Vol. V, No. 2, mayo - agosto, 2014, pp. 53 - 60

Evaluación de alternativas de alimentación en una refinería de petróleo usando un simulador de procesos

Anelys Armengol Gálvez
Correo electrónico:anely@ceinpet.cupet.cu
Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, Cuba

Rafael Franco Rico
Correo electrónico:rfrancorico@yahoo.es
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba

Ricardo Abeledo Rodríguez
Correo electrónico:abeledo@ceinpet.cupet.cu
Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, Cuba

Laura Pupo Pérez
Correo electrónico:laura@ceinpet.cupet.cu
Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, Cuba

Artículo Original

Resumen
Una refinería procesa un crudo mediano que solo le permite operar 80 días al año debido a la declinación de los pozos que la abastecen. Con vistas a garantizar una mejor explotación de la capacidad instalada se propone el análisis de alternativas de inyecto en base a la disponibilidad de materias primas en otras regiones del país, las cuales al ser más pesadas y viscosas exigen de dilución. Aprovechando la ubicación geográfica y la demanda se visualiza el enfoque hacia la conveniencia de la obtención de asfalto y de una fracción amplia con uso en los yacimientos petrolíferos para reducir viscosidad; por lo que resulta atractivo valorar las posibilidades mediante el empleo del modelo de simulación obtenido previamente con el uso del simulador profesional HYSYS (versión 2.2), complementando la información para validar resultados con una corrida de prueba con una de las alternativas propuestas (crudo pesado diluido con solventes del crudo habitual) confirmatoria de la conveniencia de la opción escogida y asociada con atractivos beneficios económicos.

Palabras claves: petróleo, destilación, simulación, refinación, evaluación

Recibido: 22 de mayo del 2014 Aprobado: 8 de julio del 2014

INTRODUCCIÓN

Baja capacidad de inyecto, ausencia de procesos secundarios y una ubicación relativamente cercana a una refinería en fase de expansión constituyen rasgos de una industria cuyo fundamental sostén se asocia con el procesamiento de un crudo mediano con propiedades que permiten la producción de aceite de uso en la industria eléctrica; sin embargo, el gradual agotamiento en la disponibilidad del citado petróleo, unido a especificaciones del mercado basadas en la existencia de otras materias primas adecuadas para la producción de asfaltos [1] (con calidad superior a la producida en otras instalaciones del país) y una fracción corte amplio idónea para utilizar en calidad de diluente reductor de viscosidad en crudos pesados (en lugar de nafta) permiten visualizar un escenario de mayores beneficios.

Analizar dicho escenario a partir del conocimiento de propiedades físicas y químicas de los materiales involucrados y de los aspectos tecnológicos característicos de dicha industria, mediante el uso del modelo obtenido en el simulador HYSYS, permitirá esclarecer interrogantes y orientar políticas que concedan vigencia socio-económica a la industria de referencia en el presente estudio.

El objetivo del presente trabajo es proponer alternativas de inyecto a dicha refinería que garanticen su producción estable durante 250 días al año, a partir de experiencias análogas en otras instalaciones [2-4].

MATERIALES Y MÉTODOS

Se definen posibles inyectos a procesar en la refinería, lo que arroja la disponibilidad de emplear: un crudo pesado nacional (M1) y el fondo de torre atmosférica (M2) de una refinería cercana que no presenta torre de destilación al vacío. Se determinan las propiedades físico - químicas y distribución de productos a nivel de laboratorio, se comparan con el crudo tradicionalmente procesado en la refinería y se considera conveniente la dilución de dichas materias primas con el fin de evitar perjuicio en la instalación. El criterio propuesto persigue lograr un inyecto de características similares al usualmente utilizado para garantizar los parámetros operacionales en tuberías y equipos. En el caso del crudo pesado también para recuperar las fracciones ligeras que, aunque representan una pequeña cantidad, pueden sobrecargar la torre de destilación al vacío (T-201) y en el de M2 para que pueda funcionar la torre atmosférica.

Para la dilución existe disponibilidad de mezcla queroseno-diésel (S1) y nafta (S2) obtenidas de la destilación del crudo habitual para ser empleados como solventes con el objetivo de mejorar las alternativas de inyecto. Dichos solventes se recirculan en el proceso.

Mediante el empleo de técnicas de optimización se determinan las proporciones de mezclas necesarias [5,6], a partir de las materias primas disponibles (M1, M2, S1 y S2), para lograr alternativas de inyecto con rendimientos de productos de torre atmosférica similares a los del crudo referente, así como de propiedades físico-químicas para que opere adecuadamente.

Se toma como función objetivo minimizar la sumatoria de los errores relativos entre las distribución de productos obtenidos y la de las mezclas planteadas, como se muestra en la ecuación (1).

$$FO = MIN\left[\sum_{i=1}^{n} Er_i\right] \quad (1)$$

donde:

FO: Función objetivo.

Er: Error relativo.

En función de la cantidad de posibles inyectos y de solventes se analizan 11 mezclas de las que se excluyen las mezclas M2+M1 y S1+S2 por carecer de sentido práctico.

