a la Concentración Promedio Admisible (CPA) (0,16 mg/m<sup>3</sup>), para una hora de exposición, según la NC 1020:2014.



**Fig. 4** Comportamiento NO<sub>2</sub>, tercera síntesis del 2-(2-nitrovinil-furano)

### Montaje e instalación de la columna absorbidora rellena

La columna absorbidora rellena instalada en el taller de obtención del 2-(2-nitrovinil-furano) quedó conformada por 2,4 cm de diámetro interior con 20 cm de altura de empaque compuesto por Anillos Rasching ¼ plg y una altura total de 50 cm.

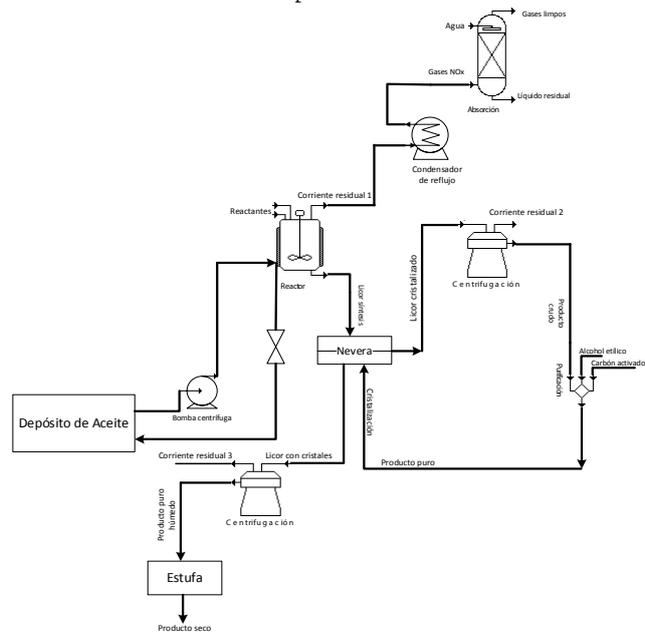
Con la implementación de la columna de absorción en el taller del producto intermedio 2-(2-nitrovinil-furano) como se muestra en la Fig. 5 se modifica el diagrama de flujo del proceso. Las etapas principales que describen el proceso son las siguientes:

**Reacción o síntesis química:** La reacción de los diferentes reactantes se lleva a cabo en un reactor mezcla perfecta con condensador de reflujo, sumergido en un baño de aceite. En este equipo tiene lugar la formación del licor de síntesis a partir de la condensación del furfural, producto derivado de la caña de azúcar<sup>1</sup>.

**Absorción de gases:** Se utiliza para esta operación una columna rellena de anillos Rasching que disuelve en agua los gases incondensables de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) proveniente de la síntesis química.

**Cristalización-centrifugación:** El licor proveniente de la síntesis se coloca en una nevera a la temperatura de -15°C durante 18 horas<sup>1</sup>. El producto de la cristalización se somete a un proceso de centrifugación obteniéndose la masa cristalina impura y un licor residual, el cual contiene nitrometano, furfural y otros productos.

**Purificación:** La masa cristalina impura pasa por un proceso de purificación con etanol y carbón activado, obteniéndose un licor puro.



**Fig.5** Diagrama de flujo de la etapa de síntesis química del Producto intermedio (PI) 2-(2-nitrovinil-furano).

Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

1. En el ambiente de trabajo existen niveles de exposición de gases nitrosos ( $\text{NO}_2$ ) superiores al valor establecido por la legislación ambiental vigente, demostrado por las mediciones realizadas con el equipo Aeroqual serie 500 para una hora de exposición.
2. Los parámetros reales de construcción de la columna rellena de anillos Rasching que sustituye a las trampas de agua para mejorar el proceso de lavado de los gases quedó conformada por un diámetro interior de 2,4 cm, una altura de empaque de 20 cm y una altura total de 50 cm.
3. El tiempo de permanencia de los gases en la columna es de 1,40 minutos, suficiente para que el soluto pase en su mayor parte de una fase a otra lográndose que el contacto entre ambas corrientes sea el máximo posible.
4. Los resultados obtenidos en la prueba del equipo de absorción diseñado, corroboran que se mejoró el proceso de obtención del 2-(2-nitrovinil-furano) desde el punto de vista técnico ambiental.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Proyecto Empresarial "Mejora continua de los Procesos de Obtención de la Furvina y el Vitrofurul" por el apoyo financiero parcial a esta investigación. Código del proyecto:10394, a los trabajadores del taller de obtención del 2-(2-nitrovinil-furano) y de la Planta de Producción, al Laboratorio de Control de la Calidad y a la Unidad de Aseguramiento de la Calidad del Centro de Bioactivos Químicos.

