

Simulación y control de una columna de absorción continua rellena con anillos tipo rasching a través del software SIMULATROL 6000

Oriana Barrios*, Pedro Berroterán, Víctor Da Silva, Efraín Roca

Departamento de Sistemas y Automática, Escuela de Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo.

Resumen.-

Este trabajo presenta la simulación del comportamiento y del control de una columna de absorción continua rellena con anillos Rasching a escala piloto, en el programa “SIMULATROL 6000”. El comportamiento en régimen permanente fue diseñado en Delphi y anexado a la librería del SIMULATROL 6000; donde el transitorio se aproximó como un sistema de segundo orden con retardo. Para la validación del proceso, se separó dióxido de carbono (CO_2) de una mezcla gaseosa aire- CO_2 , utilizando como solvente agua en una columna de absorción ubicada en la Universidad de Carabobo. Adicionalmente, se realizó la simulación de la torre en el programa, incluyendo cambios en las variables que intervienen en los lazos de control de nivel y de concentración de CO_2 .

Palabras clave: Columna de absorción, SIMULATROL 6000, control.

Simulation and control of a continuous absorption packed column with rasching ring in software SIMULATROL 6000

Abstract.-

This paper presents the simulation of the behavior and control of a pilot scale continuous absorption column filled with Rasching rings in the “SIMULATROL 6000”. The steady state behavior was designed in Delphi and added to the SIMULATROL 6000 library; where the transient state was approached as a second-order system with delay. To validate the process, carbon dioxide (CO_2) was separated from an air- CO_2 gas mixture, using water as a solvent in an absorption column located at the University of Carabobo. Additionally, simulation of the tower in the program was performed, including changes in the variables involved in the control loops and level of CO_2 concentration.

Keywords: Absorption column, SIMULATROL 6000, Control.

Recibido: septiembre 2010

Aceptado: febrero 2011

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos químicos como la destilación, la absorción, y reacciones químicas son comunes a nivel industrial para el tratamiento de materia prima, transformación y fabricación del producto.

Por ello, es regular que instituciones académicas y las propias empresas fomenten el estudio de los mismos, utilizando la simulación a través del computador; lo cual evita ponerlos en marcha de manera física sin estar familiarizados con su comportamiento.

De esta manera, por ejemplo, se han estudiado métodos distintos a los clásicos para calcular la altura requerida en una columna de absorción, tal como lo reseña el trabajo de Garfias y Barnes (México 1992), “Diseño de columnas de absorción adiabática”. También se han realizado multimedias para la enseñanza de operaciones unitarias, como el desarrollado por Rennola (Universidad de los

* Autor para correspondencia

Correo-e: oriana.barrios@gmail.com (Oriana Barrios)

Andes, 2006), que se enfocó en absorción y extracción líquido-líquido. Así mismo, se puede acotar el trabajo de manzanilla y Noriega (Universidad de Carabobo, 2007), que presenta la puesta en marcha y simulación de una torre de destilación empacada a escala piloto.

Adicionalmente, con el fin de contribuir al estudio e investigación a través de la simulación, el Ing. Efraín Roca, adscrito a la Escuela de Eléctrica de la Facultad Ingeniería de la Universidad de Carabobo, está desarrollando un software de simulación denominado SIMULATROL 6000, el cual está orientado hacia el área de control de procesos y especialmente centrado en la visualización del comportamiento de los diversos elementos de instrumentación industrial [1].

Debido a que el SIMULATROL 6000 aún no cuenta con muchos de los procesos químicos presentes en la industria venezolana, en esta investigación se pretende adicionar a su librería una columna de absorción continua rellena con anillos tipo Rasching a escala piloto, para realizar su simulación y posteriormente el control de dicho proceso.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Para efectos de la simulación, se tomaron una serie de consideraciones, descritas a continuación, que facilitan el desarrollo del software y estructura de programación del mismo en la resolución del modelo utilizado, permitiendo interpretar una aproximación del comportamiento de la columna.

1. La simulación será de un proceso de absorción a escala piloto.
2. El proceso se realiza de forma isotérmica.
3. La transferencia de masa es unidireccional en dirección perpendicular al área de transferencia, por tanto, los cambios de concentración ocurren con la variación de la altura de relleno y el área de contacto entre las fases.
4. La presión y la temperatura asignada al software serán a condiciones ambientales ($T = 26^{\circ}\text{C}$ y $P = 1,013 \text{ Bar}$), y estas se mantendrán constantes dentro y fuera de la torre, durante todo el proceso.