Se plantea el balance global de materiales como se muestra en la ecuación (2).

$$m_{(M1)} \cdot k_{M1} + m_{(M2)} \cdot k_{M2} + m_{(S1)} \cdot k_{S1} + m_{(S2)} \cdot k_{S2} = m_{total} \quad (2)$$

donde:

m: Masa (kg).

k: Variable binaria (1- Se emplea en la mezcla, 0- no se emplea en la mezcla).

Se calcula la fracción másica (w) de cada producto en la mezcla como se aprecia en la ecuación (3).

$$w_i = \frac{m_{(M1)} \cdot w_{(M1)i} \cdot k_{M1} + m_{(M2)} \cdot w_{(M2)i} \cdot k_c + m_{(S1)} \cdot w_{(S1)i} \cdot k_{S1} + m_{(S2)} \cdot w_{(S2)i} \cdot k_{S2}}{m_{total}} \quad (3)$$

Siendo *i* representativa de cada producto.

Posteriormente se calculan los errores relativos con respecto al crudo habitual, ecuación (4).

$$Er_i = \frac{\left|w_{(P)i} \cdot w_i\right|}{w_{(P)i}} \quad (4)$$

La metodología de cálculo se programa en Microsoft Excel 2007 y mediante la herramienta Solver de Excel se realiza la optimización.

Las tres mejores alternativas de mezclas se realizan y analizan en el laboratorio para la determinación de sus propiedades físico-químicas y temperatura de ebullición verdadera (TBP), y se comparan estadísticamente con las del crudo de referencia para la validación del procedimiento de optimización.

Una vez logrado lo anterior, se predice el comportamiento de la instalación frente a las alternativas de inyecto seleccionadas, mediante el uso del modelo de simulación de la refinería obtenido en un trabajo previo usando el simulador profesional HYSYS (versión 2.2) [7-9]. Posteriormente se realiza una corrida de prueba con la mezcla M1+S1+S2, pues se careció de M2. Los resultados obtenidos se comparan con los medidos en la corrida de prueba para la validación de las predicciones del modelo de simulación para esta mezcla.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dada la complejidad de la destilación por el amplio número de componentes que conforman el petróleo y las características tecnológicas que tipifican el proceso resulta engorrosa la predicción del comportamiento de la planta ante variaciones en la materia prima, siendo la razón principal por la que se recurre a la optimización y al uso del modelo de simulación obtenido mediante el empleo del simulador HYSYS como herramientas oportunas para la toma de decisiones.

Alternativas de inyecto

En el laboratorio se determinan las principales propiedades físico-químicas de los posibles inyectos (M1 y M2) y se comparan sus curvas de temperatura de ebullición verdadera (TBP) y los rendimientos teóricos con el crudo a comparar (figura 1).

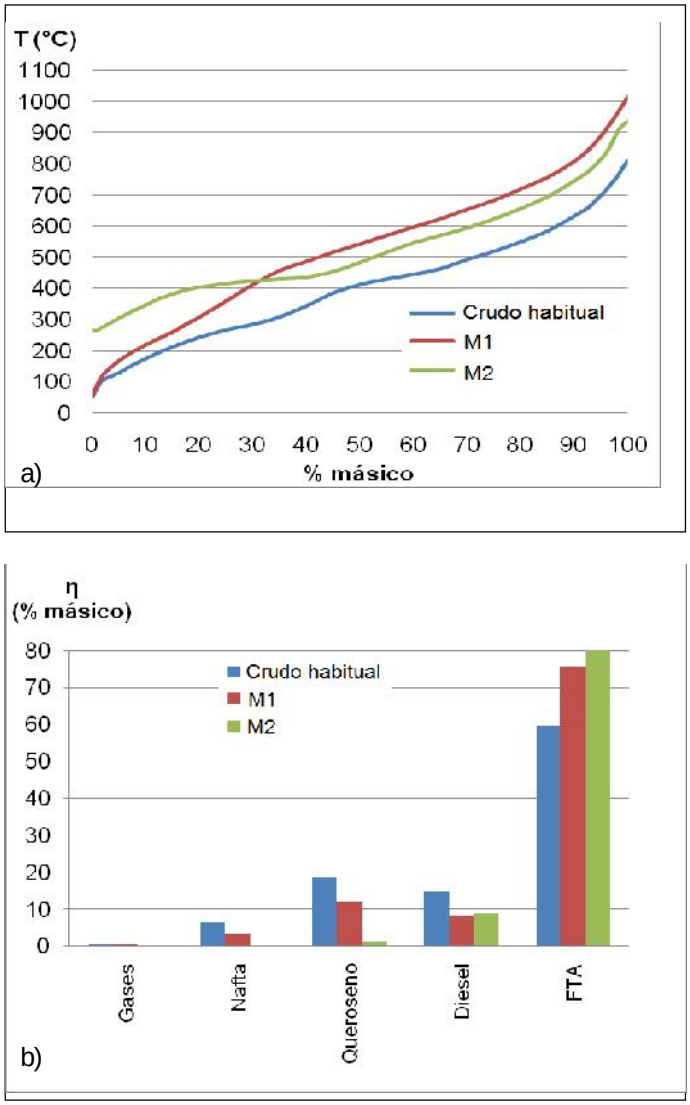


Fig. 1. Comparación de los posibles inyectos con la del crudo habitual

Las posibles alimentaciones poseen bajos rendimientos de destilados en la torre atmosférica (T-101) en relación con los obtenidos a partir del crudo habitual lo que conlleva a problemas de operación en la T-101 tales como: solapamiento entre los cortes e insuficiente nafta para generar el reflujo adecuado en el tope que traería consigo sequedad en la torre o aumento de la temperatura del tope obteniéndose cortes fuera de especificación.

