



Cambio de paradigma sobre eficiencia de hornos

Por *Javier Olivier Cabezudo* (YPF S.A.)

En este trabajo se describe el proceso desarrollado por la empresa, en búsqueda de desarrollar un modelo matemático multivariable que permitiera observar, en forma directa y cuantificable, la eficiencia operativa del horno HR-H1 del complejo industrial Luján de Cuyo de YPF S.A.

Históricamente, la principal herramienta de la que disponen los operadores para seguir la eficiencia de los hornos de procesos industriales, es la medición del exceso de oxígeno en los gases de las chimeneas. Este es un método indirecto.

Por cuestiones económicas, lo más común es que estos analizadores se instalen por encima de la zona convectiva del horno. En esta zona, los gases de chimenea se encuentran más fríos, lo que permite utilizar analizadores más económicos.

Sin embargo, el lugar óptimo para la instalación de estos analizadores es la parte superior de la zona radiante. La

diferencia operativa respecto a la ubicación de los analizadores es que cuando se encuentra por encima de la zona convectiva, la medición se ve afectada por la entrada de aires parásitos.

Se suma a todo esto el hecho de que la gran mayoría de los indicadores de eficiencia de hornos recomiendan el seguimiento de esta variable; se genera así una fuerte presión sobre los operadores, que tratan de cumplir con los objetivos planteados para esta variable.

No cabe duda de que el seguimiento de esta variable haya redundado en grandes ahorros, pero por ser un método indirecto también suele provocar operaciones ineficientes.

Cuando los ingresos de aire parásitos son mayores a los valores estándar, la presión sobre los operadores lleva a trabajar con los registros de aire cerrados, provocando operaciones ineficientes, pos-quemado y llamas muy distantes a las óptimas.

Como complemento al seguimiento del exceso de O₂, era necesario contar con un indicador que se adapte exactamente al horno, y permita evaluar y cuantificar las mejores prácticas operativas, como así también los ahorros producto del buen mantenimiento de los hornos.

Los modelos estadísticos multivariantes parecían ser una herramienta muy útil para esto. Por esto, se estudiaron profundamente los conceptos básicos de estos modelos, y cómo poder desarrollarlos mediante el uso de planillas de cálculo (herramienta con la que se contaba).

Dicho modelo se basaría en la utilización de conceptos estadísticos multivariantes como PCA y PLS.

Desarrollo

Para romper un paradigma, es necesario encontrar un ejemplo que sea superior del paradigma anterior.

El horno elegido como puntapié fue el Reformador de la unidad de *Steam Reforming* (figura 1).

Se eligió este horno por presentar algunas características especiales, que describiremos a continuación.

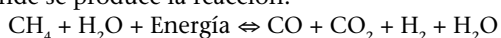
1. Es el horno de mayor consumo de mi sector de trabajo.
2. Es el que mayor cantidad de quemadores posee en todo el CILC: 200 quemadores.
3. Ante emergencias operativas en otras unidades, requiere pasar de operar a altas cargas a operar a baja carga. Y esto implica un trabajo muy arduo para ajustar la operación de todos los quemadores.
4. La calidad del combustible es muy estable; únicamente opera con gas natural.
5. La calidad de las cargas al horno es muy estable.
6. Se consideraba que este horno trabajaba en forma muy eficiente, ya que los valores de exceso de O₂ eran óptimos y las llamas de los quemadores se veían óptimas también.

Se esperaba que los puntos 4 y 5 facilitasen la creación del modelo estadístico.

El modelo debía dejar en evidencia cuándo la relación entre todas las variables operativas perdiera su correlación respecto a cómo se interrelacionaban en el momento de operación óptima.

Descripción de la unidad

La unidad de *Steam Reforming* tiene como objetivo la producción de H₂, mediante la reacción de gas natural con vapor de agua, en un reactor que consta de 75 tubos cargados con catalizador ubicados en línea recta. La primera etapa de reacción se realiza en el horno reformador HR-H1, donde se produce la reacción:



Reacción fuertemente endotérmica

Esta reacción se lleva a cabo con un gran exceso de vapor de agua.

