

**Estudio de sensibilidad del esquema catalítico para una unidad de
Hidrotratamiento de Gas oil
Predicción de parámetros para la planificación técnica y económica.**

Fernando Giménez, YPF SA, fernando.gimenez@ypf.com
Maria Primavera Monsalvo, YPF SA, maria.monsalvo@set.ypf.com
Hernán Laurito, YPF SA, hernan.laurito@ypf.com
Gustavo Trubiano, YPF SA, gustavo.trubiano@ypf.com

Resumen:

La unidad de Hidrotratamiento de Gas Oil de CIIEM (Complejo Industrial Ingeniero Enrique Mosconi) fue diseñada con la tecnología Distillate Unionfining Process de UOP para la producción de diésel con ultra bajo contenido de azufre. Procesa cargas provenientes de Destilación Atmosférica, Destilación al Vacío, Coke y Craqueo Catalítico, y cuenta con un reactor de cuatro lechos catalíticos.

El presente trabajo presenta un estudio de sensibilidad del esquema catalítico de la unidad de Hidrotratamiento de Gas Óil bajo condiciones operativas similares a las industriales, desarrollado en plantas piloto de YPF. Los resultados obtenidos se comparan con datos reales de operación de la unidad, evaluando la flexibilidad del sistema catalítico frente a variaciones en la calidad y el caudal de carga. Se analizan los impactos en temperaturas operativas y vida útil del catalizador, aportando información clave para la planificación técnica y económica. Estos resultados permiten anticipar el comportamiento de la unidad, los ajustes necesarios en las variables operativas y la viabilidad de cambios en la carga.

Este primer análisis, permite establecer parámetros de evaluación del ciclo de vida catalítico que facilitan respuestas rápidas ante requerimientos operativos. A futuro, se prevé extender esta metodología a otras unidades y ampliar el rango de variables consideradas.

Introducción

La unidad HTGB de Hidrotratamiento de Gas Oil de CIIEM (Complejo Industrial Ingeniero Enrique Mosconi) está destinada a la producción de diésel con ultra bajo azufre. El esquema catalítico actual de la unidad es un esquema convencional de hidrotratamiento y fue seleccionado mediante una evaluación técnica económica basada en los resultados de la performance técnica obtenida en las unidades piloto de YPF. En esa oportunidad compitieron 5 proveedores de tecnología resultando todas las propuestas aptas para los requisitos solicitados.

El objetivo de este estudio es analizar el impacto de cambios en la calidad de carga y cambios en el caudal (5 casos) sobre la temperatura de inicio de ciclo y la longitud del ciclo para el esquema catalítico próximo a cargarse.

El nuevo esquema catalítico cargado en la unidad es igual al esquema que fue cargado en el ciclo anterior por lo que los resultados de este estudio pudieron ser validados con los datos del ciclo operativo que concluyo en marzo de 2025 y que se inició en 2021.

Contar con la información que surge de este estudio es fundamental para conocer la flexibilidad del sistema catalítico para el próximo ciclo operativo de la unidad. Es sin duda una ventaja operativa conocer anticipadamente como responderá la unidad ante cambios en calidad y caudal de carga y cuál será el impacto aproximado sobre las principales variables operativas.

Desarrollo

Estudios en plantas piloto de YPF

Descripción de la unidad.

En la figura 1 se presenta un esquema del equipo utilizado para los ensayos de sensibilidad:

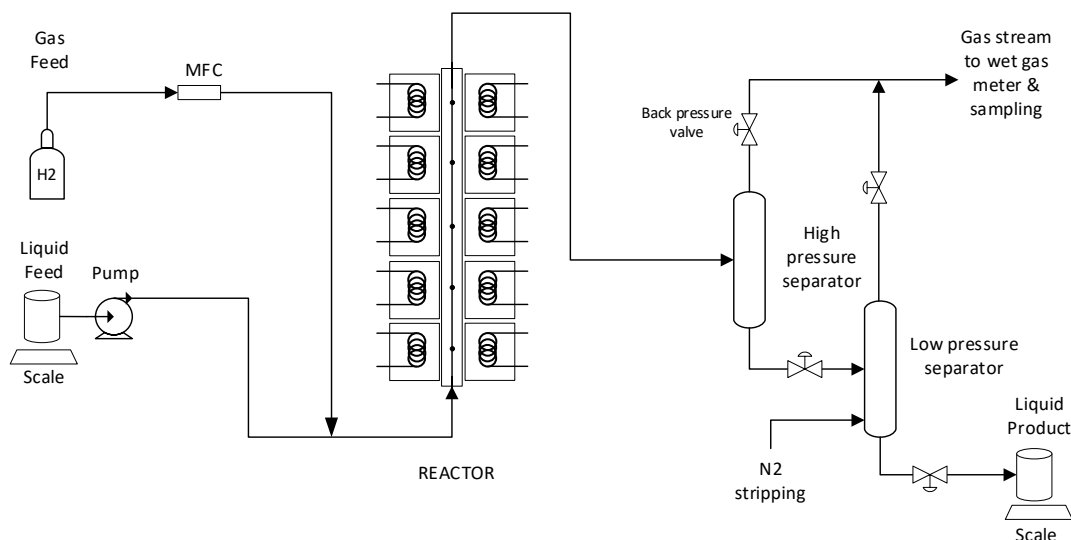


Figura 1: Equipo experimental utilizado

La unidad consta de un reactor de lecho fijo que opera de manera isotérmica. La longitud y el diámetro interno del reactor son de 143 cm y 2.54 cm, respectivamente. La longitud del reactor está dividida en cinco zonas, cada una de las cuales es calefaccionada eléctricamente y tienen las siguientes funciones:

Zona 1: Llena de partículas inertes, se utiliza para calentar la carga a la temperatura de reacción deseada y para proporcionar una distribución uniforme.

Zonas 2, 3 y 4: Destinadas a contener el catalizador y el diluyente.

Zona 5: También llena de partículas inertes.