A razón de que las propiedades físico-químicas así como la distribución de productos de M1 y del M2 difieren del crudo tradicionalmente procesado en la refinería en estudio y debido a que no existen criterios tecnológicos establecidos para tomar una decisión en cuanto a la capacidad de asimilación de los mismos, sin perjuicio de la instalación, se considera conveniente efectuar la dilución de dichos crudos. El criterio propuesto persigue lograr un inyecto de características similares al usualmente utilizado para garantizar los parámetros operacionales en tuberías y equipos. En el caso del M1 también para recuperar las fracciones ligeras que, aunque representan una pequeña cantidad, pueden sobrecargar la torre de destilación al vacío y en el de M2 para que pueda funcionar la torre atmosférica.

Determinación de la mezcla óptima para inyecto

A partir de los inyectos disponibles y de solventes existentes en la planta (mezclas queroseno - diésel (S1) y nafta (S2)) se proponen realizar mezclas que sirvan como inyecto a la refinería mediante la ejecución de un algoritmo de optimización que tiene como objetivo minimizar las diferencias entre las mezclas obtenidas y el crudo habitual. En la tabla 1 se muestran las alternativas más viables.

Tabla 1
Composición delas mezclas más viables

N°	Mezcla	Fracción másica			
		M1	M2	S1	S2
1	M1+S1+S2	0,652	-	0,323	0,025
2	M2+S1+S2	-	0,637	0,306	0,057
3	M1+M2+S1+S2	0,436	0,257	0,271	0,036

La mezcla M1+M2+S1+S2 es la óptima y también pueden considerarse las mezclas M2+S1+S2 y M1+S1+S2 que resultan válidas para las situaciones en que no se disponga de alguno de los inyectos. Por otro lado resulta prohibitivo prescindir de uno de los solventes ya que no se logra un adecuado balance de productos.

Del análisis de laboratorio se tiene que las densidades de las mezclas son, en todos los casos superiores a la del crudo habitual aunque no divergen más del 2,43 %. Esta ligera desviación puede deberse a la ausencia de gases disueltos, a la presencia de cantidades importantes de asfáltenos en M1 y M2 y a la diferente naturaleza química de estos en relación con el crudo de referencia. La naturaleza de los inyectos también genera desviaciones en las curvas de destilación, sobre todo en la zona de temperaturas de ebullición superiores a 400 °C (figura 2). Esto se debe a que la metodología seguida para confeccionar las mezclas persigue lograr un adecuado funcionamiento de la torre atmosférica y por otra parte los cortes correspondientes a vacío muestran las características propias del crudo empleado ya que los solventes utilizados no presentan componentes en este intervalo de temperaturas de ebullición. No obstante un análisis estadístico muestra que no existen diferencias significativas entre las curvas de destilación obtenidas y la del crudo para 95 % de confianza.

Como las propiedades físico-químicas de las mezclas realizadas en el laboratorio se asemejan a las del crudo base se decide implementarlas en el modelo de simulación obtenido. Se introduce en cada caso los datos en el ambiente de petróleo y se corre el modelo de simulación con el nuevo inyecto manteniendo constante los parámetros operacionales del sistema. Se comparan las propiedades físico-químicas

fundamentales de los productos obtenidos en la torre atmosférica en el modelo de simulación operando con las mezclas y los que se obtienen en operación normal, entre las que se encuentra la densidad (figura 3).

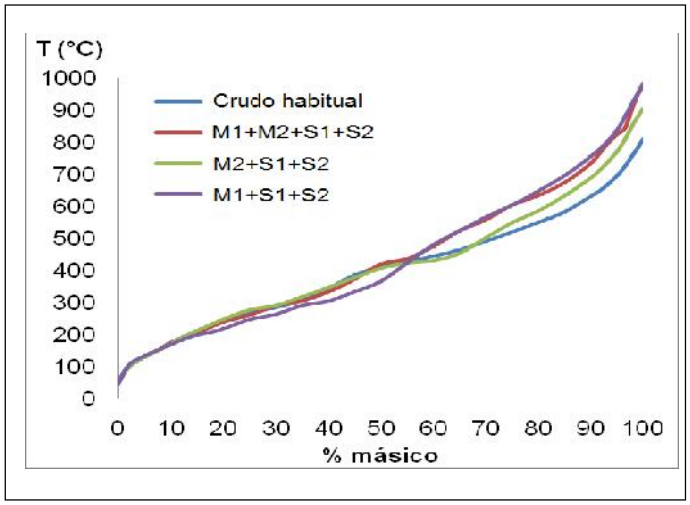


Fig. 2. Comparación de las TBP de posibles inyectos con la del crudo base (laboratorio). Simulación de la instalación con las mezclas propuestas para inyecto

