

Método integral para mejorar el diseño de columnas de destilación, a partir de conceptos de ahorro de energía

Marco Antonio Ponce Guerrero y Daniel Salazar Sotelo
Escuela de Ciencias Químicas, ULSA.
<dsalazar@www.imp.mx>

RESUMEN

Se presenta una metodología para analizar esquemas de destilación y proponer modificaciones que signifiquen ahorros de energía, mediante el uso de curvas de entalpía-temperatura que relacionan la operación simulada con el caso de una operación ideal reversible, tal como lo proponen Dhole y Linhoff.

Se hace una aplicación a una columna de destilación atmosférica de crudo, que presenta un arreglo complejo con pumparounds y extracciones laterales. El resultado de adicionar un pumparound muestra una reducción en los consumos de energía, del orden de 400 millones de BTU/día, comprobando la utilidad de los métodos de análisis de procesos que utilizan la simulación.

Palabras clave: esquemas de destilación, ahorros de energía, curvas de entalpía-temperatura.

ABSTRACT

A methodology for analysis of distillation schemes is presented. Improvements meaning energy savings can be proposed, by using enthalpy-temperature curves relating simulated operations with ideal reversible operations, according to Dhole and Linhoff.

The methodology is applied to an atmospheric distillation column, presenting a complex arrangement with pumparounds and lateral extractions. The results show that by adding a pumparound is possible to save an amount of energy around 400 millions BTU/day, confirming the advantages of analysis methods based on simulation.

Keywords: distillation schemes, energy savings, enthalpy-temperature curves.

INTRODUCCIÓN

Los incrementos de precios de petróleo crudo en el sector petrolero provocan aumentos en los costos de los energéticos y, en general, en los costos de operación de los procesos de transformación industrial. Para abatir estos costos se busca una reducción en el consumo de energía en la industria; esta tendencia se inició a finales de la década de los años setenta, forzando a los investigadores a buscar métodos innovadores para lograr el ahorro y uso eficiente de la energía.

El uso eficiente de la energía ha sido tomado seriamente en nuestro país donde se elaboró un Plan Nacional de Desarrollo 1995-2000, el cual pretende que los bienes y servicios producidos por el sector industrial satisfagan los niveles de calidad exigidos internacionalmente, requiriéndose al mismo tiempo que sean compatibles con los objetivos de preservación y mejoramiento ambiental.

La industria de la refinación

El desarrollo de la industria de la refinación está

intimamente ligado al de la economía en general, debido a la importancia y variedad de productos que genera. En México se cuenta con 6 grandes refinерías que representan una capacidad total de procesamiento de 1.3 millones de barriles por día (BPD) de crudo. PEMEX-Refinación actualmente atraviesa un proceso de modernización para incrementar la calidad de los productos de refinación y mejorar la eficiencia operativa de sus instalaciones.

Una refinерía consta de diferentes plantas que se utilizan para la transformación del petróleo crudo. La primera fase consiste fundamentalmente en el desalado del petróleo crudo, el calentamiento en un horno y su envío a una planta de destilación primaria que opera a presión atmosférica, donde se separa en: gas húmedo, gasolina despuntada, gasolina primaria, nafta pesada, kerosina, gasóleo ligero primario (GOLP), gasóleo pesado primario (GOPP) y residuo primario. El residuo primario se envía a la planta de destilación de alto vacío, donde se separa en: gasóleo ligero de alto

vacio (GOLAV), gasóleo pesado de alto vacío (GOPAV) y residuo de vacío

La planta de destilación combinada es una planta de destilación atmosférica y de destilación al vacío integradas térmicamente (ver Figura 1). Existen dos trenes paralelos de precalentamiento de la carga para intercambiar calor con los productos tanto de la destilación atmosférica como de la de vacío; también se intercambia calor con corrientes de extracción de calor de las torres.

En una refinерía, estas unidades son las que más capacidad tienen y además presentan mayor consumo energético. Es por ello que, para este trabajo, se seleccionó una columna de destilación atmosférica como caso de estudio, para la aplicación de un método de análisis mediante el cual se pueden proponer modificaciones en el esquema de la columna que conlleven un ahorro de energía sin detrimento de la calidad de los productos.

