

SIMULACIÓN DINÁMICA Y ESTRATEGIAS DE CONTROL APLICADAS AL PROCESO DE ENDULZAMIENTO DE GAS NATURAL

J. P. Gutierrez¹, L. A. Benitez¹, E. L. Ale Ruiz², E. Tarifa³ y E. Erdmann⁴

¹Instituto de Investigaciones para la Industria Química
(Universidad Nacional de Salta - CONICET)

^{1,2}Facultad de Ingeniería – Consejo de Investigación, Universidad Nacional de Salta
Av. Bolivia 5150, Salta (4400), Salta.

³Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy

⁴Instituto Tecnológico de Buenos Aires

E-mail: gutierrezjp@unsa.edu.ar

Resumen. El gas natural es uno de los recursos de mayor contribución en la matriz energética argentina. Es un recurso natural altamente utilizado en la industria, para la generación de energía eléctrica, así como combustible en el sector de transporte y su uso doméstico es técnicamente imprescindible. Aunque su composición varía de acuerdo a la ubicación del pozo donde se extrae, está compuesto principalmente por metano y, en menor medida, gases alcanos superiores. Sin embargo, suele contener gases adicionales como vapor de agua, mercaptanos, N₂, CO₂ y H₂S. Estos últimos dos compuestos, en particular, son considerados impurezas indeseables debido a que restan poder calorífico al gas como combustible pero fundamentalmente porque, bajo condiciones apropiadas, ocasionan la formación de compuestos ácidos que derivan en la corrosión del material propio de cañerías y gasoductos. El endulzamiento es el proceso específico para remover los gases ácidos y evitar los problemas relacionados con su presencia en las líneas de gas.

El objetivo de este trabajo es describir la simulación dinámica del proceso de endulzamiento de gas natural con una alcanamina, desarrollar la estrategia de control para moderar las perturbaciones del sistema y evaluar los resultados obtenidos. Para ello se trabajó con el simulador de procesos Aspen Hysys versión 8.3. Los resultados obtenidos muestran las diferencias entre los estados de simulación explorados, el estacionario y el dinámico, las particularidades de incluir la variación frente al tiempo en la simulación y el impacto que significa el empleo de una acción de control adecuada en el proceso.

Palabras clave: Simulación, Control, Endulzamiento.

1. Introducción

Debido a que la presencia de los gases ácidos del gas natural que sale de pozo puede causar dificultades técnicas en la cañería, por ejemplo corrosión, se hace necesario removerlos antes de que el gas sea transportado a través de gasoductos (Campbell y Maddox, 1974). Los valores límites de concentración de gases ácidos en las corrientes de gas que se transfieren se encuentran especificados de acuerdo a la legislación vigente en cada país o de acuerdo a requerimientos del cliente (Gutierrez et al., 2014). En Argentina, las especificaciones para el transporte del gas natural a través de gasoducto están reguladas por el ENARGAS (Ente Nacional de regulación del gas) (Erdmann; et al., 2012).

Hasta la fecha se han desarrollado numerosas tecnologías que tienen por objetivo la remoción de los gases ácidos presentes en el gas natural, en diferentes condiciones operativas y para diferentes concentraciones de CO₂ y H₂S (Kohl y Nielsen, 1997). Muchos de estos procesos involucran un proceso de absorción química con un solvente de naturaleza regenerable (Campbell y Maddox, 1974). En ese sentido, las soluciones de alcanaminas son los solventes más populares para la eliminación de gases ácidos y son comercialmente utilizados para el endulzamiento de gas desde los años 30, aproximadamente (Kohl y Nielsen, 1997). Por lo que las tecnologías con alcanaminas han ido evolucionando de manera gradual y adecuándose cada vez mejor a los casos

específicos en donde son utilizadas. Asimismo, las alcanolaminas poseen una alta afinidad hacia los gases ácidos. Existen, actualmente, varios tipos de aminas que pueden ser usadas en el proceso de endulzamiento (Abdulrahman et al., 2013). Cada una se selecciona de acuerdo a su naturaleza química (de tipo primaria, secundaria o terciaria) y pueden ser utilizadas en soluciones acuosas de una única amina o, incluso, mezclas de ellas (aminas formuladas).