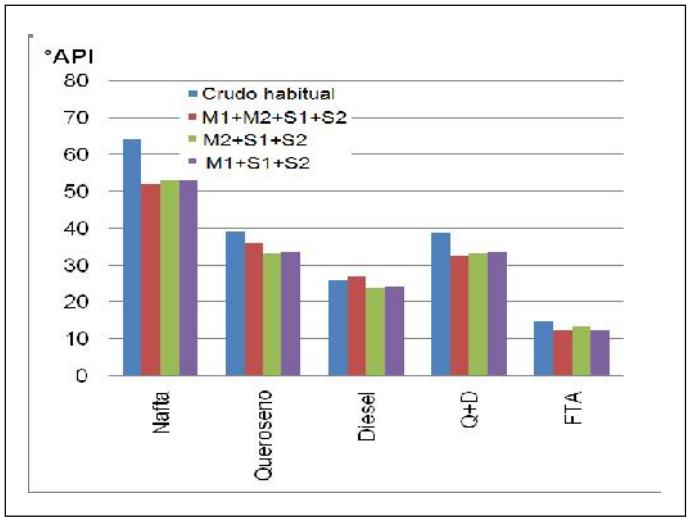


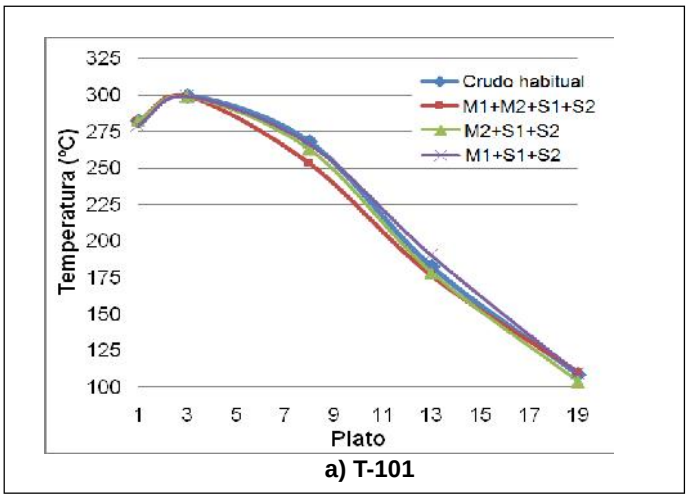
Fig. 3. °API de los productos de destilación atmosférica simulados

Las mezclas poseen cantidades similares de productos de torre atmosférica. Sus productos presentan densidad y curvas de destilación semejantes. No obstante, se observa diferencia en la densidad de los cortes de nafta que puede estar asociado a la ausencia de gases disueltos en las mezclas, que provoca además que a la salida del horno exista una mayor cantidad de componentes pesados en fase vapor, los cuales son arrastrados hacia el tope de la torre y aumentan la densidad de las fracciones ligeras, incrementando el solapamiento entre los cortes. Esta problemática se hace evidente en la reducción del flujo de diésel. También se observa que para el procesamiento de las mezclas se requiere un aumento del reflujo externo necesario para garantizar el mantenimiento de la temperatura en el tope de la torre.

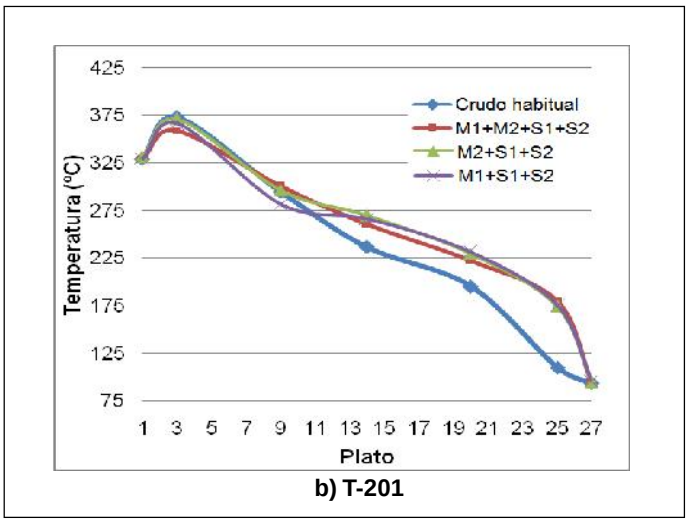
La mezcla Q+D que se obtiene no muestra diferencias significativas con respecto al S1 empleado, pudiéndose emplear nuevamente. Por su parte la nafta que se obtiene en todos los casos resulta más pesada y puede, al cabo de varios ciclos de empleo, comenzar a diferir significativamente del S2 y afectar la operación de la torre. Como solución paliativa se puede plantear su dilución con pequeñas cantidades de nafta para llevarla a las condiciones iniciales.

