

CONVERSIÓN DE CALDERAS DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO A GAS NATURAL

Nicola, Emiliano, Raízen Argentina

emiliano.nicola@raizen.com.ar

Sinopsis

En los últimos años ha cobrado notoria fuerza la concientización respecto al cambio climático, y la industria de refinación de petróleo no ha sido ajena a esto. Adoptar tecnologías y combustibles más limpios y trabajar sobre el uso eficiente de energía se ha convertido en uno de los principales desafíos dentro de las refinerías de Latinoamérica.

Yendo a la par de las necesidades del paradigma energético moderno, la Refinería de Buenos Aires ha convertido exitosamente dos de sus calderas de vapor a gas natural, originalmente diseñadas para quemar únicamente combustible líquido, y operadas con fuel oil hasta 2019. Las modificaciones realizadas sobre las calderas incluyeron cambios de quemadores, renovación de instrumentación de control y salvaguarda y un rediseño completo de la lógica de seguridad instrumentada en el sistema de salvaguarda.

El proyecto comenzó en 2013, impulsado por múltiples beneficios:

- Reducción de emisiones en chimenea (SOx, NOx, y PM10)
- Optimización energética por menor consumo de aire de combustión.
- Optimización económica de la generación de servicios esenciales de la refinería.

El proyecto fue desarrollado en conjunto entre el departamento de Ingeniería y de Tecnología, con soporte de los sectores de Control de Procesos, Salvaguarda y Mantenimiento. Se trabajó con soporte presencial del proveedor de quemadores en 2019 durante la conversión y puesta en marcha de la primera caldera. Para la puesta en servicio de la segunda caldera, se tuvieron que afrontar los desafíos que trajo consigo el contexto de pandemia, logrando finalizar la puesta en servicio en septiembre 2020.

En el presente trabajo se detallarán los principales cambios realizados, las implementaciones de sistemas de control para optimizar energéticamente la caldera, y los desafíos que debieron ser resueltos en las distintas etapas del desarrollo del proyecto.

Introducción

Dentro del parque de generación de servicios, la refinería Buenos Aires cuenta, entre otras unidades, con dos calderas medianas que producen vapor de alta presión. El vapor luego es utilizado en turbogeneradores para la producción de energía eléctrica, degradando el vapor de alta presión a media presión, que luego se distribuye como suministro a las distintas unidades de proceso. Estas calderas representan un 35% de la capacidad total de producción de vapor de alta presión.

Las calderas mencionadas son llamadas Caldera 10 y Caldera 11. Son de diseño Babcock&Wilcox. Cuentan con cuatro quemadores horizontales, paredes de tubos evaporadores, un banco de tubos sobrecalentador, un banco evaporador y un economizador. Ambas calderas son de circulación natural, y fueron diseñadas de manera idéntica.

El diseño original de las calderas contempló únicamente combustión de combustible líquido (asfalto y fuel oil). El panorama energético mundial y de la refinería al momento (década del 60) de la construcción de las calderas mencionadas empujaba hacia el uso de combustibles líquidos. A diferencia del gas natural, cuyo uso aún no había sido implementado en refinería, estaban fácilmente disponibles dentro de los productos del proceso de refinación, y demostró ser un buen combustible complementario al sistema de gas de refinería (también resultante de los procesos de refinación).

Los atractivos económicos de quemar combustibles líquidos para la generación de vapor se enfrentan con las contras operativas y ambientales. La reacción de combustión está dominada principalmente por el mezclado entre el combustible y el aire. “Si está mezclado, está quemado” es una frase célebre entre expertos de combustión, y alude a la importancia de lograr un buen contacto entre combustible y comburente. Resulta lógico, entonces, que por naturaleza los combustibles líquidos sean más difíciles de combustionar de manera completa y limpia, sin generación de subproductos indeseados. Un gas se mezcla de manera casi instantánea con otro. El líquido, por el contrario, sólo puede contactar el oxígeno en la superficie del volumen de líquido. La dificultad de contactar eficazmente el aire con el asfalto y el fuel oil derivan en una lista de requisitos que se deben cumplir para minimizar la generación de humo y monóxido de carbono.