1.1. Proceso de Endulzamiento con Aminas

El diagrama de flujo de una planta de acondicionamiento de gas con aminas consta principalmente por una torre absorbidora y una regeneradora (Erdmann et al., 2012). En la primera se lleva a cabo la operación de absorción propiamente dicha. Para ello se emplea una torre de absorción por cuyo fondo se hace ingresar la corriente de gas a tratar, ésta se pone en contacto en contra-corriente con un flujo descendente de una solución acuosa de amina (amina pobre). En el interior de la torre, el contacto entre las corrientes se lleva a cabo en los platos internos, de manera que los gases ácidos reaccionan con las moléculas de amina, liberando un compuesto soluble en agua. Esta última corriente -denominada amina rica- abandona la torre de absorción por fondo. La reacción de tipo exotérmica reversible ocurre en condiciones de elevada presión y bajas temperaturas (Perry et al, 1997).

En la segunda parte del diagrama de flujo, ocurre la etapa de regeneración de la amina rica. Este proceso ocurre en una torre de destilación, denominada regeneradora, en la cual se aprovecha la carga energética entregada en el reboiler para despojar los componentes ácidos disueltos en la solución acuosa de amina. Esta última se reacondiciona para ser bombeada nuevamente hacia la primera parte, cerrando el circuito de amina. Debido a las pérdidas de amina durante el proceso es necesario un make-up de agua y/o amina pura para que la concentración se mantenga constante al ingresar a la torre de absorción. Algunos de los equipos principales para efectuar el endulzamiento, según Behroozsarand & Zamaniyan (2011), se muestran a continuación en la Fig. 1.

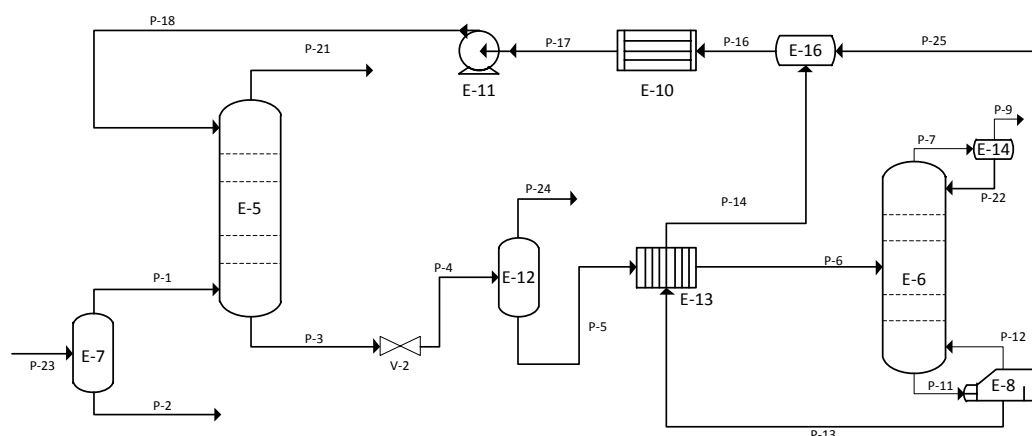


Fig. 1. Configuración típica de una planta de endulzamiento.

Equipos principales:

E-7: Separador de entrada

E-5: Torre de absorción

E-12: Tanque de separación Flash

E-13: Intercambiador Amina-Amina

E-6: Torre de regeneración

E-8: Reboiler (rehervidor)

E-16: Mezclador agua-amina

E-11: Bomba de amina

Corrientes materiales principales:

P-23: Gas de pozo

P-21: Gas dulce

P-3: Amina rica

P-13: Amina regenerada

P-17: Amina pobre enfriada

P-25: Agua de reposición

1.2. El Campo de la Simulación

La simulación consiste en la representación virtual de un proceso mediante un modelo matemático, el cual describe un fenómeno físico-químico, con el objeto de obtener información acerca de su comportamiento. Es una técnica moderna indispensable para la ejecución eficiente de tareas como diseño, optimización y operación de plantas industriales. Un simulador de procesos es un software que permite la solución numérica del modelo matemático que agrupa un conjunto de funcionalidades que se citan a continuación.