Comparación de los perfiles de temperatura respecto al caso base

En la figura 4 se muestra el perfil de temperatura de las torres utilizando las mezclas y el crudo base. El de T-101 muestra un comportamiento muy similar en todos los casos debido a que los inyectos empleados presentan distribución teórica de productos de torre atmosférica similar. En la T-201 el perfil de las mezclas difiere del crudo habitual en los platos intermedios, pues se toma como estrategia de simulación el mantenimiento de las temperaturas de tope, fondo y zona de vaporización instantánea. Esto es debido a que las mezclas presentan diferente naturaleza química y por tanto se obtienen otras distribuciones de productos, sobre todo en lo que respecta al fondo de torre de vacío.



a) T-101



b) T-201

Fig. 4. Perfil de temperatura obtenido del modelo de simulación

Operación del banco de intercambio de calor con las alternativas de inyecto

Cuando se procesan las mezclas el crudo sale más caliente del banco de intercambio que cuando utiliza crudo habitual debido a que estos tienen mayor rendimiento de fondo de torre de vacío, producto de mayor temperatura y capacidad calorífica, así como por el aumento de la producción de queroseno, el incremento del solapamiento con el corte de diesel en T-101 y del reflujo de tope en T-201. El empleo de las mezclas permite un ahorro de combustible en el horno que le precede a la torre atmosférica lo que resulta positivo desde el punto de vista económico (tabla 2).

Tabla 2
Ahorro de combustible en el horno F-101 utilizando las alternativas de inyecto

Respecto al crudo habitual	M1+M2+S1+S2	M2+S1+S2	M1+S1+S2
Ahorro de combustible (kg/h)	45,93	64,46	11,36
Porcentaje del combustible empleado (%)	14,0	19,8	3,5

Análisis de una corrida de prueba empleando como inyecto M1+S1+S2

En el tiempo disponible para la realización del trabajo se decide para corroborar la validez de las predicciones del modelo de simulación utilizar la mezcla M1+S1+S2 en las proporciones antes planteadas. Se procede a realizar la corrida de prueba, a continuación se muestran los resultados predichos y los obtenidos en la planta.

Se comparan los flujos obtenidos en la corrida de prueba con los del modelo de simulación (tabla 3). Los resultados son cercanos a la simulación, reportándose los mayores errores en aquellas corrientes cuyos flujos son menores.

Tabla 3
Flujos de productos medidos en la corrida y obtenidos por simulación

Productos	Flujo volumétrico (m^3/h)		Er (%)
	Real	Simulado	
Crudo inyecto	26,09		-
Columna de destilación atmosférica			
Nafta	1,08	1,18	9,26
Queroseso+Diésel	8,87	9,43	6,31
Columna de destilación al vacío			
Productos laterales (R3+R2)	2,93	2,68	8,53
Fondo de torre de vacío	11,69	10,87	7,01

Estas desviaciones pueden estar dadas por la unión de los errores en el mezclado a la hora de obtener el inyecto, los errores de medición de caudales en los tanques así como las desviaciones propias del modelo de simulación. No obstante se considera que el modelo obtenido predice de forma adecuada la operación del sistema, teniendo en cuenta la complejidad del mismo y las consideraciones para su confección.

La figura 5 muestra los resultados de los °API de los productos simulados respecto a los obtenidos en la corrida de prueba. El error relativo con relación a la densidad para todos los productos es inferior a 2,5 % con excepción del fondo de torre de vacío (FTV) que es 3,4 %.

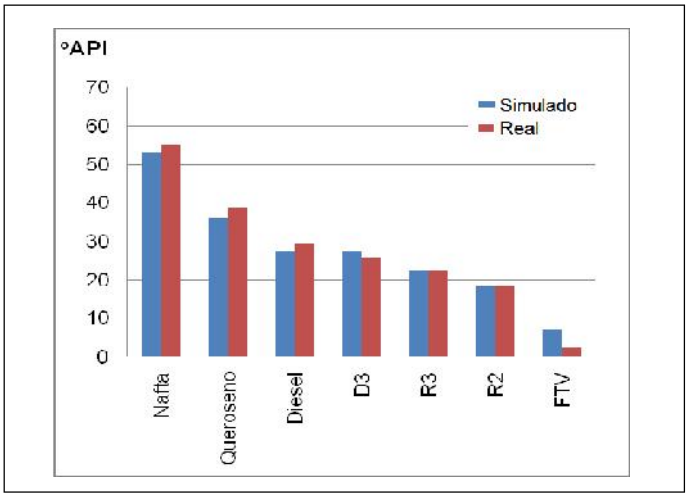


Fig. 5. Comparación de los °API de los productos de los cortes reales con los simulados

Las curvas de destilación de nafta, queroseno, diésel, fondo de torre atmosférica (FTA), R3 y R2 se muestran de la figuras 6-11 respectivamente. El análisis estadístico realizado a los productos demuestra que no existen diferencias significativas para 95 % de confianza entre las curvas de destilación de los productos simulados y las obtenidas en la planta. Para este análisis se utiliza el programa Statgraphics Plus Versión 5.1.

