

SISTEMA DE HOMOGENIZACIÓN Y CONTROL DE VISCOSIDAD DEL COMBUSTÓLEO

J. L. GROSSO V.*, J. E. FORERO, C. E. CUADRADO, y F. OTERO

Ecopetrol - Instituto Colombiano del Petróleo, A.A. 4185 Bucaramanga, Santander, Colombia

El combustóleo, debido a las especificaciones exigidas, de bajo azufre y baja viscosidad, es un subproducto de la refinación, de gran influencia económica por su alto volumen de producción, su alto consumo de diluyente y las restricciones de mercadeo. Si las especificaciones finales no son alcanzadas en el proceso, o son variables con el tiempo, se generan costos adicionales para alcanzar la calidad final requerida. La instalación del sistema de control automático de la viscosidad en línea del combustóleo, previamente evaluado a escala piloto, ha facilitado y optimizado su preparación, minimizando la variación de la viscosidad, dosificando un volumen adecuado de diluyente, que es monitoreado desde un sistema de control distribuido. Anteriormente, se dificultaba mantener la estabilidad del producto, por la gran gama de factores que afectan la relación óptima de corrientes constituyentes del producto. Algunos de los efectos alcanzados con este sistema de control son: disminución promedio día de volumen de diluyente, disminución de los tiempos de preparación de productos finales, menor número de muestras de control al laboratorio, más estabilidad en la operación de la planta, menor sedimentación en zonas de almacenamiento, y mayor eficiencia en procesos de transferencia de masa y calor.

Fuel oil is a refinery by-product with a big economical effect due to its high production volumen, diluent use and market specifications based on low viscosity and low sulfur content. When these specifications are not achieved or they are not steady during the process, additional costs are generated by reprocessing, recirculation, storage, laboratory analysis, pumping, etc.. An in-line viscosity automatic control, previously evaluated in a pilot plant, was installed in order to optimize the fuel oil preparation system. This type of control minimizes viscosity variation, maintains the product specifications and allows a proper dosage of diluent. The viscosity automatic control system has added several benefits as follows: decreases the diluent volumen per day, decreases length of final products preparation, fewer number of samples to analyze, a more steady operation of plant, less sedimentation in storage tanks and mass and heat transfer processes more efficient.

Palabras Claves: *homogenización, control de viscosidad, mezcladores estáticos*

* A quien debe ser enviada la correspondencia

INTRODUCCIÓN

El combustóleo (fuel-oil) es un subproducto de la refinación de petróleo, de gran influencia económica por su alto volumen de producción (entre 20%-30% del volumen total de crudo cargado), por su consumo de recursos valiosos como el ALC (aceite liviano de ciclo), y por las especificaciones exigidas para su consumo de bajo azufre y baja viscosidad, principalmente.

Casi la totalidad del combustóleo producido en las refinerías colombianas es preparado en el Complejo Industrial de Barrancabermeja, en la planta viscorreductora II. Por lo general es utilizado en las calderas como combustible, ya sea directamente o como emulsión, y la otra parte es exportada.

El control de calidad de este producto es muy importante así sea usado como combustible de calderas, porque la estabilidad de la viscosidad influye mucho en la calidad de la atomización para obtener una combustión eficiente, que reduce las emisiones de contaminantes y lo hace excelente producto para la exportación, logrando poder de negociación y evitando el rechazo por incumplimiento de la calidad exigida internacionalmente.

Un problema que se presentaba en los sistemas de preparación del combustóleo era la dificultad para mantener el producto con una calidad estable, dada la cantidad de factores y variables operacionales que intervienen en su control como: calidad de la carga a la planta, severidad de los hornos de viscorreducción, eficiencia de los procesos de separación y rectificación, eficiencia de la mezcla, etc. (Singh *et al.*, 1991).

La adición del diluyente al combustóleo es el recurso final que se tiene en el proceso para mantener la calidad del producto en condiciones apropiadas, pero también es el medio más costoso para lograrlo, no sólo por su impacto en la operación de las otras plantas de proceso (dejando de producir corrientes valiosas, para destinar su operación a la producción de diluyente), sino porque se aumenta el volumen total de este combustible, situación no deseable para la logística de la refinería.

Dos o tres horas después de que las muestras del producto final eran tomadas en la línea de salida, se recalculaba la cantidad de diluyente necesario con base en los datos de calidad reportados por el laboratorio.