Este horno reformador está constituido por dos grupos de quemadores, asociado cada uno a un control de presión de gas combustible:

- 20 quemadores de piso. Asociados a un control de presión de gas combustible.
- 180 quemadores distribuidos a lo largo de las paredes del mismo. Asociados a otro control de presión de gas combustible.
- La operación de cada uno de los 200 quemadores es manual.

El consumo de gas combustible respecto al gas procesado era de 0,63 Nm³/Nm³.

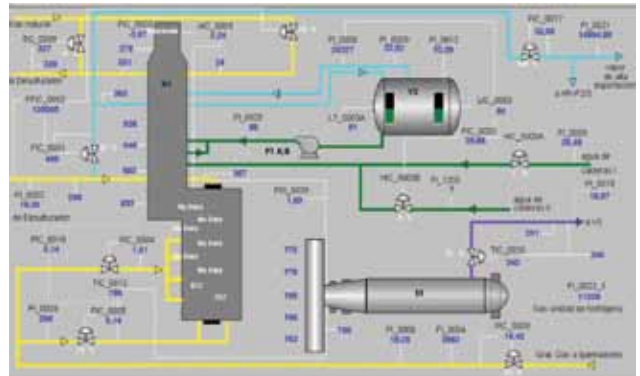


Figura 1. Configuración de la unidad de *Steam Reforming*.

Generación del modelo

La primera parte del trabajo consistió en definir qué variables resultarían útiles para el modelo. Se decidió utilizar todas aquellas variables que dieran indicación del requerimiento energético y la calidad de la operación.

Las variables seleccionadas fueron:

Caudales	Presiones	Temperaturas
Gas natural proceso	Quemadores piso	Ingreso al reactor
Vapor AP a proceso	Quemadores pared	Objetivo salida reformador
Agua zona convectiva	Tiraje del horno	Salida radiante
FG quemadores piso		Convectiva 1
FG quemadores pared		Convectiva 2
		Convectiva 3
		Convectiva 4
Otras		
% apertura damper		
% exceso de O ₂		

Una vez definidas las variables, se trabajó arduamente en la determinación de qué datos eran representativos de momentos con operación eficiente, y cuáles no.

Para esto, se utilizaron herramientas estadísticas multivariantes, como análisis de componentes principales: PCA y T2 de *Hotelling*.

Como resultado de esta etapa, se obtuvo el conjunto de datos donde la operación había sido más eficiente.

Ahora, con estos datos, debía construirse un modelo que fuera capaz de informar al operador cuando la operación se encontraba lejos de la más optimizada histórica, como función de todas estas variables. Complicado de decir y más aún de lograrse.

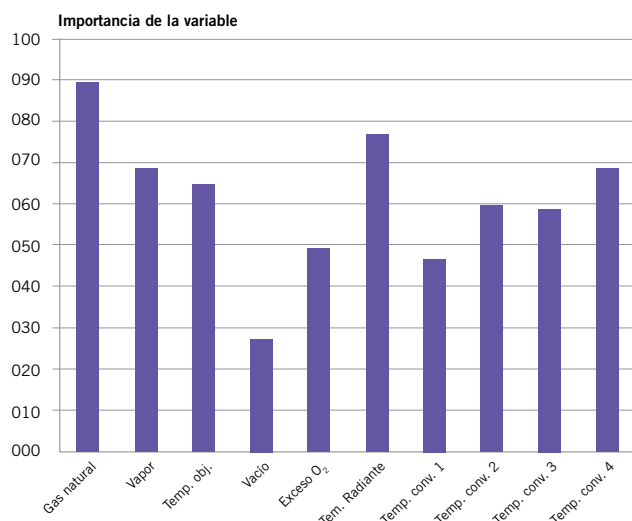


Figura 2. Peso de las 10 variables de mayor impacto en los modelos.