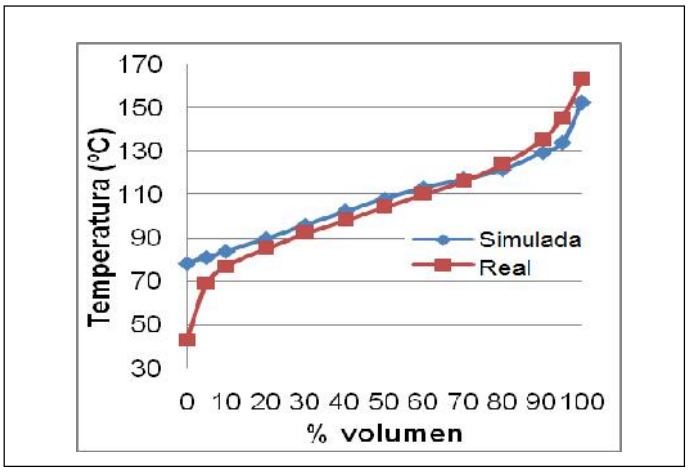


Fig. 6. Comparación de las curvas de destilación de nafta

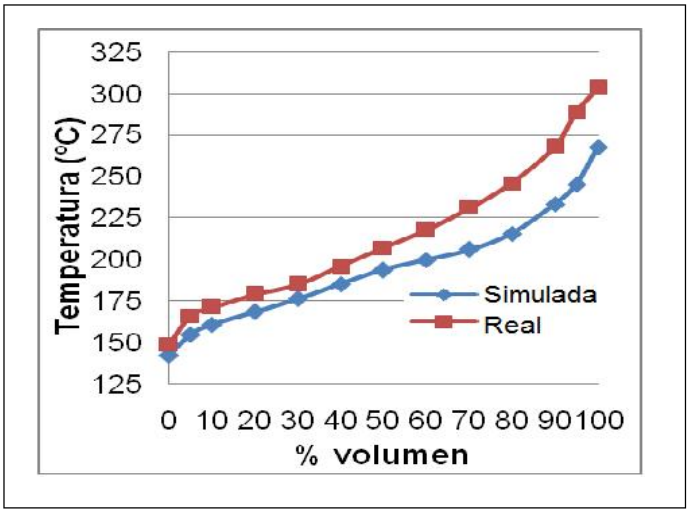


Fig. 7. Comparación de las curvas de destilación de queroseno

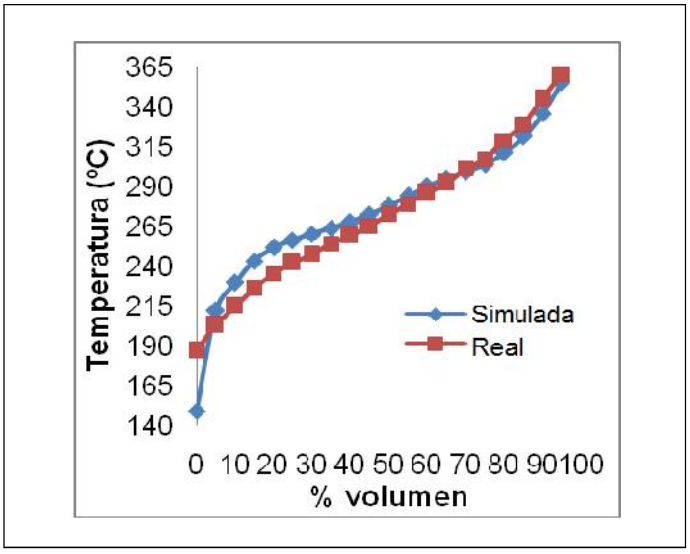


Fig. 8. Comparación de las curvas de destilación de diésel

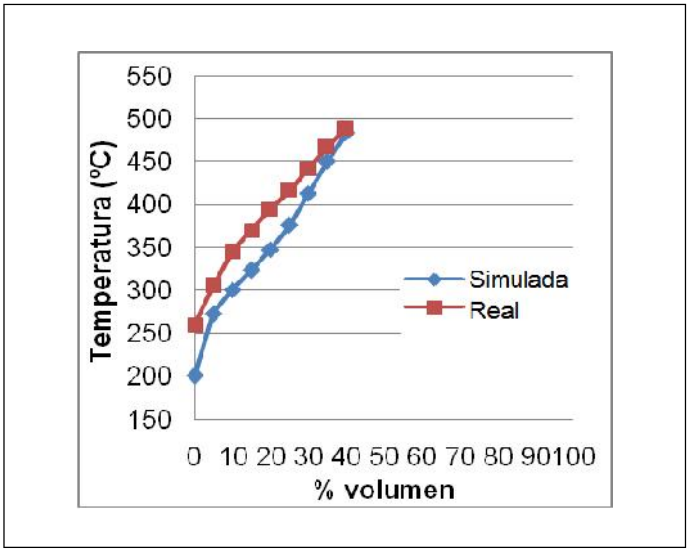


Fig. 9. Comparación de las curvas de destilación de FTA

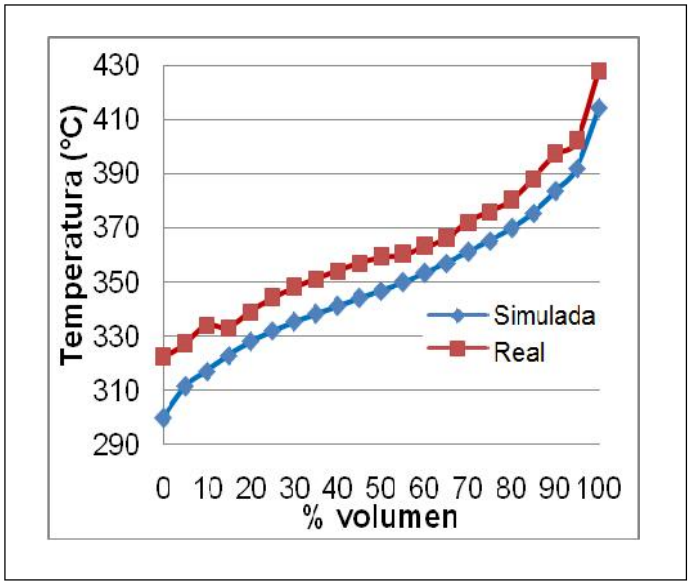


Fig. 10. Comparación de las curvas de destilación de R3

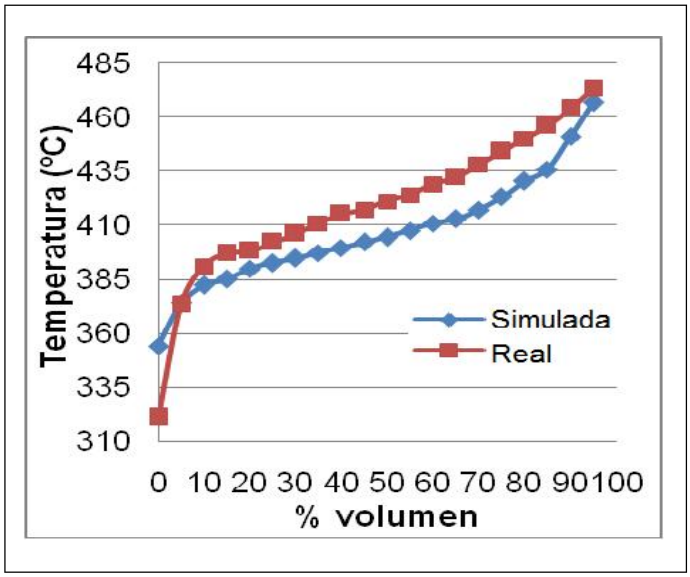
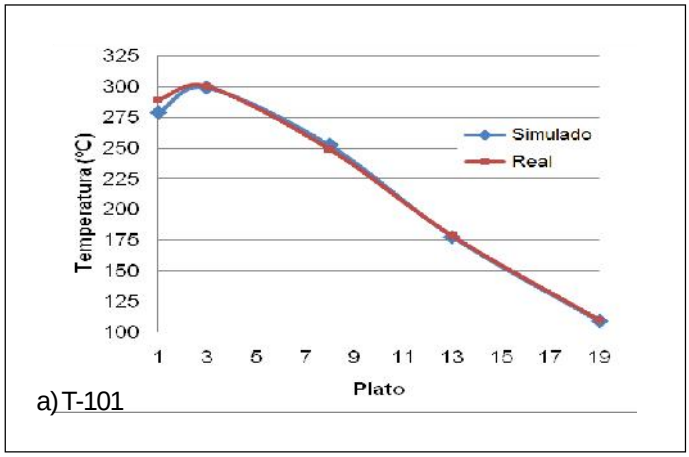


Fig. 11. Comparación de las curvas de destilación de R2

En la figura 12 se muestran la comparación entre los perfiles de temperatura de la torre de destilación atmosférica (T-101) y la torre de destilación al vacío (T-201) reales y los simulados. El modelo describe el perfil de temperatura de T-101 con un alto grado de precisión, mientras que existen mayores divergencias