Al tomar la acción, basados en los datos del laboratorio, éstos ya no reflejaban la situación real de la planta, no sólo por el tiempo sino también por la calidad de la muestra, que en esas condiciones no podía asegurarse que fuera representativa por falta de un sistema de homogeneización apropiado, lo que sumado a la forma de calcular la relación de diluyente, no producía un acertado control del proceso.

La inestabilidad que se presentaba por esta forma de controlar las especificaciones generaba grandes pérdidas económicas, por exceso de diluyente usado, dado que su costo es superior al del combustóleo o, en caso contrario, por deficiencia la cual genera mayores tiempos de procesamiento, almacenamiento, bombeo y, por tanto, pérdidas por costo de oportunidad.

Como propuesta por parte del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) para facilitar la operación del sistema de producción y mejorar la calidad del combustóleo, se recurrió a la tecnología de homogeneización que ya ha sido aplicada en otros procesos con resultados muy favorables. Se desarrolló un sistema de homogeneización y control automático de viscosidad compuesto por tres subsistemas principales: mezclado estático en línea, control y medición en línea, con un viscosímetro como elemento sensor y un convertidor que adapta la señal para llevarla al sistema de control distribuido Honeywell TDC 3000 existente en la planta viscorreductora II, del Complejo Industrial de Barrancabermeja (CIB).

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El trabajo se realizó en dos etapas: a escala de laboratorio y de planta piloto en las instalaciones del ICP, y se implementó a escala industrial en la planta viscorreductora II. Ahora se adelantan los estudios para realizar esta misma aplicación en las plantas de producción de asfaltos, en las refinerías de Cartagena y Barrancabermeja. En la Figura 1 se muestra la metodología general para la realización de este trabajo.

Seguimiento del proceso

En esta etapa se realizó un análisis operacional de la planta en donde se involucraron las variables internas y externas que afectan la producción del combustóleo:

- Facilidades de almacenamiento, esquemas de recibo y descarga, evaluación de internos, trazado de tuberías, accesorios, disponibilidad de bombeo, etc.

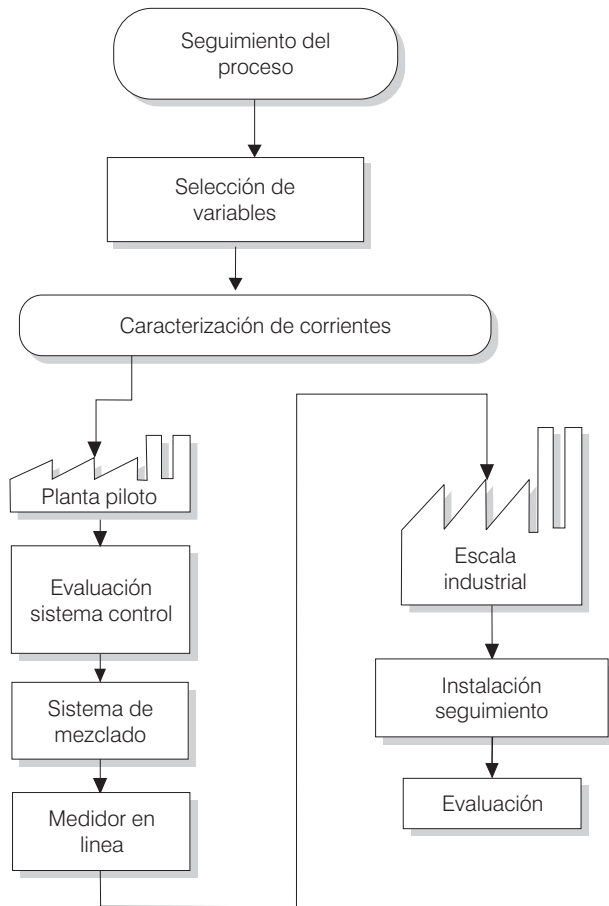


Figura 1. Metodología experimental.

Tabla 1. Viscosidad representativa de las corrientes constitutivas del combustóleo.

CORRIENTE	Temperatura/Viscosidad
Carga	408 K / 598 mPas
Brea	408 K / 2.100 mPas
Slurry	353 K / 86 mPas
ALC	298 K / 2,85 mPas

prepararon mezclas en diferentes proporciones, a las que se les determinó su comportamiento reológico: se les midió la viscosidad y la densidad en un rango de temperatura que cubriera el rango de operación en la planta, con el objetivo de evaluar el poder diluyente tanto del ALC, así como la susceptibilidad de la mezcla a la temperatura (variables que se miden en línea y datos de entrada al sistema de control).