Todos los intentos de construir un modelo matemático acorde, redundaban en una gran incertidumbre, enorme complejidad matemática y, lo que era peor, la imposibilidad de calcular estos modelos en forma *on-line*, que era una de las premisas originales. La de ser una herramienta práctica para el operador.

Cabe aclarar que se contaba tan solo con una planilla de cálculo como herramienta matemática, y las bases de datos de la unidad almacenada en PI para la realización de todo este trabajo.

Realmente, el objetivo parecía muy ambicioso. Tan grandes eran las complejidades que se llegó a una primera conclusión: "Sistemas complejos requieren modelos complejos".

Un punto muy llamativo que se pudo observar con estos modelos fue el poco peso relativo de variables como Exceso de O₂ y Vacío en la chimenea. Y esto llamó mucho la atención, y fue el disparador de una nueva etapa del trabajo. Ver la figura 2, con el peso de las 10 variables de mayor impacto en los modelos.

Replanteo

Bajo esta premisa, se replanteó qué variables debían ser utilizadas para el modelo (ver figura 3). Y se llegó a una nueva definición para delinear las variables a utilizar.

El concepto utilizado fue el siguiente:

"Se utilizarían solo aquellas variables que describan el requerimiento energético del proceso. De forma tal de hacer una estimación del *duty* (programa) requerido por el proceso, y el consumo energético para lograrlo."

Este cambio en la selección de las variables, vino acompañado de un cambio en lo referente a ¿qué debía hacer el modelo?

- El modelo debería estimar el consumo requerido de gas combustible para los requerimientos energéticos actuales.
- El valor así estimado se compararía con el consumo real actual.

Este nuevo enfoque cumplía con todos los requisitos planteados. Y, a su vez, liberaba al operador para realizar cualquier cambio con tal de retornar al estado de consumo óptimo.

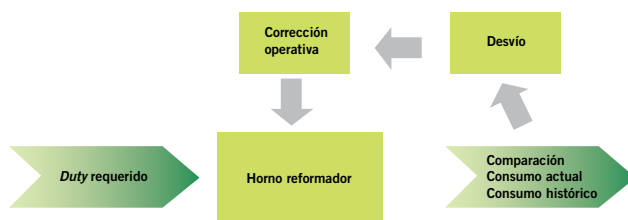


Figura 3. Ciclo operativo del modelo.

Con este nuevo esquema de trabajo, una simple regresión lineal múltiple permitió estimar el consumo.

$$\text{Consumo} = f_c (\text{Gas Natural}, \text{Vapor}, \text{Temp. objetivo})$$

Ahora con nuestro modelo matemático, debíamos encontrar la forma de llevar este dato al operador. La manera más práctica que se encontró fue hacerlo en forma gráfica mediante el uso de las funciones del PI.

Esta variable se mostraba, junto al consumo actual, en un gráfico continuo de PI, que puede apreciarse en la figura 4.

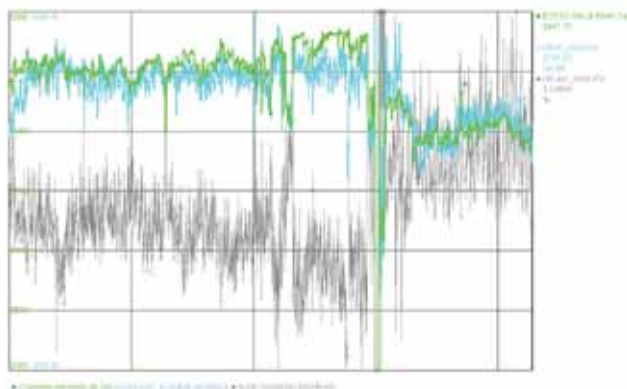


Figura 4. Representación gráfica predicción y consumo actual de combustible.

Con todo esto armado, ahora se debía convencer a los operadores de que esta era una herramienta útil. Por lo tanto, no se les enseñó la herramienta hasta tanto no se observara un desvío digno de ser corregido.