Entre cada sección se inserta lana de material cerámico para mejorar la distribución del fluido. La unidad está equipada con un separador de alta presión y un separador de baja presión, dotado de un sistema de estriepo de H₂S con nitrógeno.

El equipo puede operar hasta 200 barg y 550°C de temperatura, y puede funcionar en flujo ascendente o descendente.

Los procedimientos de secado, mojado, sulfuración y estabilización se realizan según las especificaciones proporcionadas por el proveedor de tecnología.

Una vez activado y estabilizado el catalizador, la unidad se ajusta operativamente a las condiciones deseadas para iniciar los ensayos.

Metodología de testeo y análisis

A continuación, se describe brevemente la metodología de ensayo utilizada para el estudio de sensibilidad en las unidades piloto de YPF.

Los ensayos consistieron en evaluar el nivel de actividad del esquema catalítico en su estado SOR (a través de la WABT SOR necesaria para lograr la especificación deseada en el producto), luego se lleva a cabo una desactivación acelerada en condiciones controladas y posteriormente se mide nuevamente la actividad que corresponderá a la WABT de fin de ciclo. Con esta información es posible calcular la velocidad de desactivación que experimenta el esquema catalítico cuando es sometido a diferentes calidades de carga.

Las condiciones experimentales en las que se llevaron a cabo los estudios de sensibilidad son representativas de la unidad industrial.

En la tabla N°1 se resumen estas condiciones:

Variable	Condiciones operación para SOR y EOR	Desactivación acelerada
Temperatura, °C	340-400	400
LHSV, h-1	1.03	1.03
Presión parcial H ₂ , kg/cm ² g	51	25
Relación H ₂ /Hc, Nm ³ /m ³	350	175

Tabla N°1: Condiciones de operación del estudio de sensibilidad

Se estudio el impacto de 5 casos que difieren en calidad de carga y nivel de carga (caudal) sobre la temperatura de operación y sobre la longitud de ciclo.

La tabla N°2 indica los niveles de calidad y carga de los 5 casos estudiados. En la tabla, DD, CO, FC Y CC representan los % en volumen en la carga a la unidad de GO de destilación directa, GO de la unidad de Coque, GO de la unidad de FCC y porcentaje de carga craqueada a la unidad respectivamente. En los casos 2 a 5 se han representado numéricamente los incrementos de esos porcentajes para cada caso.

Casos →		Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
ORIGEN DEL GO	Caudal Total	Base	Base	Base	Base	Base +19%
	Destilación Directa	DD	DD -22	DD-28	DD-33	DD
	Coque	CO	CO+10	CO+15	CO+20	CO
	FCC	FC	FC +13	FC +13	FC+13	FC

Tabla N°2: Niveles de calidad y de carga de los 5 casos estudiados

Resultados de planta piloto

Impacto de la calidad de carga sobre la temperatura de inicio de ciclo.

Para analizar el impacto de la calidad de la carga sobre la temperatura de inicio de ciclo, el esquema catalítico bajo estudio se sometió a las diferentes calidades de carga correspondientes a los casos estudiados.

Para cada calidad de carga se realizó un barrido de temperaturas en el rango 340°C-400°C y se caracterizaron completamente los productos obtenidos en cada condición. La temperatura de inicio de ciclo se calcula a partir de la curva generada de S vs Temperatura y es la que corresponde a un contenido de 10 ppm de azufre.

En el grafico N°1 se muestran los resultados:

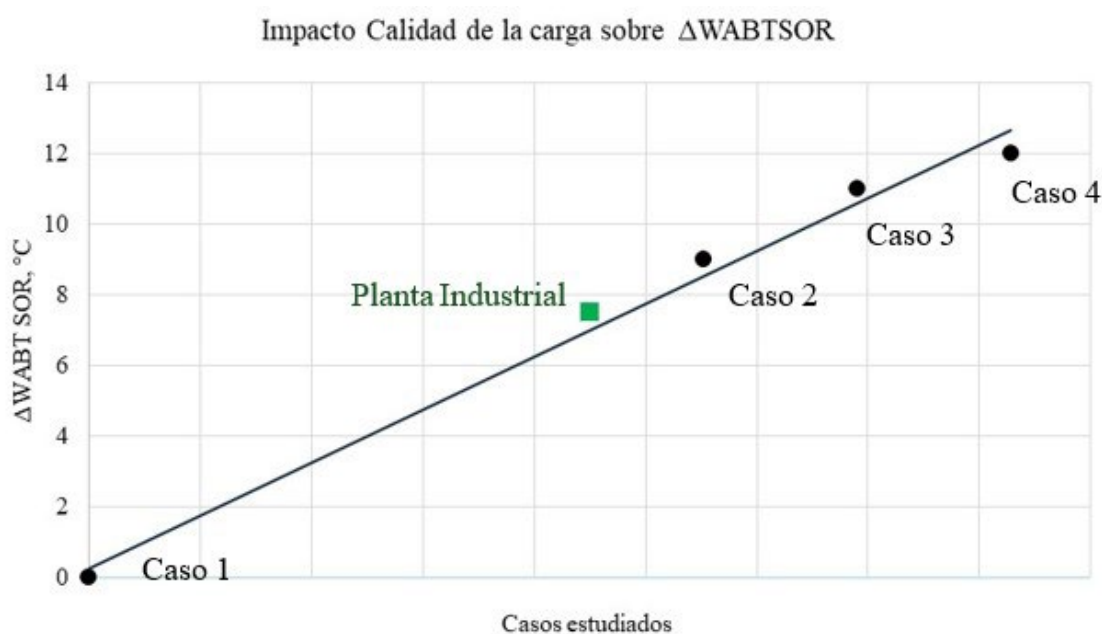


Gráfico N°1: Impacto de la calidad de carga sobre la WABT SOR

Como puede observarse al pasar del caso 1 al caso 2 se es necesario incrementar la WABT SOR en 9°C para lograr la especificación del producto. Ese incremento de temperatura corresponde a cambios en la calidad de carga debido a la incorporación de GO proveniente de la unidad de coque y GO proveniente de la unidad de FCC a expensas de una disminución del GO proveniente de topping. Incrementos sucesivos del GO de coque solamente provocan aumentos de entre 2 y 3 grados por sobre el caso 2.