El equipo utilizado para la determinación de la viscosidad dinámica es de alta precisión, marca Haake RV 20, con unidad de medición M5 y sensores NV, MV1, MV2, SV1, SV2, SVDIN, según el intervalo de viscosidad de la muestra. Estos equipos están dotados de un baño con control de temperatura, Haake F3C, para mantener ésta en el rango deseado (258 K a 423 K), con una precisión de 0,2 K.

- Variables operacionales: temperaturas y presiones en las torres de destilación y despojadoras (esquema de control, estabilidad e influencia en la calidad del producto).
- Variables externas: severidad de extracción en Demex, calidad de los fondos de vacío.

Caracterización de corrientes.

Se hizo seguimiento de los diferentes esquemas operacionales de la unidad y de las variables externas que afectan la viscorreductora, se definió la operación más representativa y se tomaron las muestras de las corrientes que constituyen el combustóleo, que son en su mayor parte la brea, producto de la viscorreductora, aceite liviano de ciclo y en algunos casos aceites pesados provenientes de la planta de cracking catalítico (slurry). En la Tabla 1 se muestra la viscosidad promedio de las corrientes.

Con las corrientes que forman el combustóleo se

A escala de planta piloto.

A esta escala se realizaron pruebas en donde se probaron diferentes esquemas de mezclado, se evaluó el tipo de mezclador estático, la disposición, la longitud, etc.

La planta piloto estaba conformada básicamente de:

- Dos tanques de almacenamiento, uno que contenía los fondos pesados y el otro el diluyente, dotados de facilidades tales como serpentines de calentamiento, indicadores de temperatura y control de nivel.
- Dos bombas.
- Válvula de control en la línea del diluyente.
- Sistema de mezclado estático (Diseño propio del ICP).
- Viscosímetro, Modelo 7827 de Solartron con las siguientes especificaciones:

Rango de viscosidad: 1 a 12.500 mPas
Precisión: $\pm 1\%$ de la escala.
Repetibilidad: $\pm 0,5\%$ de la lectura.
Temperatura: 223 K a 433 K.

La evaluación del sistema de mezclado se realizó evaluando la eficiencia de diferentes arreglos y de diseños de mezcladores estáticos a diferentes condiciones de flujo (velocidad, viscosidad, diseño del mezclador, diámetro, etc.), con el fin de encontrar el más adecuado para operar industrialmente (Mutsakis y Streiff, 1986 y Pahl y Muschelknautz, 1982), es decir, el que tenga alta eficiencia de mezclado y mínima resistencia al flujo. Como resultado de esta evaluación se instaló en el proceso un mezclador estático de tres vías, modificado según diseño del ICP. Con este sistema se aseguró alta eficiencia de mezclado y caídas de presión bajas (20,6 kPa, 3 psi).

En cuanto a la evaluación de la estrategia de control diseñada, y del comportamiento de la viscosidad de la mezcla obtenida, se realizaron varias pruebas en

la planta piloto. Se sintonizó el lazo de control de las desviaciones de la medida en línea, para que, respecto a la medida real, permanecieran en un rango menor al 1%.

El buen desempeño de la estrategia de control, y los mínimos rangos de variación de viscosidad obtenidos en las pruebas, constituyeron un buen indicio del éxito que podría alcanzarse con este sistema, a nivel industrial.

La estrategia de control se muestra en la Figura 2. Esta tiene como objetivo controlar la viscosidad del combustóleo mediante la utilización de las curvas base de viscosidad vs temperatura (Figura 3), un controlador PID, bloques linealizadores, y una señal de salida que manipula de la válvula que controla la adición de ALC a la breca.

La estrategia de control consta de:

- Un sistema de mezcladores estáticos que homogenizan las corrientes de breca y ALC.
- Un viscosímetro en línea como elemento primario