El modelo se tuvo al resguardo de encontrar el momento óptimo para darse a conocer, hasta que por fin se

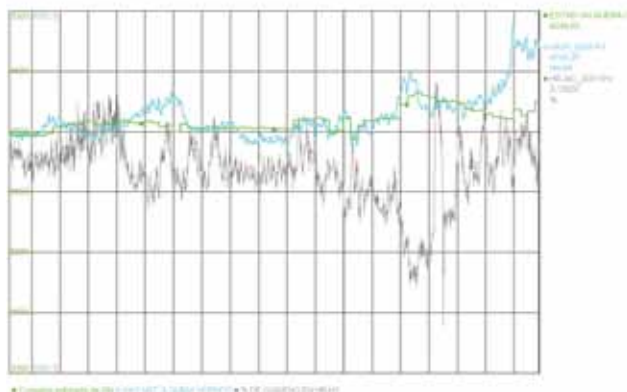


Figura 5. Primer desvío observado respecto al modelo.

detectó un desvío que se consideró de relevancia. Y que con el modelo de seguimiento de la eficiencia mediante el exceso de O_2 no se había detectado. Se puede apreciar en la figura 5: primer desvío observado respecto al modelo.

Ahora sí, con un claro desvío respecto de la operación histórica del horno, se presentó el modelo a los operadores de la unidad.

Con una somera explicación, “el modelo no era más que el reflejo de cómo ellos mismos operaban históricamente el horno”; nos propusimos llevar otra vez el consumo del horno al óptimo histórico que mostraba el modelo para las condiciones operativas actuales.

Durante la presentación del modelo a los operadores se aprovechó para debatir sobre la incidencia de los distintos factores que afectan a la eficiencia del horno, y cómo esta herramienta nos permitiría verificar fehacientemente el impacto de cada cambio que se realizara.

Se decidió como primera acción, para ver de retomar el punto medio de operación, cerrar un 1% el dámper de la chimenea, ya que ni siquiera requería salir a campo, y sería muy fácil ver si se mejoraba o se empeoraba la situación.

Rápidamente, se pudo observar cómo respondió el sistema a este cambio. Puede verse la figura 6: verificación de la utilidad del modelo.

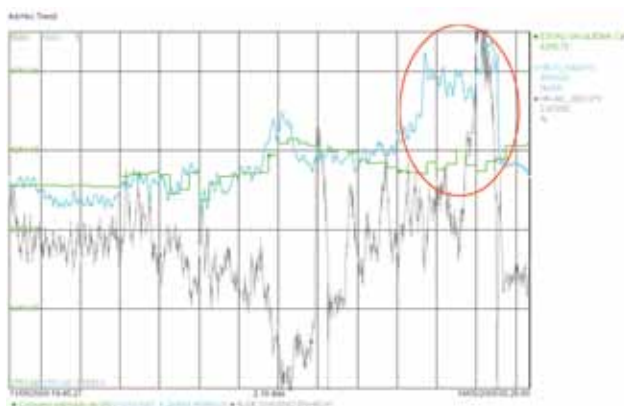


Figura 6. Verificación de la utilidad del modelo.

Resulta muy interesante ver en la figura 6 cómo el exceso de O_2 demoró casi 6 horas antes de acusar la fluctuación importante. Sin embargo, la acción sobre el dámper la acusó primero el exceso de O_2 .

Este primer resultado me hizo suponer que el objetivo primario se había cumplido.

Por primera vez, los operadores contaban con una herramienta que en forma directa les permitía ver cuán útil o no resultaban los cambios en el sistema, por lo que se acordó continuar efectuando modificaciones y ver qué efectos tenían sobre el mismo.

Y sorpresivamente...