en T-201 fundamentalmente en los platos superiores a la zona de vaporización instantánea (platos 5-20). Esta divergencia puede estar dada por la diferencia entre las densidades del inyecto. El procesar una mezcla más densa implica que existe mayor cantidad de fracciones pesadas lo que provoca que el reflujo de tope comience a ser insuficiente para garantizar un perfil de temperaturas adecuado sobre todo en la zona rica en componentes de mayor temperatura de ebullición.



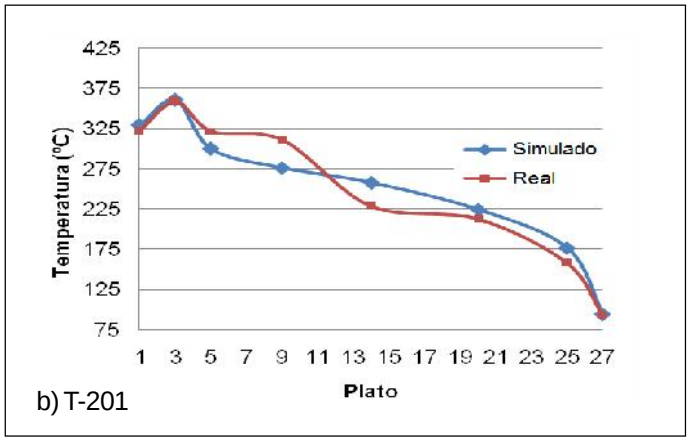


Fig. 12. Perfil de temperatura

Caracterización del asfalto obtenido

Cualitativamente el fondo de torre de vacío, traducido para el régimen de operación utilizado se constituye en asfalto, cuyas características se asocian al componente crudo y no a la fracción empleada como diluente, resultando para el caso en un material de excelente calidad amparado por la norma cubana clasificando en la marca AC-30 con alta demanda en el mercado interno [10].