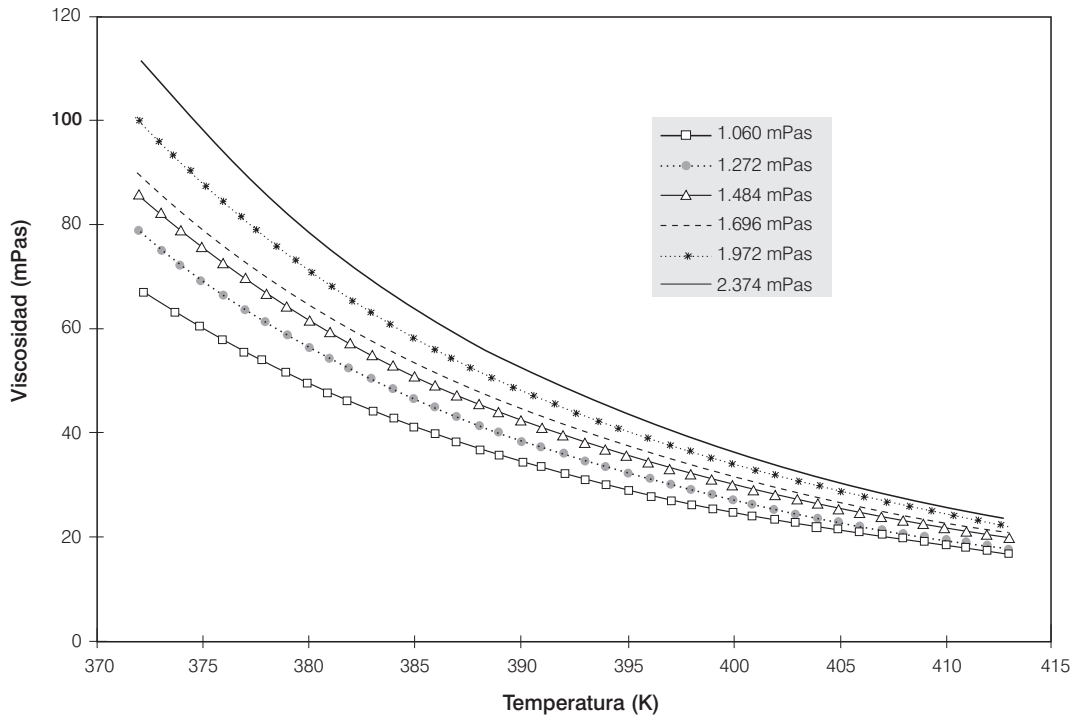


Figura 3. Curvas base de viscosidad.

de medida, colocado aguas abajo del sistema de mezclado estático, que opera con el principio de sensor vibrante, marca Solartron Transducers.

- Un controlador PID configurado en el SCD.
- Bloques extractores de logaritmo que linealizan la señal de viscosidad, con respecto a la señal que manipula la adición de ALC.

El controlador PID sólo está diseñado para procesos lineales. La Figura 4 muestra que el comportamiento de la viscosidad del combustóleo versus el porcentaje de ALC agregado no es lineal. Sin embargo, esta dependencia es de tipo logarítmico, por lo cual se puede linealizar el sistema:

- Un bloque caracterizador que contiene la gráfica o la ecuación de la línea base característica de este sistema, viscosidad vs. temperatura.
- La válvula de control en la línea de aceite liviano de ciclo.

La estrategia fue configurarla en el sistema de control distribuido (SCD) I/A de Foxboro versión 120 localizado en las plantas piloto del ICP. El método utilizado para el ajuste del controlador de viscosidad fue

el de lazo abierto que utilizó las siguientes correlaciones de Cohen y Coon (Kalotay y Schaffer, 1991 y Dealy, 1984):

Proporcional-Integral:

$$\mu = \frac{\tau_{DT}}{\tau}$$

$$\frac{100}{BP} = \frac{1 + \frac{\mu}{11}}{\tau_{DT} \cdot R_R} ; \quad I = 3,33 \tau_{DT} \left[\frac{1 + \frac{\mu}{11}}{1 + \frac{11\mu}{5}} \right]$$

Proporcional-Integral-Derivativa

$$\mu = \frac{\tau_{DT}}{\tau}$$

$$\frac{100}{BP} = 1,35 \left[\frac{1 + \frac{\mu}{5}}{\tau_{DT} \cdot R_R} \right] ; \quad I = 2,5 \tau_{DT} \left[\frac{1 + \frac{\mu}{5}}{1 + \frac{3\mu}{5}} \right]$$