5. El tipo de relleno se limitó a *Anillos tipo Rasching*, únicamente cerámicos o de carbón, considerando que la mayoría de los rellenos de torre se construyen con materiales baratos, inertes y relativamente ligeros [2].
6. Los diámetros de los anillos de relleno solo pueden tomar los valores de 13, 25, 38 y 50 mm.
7. Se limitó al gas inerte como aire y al solvente líquido como agua pura.
8. La base de datos cuenta solamente con los elementos aire, agua, CO_2 , NH_3 y SO_2 .
9. La forma física del tanque será tomada como un cilindro.
10. El modelo matemático que describe el comportamiento del proceso en estudio, se desarrolló en dos etapas fundamentales, el modelo para régimen permanente y el de régimen transitorio.

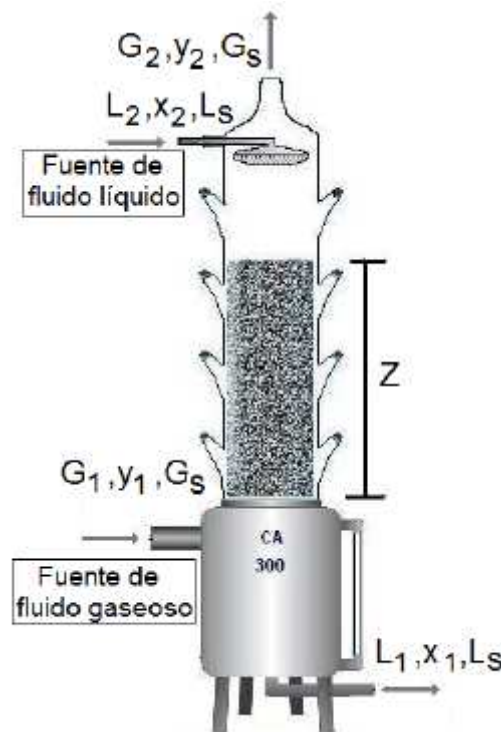


Figura 1: Variables involucradas en el proceso de absorción en una torre empacada

En la Figura 1 se encuentra estructurada la distribución de las variables de entrada y salida del equipo de absorción. Estas variables son:

Flujo molar del gas en la corriente de salida (G_2),
 Fracción molar del soluto en la corriente de salida del gas (y_2),
 Flujo molar del líquido en la corriente de entrada (L_2),
 Fracción molar del soluto en la corriente de entrada del líquido (x_2),
 Flujo molar de gas en la corriente de entrada (G_1),
 Fracción molar del soluto en la corriente de entrada del gas (y_1),
 Flujo molar de líquido en la corriente de salida (L_1),
 Fracción molar del soluto en la corriente de salida del líquido (x_1),
 Altura de la sección empacada (Z), flujo molar de gas inerte (G_s),
 Flujo molar de líquido inerte (L_s).

3. SIMULACIÓN DEL PROCESO

Para realizar la simulación, el estado estacionario, fue modelado a través del software Borland Delphi 6, debido a que con él se desarrolló el SIMULATROL 6000. Esto permitió enlazar fácilmente, el algoritmo desarrollado con el simulador. Respecto al régimen transitorio, se emuló como un sistema de segundo orden con retardo, tomando un bloque ya existente en el SIMULATROL.

3.1. Modelación del estado estacionario

A continuación se muestran las ecuaciones utilizadas como base para el desarrollo de la simulación del régimen permanente:

3.1.1. Balance global de masa y componentes:

$$L_s = L_2(1 - x_2), \quad (1)$$

$$G_s = G_1(1 - y_1), \quad (2)$$

$$L_1 = \frac{L_s}{1 - x_1}, \quad (3)$$

$$G_2 = \frac{G_s}{1 - y_{2\text{ sup}}}, \quad (4)$$

$$X_1 = \frac{\left[\left(\frac{x_2}{1-x_2} \right) - \left(\frac{y_{2\text{ sup}}}{1-y_{2\text{ sup}}} - \frac{y_1}{1-y_1} \right) * \frac{G_s}{L_s} \right]}{\left[1 + \left(\frac{x_2}{1-x_2} \right) - \left(\frac{y_{2\text{ sup}}}{1-y_{2\text{ sup}}} - \frac{y_1}{1-y_1} \right) * \frac{G_s}{L_s} \right]}, \quad (5)$$

donde:

$y_{2\text{ sup}}$: fracción molar supuesta del soluto en la corriente de salida del gas.