Fue así como luego de muchos pequeños ajustes, se fue encontrando una operación que resultó ser muy superadora al modelo original. Y con esto se comenzó a gestar un nuevo paradigma entre los operadores. Ya no se miraba el exceso de O_2 de los gases de la chimenea, sino que

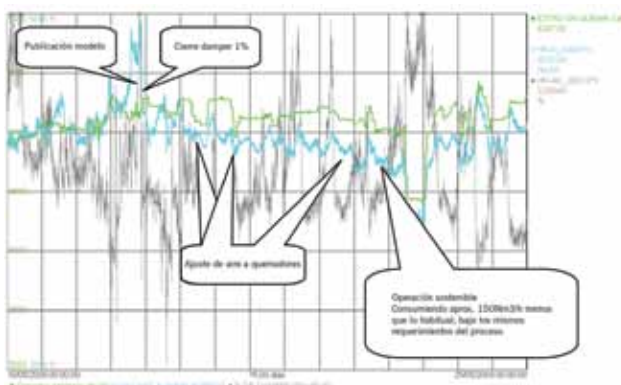


Figura 7. Comienzo de la optimización.

se observaba el consumo actual frente al indicado por el modelo, y en función de esto se decidía la necesidad de realizar ajustes o no.

Se siguió esta operación, verificando que era factible operar en estas nuevas condiciones para cualquier carga en la unidad. Ver la figura 7: comienzo de la optimización.

Finalmente, se llegó al punto en que los cambios operativos en el horno ya no conducían a una merma en el consumo de gas combustible.

Con los datos de esta nueva manera de operar el horno, se procedió a realizar una nueva correlación, que en términos medios equivalía a un ahorro entre 300 y 350 Nm^3/h de combustible, según se puede apreciar en la figura 8.

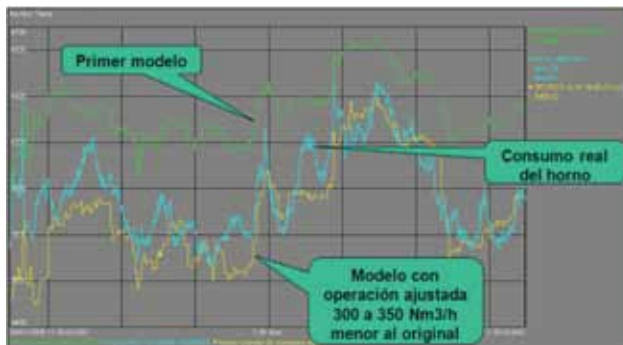


Figura 8. Comparación entre 1º modelo, 2º modelo y consumo real.

Entre los ajustes que produjeron mejoras más notables están:

- Ajuste de la posición del dámper.
- Regulación de los registros de aire primario y secundario.
- Unificación de criterios operativos.

Un punto muy interesante resultó ser el de la unificación de criterios operativos, que consistía en determinar en qué zonas era más ventajoso “energéticamente” entregar calor al horno. Y provocó un debate entre la forma de operar de los distintos turnos.

Esta discrepancia, más que ineficiencia energética generaba un gran trabajo artesanal, ya que llevaba aparejado el cambio del registro de aire secundario de los 180 quemadores de pared, tarea por demás laboriosa.

La unificación del criterio operativo significó una reducción en el tiempo dedicado de los operadores a la optimización del horno.

Todo este trabajo de optimización, además, entregó como plus “Un mayor conocimiento del sistema”, y permitió estimar cual sería el impacto energético de reducir el exceso de vapor.

El impacto resultaba muy grande. Los productos efluentes del reactor llegan hasta temperaturas próximas a los 760 °C.

Visto y considerando esto, se consultó al fabricante del catalizador de la unidad qué posibilidad había de reducir levemente este exceso. El fabricante dio el visto bueno, y así fue como se comenzó a operar con una relación vapor hidrocarburo levemente inferior a la histórica.

Y nuestro modelo nos permitió nuevamente determinar la forma óptima de operación.

Las mejoras eran evidentes, pero los resultados de la estimación no eran públicos, por lo que el operador que deseaba ajustar el horno debía conseguir una PC, ingresar a un lugar especial y poder visualizar esta tendencia. Debido a esto, todavía eran muchos los momentos en que se observaban desvíos importantes respecto del estimado.