$$D = \frac{0,37 \tau_{DT}}{1 + \frac{\mu}{5}}$$

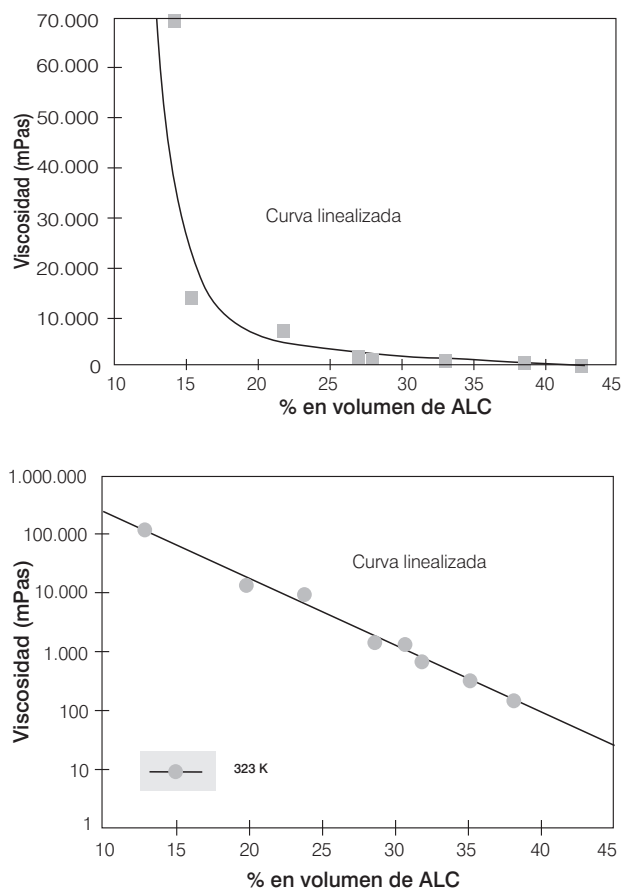


Figura 4. Relación viscosidad vs. porcentaje de ALC.

R_R corresponde a la pendiente de la curva de respuesta y está en unidades de porcentaje/tiempo (min^{-1}); es expresada como:

$$R_R = \frac{\frac{\Delta M}{t}}{\Delta \theta}$$

$\Delta M \rightarrow$ cambio en la medida, %.

$t \rightarrow$ tiempo, min.

$\Delta \theta \rightarrow$ cambio en la salida, %.

Escala industrial

Una vez culminadas las pruebas de planta piloto, en donde se diseñó el sistema de homogenización y se validó el sistema de control, se seleccionó el sitio en donde éste debía instalarse, para que cumpliera con requisitos importantes como: condiciones operacionales seguras, facilidad de acceso y sin afluentes posteriores.

Se realizó la instalación a nivel industrial en donde se hicieron las pruebas necesarias para la determinación de las características del controlador. Se crearon las facilidades en campo para ajustar las condiciones de operación de la planta a las condiciones de trabajo del viscosímetro utilizado, que se recomendó de la misma marca y características del que se usó en planta piloto. Al finalizar, la estrategia de control quedó funcionando en forma automática lográndose beneficios de tipo económico y técnico.

RESULTADOS

Influencia del porcentaje de ALC y temperatura en la viscosidad de la brea.

A las mezclas de brea con diferentes porcentajes de ALC se les midió la viscosidad en un amplio intervalo de temperatura, que cubría el rango de trabajo de la planta y del viscosímetro.

En la Figura 5 se muestra el efecto que ejercen la temperatura y el porcentaje de ALC en la mezcla de combustóleo. La viscosidad cambia en función de la temperatura en forma potencial y el comportamiento que presentan las mezclas es de tipo newtoniano, en todo el intervalo de temperatura.

Sistema de homogenización en línea.

La geometría de mezclador utilizado fue de tipo helicoidal modificado de tres vías (en proceso de patente por parte del ICP), a través del cual pasan las corrientes que se separan y se mezclan produciéndose un contacto efectivo con poca pérdida de presión a través del mismo.

Se instaló en la tubería donde se encuentran las corrientes de brea, ALC y slurry. El sistema está constituido por 2 mezcladores de 1,5 m de longitud y 10 pulgadas de diámetro. La máxima caída de presión que se presentó fue de 20,6 kPa (3 psi). Puesto que la temperatura de operación es alrededor de 423 K, la viscosidad de la mezcla es poco sensible a la temperatura a estas condiciones, según el estudio reológico, por lo tanto la caída de presión no se ve afectada en forma apreciable.

Implementación del proceso a escala industrial.