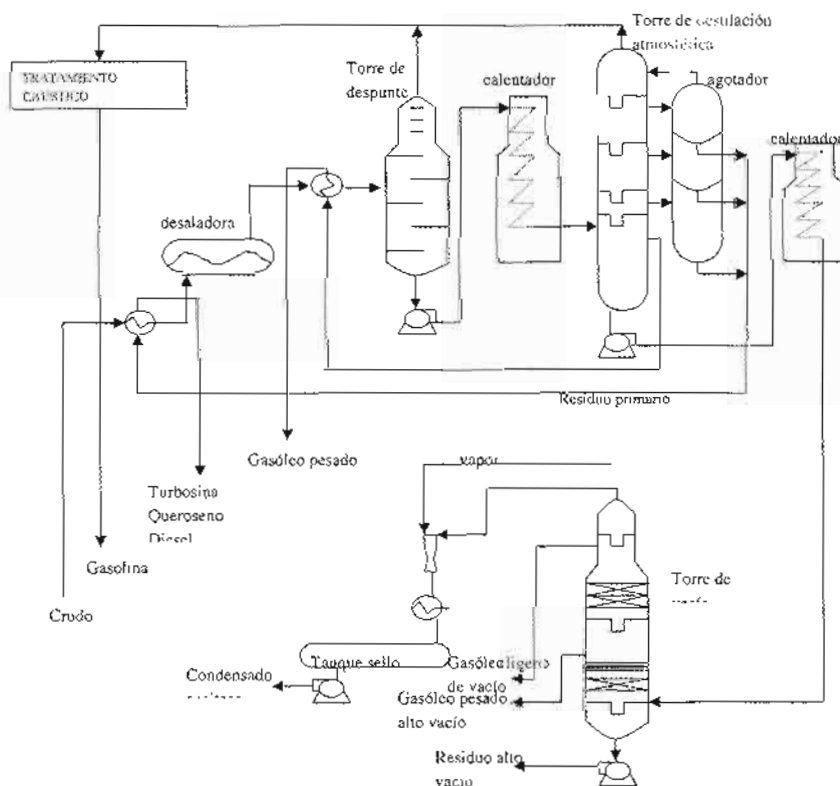


Figura 1. Diagrama simplificado de una unidad de destilación combinada.

METODOLOGÍA

En la década de los ochenta las grandes empresas de ingeniería se abocaron al análisis de procesos en la industria, obteniendo finalmente una técnica útil para el ahorro de energía; esta técnica de integración energética es llamada "Método de punto de pliegue" y es utilizada para el análisis de procesos nuevos (diseño), así como para procesos existentes (rediseños o revamps).

La tecnología de punto de pliegue fue introducida por Linnhoff, y es una técnica de análisis de la integración térmica de un proceso químico, en la que se demuestra que es posible el establecimiento de diseño de procesos de intercambio térmico con un número mínimo de intercambiadores de calor y una mínima área de transferencia de calor.

Con el transcurso del tiempo, la aplicación de la tecnología de punto de pliegue se ha extendido para analizar la integración térmica de un proceso químico completo, incluso un complejo de plantas. Linnhoff y Flower en 1978 propusieron el uso de correlaciones Temperatura-Entalpía e introdujeron la idea de fijar una diferencia de temperatura mínima DT_{min} para un problema dado. En 1979, Linnhoff adicionó el concepto de flujo de calor que cruza el punto de pliegue cuando desarrolló lo que ahora se llaman las reglas de oro de la tecnología de pliegue. Esto fue seguido por la colocación apropiada del concepto de la integración correcta de bombas de calor y columnas de destilación.

Proceso de separación por Destilación

La destilación es el proceso de separación más extensamente usado en la industria química. Es además la operación unitaria que más consume energía comparada con otros procesos de separación. Esto hace a la destilación un objetivo primario para estudios de conservación de la energía.

Normalmente existe solamente un punto de pliegue en el flujo de calor en cascada que existe en las columnas de destilación, y es un punto con exactamente cero de flujo de calor. El calor aceptado en el rehedidor es requerido a una temperatura más alta que la temperatura

del punto de pliegue y el calor cedido en el condensador está por debajo de la temperatura de pliegue. El calor nunca debe de ser transferido a través del Punto de Pliegue.