3.1.2. Altura de la zona rellena (zona de transferencia de masa):

Basándose en la Teoría de Doble Resistencia de Whitman [3].

$$-\frac{k_x}{k_y} = \frac{y - y_i}{x - x_i}, \quad (6)$$

donde: k_x, k_y : coeficientes de transferencia de masa del líquido y del gas respectivamente.

x, y : concentraciones de soluto en líquido y gas.

x_i, y_i : respectivamente, fracciones molares de líquido y gas en la interfase.

3.1.3. Coeficientes de transferencia de masa

Fase Gaseosa:

$$\frac{k_y S c v^{2/3}}{G} = 1,195 \left[\frac{ds G'}{\mu_G(1 - \varepsilon_{L0})} \right]^{0,36}, \quad (7)$$

Fase Líquida:

$$\frac{k_x ds}{D_L} = 25,1 \left[\frac{ds L'}{\mu_L} \right]^{0,45} \left[\frac{\mu_L}{\rho_L D_L} \right]^{0,5}, \quad (8)$$

donde:

ds es el diámetro de una esfera con la misma superficie que una única partícula de empaque [4],
 Scv representa el número de Smith de gas [adim],
 G es la velocidad molar superficial de masa del gas [$\text{kmol/m}^2.\text{s}$],

G' es velocidad superficial de masa del gas [$\text{kg/m}^2.\text{s}$],

L' es velocidad superficial de masa líquida [$\text{kg/m}^2.\text{s}$],

μ_G es la viscosidad de la mezcla gaseosa [$\text{kg/m}.\text{s}$],

μ_L es viscosidad de la mezcla líquida [$\text{kg/m}.\text{s}$],

D_L es difusividad de mezcla líquida [m^2/s],

ρ_L es la densidad de una sustancia líquida [kg/m^3]

y

ρ_{LM} representa la densidad de la mezcla líquida [kg/m^3] [4].

Respecto a ε_{Lo} , es el espacio vacío de operación y esta dado por las siguientes ecuaciones

$$\varepsilon_{Lo} = \varepsilon - \phi_{Lt}, \quad (9)$$

$$\phi_{Lt} = \phi_{Lo} + \phi_{Ls}, \quad (10)$$

$$\phi_{Lo} = \phi_{LOW} \cdot H, \quad (11)$$

$$\phi_{LOW} = \phi_{LtW} \phi_{LsW}, \quad (12)$$

el subíndice W significa que el líquido es agua y las variables anteriores indican ϕ_{Lt} , la retención total de líquido [adim], ϕ_{Lo} , la retención de operación del líquido [adim], ϕ_{Ls} , la retención estática del líquido [adim] y H , factor de corrección (retención torres empacadas) [adim].

Para el desarrollo de las ecuaciones planteadas, se requiere de las tablas que describen las características y los valores de los parámetros de la retención de líquidos de una torre empacada [4].

3.1.4. Área interfacial:

Esta área puede ser menor que el área real, debido a las zonas estancadas en las que el líquido llega a la saturación [5].

$$a_{AW} = M \left(\frac{808G'}{\rho_G^{0.5}} \right)^n L'^P, \quad (13)$$

donde la variable ρ_G es la densidad de gas [kg/m³] y los parámetros m , n y P se encuentran tabulados en la tabla de parámetros del área interfacial, considerando absorción de líquidos acuosos [4].

3.1.5. Algoritmo del programa principal:

Para desarrollar el algoritmo del modelo matemático de la columna de absorción se tomaron en cuenta una amplia gama de constantes que corresponden a las características de los elementos disponibles por el programa. Se creó una base de datos donde se almacenan dichas constantes para ser usadas por el software cuando sea necesario, las cuales se mencionan a continuación:

Peso molecular (**PM**) en kg/kmol, la constante universal de los gases (**R**) en (J/°K.mol) temperatura de ebullición (**Tb**) en °K, temperatura crítica (**Tc**) en °K, presión crítica (**Pc**) en Pa, volumen crítico (**Vc**) en m³/kmol, volumen normal (**Vb**) en m³/kmol, momento dipolar (**U**) en debyes, constantes de densidad de los líquidos (**Cd1**,

Cd2, **Cd3**, **Cd4**) que son adimensionales, al igual que las constantes de viscosidad (**Visc1**, **Visc2**, **Visc3**, **Visc4**), las constantes de tensión superficial (**CTS1**, **CTS2**) y el factor acéntrico (**W**).