Las características dinámicas del proceso, tiempo muerto, la constante de tiempo y la ganancia se deter-

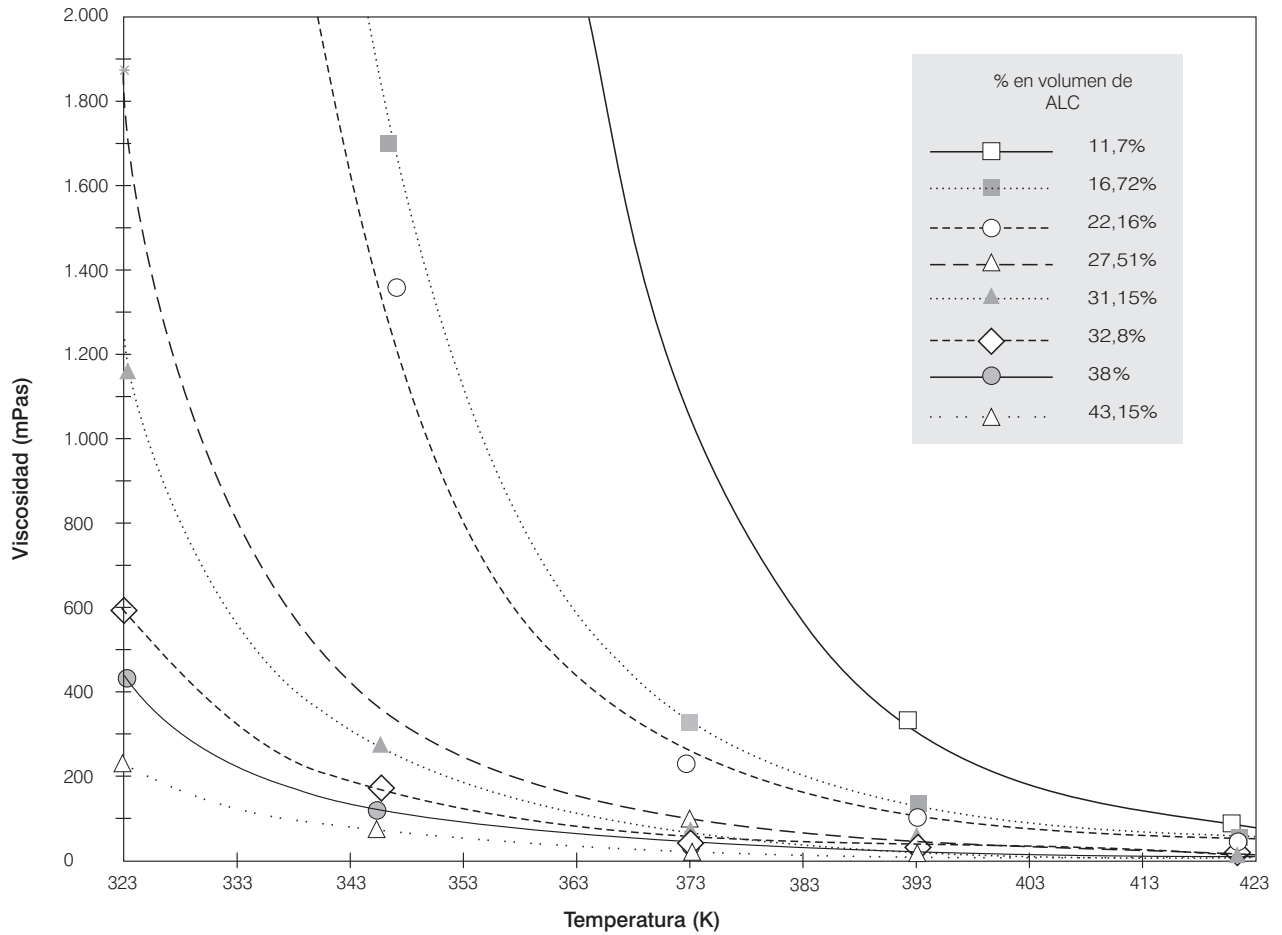


Figura 5. Influencia del porcentaje de ALC y la temperatura sobre la viscosidad de la brea.

minaron por el método del lazo abierto. Las pruebas realizadas consistieron en la aplicación de perturbaciones específicas al proceso y se observó la curva de respuesta de la viscosidad. Estas perturbaciones se realizaron tratando de que la respuesta se debiera únicamente al cambio en la señal de control.

Para el sistema se realizaron cambios tipo escalón en el porcentaje de apertura de la válvula que manipula el flujo de ALC, y se observó la respuesta de la viscosidad del combustóleo. La Tabla 2 muestra los valores obtenidos para el tiempo muerto, la constante de tiempo y la ganancia, en cuatro pruebas.