- ❖ Base de datos de componentes, contiene las constantes necesarias para calcular las propiedades físicas a partir de los modelos termodinámicos.
- ❖ Bloque de modelos termodinámicos, ofrece diversas opciones para el cálculo de los equilibrios líquido-vapor y líquido-líquido, de las entalpías y otras propiedades termodinámicas.
- ❖ Bloque del diagrama de flujo (“flowsheet”), está relacionado con las corrientes y los equipos que se van a simular.
- ❖ Bloque de operaciones unitarias, realiza los balances de materia y energía en los distintos equipos.
- ❖ Bloque generador de datos de salida, genera un informe con todos los resultados de la simulación.
- ❖ Bloque de secuencia de cálculo, controla la secuencia en que han de ser realizados los cálculos y la convergencia de la simulación (Cohen, 2003).

El objetivo de este trabajo es simular el estado dinámico del proceso de endulzamiento de gas natural con dietanolamina (DEA). A partir de ello, se establece una comparación entre los perfiles de Temperatura de la torre de absorción obtenidos en el estado estacionario y dinámico. Luego, se obtienen las fluctuaciones de algunas variables de control y se establece una estrategia de control pertinente a fin de obtener perfiles constantes en el tiempo, mediante la inserción de un controlador adecuado.

2. Metodología

2.1. Simulación en Estado Estacionario

Aspen Hysys v8.3 tiene la capacidad de simular rigurosamente los sistemas para la remoción de gases ácidos con aminas, para lo cual ha desarrollado un paquete de propiedades específico denominado *Acid Gas*. El mismo contiene las reacciones químicas electrolíticas que suceden entre el solvente (amina) y los compuestos ácidos del gas natural.

El simulador Aspen Hysys v.8.3 incorpora mejoras respecto al paquete fisicoquímico de versiones anteriores hechas con el objetivo de extender el rango de aplicabilidad y para mejorar la descripción de los sistemas no ideales, tiene un mayor rango de temperaturas, que van desde sistemas criogénicos hasta altas temperatura, y desde presiones de vacío hasta sistemas de alta presión. Tiene una gran base de datos para la interacción binaria lo que hace que las determinaciones sean muy buenas para mezclas de hidrocarburos (Aspen Technology, 2012).

En el ambiente de simulación, se introducen los equipos y las corrientes materiales y energéticas principales. El gas natural que ingresa al proceso tiene la composición detallada en la Tabla 1. Se observa la excesiva cantidad de CO_2 y H_2S que ingresa al proceso ya que la restricción establecida por el ENARGAS especifica un valor límite de 2% molar de CO_2 y de menos de 3 ppm de H_2S en la corriente de gas dulce. La corriente de entrada, denominada “SOUR GAS” o gas fuente, ingresa con un flujo molar igual a 2745 lbmol/hr, a una presión de operación igual a 1000 psia y una temperatura de 86 °F.

Tabla 1. Composición del gas natural que ingresa a Planta

| Componente | Fracción Molar |
|----------------------|----------------|
| Metano | 0,8692 |
| Etano | 0,0393 |
| Propano | 0,0093 |
| i-Butano | 0,0026 |
| n-Butano | 0,0029 |
| i-Pentano | 0,0014 |
| n-Pentano | 0,0012 |
| n-Hexano | 0,0018 |
| n-Heptano | 0,0072 |
| Nitrógeno | 0,0016 |
| CO_2 | 0,0413 |
| H_2S | 0,0172 |
| Agua | 0,0050 |

La solución acuosa de DEA (amina pobre) posee las condiciones explicitadas en Tabla 2.