Una manera de validar los resultados obtenidos es agregando el punto correspondiente a la operación de la unidad pudiéndose observar que el mismo cae dentro de la tendencia general observada.

A partir de la información generada experimentalmente es posible predecir el impacto que tendrá un cambio porcentual de GO proveniente de Coque y/o FCC en la composición de la carga sobre el WABT SOR del esquema catalítico tal cual se resume en la tabla N°3:

Origen Carga	WABT SOR
+10 % vol Coque	Base + 3°C
+10 % vol FCC	Base + 6°C

Tabla N°3: Impacto calidad de carga sobre WABT SOR

Impacto de la calidad de carga sobre la longitud de ciclo

También se analizó el impacto que la calidad de carga tiene en la longitud del ciclo estimada del esquema catalítico.

El gráfico N°2 muestra para los casos analizados experimentalmente la disminución en el ciclo de vida al cambiar la calidad de carga:

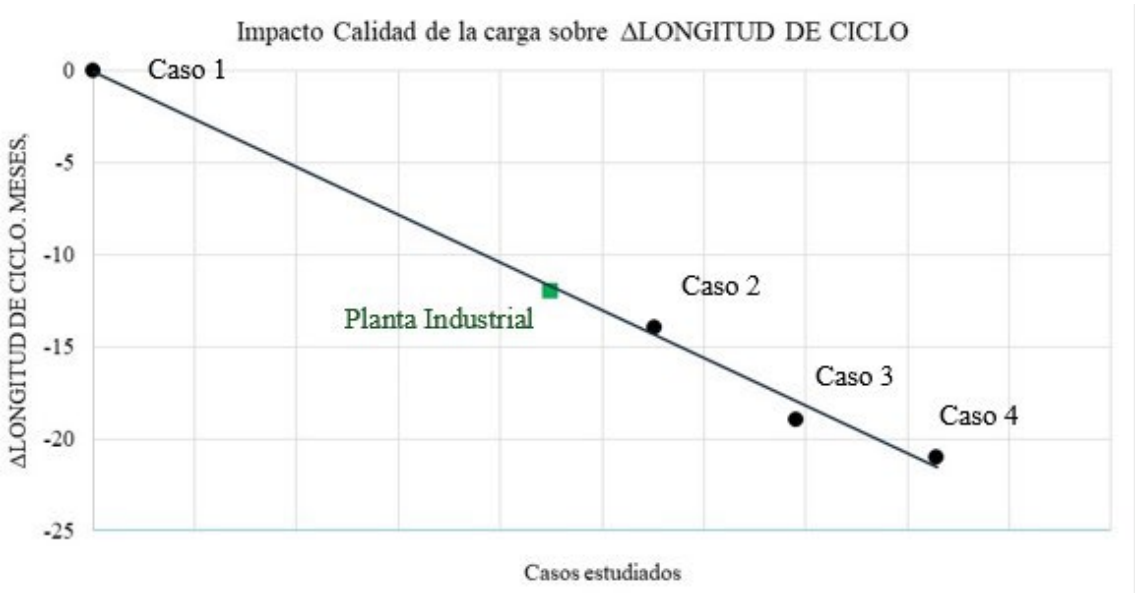


Gráfico N°2: Impacto de la calidad de carga sobre la longitud de ciclo

Al igual que en el caso anterior, al pasar del caso 1 al caso 2 se pierden aproximadamente 14 meses respecto de la longitud de ciclo del caso base debido a la desactivación ocasionada por la presencia de GO de coque y de FCC simultáneamente. Estas disminuciones en la longitud del ciclo son menores (del orden de 3-4 meses respecto al caso base) cuando solo cambia el contenido de GO de coque.

La información obtenida experimentalmente en este estudio se resume en la tabla N°4:

Origen Carga	Longitud de ciclo
+10 % vol. Coque	Base - 4 meses
+10 % vol. FCC	Base - 8 meses

Tabla N°4: impacto calidad de carga sobre longitud de ciclo

Impacto del Caudal de carga sobre la temperatura de inicio de ciclo y sobre la longitud de ciclo.

En el gráfico N°3 se observa el impacto de un cambio de aproximadamente 20% en el nivel de carga respecto al caso Base. En ambos casos la calidad de carga es idéntica y solo se ajusto la temperatura a la nueva condición para conseguir la especificación solicitada en el producto.

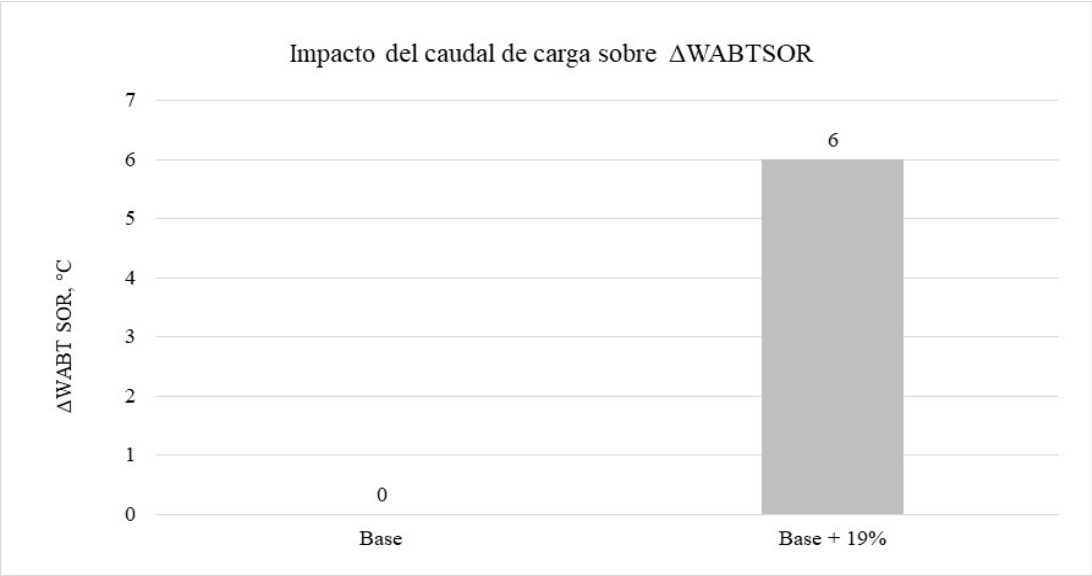


Gráfico N°3: Impacto del caudal de carga sobre la WABT SOR

Se observa que aumentar una 20 % el nivel de carga para una calidad de carga fija incrementa la WABT SOR en 6°C.