Tabla 2. Características dinámicas del proceso.

No. PRUEBA	Apertura	Tiempo muerto	Constante de tiempo	Ganancia
	$\Delta\%$	$\tau_{DT}(\text{min})$	$\tau(\text{min})$	k
1	4 (2-6)	9	13	0,25
2	4 (6-2)	5	16	1,1
3	5 (35-40)	5	14	0,45
4	5 (40-35)	5,5	21	0,4

Los parámetros de sintonización del controlador se obtuvieron con las características dinámicas del proceso, encontradas en las pruebas anteriores, y utilizando las ecuaciones de Cohen y Coon. Tales parámetros son las acciones proporcional, integral o reset y derivativa (Tabla 3).

Los parámetros utilizados inicialmente fueron el promedio de las dos últimas columnas, luego se hicieron ajustes para mejorar el desempeño del lazo de control.

La estrategia de control de viscosidad implementada es flexible a todos las perturbaciones que ocurren en el proceso, ajustando, en forma automática, la viscosidad ante cualquier cambio.

Tabla 3. Parámetros de sintonización del controlador.

PARÁMETROS	Prueba	Prueba	Prueba	Prueba
	1	2	3	4
TIPO	PID	PID	PID	PID
K	0,25	1,1	0,45	0,4
I	16	11,9	11	15
D	2,9	1,7	41,7	1,9

Los resultados de este estudio contemplan beneficios de tipo tanto técnico como económico, dentro de los cuales puede mencionarse lo siguiente:

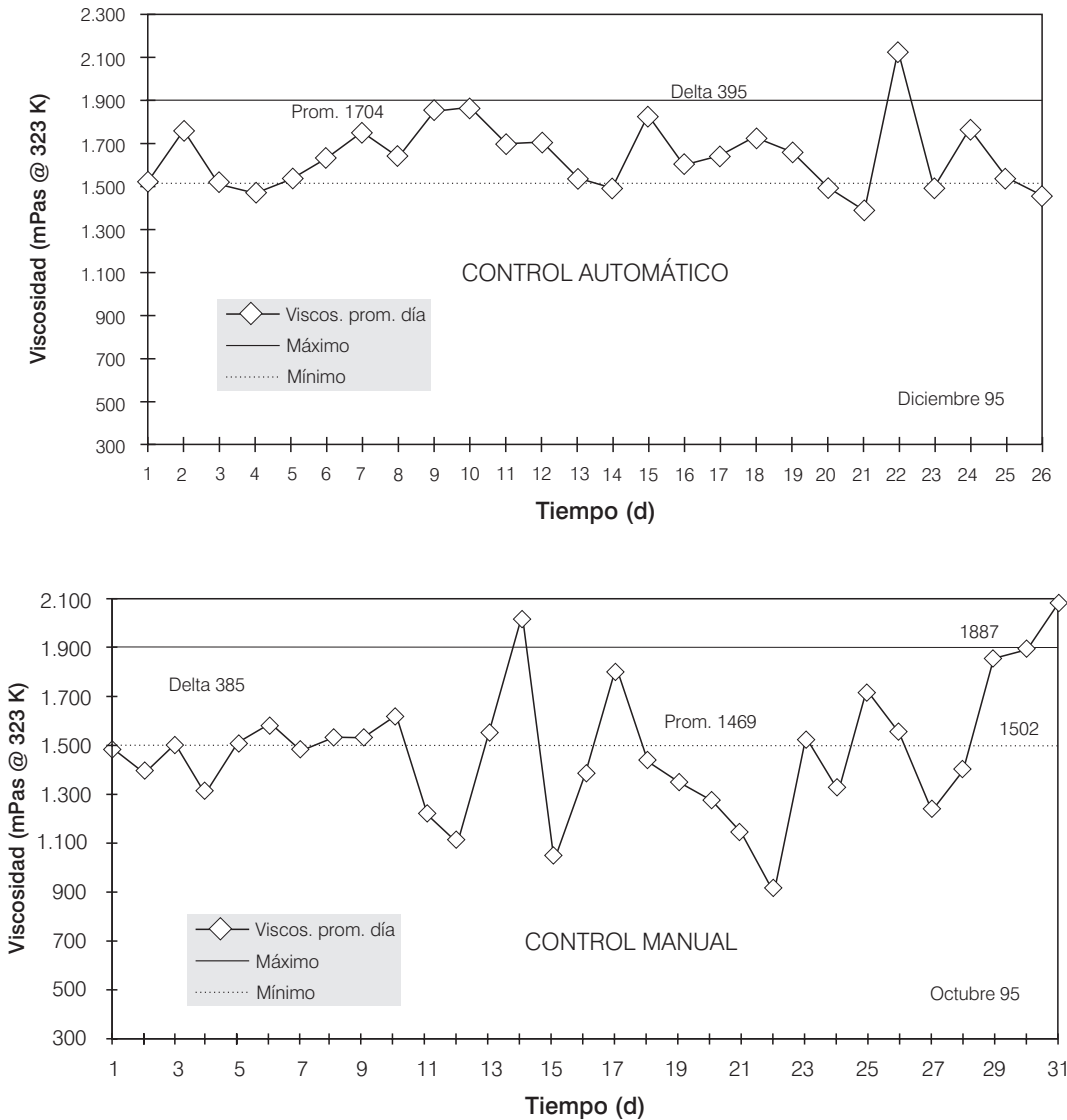


Figura 6. Rango de variación de viscosidad con control automático y manual.

Con la instalación del sistema de homogeneización y control automático de la viscosidad en la viscosreductora II se ha observado una gran estabilidad en los valores de la viscosidad diaria promedio del combustóleo.

Como se puede observar en la Figura 6, en donde se presentan las curvas del comportamiento de la viscosidad antes y después de poner en operación el sistema de homogeneización y control automático de viscosidad, para cada conjunto de datos se determinaron los límites máximos y mínimos de control, con lo cual se precisa que para la operación manual el sistema está fuera de control, porque más del 60%, de las medidas están por fuera de los límites de control, mientras que con el sistema automático más del 90% de las medidas están en este rango, demostrando que se tiene control sobre el sistema.

Además, se facilitó en gran medida la preparación de diferentes calidades de combustóleo en línea, accionando el seleccionador electrónico instalado en el SCD en donde se programaron 4 curvas base de viscosidad, que pueden ser activadas fácilmente por el ingeniero de proceso, de acuerdo con las necesidades de los usuarios.

También se espera una disminución del tiempo de preparación en tanques de los combustóleos de baja viscosidad, debido a la calidad estable y constante del combustóleo generado en la planta, porque el sistema de control garantiza que el diluyente sea dosificado en una forma más adecuada. Esta relación es calculada varias veces por minuto.

Por la robustez del sistema instalado se presenta aumento de la eficiencia de los equipos de proceso en especial los de transferencia de calor y disminución del número de muestras enviadas al laboratorio para evaluar la severidad de la planta. Estos datos son más confiables por la calidad de la muestra más representativa del proceso por su alto grado de homogeneización.

CONCLUSIONES

- Por los beneficios económicos y técnicos alcanzados con el desarrollo de este proyecto, ya se están adelantando estudios para aplicar esta tecnología en el mejoramiento de la calidad de otros productos de Ecopetrol.

- Los costos de instalar esta tecnología son recuperados en períodos de tiempo cortos.
- La estabilidad del producto mejora las perspectivas de mercadeo del producto y un mejor aprovechamiento de las facilidades de transporte y almacenamiento.
- Se tiene un beneficio económico de alrededor de U\$550.000/año por cada cien barriles diarios de ciclo ahorrado en el proceso. El consumo promedio de ALC de los últimos meses se ha reducido en más de 100 Bls/día.
- Para alcanzar resultados satisfactorios con la aplicación de esta tecnología se requiere una evaluación cuidadosa de las condiciones del proceso, y seguir cada una de las etapas aquí descritas.

REFERENCIAS

- Dealy, J. M., 1984. "Viscometers for online measurement and control", *Chemical Engineering*, (october 1).
- Kalotay, P. y Schaffer, D., 1991. "On-line viscosity measurement with coriolis mass flow meters", *Inter. Conference & exhibition*, paper # 91.
- Mutsakis, M. y Streiff, F., 1986. "Advances in static mixing technology", *Chemical Eng. Progress* (july).
- Pahl, M. H. y Muschelknautz, E., 1982. "Static mixers and their applications", *International Chemical Engineering*, 22 (2).
- Singh, I. D., Kapoor, M. P. y Ramaswamy, V., 1991. "Storage stability of visbroken residual fuel oils: compositional studies", *Fuel*, (febrero): 70