También se hizo uso de algunas constantes básicas como gravedad (9,81 m/s²) y π (3,141592654) para el cálculo de las áreas circulares o volúmenes cilíndricos y esféricos.

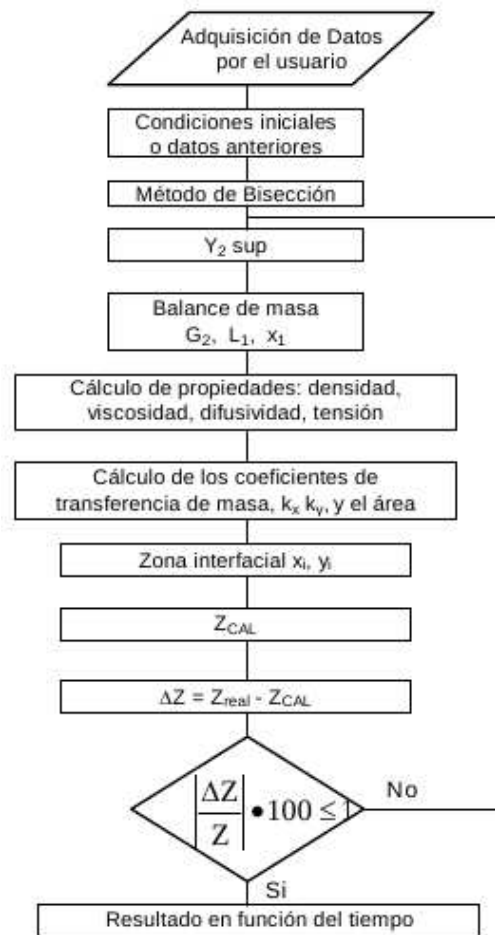


Figura 2: Algoritmo del programa principal en régimen permanente

La estructura del programa principal para realizar la simulación de la columna de absorción en régimen permanente, se muestra en la Figura 2.

3.2. Modelación del régimen transitorio

En el bloque de la librería del SIMULATROL 6000, que representa el comportamiento de segundo orden con retardo, se deben especificar las siguientes variables: Kp (Ganancia del Proceso), ganancia de estado estacionario, la cual se toma

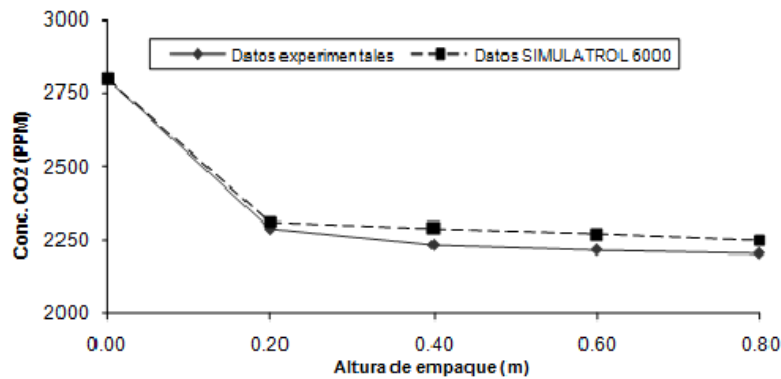


Figura 3: Comparación entre concentración de CO₂ (Y_2) obtenida experimentalmente y con SIMULATROL 6000.

como unitaria ($K_p = 1$), ya que el valor de la salida del sistema para régimen permanente es calculado en la primera etapa del modelado; τ_1 y τ_2 (*Constantes de Tiempo*), corresponden a las dos constantes de tiempo del sistema de segundo orden, y el usuario debe colocar el valor según sea el caso del sistema que desea simular; T_0 (*Tiempo Muerto*), tiempo que tarda en reaccionar el sistema después de producida una perturbación a la entrada y *Bias (Polarización de la Salida)*, valor sumado a la salida cuando la misma es cero.

A este bloque se le asigna a su entrada la señal de concentración del gas de salida de la columna en régimen permanente (Y_2), obteniendo a su salida la sumatoria del comportamiento de la respuesta estacionaria y la transitoria de dicha señal (Y'_2).