Liebmann y Dohle aplicaron la tecnología de punto de pliegue a una columna de destilación fijando la mínima condición termodinámica (MTC). Para que una columna opere en la mínima condición termodinámica, es necesario que la curva de equilibrio coincida con la curva de operación, esto se podría lograr manteniendo el mínimo flujo neto de calor en todo el equipo, por medio de la adición de una cantidad de calor dQ_a en cada plato de la sección de agotamiento por medio de un rehedidor parcial y remoción de una cantidad de calor dQ_r en cada plato de la sección de rectificación. La condición ideal de una columna operando en la MTC requiere, por lo tanto, de un número de etapas infinito y condensadores o rehedidores parciales por cada etapa de equilibrio.

De una columna operando en esta condición se puede obtener el perfil de entalpías en función de la temperatura, para comparar los flujos mínimos de calor con los de una torre real. Con el objeto de obtener los flujos mínimos de calor de una torre es necesario conocer los flujos mínimos de vapor y líquido en cada punto y asociarles su entalpía específica toda vez que esta propiedad sólo es función de la temperatura, composición y presión del sistema.

Para obtener la MTC de un sistema multicomponente, es necesario resolver "n" ecuaciones de balances por componente y "n" ecuaciones de equilibrio que son complicadas y requieren de un procedimiento iterativo (donde n es el número de etapas de equilibrio).

Generalmente los métodos propuestos para determinar la condición mínima termodinámica de sistemas multicomponentes son procedimientos tediosos, consumidores de tiempo, y por lo mismo, poco prácticos. Dohle presenta un método para obtener lo que llaman la condición mínima termodinámica práctica (practical near minimum thermodynamic condition o PNMTC), basado en los resultados de una simulación convergida de una columna de destilación, considerando un componente clave pesado y un componente clave ligero.

En el PNMTC, se resuelven simultáneamente las ecuaciones de equilibrio y operación de los componentes clave. Para ello, se incorporan las composiciones de equilibrio de las corrientes líquido y vapor que emergen de la misma etapa en las ecuaciones de balance de materia:

$$V_{\min} \cdot y_L^* - L_{\min} \cdot x_L^* = D_I$$

$$V_{\min} \cdot y_H^* - L_{\min} \cdot x_H^* = D_H$$

Estas ecuaciones establecen el flujo mínimo de vapor (V_{\min}) y el flujo mínimo del líquido (L_{\min}) a la temperatura de la etapa. L corresponde al clave ligero y H al clave pesado. D corresponde al flujo molar de los destilados. Estos flujos, junto con las fracciones al equilibrio, nos generan un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas; las incógnitas son los flujos molares de vapor y de líquido mínimos por cada etapa, y se resuelven mediante métodos numéricos. Los flujos mínimos de calor así obtenidos corresponden a la operación reversible de una columna y sirven como criterio de comparación contra una columna real. La diferencia de valores entre las dos condiciones representan el alcance máximo para mejorar las fuerzas impulsoras dentro de la columna.

Para obtener la representación temperatura – Entalpía para PNMTC, es necesario expresar los flujos de líquido y vapor mínimos en función de entalpías. La simulación de la columna proporciona resultados etapa por etapa de los valores de entalpía de líquido y de vapor.

Como se mencionó anteriormente, el vapor y las corrientes líquidas emergen desde la misma etapa donde está en equilibrio una con otra. Las entalpías para los flujos de líquido y vapor mínimos se obtienen mediante la proporcionalidad molar directa:

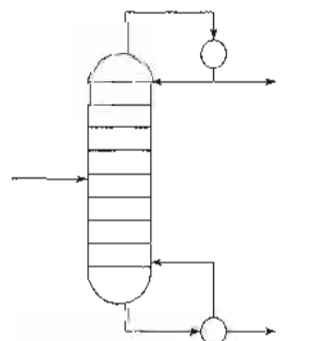
$$H_{V_{\min}} = H_V^* \left(\frac{V_{\min}}{V^*} \right)$$

$$H_{L_{\min}} = H_L^* \left(\frac{L_{\min}}{L^*} \right)$$

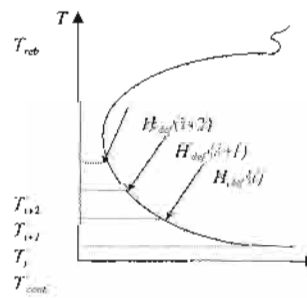
donde: * significa que están al equilibrio.
 L hace referencia a la etapa líquida.
 V hace referencia a la etapa de vapor.