Tabla 2. Características de la amina utilizada

| | |
|---------------|---------------|
| Flujo molar | 4160 lbmol/hr |
| Temperatura | 95 °F |
| Presión | 995 psia |
| % másico DEA | 27% |
| % másico agua | 73% |

La simulación del caso base en estado estacionario se muestra en la Fig. 2.

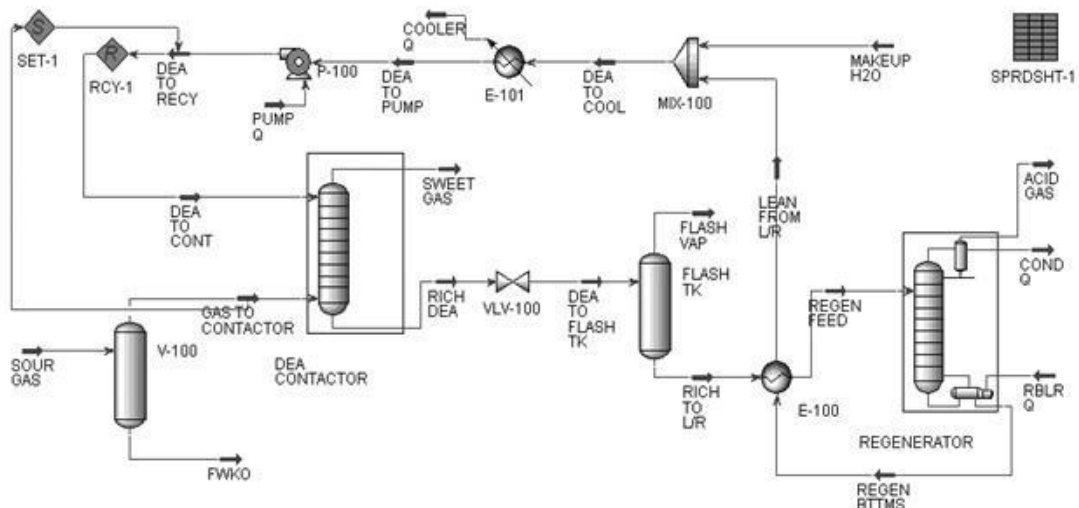


Fig. 2. Simulación en estado estacionario

2.2. Transición al Estado Dinámico

A partir del modelo estacionario presentado previamente, se llevan a cabo las modificaciones necesarias para obtener el modelo dinámico.

Las principales modificaciones que se hacen sobre el modelo de simulación estacionario se detallan a continuación.

- ❖ La instalación de válvulas en las principales corrientes con el objetivo de especificar los valores de presión o flujo molar de las corrientes seleccionadas. De esa forma, se asegura que los grados de libertad del

flowsheet sea reducido a cero y así correr el integrador para el estado dinámico de forma correcta.

- ❖ La implementación de la herramienta Tray Sizing del simulador para calcular el tamaño y establecer la configuración de cada plato (de los 20) de la torre de absorción. Este punto es importante porque en el estado estacionario la caída de presión es especificada por el operador, mientras que en el estado dinámico es calculada mediante consideraciones hidráulicas.
- ❖ La incorporación de dos bombas centrífugas adicionales debido a que el modelado dinámico involucra cálculos de velocidad de flujo que consideran las diferencias de presión y las resistencias de flujo que se verían imposibilitados sin que se compensen con estos equipos de bombeo.

La captura de pantalla del estado estacionario modificado, listo para ser integrado al estado dinámico, se muestra en Fig. 3. En ella se observan las modificaciones descritas anteriormente para pasar al estado dinámico.