La tabla N°5 muestra el impacto del aumento de un 10% en el nivel de carga sobre la WABT SOR del esquema catalítico

Nivel de carga	WABT SOR
+10 % LHSV	Base + 3°C

Tabla N°5: Impacto nivel de carga sobre WABTSOR

Se estimó adicionalmente el impacto sobre la longitud de ciclo arrojando los resultados mostrados en la tabla N°6.

Nivel de carga	Longitud de ciclo
+10 % LHSV	Base - 15%

Tabla N°6: Impacto nivel de carga sobre longitud de ciclo

Descripción de la unidad Industrial

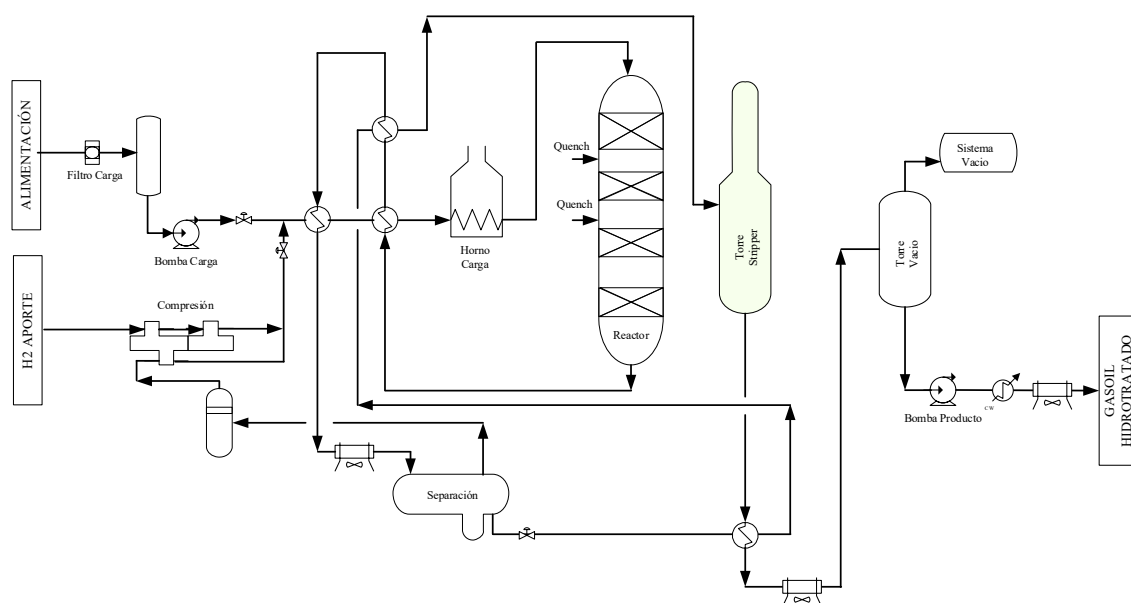
La unidad HTGB, ubicada en el CIEM (Complejo Industrial Ingeniero Enrique Mosconi) corresponde a una planta de hidrotratamiento de gasoil diseñada bajo la tecnología Distillate Unionfining Process de UOP. La misma procesa una carga combinada proveniente de diversas corrientes del complejo: destilación atmosférica, destilación al vacío, craqueo catalítico (FCC) y unidades de coque. La alimentación se acumula y se bombea hacia la sección de reacción, se incorpora la principal corriente de hidrógeno de reciclo con control de flujo, para luego ingresar a un tren de intercambiadores de calor que aprovecha el calor generado en la reacción para precalentar la carga. Luego en el horno de carga se ajusta la temperatura de entrada al reactor.

La mezcla de gasoil e hidrógeno ingresa al reactor, que cuenta con cuatro lechos catalíticos y control de temperatura por inyección de hidrógeno de quench en los lechos dos y tres.

Tras la reacción, el efluente caliente intercambia calor con las distintas corrientes de alimentación antes de pasar por una secuencia de enfriamiento y separación en etapas de alta y baja presión, donde se separan el gas de reciclo, aguas ácidas y el producto líquido.

El gasoil tratado se dirige al despojador para separarlo del hidrógeno disuelto, compuestos livianos y gases ácidos disueltos y una fracción de nafta agria. El aporte de calor se realiza por inyección de vapor de media presión en el fondo.

La fracción de tope (nafta) se enfría y se deriva hacia otras unidades de tratamiento de nafta, mientras que el fondo del despojador, tras ser enfriado, se envía a la torre de vacío de donde se obtiene el gasoil desulfurado y seco, que es finalmente enfriado y enviado a almacenamiento.



Validación de los resultados de planta piloto

Análisis de impacto

Con el objetivo de evaluar el efecto de las cargas craqueadas en el comportamiento del esquema catalítico de la unidad HTGB, se analizó la variación del Weighted Average Bed Temperature Normalizado, **WABTn**, en función del cambio relativo en el porcentaje de cargas craqueadas (FCC y Coke) durante el ciclo operativo de la unidad. También se analizó el impacto en el ciclo debido al incremento de velocidad espacial en el reactor (LHSV).

Este análisis compara el cambio en el WABTn observado en la operación de la unidad al cambiar la calidad de carga con el cambio en el WABT estimado en los ensayos de planta piloto. Para este análisis, se utilizaron datos de los dos primeros años de operación de la unidad, dado que los ensayos en planta piloto para estimar los efectos sobre la WABT se realizaron en condiciones de inicio de ciclo.