Incluso logrando una combustión perfecta de los combustibles líquidos pesados, no es posible evitar la formación de contaminantes que son emitidos a la atmósfera por la chimenea. Los combustibles pesados como el fuel oil y el asfalto se destacan por su alto contenido de compuestos azufrados y nitrogenados, que durante el proceso de combustión derivan en mayores contenidos de óxidos de azufre (SOx) y óxidos de nitrógeno (NOx). No es sorpresivo que las emisiones de SOx, NOx, material particulado y CO en las chimeneas de calderas y hornos que emplean combustible líquido sean notoriamente más elevadas. El gas natural es considerado un combustible limpio en comparación al fuel oil, ya que no tiene contaminantes que generen SOx, el mezclado en el quemador es muy eficiente y no generan material particulado. La formación de NOx con gas natural se presenta por efectos térmicos dentro de la llama, pero se han encontrado soluciones para mitigar la formación con los denominados quemadores Low-NOx, que hoy son de común uso en sistemas de combustión.

Otra desventaja del uso de combustible líquido en sistemas de combustión es la eficiencia. Quizás el impacto ambiental, en este caso, no sea tan visible como la presencia de contaminantes en la chimenea. La dificultad de mezclado entre el combustible líquido y el aire resulta en una combustión más deficiente, y para lograr un buen quemado, los quemadores de fuel oil y asfalto se operan con más cantidad de aire que los quemadores a gas. Es normal que los diseños de quemadores a gas especifiquen un 10% de exceso de aire para asegurar un buen quemado, mientras que, para combustibles líquidos pesados, es común ver especificaciones de 20-25% de exceso de aire. El exceso de aire se define como el aire adicional por sobre la cantidad estequiométrica necesaria que se suministra al quemador. Esto representa una masa adicional de aire que no contribuye a la estequiometría de la reacción de combustión, y su único rol es asegurar que el combustible encuentre rápidamente oxígeno para lograr una buena combustión. Esta masa de aire se calienta junto al resto de los gases de combustión, y parte del calor de combustión se pierde por la chimenea, haciendo que todo el proceso sea menos eficiente energéticamente.

Estas limitaciones mencionadas, junto con el beneficio económico que trae aparejado el uso de gas natural en lugar de fuel oil, impulsaron al desarrollo de un proyecto para la renovación del sistema de combustión de Caldera 10 y Caldera 11, para que en las calderas generen vapor con gas natural.

Desarrollo

El upgrade al sistema de combustión de las calderas consistió en varios frentes de trabajo necesarios para operarlas de manera eficiente y segura, utilizando ahora combustible gaseoso. A continuación, se comentarán los detalles más relevantes de cada modificación.

1) Renovación de los quemadores:

Una de las premisas del proyecto fue mejorar la eficiencia de la caldera, manteniendo la flexibilidad en el parque de generación de servicios de la refinería. Con esto en mente, se especificaron los quemadores nuevos con capacidad de quemar gas natural, fuel oil, o una mezcla dual de ambos combustibles en simultáneo. De esta manera, se puede lograr operar las calderas la mayor parte del tiempo con gas natural, pero tener la flexibilidad de quemar 100% fuel oil o una mezcla de combustibles en caso de restricciones en la disponibilidad de gas natural en la refinería, especialmente durante los meses de invierno.

Los quemadores nuevos son de tecnología Low-NOx, para cumplir con los límites legales de emisiones en chimeneas de calderas de producción de vapor. Esta tecnología se caracteriza por dividir el aire en tres “etapas” (*stages*). Donde un quemador tradicional tiene dos ingresos de aire (primario y secundario), los quemadores Low-NOx distribuyen el aire en un tercer lugar de ingreso (generalmente por el exterior de la llama) para disminuir la temperatura media de llama y desfavorecer las reacciones térmicas que derivan en NOx. Resulta fundamental la correcta instalación de los quemadores para su funcionamiento. Se debió poner especial atención en respetar las distancias y medidas especificadas en el plano constructivo. Una desventaja de los quemadores Low-NOx que no sufren los quemadores tradicionales es la pérdida de robustez. Los desvíos en las distancias constructivas al montar los quemadores pueden tener un impacto en la estabilidad de la llama y la operación correcta del quemador. Para asegurar el correcto montaje, se armó un protocolo de inspección de los quemadores, siguiendo los lineamientos del proveedor. En el 2019, se encaró la revisión de los quemadores de Caldera 11, contando con la asistencia técnica del fabricante de los quemadores. Esta experiencia resultó muy valiosa de cara al 2020, cuando se tomó la Caldera 10 para realizar las modificaciones. En mayo 2020 se finalizó el montaje de los quemadores nuevos de Caldera 10. Ante la imposibilidad de asistencia de personal técnico del fabricante debido al contexto de pandemia que se atravesaba, se desarrolló en RBA un protocolo de inspección de los quemadores, colaborando el departamento de Tecnología con el departamento de Proyectos encargados de la ejecución de las tareas mecánicas. El protocolo de inspección de quemador permitió al supervisor mecánico realizar una primera inspección de calidad luego del montaje, contribuyendo a optimizar la disponibilidad limitada de personal en refinería.