Al calcular los déficits de entalpía para cada plato de la columna real y graficarlos en un diagrama de temperatura entalpía, se obtiene la Gran Curva Compuesta (GCC) de la columna. A partir de la información obtenida de los déficits de entalpía, se obtienen las curvas compuestas fría y caliente, que representan las fuerzas impulsoras de transferencia de masa y calor entre las etapas. (Ver Figura 2).

De acuerdo a Dhole el área dentro de la Gran Curva Compuesta representa las fuerzas impulsoras de transferencia de materia y de calor dentro de la columna, mientras que las curvas compuestas fría y caliente proyectan estas fuerzas impulsoras entre las curvas líquido y vapor.

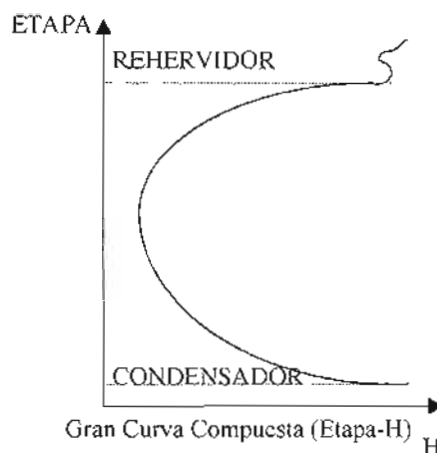
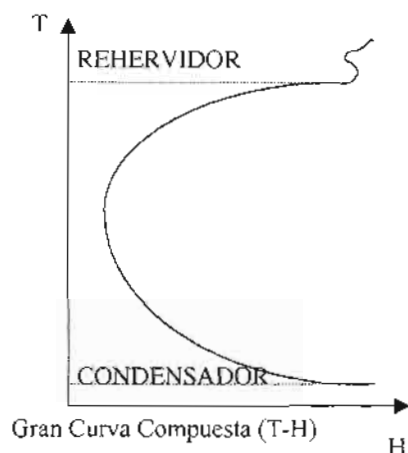


Datos de la columna real y de la condición mínima (asintótica) (PNMTC).



Construcción de la gran curva compuesta GCC de la columna.

Figura 2. Diagramas de la Gran Curva Compuesta (GCC) para una columna de destilación.



Las modificaciones posibles en el diseño de una columna de destilación para reducir los consumos de servicios auxiliares, como pueden ser cambios en la presión de operación, en la relación de reflujo, la adición de cambiadores de calor o bien de "pumparounds" (corrientes de recirculación), puede ser analizada con la construcción de las curvas compuestas, donde se verán fácilmente los niveles en la columna que requieren modificaciones y el efecto de las mismas sobre el balance de calor global. La metodología aplicada se puede resumir en los siguientes pasos:

- Simulación rigurosa de la columna de destilación, obteniendo perfiles de temperatura, presión, flujo y entalpías, así como las composiciones de líquido y vapor en cada una de las etapas de equilibrio.
- Obtención del flujo mínimo de vapor y líquido con su Entalpía específica asociada; elaborando un balance de materia en la columna de destilación para obtener el factor de separación, el factor de enriquecimiento, el flujo del destilado, el flujo del producto y obtener así los flujos mínimos requeridos para las secciones de rectificación y agotamiento.
- Elaboración de la gráfica del número de platos reales contra el flujo de vapor real, ideal y mínimo.
- Obtención de la gran curva compuesta (diagrama entalpía-temperatura), y sus respectivas curvas caliente y fría.
- Proposición de nuevos casos de arreglos de la columna de destilación.
- Determinación de los costos de inversión por

concepto de las modificaciones y la disminución de los costos de operación de la columna, debido al ahorro de energía.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para este estudio se tomó como ejemplo la planta combinada de la refinería de Tula, en particular la columna atmosférica que tiene una capacidad de 150,000 BPD y que consta de 34 platos teóricos, tal como se muestra en la Figura 3.

El crudo desalado llega a las torres de despunte D01A y D01B, donde se realiza la primera separación, obteniendo nafta de despunte en el domo, la cual se manda a tratamiento cáustico, y crudo despuntado en el fondo. Por la parte superior de las torres de despunte se alimenta un reflujo de nafta ligera, con objeto de recuperar la nafta y fracciones más pesadas que van en el vapor de la alimentación de la torre de despunte.