Evaluación de Impacto de las cargas craqueadas sobre el WABT normalizado (WABTn)

Para analizar el impacto del porcentaje de cargas craqueadas sobre el WABT normalizado debieron filtrarse los datos para considerar únicamente aquellos días en los que el porcentaje de FCC y/o Coke en la carga mostraba una variación positiva respecto al día operativo anterior. Adicionalmente, se limitaron los datos a incrementos de WABTn entre 0 y 30°C, con el objetivo de excluir eventos asociados a arranques de unidad o ajustes de severidad no relacionados con la composición de la carga.

En la Grafico N°4 se muestra el delta de porcentaje de carga craqueada (Δ Coke y Δ FCC ejes verticales izquierdo y derecho respectivamente) indicando el correspondiente diferencial de WABTn operativo (Δ WABTn) para diferentes puntos a lo largo del ciclo. Aquí se evidencia la necesidad de incremento de WABT como respuesta a los cambios de composición en la alimentación.

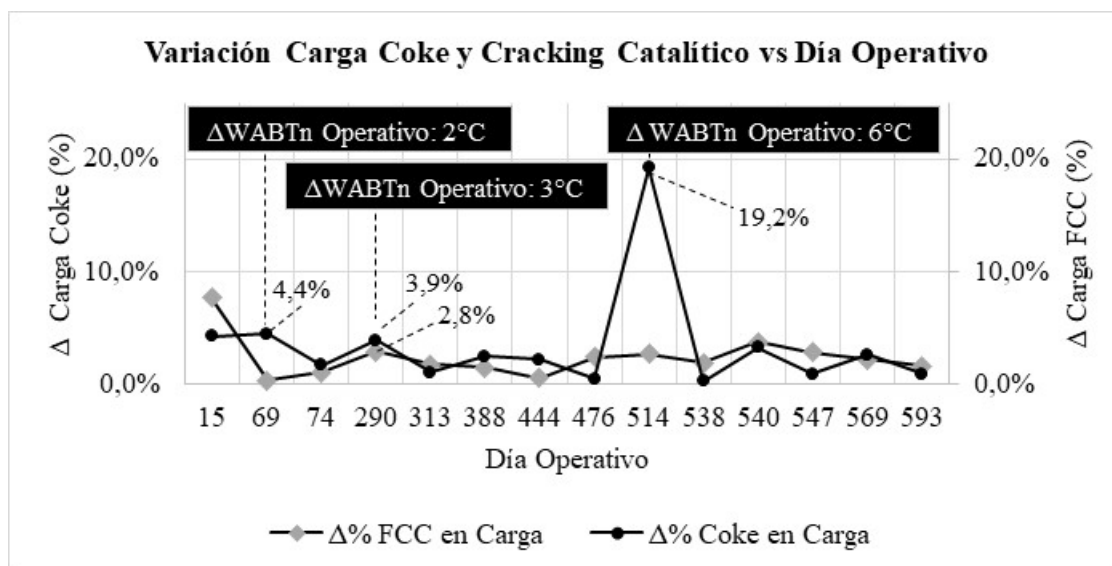


Gráfico N°4: Δ Coke y Δ FCC versus días operativos

Tal como quedo expresado en la sección anterior, los estudios en planta piloto permitieron determinar el impacto de la calidad de la carga sobre la WABT SOR:

- Un incremento de 10% en carga de Coke genera un aumento de +3°C en TSOR
- Un incremento de 10% en carga de FCC genera un aumento de +6°C en TSOR

A partir de esta información es posible calcular según los resultados de planta piloto cuanto debería haberse incrementado el WABTn ante los cambios registrados de calidad de carga (ver gráfico N°4).

En el grafico N°5 se muestra la relación entre el $\Delta WABTn_Operativo$ y $\Delta WABT$ SOR predicho por los resultados en planta piloto. Esta comparación permite evaluar el grado de correlación entre el modelo basado en datos de planta piloto y el comportamiento observado en la unidad. Como se observa los puntos caen en torno a una línea diagonal (correlación perfecta) indicando una muy buena correlación entre ambos valores.

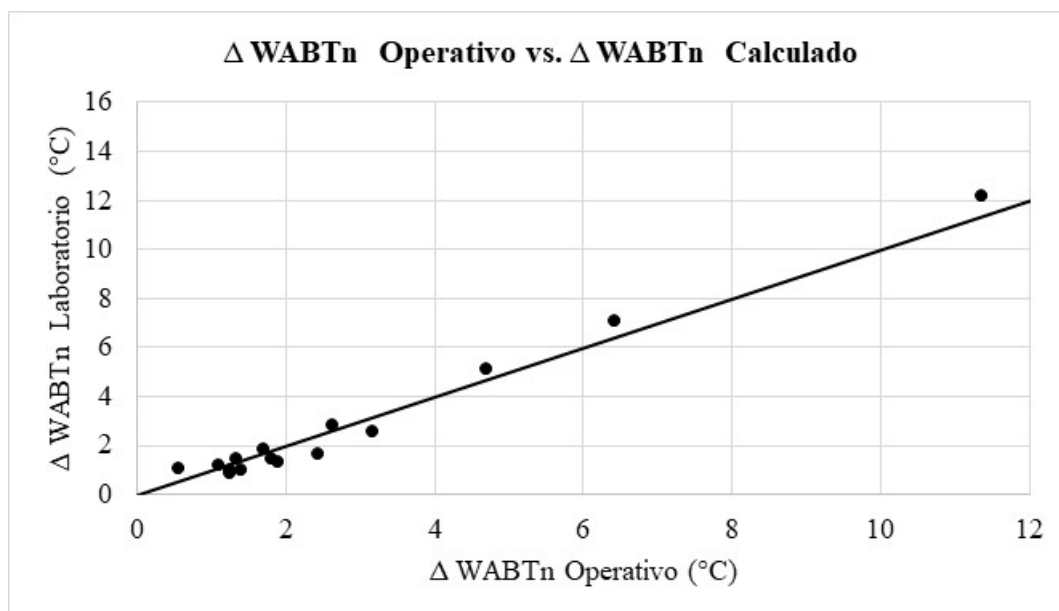


Gráfico N°5: $\Delta WABT$ Laboratorio vs $\Delta WABTn$ operativo

Evaluación de impacto de las cargas craqueadas sobre longitud del ciclo operativo