4. SISTEMA DE ABSORCIÓN FÍSICO

En la torre de absorción existente en el Laboratorio de Ingeniería de Procesos, se realizaron las pruebas experimentales para corroborar el correcto funcionamiento de las simulaciones desarrolladas en estado estacionario. Dicho sistema consta de una columna de vidrio de 11cm de diámetro, 1 m de altura, y 80 cm de área empacada con anillos tipo Rashing de PVC de 1/2"; colocada encima de un tanque de acero inoxidable de 64,1 L.

El equipo opera en contracorriente, recibiendo por la parte superior agua (H_2O) a manera de regadera de un sistema hidroneumático, y por el tanque inferior una entrada para la mezcla de aire y CO₂ (siendo el aire el gas inerte y el CO₂ el

soluta) que es impulsada por un turboventilador de potencia 1/2 Hp, velocidad nominal 1800 RPM y entrada y salida de aire de 50 mm de diámetro. A dicho turboventilador se le modificó su velocidad a través de un variador de frecuencia de marca Telemecanique, modelo ALTIVAR 18.

5. COLUMNA DE ABSORCIÓN DEL LIP VERSUS SIMULACIÓN EN SIMULATROL 6000

La validación se realizó comparando el comportamiento en régimen permanente de la concentración de CO₂ a diferentes alturas de la zona empacada, tanto de la columna del laboratorio como la simulada en el SIMULATROL 6000.

Para operar de manera correcta con la columna de absorción, fue necesario establecer las variables de entrada que permiten obtener un punto óptimo de funcionamiento ($G_1 = 14,44$ m/s.At, $X_2 = 0$, $L_2 = 4$ L/min, $Y_1 =$ ajustado por el usuario), de tal manera que el sistema alcance el régimen permanente en poco tiempo y se evite la inundación de la columna [6].

En la Figura 3 se muestra una de las validaciones realizadas, considerando un $Y_1 = 2800$ PPM. En dicha figura puede observarse que la concentración de CO₂ en cada toma, coincide aproximadamente con la obtenida en los experimentos realizados con la columna del LIP, presentando en promedio un error de 1,347 %.

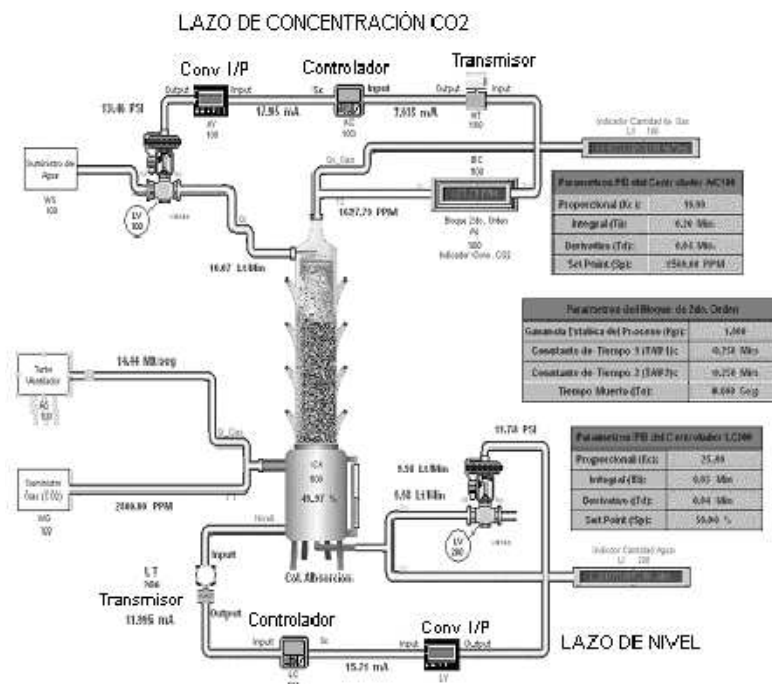


Figura 4: Simulación de dos lazos de control en el software Simulador 6000.

5.0.1. Perturbaciones

6. CONTROL DEL PROCESO DE ABSORCIÓN CON SIMULATROL 6000

En el montaje de la Figura 4, se observan los dos lazos de control por realimentación que se establecieron en el simulador, para lo cual se debió configurar todos los parámetros de los distintos elementos, tales como transmisores, controladores y columna de absorción, entre otros.