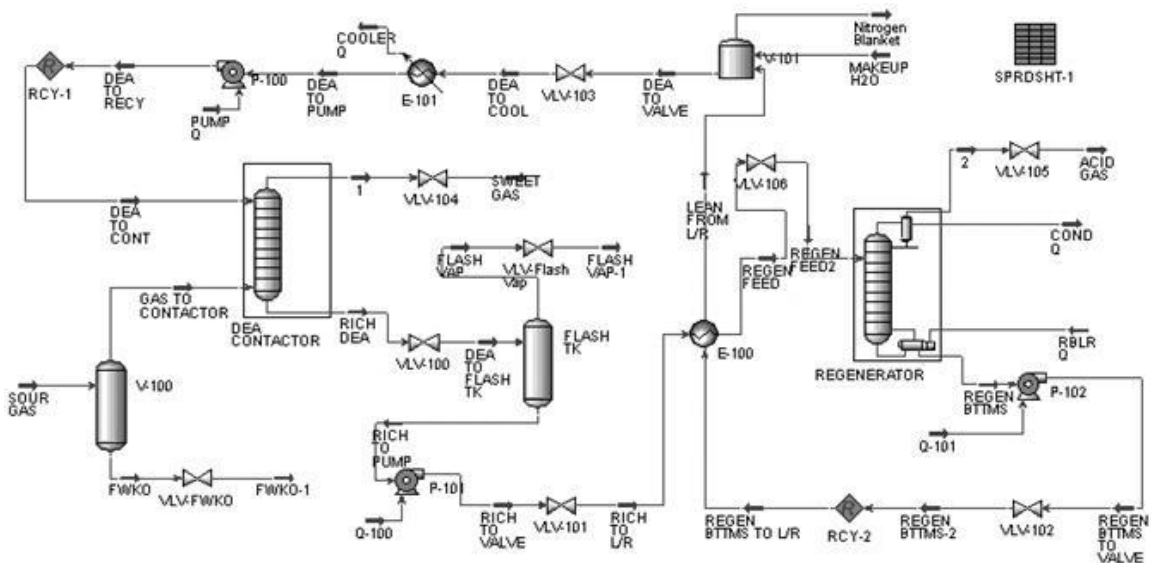


Fig. 3. Simulación del caso base modificado, en estado estacionario

2.3. Simulación en Estado Dinámico

Una vez modificado el caso de simulación en estado estacionario, se pasa al modo dinámico en el simulador. Luego, se procede a correr el integrador, para ello se inicializa el tiempo en cero y se establece un tiempo de finalización. También se selecciona un valor de tiempo por paso de iteración.

El objetivo del presente trabajo es evaluar el comportamiento de la sección de absorción por lo que la unidad considerada en la simulación dinámica, se basa en las corrientes relacionadas a la torre absorbidora (DEA CONTACTOR) y al separador de entrada (V-100).

Las variables que se siguieron en la integración dinámica del simulador son:

- ❖ Flujo molar del gas ácido de entrada.
- ❖ Flujo molar de la corriente de gas dulce.
- ❖ Temperatura de la corriente de gas dulce.
- ❖ Temperatura del gas ácido.
- ❖ Nivel de líquido en el separador de entrada.

2.4. Inserción de una Estrategia de Control

Los siguientes controladores se introducen en la simulación dinámica:

- ❖ Controlador de Nivel
- ❖ Controlador de Flujo

En el caso del controlador de nivel, el mismo fue planteado para mantener seteado el nivel del líquido del separador de entrada. Así, la variable de proceso seleccionada en el simulador es Liquid Percent Level, el controlador seleccionado es de modo automático, acción directa con K_c y T_i iguales a 2.

El controlador de flujo su utilizado para tener un flujo molar constante de gas dulce, en la cabeza de la torre absorbidora. El controlador es de acción reversa, modo automático, $K_c = 0.5$ y $T_i = 0.20$.

3. Resultados y Discusión

3.1. Perfiles de Temperatura de la Absorbedora

A continuación se muestran los perfiles de temperatura en la torre de absorción. El primer caso, Fig. 4, corresponde al estado estacionario, mientras que en el segundo, Fig. 5, en el estado dinámico.