Para analizar el impacto de la calidad de carga sobre la longitud de ciclo se tomó como caso base operativo un periodo de 476 días en el cual la variación de cagas craqueadas de coque fue menor al 5%, y un caso 1 operativo, correspondiente al día 514, en el cual la variación de carga de Coke fue del 19%. En cada caso se filtraron los valores de WABTn de tal manera de obtener una tendencia creciente a lo largo del periodo, ya que los incrementos en las cargas de topping en la unidad reducen el WABT en ciertos momentos del ciclo.

En la Grafico N°6 se representa la variación diaria en el porcentaje de carga craqueada, expresado como $\Delta Coke(\%)$ y $\Delta FCC(\%)$, tanto para el caso base operativo como para el caso 1 operativo considerado.

Adicionalmente, en el Gráfico N°7 se representa la evolución temporal del **WABTn operativo** correspondiente a cada uno de los casos evaluados (caso base operativo y caso 1 operativo). La velocidad de desactivación en cada caso se obtuvo a partir de una regresión lineal sobre el conjunto de datos operativos.

Con estas estimaciones fue posible calcular la duración total del ciclo operativo para ambos escenarios, considerando un valor de WABTn al final del ciclo (EOR) igual a para ambos casos. A partir del punto de intercepción de estas rectas con el valor EOR, se calculó la longitud del ciclo catalítico en días, y se determinó así la reducción de ciclo debida al incremento de carga craqueada en el **caso 1**.

La reducción así estimada se comparó con la predicha por los estudios de planta piloto discutidos en la sección anterior (tabla N°4).