Una de las variables a controlar es Y_2 , lo cual se hará a través de la manipulación de la variable de entrada L_1 . El otro lazo controla el nivel de líquido en el tanque, manipulando una válvula de desagüe a la salida del mismo.

Los controladores fueron ajustados según el Criterio de Ziegler & Nichols (Método de Oscilaciones Continuas) [7]. Los parámetros del controlador PID del lazo de concentración se establecieron en $K_c = 10$, $T_i = 0,2$ min y $T_d = 0,04$ min. Respecto al PID del lazo de nivel, los ajustes fueron $K_c = 25$, $T_i = 0,03$ min y $T_d = 0,02$ min.

Con los controladores PID entonados, en el simulador se realizaron cambios en el punto de ajuste y en variables perturbadoras que arrojaron

los resultados especificados en las secciones siguientes.

6.1. Lazo de control de la concentración del gas de salida (Y_2)

6.1.1. Cambio punto de ajuste

Para este caso se dejaron fijas las variables de entradas del sistema: $Y_1 = 2800$ PPM, $G_1 = At.14,44$ m/s y $L_2 = 13,6$ L/min, y se realizaron variaciones del punto de ajuste de 1600 a 1500 PPM. Estos cambios se muestran en la Figura 5, donde se observa que el control Y_2 permite seguir los cambios realizados en el punto de ajuste.

6.1.2. Perturbaciones

Para simular perturbaciones, se realizaron variaciones en la concentración de CO_2 en la entrada (Y_1), de 2800 a 3200 PPM y luego a 2500 PPM; manteniendo L_2 en 13,6 L/min. Posteriormente L_2 se modificó a 6 L/min.

En la Figura 6, se muestra cómo al aplicar las perturbaciones anteriores, el sistema logra estabilizarse de manera exitosa en el punto de ajuste definido en la simulación. Sin embargo se puede observar en dicha figura que para un valor de



Figura 5: Variación del punto de ajuste en la concentración de CO_2 en la salida.

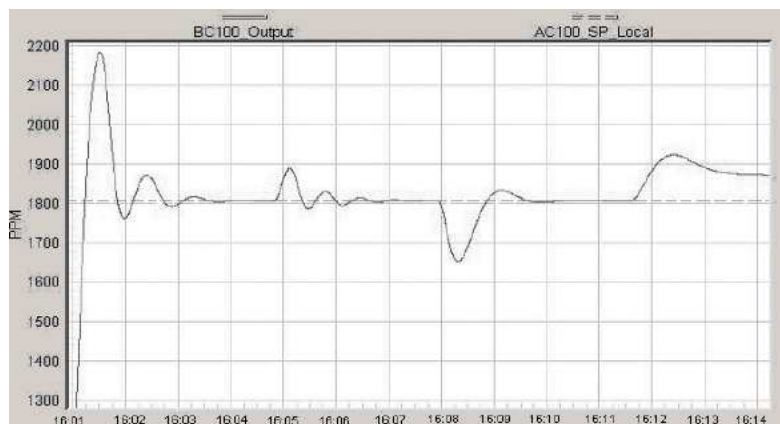


Figura 6: Comportamiento de concentración de CO_2 ante perturbaciones.

$L_2 = 6$ L/min, el resultado no alcanza nuevamente el valor deseado, sino que queda aproximadamente 3,33 % por encima del mismo (parte final de la gráfica), esto se debe a que es poco el flujo del líquido a la entrada de la columna para producir el valor de concentración requerido a la salida.

6.2. Lazo de control del nivel en el tanque

Al igual que en lazo de concentración de CO_2 , se realizaron cambios tanto de punto de ajuste como en las variables de entrada que pueden representar perturbaciones al sistema, con el fin de observar el comportamiento del proceso ante dichas variaciones.

6.2.1. Cambio de punto de ajuste

Para este lazo de nivel, se dejaron fijas las variables de entradas del sistema en $Y_1 = 2800$ PPM, $G_1 = 14,44$ m/s y $L_2 = 13,6$ L/min.

Se aumentó el punto de ajuste de 50 % a 70 % y luego se disminuyó a 20 %.

En la Figura 7, se observa el control del proceso para los diferentes puntos de ajuste, logrando que el nivel se estabilice exitosamente en el valor deseado.