Tabla Nomenclatura	
A	Factor de absorción definido como, L/mG
L	Razón de flujo volumétrico del líquido, kg/s
G	Razón de flujo volumétrico del gas, kg/s
M	Pendiente de la curva de equilibrio
$y_1$	Fracción molar del gas de entrada
$y_2$	Fracción molar del gas de salida
$x_1$	Fracción molar del líquido de salida
$x_2$	Fracción molar del líquido de entrada
$K_{ya}$	Coefficiente total volumétrico de transferencia de masa
$1/k_{ya}$	Resistencia de la película gaseosa
$1/k_{xa}$	Resistencia de la película líquida
$P_{BM}$	Presión media logarítmica de B
$D_{AB}$	Difusividad de la mezcla gaseosa
$P_T$	Presión total del sistema
$k_c$	Coefficiente pelicular de transferencia de masa (moles transferidos/tiempo*A*mol/V)
R	Constante universal de los gases
T	Temperatura absoluta, K
w	Velocidad del gas, referida a sección transversal del total de la columna, m/s
$\sigma$	Superficie específica del relleno
G-0 (I)	Taller de G-0 (I)
VOC	Compuestos orgánicos volátiles

## REFERENCIAS

5. Díaz-Molina, M. I.; Rodríguez-Negrín, Z.; Rodríguez-Rico, I. L.; Brito-Martínez, M. Evaluación de impacto ambiental y propuesta de indicadores ambientales en el taller de obtención del 2-(2-nitrovinil furano) del centro de bioactivos químicos. *Tecnología Química* **2011**, *31*, 145-154.
6. Rodríguez, L.; Blázquez, G. Escalado de reactores químicos y biológicos. *Granada, España* **2010**.
7. Díaz Molina, M. I. Análisis de proceso en función de una propuesta de tecnología más limpia en la obtención del bioactivo G-0. Tesis para optar por el grado de Máster en Análisis de Procesos. Facultad de Química-Farmacia. Centro de Bioactivos Químicos, 2001.
8. Ramsden, E. *A-Level chemistry*. Nelson Thornes: 2000.
9. CATC Oxidos de Nitrógeno (NOx), ¿Por Qué y Cómo Se Controlan? Control y Protección; Environmental Protection Agency EPA-456-F-00-002, 1999.
10. Treybal, R. *Mass Transfer Operations*, McGraw-Hill, New York, 1980; pp 306-333.
11. Korc, M. E.; PROCEE, P. Curso de Orientación para el Control de la Contaminación del Aire. S/E. Washington DC **1999**.
12. Tran, C. D.; De Paoli Lacerda, S. H.; Oliveira, D. Absorption of water by room-temperature ionic liquids: effect of anions on concentration and state of water. *Applied spectroscopy* **2003**, *57*, 152-157.
13. Rodríguez, E. B.; Mendoza, J. D.; Acosta, S. D. N.; González, G. R. *Algunas Operaciones Básicas de la Industria Química Para El Ingeniero Industrial*. 2011.
14. GEOCUBA Informe Técnico: *Monitoreo de variables ambientales (ruido y gases)* en el Centro de Bioactivos Químicos, "Universidad Central de las Villas "Marta Abreu", 2015.
15. *Boletín Técnico. Monitoreo de Variables Ambientales (Ruido y Gases)*; División de Estudios Medioambientales, 2015.
16. G.W. Rayner-Canham and T.L. Overton, *Descriptive Inorganic Chemistry: 6th Edition*, W.H. Freeman Publishing Co., New York, 2014.
17. Ramm, V. M. In *Absorption of gases*, 1966. p 26, pp 55-60. Translated from Russian by R. Kondor. Translation edited by D. Slutzkin.
18. Pávlov, K. F.; Romankov, P. G.; Noskov, A. A. *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química*. Mir: 1981.
19. Oficina Nacional de Normalización. NC 872:2011. Seguridad y salud en el trabajo - Sustancias nocivas en el aire de la zona de trabajo - Evaluación de la exposición laboral - Requisitos generales. La Habana: ONN; ICS: 13.300, 13.100, 2011.
20. Norma Cubana NC 1020:2014. Calidad del aire - contaminantes - Concentraciones máximas admisibles y valores. Guías en zonas habitables. ICS: 13.040, 2014.