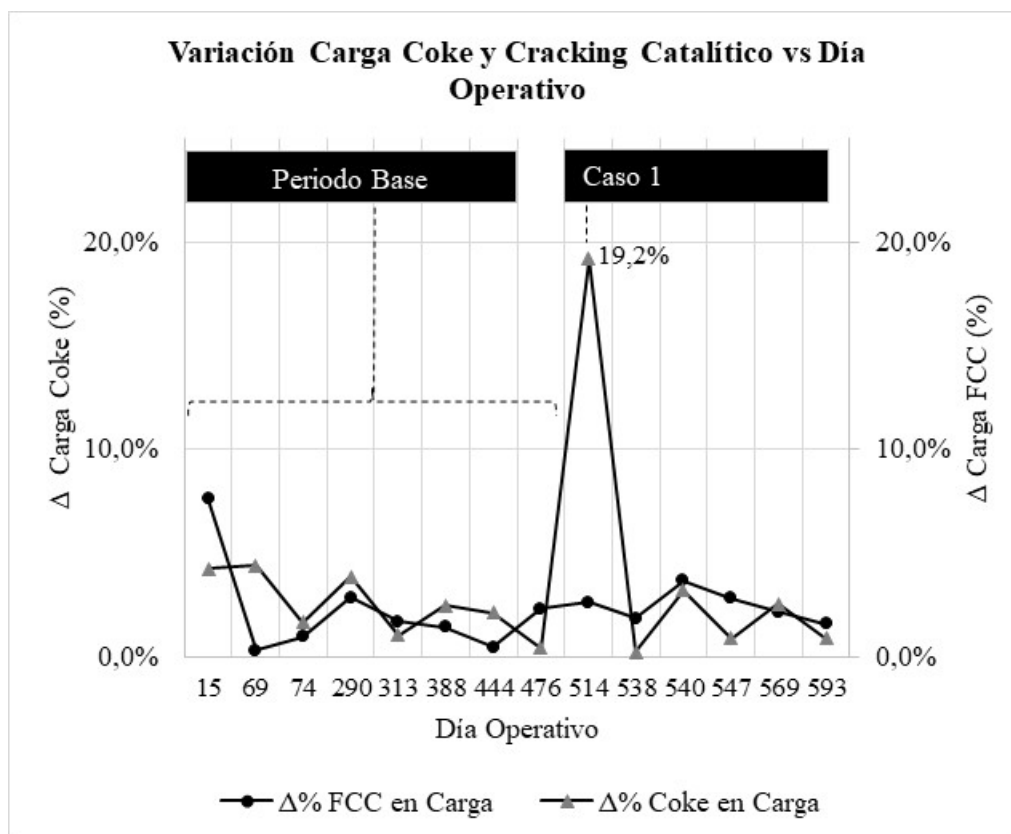


Gráfico N°6: Δ Coke y Δ FCC versus días operativos

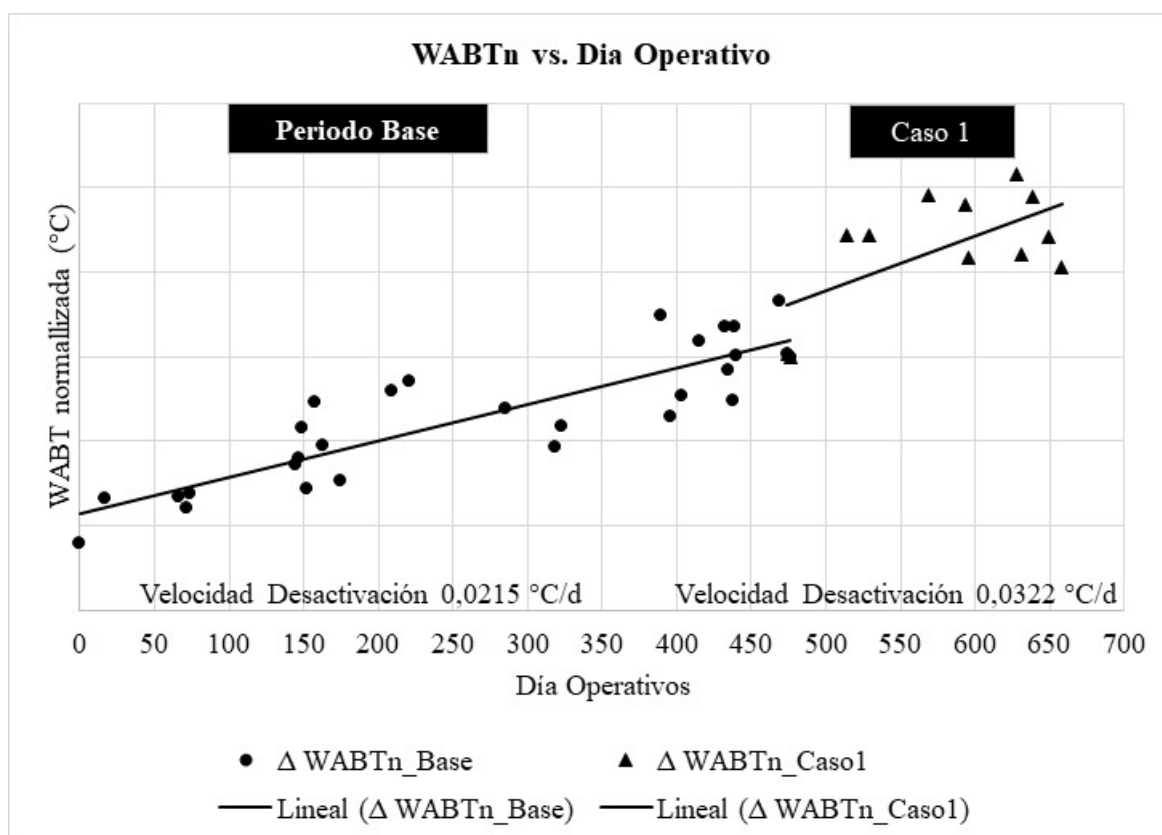


Gráfico N°7: WABTn Operativo vs. día operativo

En la Tabla N°7 se observan los cambios en calidad de carga (tanto para GO de coque como GO de FCC) que se registran al pasar del caso base operativo al **caso 1 operativo** y la correspondiente disminución estimada del ciclo operativo.

Δ CK (%)	19
Δ FCC (%)	3
Estimación disminución del ciclo operativo (meses)	10
Estimación de la disminución del ciclo operativo utilizando la predicción de plantas piloto (meses)	9.8

Tabla N°7: Estimaciones de la disminución del ciclo operativo por cambios en la calidad de carga

Como puede observarse existe una excelente correlación entre lo medido experimentalmente en plantas piloto y lo observado operativamente en la planta industrial.

Evaluación de impacto de caudal de carga sobre longitud del ciclo operativo y WABT SOR

Para analizar el impacto de del caudal de carga sobre la WABT SOR y la longitud del ciclo operativo se consideraron nuevamente un **caso base operativo** asociado a un periodo de 446 días con un caudal de carga promedio de Base y un **caso 1 operativo** con un caudal de carga promedio un 8% superior al base. Los datos fueron filtrados para tener variaciones de aporte de cargas craqueadas en el rango -1 a 1% para minimizar el efecto en el WABTn asociado ajustes en porcentaje de cargas craqueadas en la carga.

En el Gráfico N°8 se observa la evolución temporal del **WABT operativo** correspondiente a cada uno de los casos evaluados. Para estimar la reducción en el ciclo de vida al se procedió de la misma forma que en el caso de cambios en la calidad de carga.