Una de las perturbaciones escogidas, fue la variación de la concentración de gas de entrada (Y_1), arrojando los resultados que se observan en la Figura 8.

Como se puede observar en la Figura 8, al perturbar la entrada de concentración de gas (Y_1), realizando cambios de 2800 a 3200 PPM, y de ese punto a 2500 PPM, se logra que el sistema quede estable para un punto de ajuste fijo de 20 %, lo que permite indicar que el control se realiza de manera exitosa.

Otras perturbaciones, se visualizan en la Fi-



Figura 7: Comportamiento del nivel ante variaciones en el punto de ajuste.

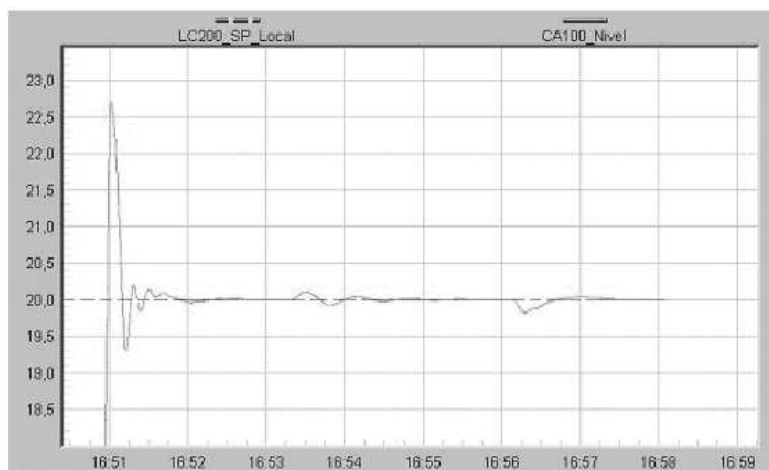


Figura 8: Gráfico del nivel ante perturbaciones en la concentración de entrada (Y_1).

gura 9, donde se modificó L_2 de 13,6 Lt/min a 10 Lt/min, y posteriormente se hizo una variación en el punto de ajuste del lazo de concentración de 1800 a 2000 PPM, manteniéndose el punto de ajuste deseado del lazo de nivel en 20 %.

7. CONCLUSIONES

Usando el lenguaje de programación Delphi fue creado de manera exitosa la representación de un modelo matemático para una columna de absorción a escala piloto, a través de un procedimiento de iteraciones sucesivas que realiza todos los cálculos necesarios para obtener una respuesta que se aproxime de manera óptima al comportamiento real de dicho proceso.

Con el modelo matemático ya establecido, se

realizó la librería y el modelo interno correspondiente al proceso de absorción en el Simulacrol 6000, quedando este como un recurso predeterminado en el software. Haciendo uso del mismo se realizaron distintas pruebas de simulación de la torre y se compararon con datos experimentales realizados a la torre existente en el LIP, obteniendo errores comprendidos entre 0 % y 5 %. De esta manera se verificó un correcto funcionamiento tanto para el modelo matemático como para el modelo del Simulacrol 6000.

Es posible observar a través de la simulación de los lazos de control de concentración y nivel la interacción existente entre los mismos, observando que ante cambios en una de estas variables, la otra se perturba pero retorna a su valor de ajuste.



Figura 9: Perturbación en la variable L_2 y en el punto de ajuste del lazo de concentración.

Referencias

- [1] Díaz, R. y Mateo, S. (2008). "Desarrollo de un banco de prueba de programas de control asistido por simulación computarizada", Universidad de Carabobo, Venezuela.
- [2] Gomis, M. (1998). "Introducción a las operaciones de separación (Cálculos por etapas de equilibrio)", Publicaciones Universales de Alicante, España.
- [3] Geankoplis, C. (1998). "Procesos de transporte y operaciones unitarias" 3^{ra} edición, Editorial continental, S.A., México.
- [4] Treybal, R. (1995). "Operaciones de transferencias de masa" 2^{da} Edición, España.
- [5] Perry, R. (2001). "Manual del Ingeniero Químico" 6^{ta} edición, Mc Graw Hill, México.
- [6] Barrios, I. (2009). "Desarrollo de un software para la simulación de una torre de absorción empacada a escala piloto", Universidad de Carabobo, Venezuela.
- [7] Smith, C. y Corripio A. (2001). "Control Automático de procesos, teoría y práctica". Noriega Editores, México.