El crudo se manda a un horno donde se calienta hasta 370°C. En la columna de destilación primaria se alimenta el crudo calentado y vapor de agua, para disminuir la presión parcial de los hidrocarburos y mantener la temperatura y presión adecuadas en la zona de vaporización de la torre, así como para contribuir como agente de arrastre de los productos ligeros. Se obtienen diversos cortes como son los incondensables, las naftas ligeras y pesadas, la kerosina, el GOLP, el GOPP y el residuo primario a diferentes presiones y temperaturas.

La columna en su diseño original tiene tres agotadores laterales que salen de los platos 35, 39 y 43; estos agotadores se identifican como D03A, D03B y D03C obteniendo Nafta pesada, Querosina y GOLP como productos.

La torre de destilación primaria también tiene dos pumparounds que salen del plato 17 y del plato 27, cuyo objetivo es aumentar la transfe-

rencia de masa entre estos platos aumentando la eficacia en la separación.

Al aplicar la metodología y construir la Gran Curva Compuesta (ver Figura núm. 4) , se observa que en los platos 31 a 33 existe un cambio abrupto en el consumo de energía, siendo que en estos puntos se genera energía que puede ser aprovechada.

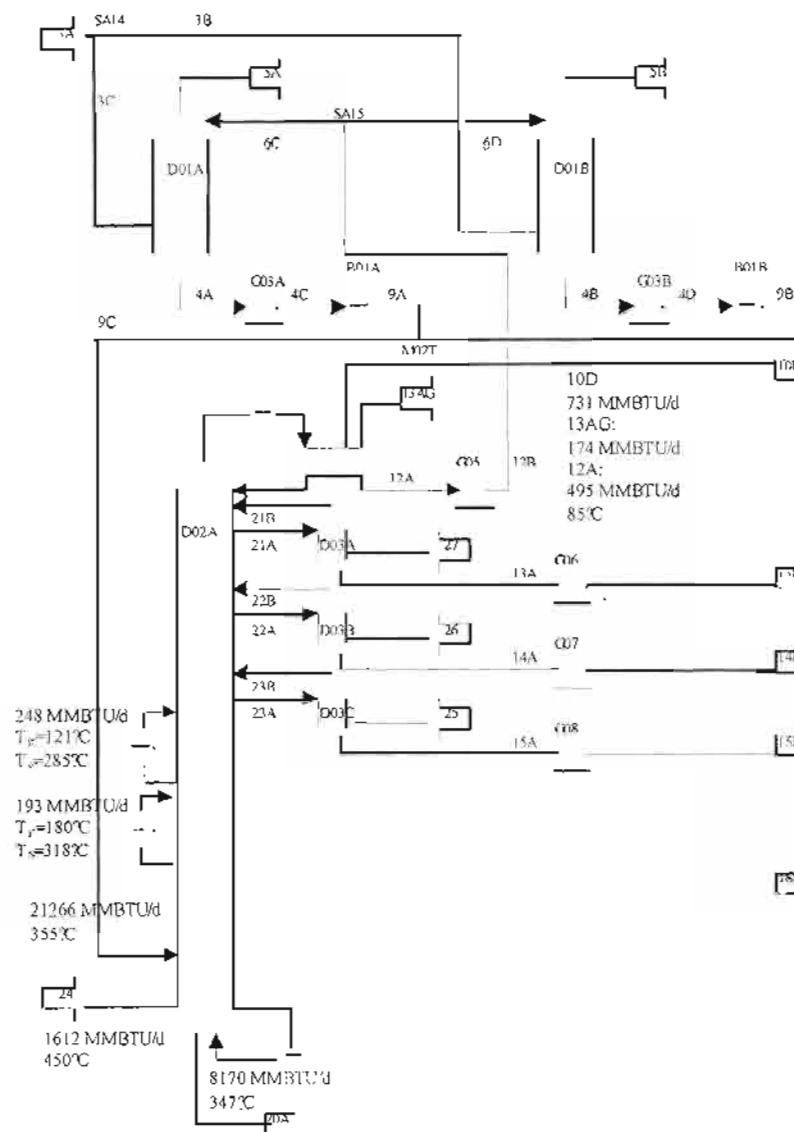


Figura 3. Diagrama de la columna tomada como caso de estudio.