Era el momento de hacer pública esta herramienta. Así fue como en el año 2010 se instaló esta variable en los esquemáticos de PI del CILC y, además, se la agregó como variable en el sistema de control distribuido, de forma tal que estuviera siempre visible. Y el impacto fue enorme.

El último modelo de estimación de consumo muestra un consumo inferior al original en más de 1.000 Nm³/h.

Luego del último paro de la unidad, un tubo del reformador presentó un problema de circulación, por lo que fue necesario proteger este tubo de los fuegos, lo que genera una operación levemente menos eficiente, y esto se refleja en que en este ciclo no llegamos a la máxima eficiencia del horno, tal como se aprecia en la figura 9: estado actual del horno reformador.

Se puede ver cómo el modelo permite cuantificar la implicancia energética de este problema operativo: aproximadamente 200 Nm³/h.

Comparaciones

- **Consumo de gas combustible:** Comparando el gas que era requerido para operar bajo los mismos requerimientos energéticos, se observa un consumo sostenible de 1.000 Nm³/h inferiores a los históricos, como se puede observar en la figura 9 referida.

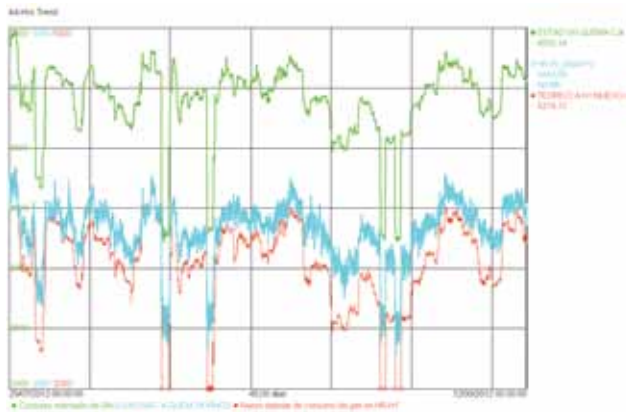


Figura 9. Estado actual del horno reformador.

- **Consumo específico:** Desde la aplicación del modelo estadístico se observa una reducción en el consumo específico de gas combustible en la unidad. 15% inferior a la media histórica. Ver la figura 10: comparación del consumo específico de combustible, antes y después de la implementación de la herramienta.
- **Exceso de O₂:** Se observa un leve aumento en el exceso de oxígeno con el cual opera la unidad a partir del momento de implementación del modelo (05/2009). De hecho, cambió la forma operativa de seguir la eficiencia del horno, que anteriormente estaba basada en el seguimiento pura y exclusivamente del exceso de O₂. Esto supone que en la anterior operación habría

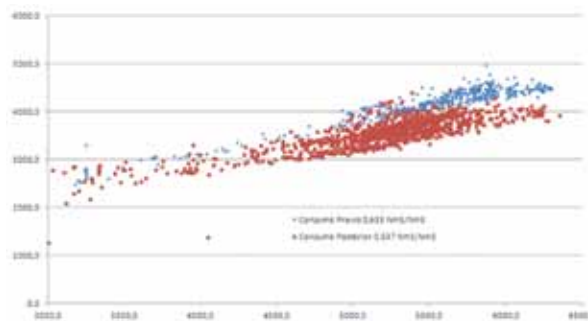


Figura 10. Comparación del consumo específico de combustible, antes y después de la implementación de la herramienta.

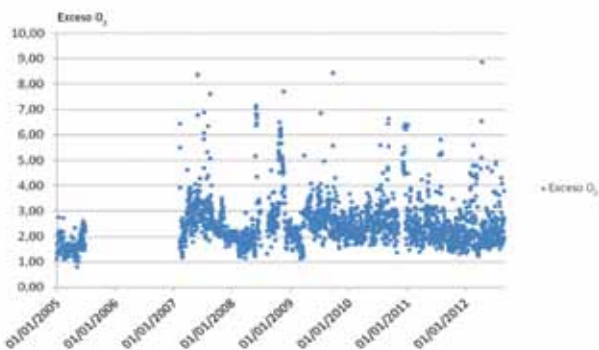


Figura 11. Seguimiento del exceso de O_2 en los gases de chimenea.

una combustión deficiente y generadora de CO. Ver figura 11: seguimiento del exceso de O_2 en los gases de chimenea.