CONCLUSIONES

1. Al valorar mediante el empleo de técnicas de optimización y en función de las materias primas (crudo pesado y fondo de torre atmosférica de una refinería) y solventes (mezcla queroseno - diesel y nafta) disponibles se proponen tres alternativas de inyecto a la refinería que pueden ser introducidas al modelo de simulación.

2. La realización de una corrida de prueba con la alternativa mezcla M1+S1+S2 permitió validar las predicciones del modelo de simulación, obteniendo como productos solvente reductor de viscosidad y asfalto AC-30 con aplicación en pavimentación con excelentes resultados de desempeño.

3. El empleo de cualquiera de las alternativas de inyecto evaluadas permite aprovechar la capacidad de refinación instalada en la refinería de petróleo objeto del presente estudio, con el consiguiente beneficio socio-económico que ello trae aparejado.

REFERENCIAS

1. **COSTA, Marcio R.** "Producción de asfalto a partir de petróleo cubano". Directores: Ricardo Abeledo, Lourdes Zumalacárregui, Laura Pupo. Trabajo de Diploma Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, julio, 2009.

2. **MORALES, J. Elier.** "Análisis de alternativas para el incremento de productos claros, en la refinería Ñico López, con la aplicación de HYSYS". Director: Carlos J. Morón. Tesis de Maestría. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, 2008.

3. **AGUILAR, R.** *et al. Mezclado de crudos y modelos no lineales para simulación y optimización de refinerías*. México D. F. [ref. de 24 de junio de 2010]. Disponible en Web: http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/11319/V%20STA%20p55.pdf [consultado enero 2014].

4. **SUÁREZ, Héctor L.** "Dietas de crudo alternativas para la refinería El Palito". Director: Waldo R. Urribarrí. Trabajo de Diploma, Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, 2012. Disponible en Web: http://200.35.84.131/portal/bases/marc/texto/2101-12-05095.pdf [consultado enero 2014].

5. **VERRUSCHI, Elisa** *et al*. "Como planificar óptimamente la cadena de suministros de una refinería". *Universidad, Ciencia y Tecnología*. diciembre 2009, vol 13, núm. 53, pp. 339-344, ISSN 1316-4821, Disponible en Web: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212009000400008&lang=en [consultado enero 2014].

6. **LEE, Soun Ho; BINKLEY, Michael J.** "Optimize design for distillation feed. Use these steps for enhanced performance". *Hydrocarbon Processing*. june 2011, vol 90, núm. 6, pp. 101-105. ISSN 0018-8190.

7. **ARMENGOL, Anelys; MORALES, J. Elier.** "Simulación del proceso de destilación atmosférica y al vacío de la refinería Sergio Soto". Proyecto 2908: Modelación, simulación de instalaciones petroleras de Cupet, Etapa 03, Ceinpet, La Habana, 2009.

8. **COKER, A. Kayode.** *Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*. Estados Unidos: Editorial: Elsevier, fourth edition, vol 2, 2010, pp.1-218. ISBN 978-075-068-366-1.

9. **MUÑOZ BATISTA, M. Jesús; PÉREZ GONZÁLEZ, Alain.** *et al***.** "Aplicación de la simulación de procesos durante la práctica laboral de estudiantes de Ingeniería Química". *Revista Cubana de Ingeniería*, vol. II, núm. 3, pp. 15-23.ISSN 2223-1781, 2011,

10. *Manual de Gestión de Calidad*. Catálogo de Especificaciones de Productos, Rama Combustible. Producto cemento asfáltico. DT-GC/P0703. Cupet, La Habana, 2012.

AUTORES

Anelys Armengol Gálvez
Ingeniera Química, Máster en Análisis y Control de Procesos, Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, Cuba

Rafael Franco Rico
Ingeniero Químico, Doctor en Ciencias Técnicas, Instructor, Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Ricardo Abeledo Rodríguez
Ingeniero Químico, Investigador Agregado, Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, Cuba

Laura Pupo Pérez
Ingeniera Química, Especialista I en Investigación, Innovación y Desarrollo, Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, Cuba

Feed Alternatives Evaluation in an Oil Refinery Using a Process Simulator

Abstract

By processing a medium crude, a refinery can only operate 80 days a year due to the declining of its wells supply. In order to ensure a better improvement of its resources some feed alternatives are proposed. That depends of the availability in others country regions of raw material that demands dilutions because of their heavier and viscosity. Taking advantage of geographic location and demands, asphalt can be obtained and also a wide cut with use in oilfields to reduce viscosity. That is why could be attractive to evaluate the possibilities of using the simulation model previously obtained with professional simulator HYSYS (version 2.2), complementing the information in order to validate results in a test with one of the alternatives proposed (heavy diluted crude with solvents of habitual crude) confirming the convenience of the chosen option, associated with profitable gains.

Key words: petroleum, distillation, simulation, refination, evaluation