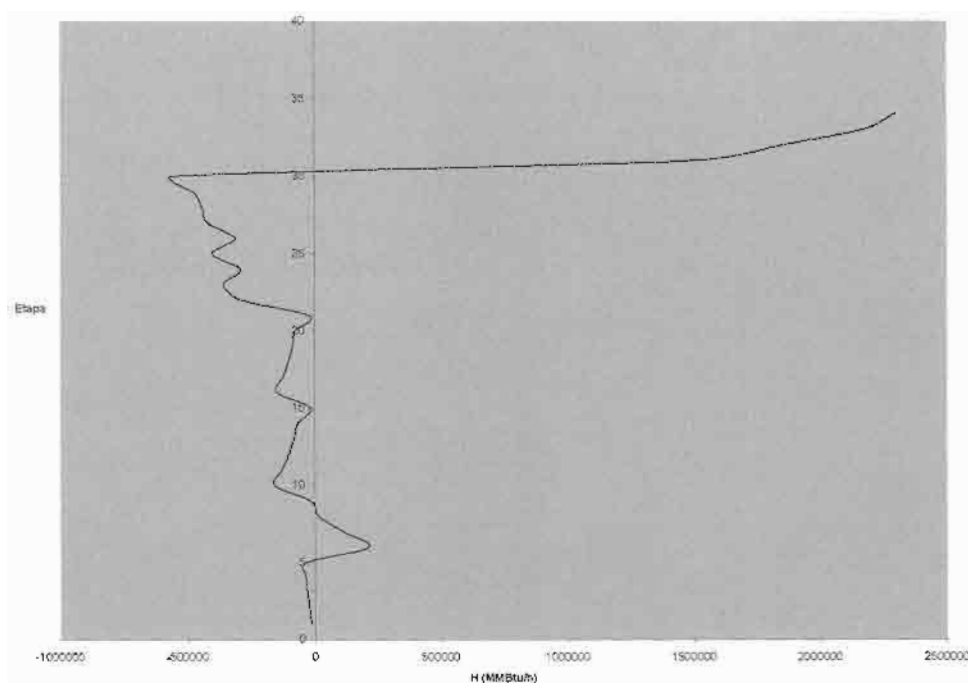


Figura 4. Gran Curva Compuesta para la condición de diseño de la columna

En esta Figura 4, se observa la existencia de 2 puntos de pliegue por arriba de la alimentación (platos 15 y 21) que no pueden ser modificados debido a que son alimentación a los agotadores laterales; y un cruce del punto de pliegue (plato 31) en la alimentación donde la entalpía de vapor es menor a la de líquido debido a que la temperatura de alimentación es mucho mayor a la generada en el rehervidor.

Con estas observaciones se decidió generar y simular una nueva alternativa como se menciona a continuación:

Tratando de aplicar el método de punto de pliegue, se encontró que no existe posibilidad para modificar la relación de reflujo, ya que al hacerlo cambian significativamente las propiedades y los rendimientos de los productos.

Modificar el precalentamiento, para extraer calor de la alimentación obliga a incrementar la cantidad de vapor de agotamiento para obtener una buena separación.

Si se incorpora un tren de intercambio de calor, a manera de condensador parcial, se

cambian fuertemente las propiedades de los productos destilados.

Finalmente se optó por agregar un pumparound; (ver Figura 5) esta corriente de recirculación se agregó del plato 28 al 30, extrayendo un flujo de la corriente líquida y pasándolo a una etapa superior, donde existe una temperatura menor, recuperando calor y bajando considerablemente el deficit de entalpía en los platos inferiores a ésta.

Con esta modificación obtuvimos un deficit de entalpía en las etapas donde se hizo la modificación de un orden de 3400 MMBTU/día, comparado con el diseño original que tiene una entalpía de orden de 3800 MMBTU/día, es decir, un ahorro de energía de 400 MMBTU/día, sin detrimento de la calidad y cantidad de los productos destilados.

Con estos cambios se demuestra el potencial del método para estudiar modificaciones a columnas de destilación que bajan considerablemente el consumo de energía, que puede aprovecharse en otros procesos, significando un incremento en la rentabilidad de las instalaciones.