- **Generación de vapor:** La energía de los productos efluentes del horno reactor se aprovecha para generar vapor de alta presión. La optimización de la unidad produjo una reducción en la exportación de este vapor. Este efecto se observó tempranamente, y se puso a consideración del complejo si era conveniente esto o no.

Dado que las calderas tenían capacidad ociosa y son más eficientes para la generación de vapor que la unidad de *Steam Reforming*, el complejo dio el visto bueno para continuar con la optimización. Ahora, la unidad produce 10 Tn/h menos de vapor de alta presión. Ver la figura 12: evolución de la exportación de vapor en la unidad. Una buena parte de la operación ineficiente del horno la disimulaba esta generación de vapor de alta presión.

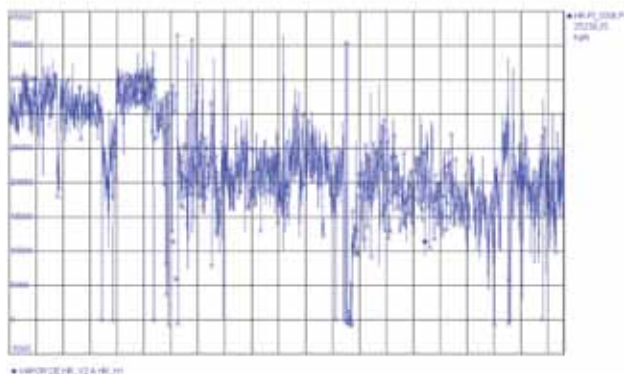
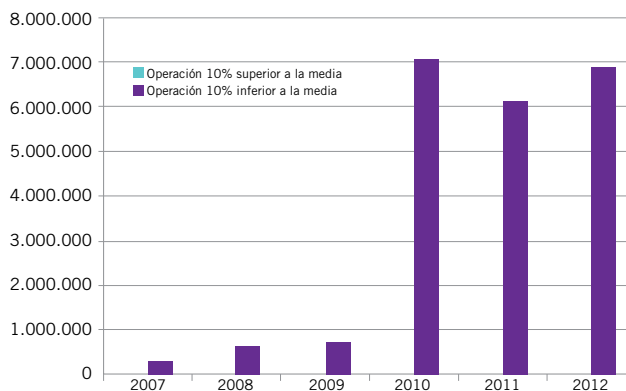


Figura 12. Evolución de la exportación de vapor en la unidad.

Cuantificación económica

Para intentar hacer una evaluación económica, se optó por cuantificar cuántos $Nm^3/año$ representaban todos los momentos en que se había operado consumiendo 10% más que la media histórica en cada uno de los 2 años anteriores a la implementación (bastante parecido a lo que se pretendía originalmente), versus cuántos $Nm^3/año$ representaban los momentos en los que se operó 10% por debajo de la media histórica.



	2007	2008	2009	2010	2011	2012*
Operación 10% superior a la media [$Nm^3/año$]	25.885	20.280	22.466	18.857	-	-
Operación 10% inferior a la media [$Nm^3/año$]	299.558	630.234	716.982	7.073.688	6.136.907	6.883.865

* Estimación a septiembre de 2012.

Hubo que pegar la tabla de valores para poder ver lo que se esperaba encontrar. Hay que ser sinceros. Nunca me había imaginado esto. Aquí también se puede ver que en los años anteriores a la implementación de esta herramienta existía una operación bastante errática.

También se puede ver que el primer modelo seleccionado estaba lejos de ser el óptimo, ya que eran más los tiempos en los que se operaba por debajo de la media estimada que aquellos en los que se operaba por encima de la media estimada.