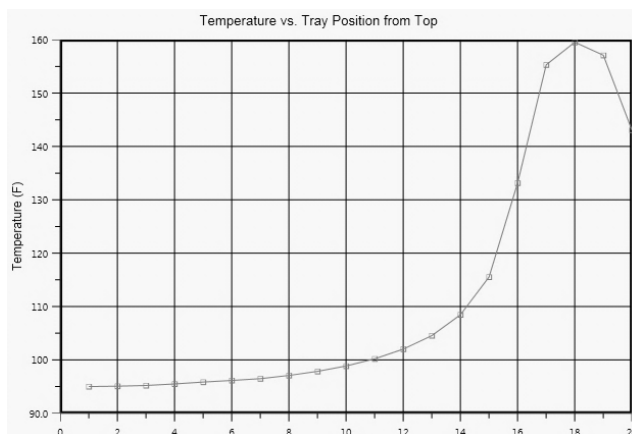


Fig. 4. Perfil de temperatura correspondiente al estado estacionario

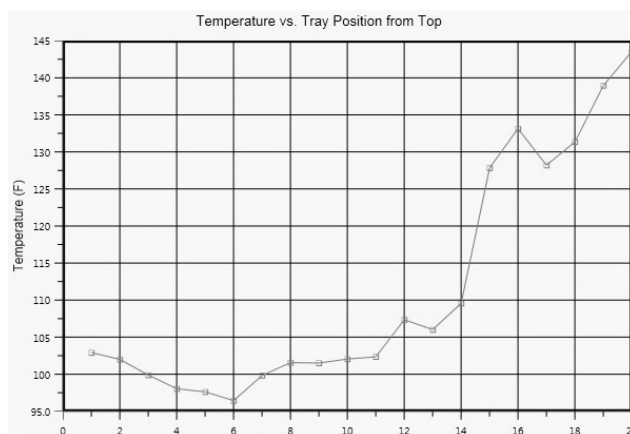


Fig. 5. Perfil de temperatura correspondiente al estado dinámico.

Se observa en ambos perfiles el incremento de temperatura hacia el fondo de la torre. La máxima temperatura está en los platos inferiores de la torre debido a que en ese lugar es por donde ingresa el gas y donde se produce el contacto con mayor intensidad entre los compuestos ácidos y la amina, los cuales reaccionan exotérmicamente.

3.2. Variación Frente al Tiempo

En el *Stripchart* del simulador se monitorean los perfiles de las variables seleccionadas y su evolución en el tiempo.

En la Fig. 6, se observa que los perfiles de temperatura de gas ácido (i) y dulce (ii) no fluctúan en el tiempo, de igual forma se comporta el flujo molar de la corriente de gas ácido de entrada (iii). Por el contrario se observa la marcada variación del flujo molar de gas dulce (iv). En la Fig. 7, se observa que el nivel de líquido en el separador primario cambia drásticamente en función del tiempo.

Claramente, la acumulación de líquido en el separador es la razón por la cual el flujo material por cabeza de torre varía de forma tan considerada.

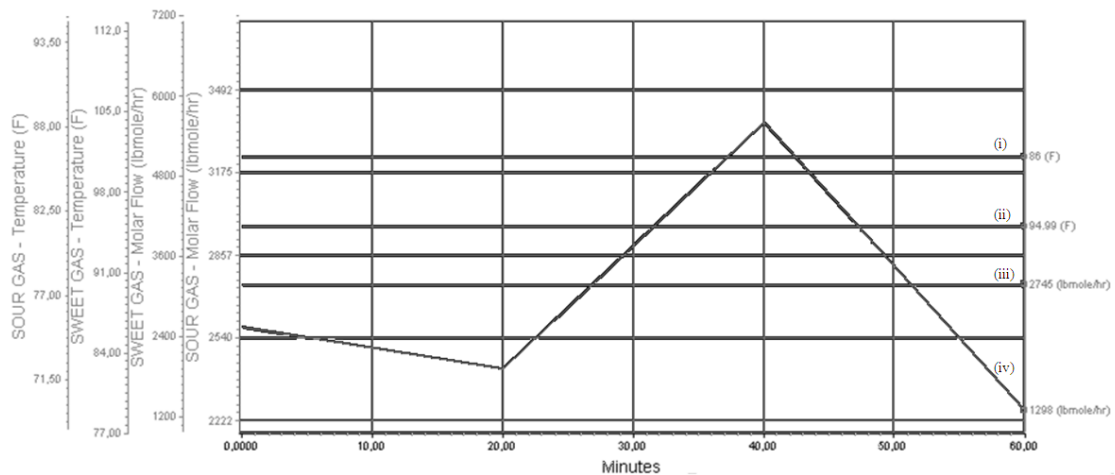


Fig. 6. Evolución del flujo molar y la temperatura de las corrientes de gas ácido y gas dulce