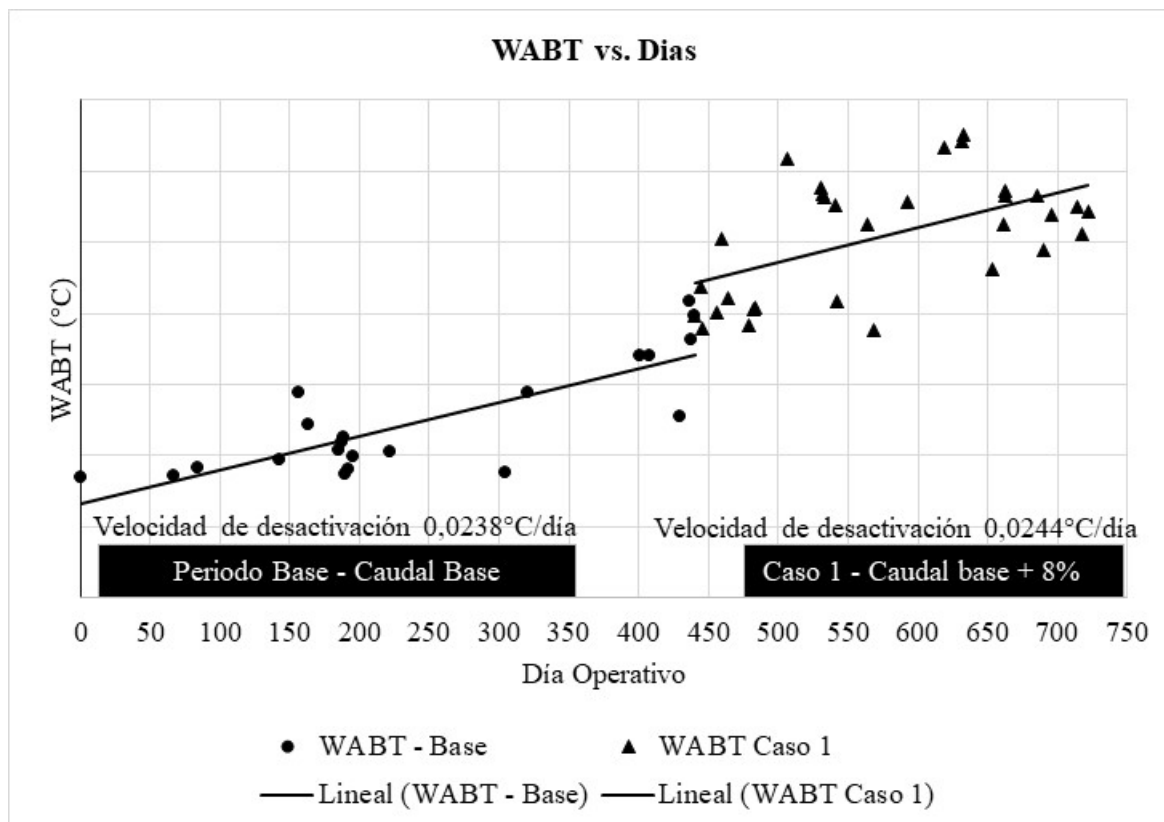


Gráfico N° 8: WABT versus dias operativos

En la Tabla N°8 se registran los cambios en los niveles de carga al pasar del caso base operativo al caso 1 operativo y la correspondiente disminución estimada del ciclo operativo.

Nivel de carga caso base operativo	Base
Nivel de carga caso 1 operativo	Base + 8%
Estimación disminución del ciclo operativo, %	16
Estimación de la disminución del ciclo operativo utilizando la predicción de plantas piloto %	12

Tabla N°8: Estimaciones de la disminución del ciclo operativo por cambios en la calidad de carga

Se observa que los resultados operativos predicen una disminución mayor que la observada en plantas piloto. Esto se debe a que los resultados operativos están afectados no solo por un cambio en el nivel de caudal sino por el fenómeno de desactivación que ya ha sufrido el esquema catalítico al momento de analizar este cambio de caudal, diferencia en la calidad de la carga y en la especificación del producto.

Para el caso del impacto de el cambio en caudal sobre WABT SOR, la tabla N°9 resume los resultados obtenidos.

Nivel de carga caso base operativo	Base
Nivel de carga caso 1 operativo	Base + 8%
Estimación Δ WABT SOR Operativo, °C	3,9
Estimación Δ WABT SOR Planta Piloto, °C	2,3

Tabla N°9: Estimaciones de la disminución del ciclo operativo por cambios en la calidad de carga

Por la misma razón que el caso anterior se observa una discrepancia entre valores operativos y los predichos en planta piloto.

Conclusiones

En el estudio realizado sobre el esquema catalítico de la unidad de Hidrotratamiento de Gas Oil del Complejo Industrial Ingeniero Enrique Mosconi (CIIEM) a través de pruebas en plantas piloto de YPF, se ha evaluado el impacto de variaciones en la calidad y el caudal de carga sobre la temperatura de inicio de ciclo y la longitud del ciclo del catalizador. Los resultados obtenidos permiten anticipar el comportamiento de la unidad ante cambios en la composición de la carga o cambios en el caudal, proporcionando información valiosa para la planificación técnica y económica.

La validación de los resultados obtenidos de los ensayos en la planta piloto de la GEEO con datos operativos reales ha confirmado la precisión de las predicciones realizadas en relación con los cambios de composición y una tendencia cualitativa respecto al incremento de carga.

Debe destacarse la importancia de realizar pruebas piloto como una herramienta que no solo facilita respuestas rápidas ante requerimientos operativos, sino que también sienta las bases para extender esta metodología a otras unidades y ampliar el rango de variables consideradas.

En resumen, el trabajo realizado aporta herramientas clave para optimizar el rendimiento y la vida útil del catalizador, asegurando una operación más eficiente y adaptable de la unidad de hidrotratamiento.

Fernando Giménez es Ingeniero Químico egresado de la Universidad Nacional de La Plata y de la Carrera de Especialización en Gas de la Universidad de Buenos Aires.

Actualmente se desempeña como ingeniero de procesos de Hidrotratamientos en el área de eficiencia de procesos del Complejo Industrial Ingeniero Enrique Mosconi de YPF.

Su experiencia en la industria del refino se ha desarrollado como ingeniero de procesos de diseño en AESA, como ingeniero de proyectos en el sector de Lubricantes y Especialidades de YPF y como ingeniero de procesos de Hidrotratamientos del Complejo Industrial Enrique Mosconi. También ha participado de la inspección de montaje y puesta en marcha de la nueva unidad de Hidrotratamiento de Naftas de Coke del complejo.

Gustavo Trubiano es Doctor en Ingeniería Química egresado de la Universidad Tecnológica Nacional (Facultad Regional Mendoza) y Universidad Nacional del Sur.

Actualmente trabaja como ingeniero principal de procesos en la Gerencia Ejecutiva de Excelencia Operacional de YPF.

Posee más de veinte años de experiencia en catálisis, hidroprocesos/hydrocracking, síntesis de metanol e hidrógeno y ha desarrollado toda su actividad en YPF.

Es profesor titular de las cátedras de Diseño Óptimo I y II, correspondientes al quinto año de la carrera de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de La Plata.

Maria Primavera Monsalvo es Ingeniero Químico egresado de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ), perteneciente a la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ). Especializada en Industrialización del Petróleo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (UBA).

Trabaja desde hace más de veinte años en YPF, desempeñándose en el Área de Tecnología. En la actualidad es consultora de servicio técnico especializado en unidades catalíticas de lecho fijo (hidrotratamiento, hydrocracking; reformado) en la Gerencia de Ejecutiva de Excelencia Operacional, de la Dirección de Planificación y Desarrollo Técnico de YPF.

Es Profesora titular de la cátedra de Ingeniería de las Reacciones Químicas y Diseño de Reactores, en la Universidad Tecnológica Nacional de La Plata.

Hernán Luis Laurito es Ingeniero Químico egresado de la Universidad Tecnológica Nacional (Facultad Regional La Plata)

Actualmente trabaja como ingeniero principal de simulaciones de procesos en Real Time Intelligence Center del Complejo Industrial Ingeniero Enrique Mosconi de YPF.

Posee más de veinte años de experiencia en ingeniería de procesos y ha desarrollado toda su actividad en YPF.