Conclusiones

- El uso de herramientas de gestión indirectas, como el seguimiento de exceso de O_2 en los gases de chimenea, puede llevar a operaciones ineficientes.
- Los modelos estadísticos multivariantes mostraron ser una herramienta de mucha utilidad para hacer un modelo a medida del sistema.
- En el CILC se está gestando un nuevo paradigma para el seguimiento de la eficiencia *on line* de los hornos.
- El punto óptimo de operación no venía dado por el punto de mínimo exceso de O_2 de los libros, y eso explica por qué esta variable, en el primer modelo, tenía poco peso relativo en comparación con otras variables.
- El modelo permite cuantificar las ineficiencias para poder definir mejor las prioridades de los trabajos de mantenimiento.
- El modelo estadístico permitió conocer más en detalle el impacto de las distintas variables operativas de la unidad, haciendo posible de esta manera proponer opciones de operación que requieran menos energía.
- Si impongo objetivos de exceso de O_2 a los operadores, pero este mismo objetivo no es compartido por el sector de mantenimiento, tengo muchas probabilidades de lograr grandes ineficiencias, y las mismas se irán incrementando con el correr del tiempo.
- A altas cargas, el modelo estima un consumo mayor al que se requiere.
- A bajas cargas, el modelo estima menor consumo de gas que el que se puede lograr.

- De esto se puede inferir que el consumo de gas combustible no es una función lineal respecto a las variables seleccionadas.

Para esto, se debió inferir el caudal de combustible en función de las presiones aguas arriba, y debajo de la reguladora, y el porcentaje de apertura de la válvula reguladora de presión a los quemadores. ■

Claves del éxito

Podemos destacar como puntos clave para el éxito de esta nueva herramienta, los siguientes:

- Modelo matemáticamente sencillo, que es el fiel reflejo de la operación actual de horno.
- Cálculo *on-line* y visualización gráfica.
- Selección del momento oportuno para dar a conocer el modelo.
- El modelo no se impuso como muestra de mala operación. Se presentó como herramienta de ayuda para facilitar el trabajo.
- Se le dio libertad a los operadores de realizar distintos ajustes y ellos mismos podían cuantificar los resultados.

Agradecimientos

A todos los operadores de la unidad, quienes supieron aprovechar todo el potencial de esta herramienta: Carrizo, Héctor; Fava, Alejandro; Lucero, Jorge; Núñez, Agustín; Alegre, Juan; Ruarte, Claudio; Pentasuglia, Juan; Reynoso, Ricardo; Palacio, Omar; Pacheco, Eduardo; Morales, Alberto; Herrera, Daniel; Guardia, Ángel; Merlo, Mauricio; Vidal, Javier; Oro, Alberto; Juárez Maggini, Eduardo Carlos; Falbo, Guillermo; Mayorga, Rodolfo; Zabala, Gustavo; Giménez, Javier; Roco, Sergio; Santín, Cristian; Carrizo, César; Selada, Flavio; Galdeano, Javier.

Nuevas aplicaciones, nuevos desafíos

La extrapolación de este método de seguimiento de la eficiencia de los hornos plantea, para cada caso en especial, nuevos desafíos, como ser:

- Para la implementación en los hornos de Isomax de este método, apareció una nueva variable, que tenía un peso fundamental en la capacidad de estimación del caudal de gas combustible requerida para satisfacer las necesidades energéticas del proceso, que es “la variación del poder calorífico del gas combustible”. Para salvar esto, se requirió encontrar una forma de estimar esta variación del poder calorífico.
- Para la implementación en el horno del cracking catalítico, además de la variación del poder calorífico del gas, se detectó que el caudalímetro de gas combustible para bajos regímenes operativos presentaba valores erróneos.

Javier Olivier Cabezudo es Jefe de Planta de Isomax – Hidrógeno del complejo industrial de YPF S.A. en Luján de Cuyo, Mendoza.