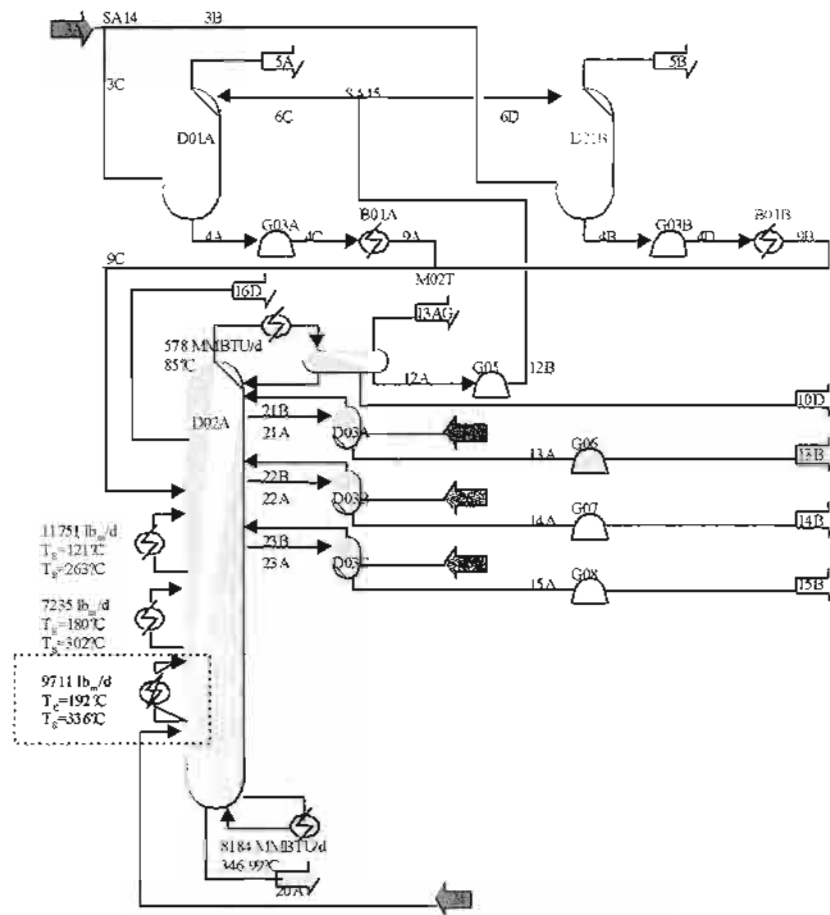


Figura 5. Esquema modificado de la Columna

BIBLIOGRAFIA

- (1) Liebmann K., Dohle R., "Integrated Crude Distillation Design", *Computers Chem. Engng.*, vol. 19, pp. S119-S124, 1995.
- (2) Linhoff B., "Heat Integration of Distillation Columns into Overall Processes", *Chemical engineering Science*, vol. 38, núm. 8, pp. 1175-1188, 1983.
- (3) Linhoff B., "Pinch Analysis – A State of the Art Overview", Document of University of Manchester Institute of Science & technology. 503-522.
- (4) Chavez I., "Ahorro de Energía en columnas de destilación aplicando la Metodología de Punto de Pliegue", XXXV Convención Nal. del IMIQ, Morelia, Mich.
- (5) Dhole V. R., "Distillation Column Targets", *Computers Chem. Engng.*, vol. 17, núm. 5/6, pp. 549-560, 1993.
- (6) Linhoff B., "General Process improvements through Pinch Technology", *Chemical engineering progress*, pp 51-58, junio, 1998.
- (7) Linhoff B., "Pinch Technology has come of Age", *Chemical engineering progress*, pp. 34-40, julio, 1984.
- (8) Fonyó Z., Thermodynamic Analysis Rectification I. Reversible Model of rectification". *International chemical engineering*, vol. 14, núm. 1, pp. 18-27, enero, 1974.
- (9) Fonyó Z., "Thermodynamic Analysis Rectification II. Finite ascade Models", *International chemical engineering*, vol. 14, núm. 2, pp. 203-210, abril, 1974.
- (10) Trivedi K. K., "Optimize a Licensor's Design using Pinch Technology", *Hydrocarbon processing*, pp. 113-126, mayo, 1996.