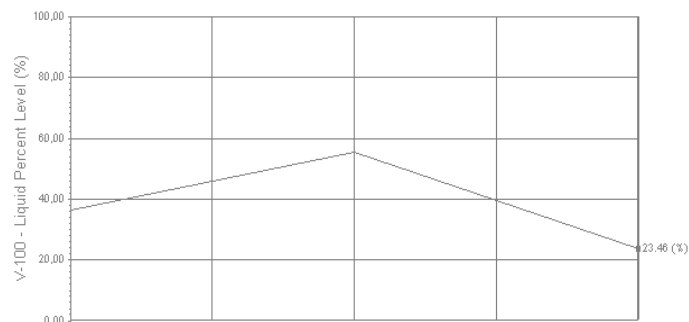


Fig. 7. Evolución del nivel de líquido acumulado en el separador de entrada

4. Conclusiones

Fue posible establecer el estado estacionario completo del proceso de endulzamiento con amina. Sumado a esto, se pudo realizar la simulación dinámica del proceso de endulzamiento y aislar variables de interés para su seguimiento y evolución en el tiempo. En todos los casos se pudo adecuar la corriente gaseosa a las normas establecidas por el Ente Nacional competente.

La simulación dinámica representa un campo de amplio interés dentro de la ingeniería de procesos y es responsabilidad del operador enfocarse en el análisis de un determinado caso de estudio.

Se observa que algunas de las variables representativas fluctúan en el tiempo, de ahí la importancia de establecer acciones de control, que también son posibles simular gracias a estos potentes programas de simulación. Los controladores introducidos sirvieron para establecer un adecuado seteo de variables y lograr mantener sus valores en el lapso de tiempo analizado en cada caso.

Referencias

- Abdulrahman R. K. & Sebastine I. M. (2013). Natural gas sweetening process simulation and optimization: a case study of Khurmala field in Iraqi Kurdistan región. *Journal of Natural Gas Science Eng.* 141 116-120.
- Aspen Technology Inc. (2012). Aspen HYSYS Thermodynamics COM Interface. Version Number: V8.3. . Cambridge, MA: Aspen Technology Inc.
- BEHROOZSARAND, A. & ZAMANIYAN, A. (2011) Multiobjective Optimization Scheme for Industrial Synthesis Gas Sweetening Plant in GTL Process. *Journal of Natural Gas Chemistry*, 20, 99-109.
- Campbell, J. M. & Maddox, R. N. (1974). *Gas Conditioning and Processing*. Campbell Petroleum Series, vol. 121.
- Cohen, León (2003). *Diseño y simulación de procesos químicos*, 2da edición ampliada y modificada. León Cohen Mesonero. España.

- Gutierrez J. P., Benitez L., Ale Ruiz L., Tarifa E. & Erdmann E. (2014) Optimización del Proceso de Endulzamiento de Gas Natural con Aminas. XXVII Congreso Interamericano y Colombiano de Ingeniería Química.
- Erdmann, E., Ale Ruiz, L., Martínez, J., Gutierrez, J. P. & Tarifa, E. (2012) Endulzamiento de gas natural con aminas. Simulación del proceso y análisis de sensibilidad paramétrico. Avances en Ciencias e Ingeniería. 3(4), 89-101.
- Kohl A. L. & Nielsen R. (1997). Gas Purification. Gulf Professional Publishing.
- Perry R. H., Green D. W., Maloney J.O. (1997) Perry's Chemical Engineers' Handbook. 7 th Ed. London; Ed McGraw-Hill.