Uno de los principales desafíos afrontados durante la puesta en marcha y calibración de los quemadores fue el largo de llama. Al exigir un exceso de aire bajo en la caldera, la llama de los quemadores se tornaba notoriamente más larga. Observando por las mirillas, se detectó que por momentos el largo de llama con bajo exceso de aire podía tener impacto sobre los tubos. Esta condición, sostenida en el tiempo, puede acortar significativamente la vida útil de los tubos de la caldera, e incluso provocar una rotura temprana de algún tubo. En la operación de la caldera, la mejor manera de acortar el largo de llama de un quemador es operándolo con mayor aire en exceso. Esto acorta notablemente el largo de llama, y resultó práctico encontrar el punto operativo óptimo para operar la caldera sin impacto de llama en los tubos. Para automatizar la solución, se tuvo en cuenta el fenómeno en la confección de una curva de oxígeno controlada por el sistema de control de la caldera. Cuando el caudal de gas pedido a la caldera aumenta, haciendo que la llama sea más larga, el sistema de control automáticamente pedirá un exceso de aire levemente mayor. En caso contrario, con la caldera a menor carga, el sistema de control busca optimizar el aire de combustión, y con esto maximizar eficiencia de la caldera.

Esta curva de oxígeno automática se calibró para los tres posibles combustibles que puede quemar la caldera: gas natural, fuel oil, o ambos en simultáneo.

2) Montaje de pilotos continuos y detectores de llama.

Previo a la modificación de los quemadores en las calderas, no se contaba con pilotos continuos. Las calderas se encendían con un piloto, pero este luego se apagaba, y los quemadores permanecían protegidos por dos detectores de llama, en lógica 2oo2 (dos de dos). Con el upgrade a gas natural, se montó un piloto continuo en cada quemador. Cada piloto cuenta con un ignitor propio, que es accionando de manera remota desde la sala de control. El panelista puede encender y apagar los pilotos de manera 100% remota, una vez cumplido el barrido del hogar y la prueba de estanqueidad de las válvulas de gas.

Los pilotos operan con gas natural, tomando el combustible de la misma línea que alimenta gas a los quemadores. Una autorreguladora local controla la presión de suministro de gas a los pilotos. El sistema de pilotos cuenta con una válvula de corte propia, independiente a la del quemador. De esta manera, los cortes de las calderas se pudieron configurar con acciones escalonadas, llevando la caldera a una condición segura sin necesidad de apagar por completo el fuego en el hogar. A modo de ejemplo, un corte por baja presión de suministro de gas a los quemadores cerrará las válvulas de corte de suministro de gas natural a los quemadores, pero dejará los pilotos encendidos.

Durante la puesta en marcha de la caldera, se realizaron pruebas de robustez en los pilotos. El objetivo de estos ensayos fue probar la estabilidad de llama de los pilotos ante cambios en las condiciones de aire de combustión. Empezando por el mínimo caudal de aire permitido por lógica, se aumentaron las vueltas del ventilador de tiro forzado hasta máxima capacidad, observando los pilotos en campo y registrando su comportamiento. Las conclusiones más relevantes son las siguientes:

- A. Los pilotos operan de manera satisfactoria bajo todo el rango de caudal de aire de combustión.
- B. A mayores caudales de aire, las llamas de los pilotos se acortan significativamente, lo cual es de esperar. Cerca del máximo caudal de aire de combustión, la llama se acorta mucho y, si bien nunca se apagó, se observó un cierto grado de inestabilidad.
- C. La presión de suministro de gas a los pilotos resultó determinante para la estabilidad de los pilotos. Operarlos con una presión menor a la indicada por el proveedor desmejoró apreciablemente la estabilidad de los pilotos, tornando la llama débil y amarilla.

Para complementar la seguridad de los quemadores ante una pérdida de llama, se mantuvo el arreglo de detectores de llama ópticos en arreglo 2oo2.

3) Implementación de una nueva línea de gas natural dedicada a las calderas, una estación reductora, y un KOD nuevo.

La estación reductora de gas natural se montó con dos líneas en paralelo, y suministrando a ambas calderas por el mismo troncal. Ambas cuentan con una autorreguladora que fija el suministro de gas natural a las dos calderas, para que luego la demanda de gas de cada una regule de manera independiente el caudal de gas a quemadores. La estación también cuenta con una válvula de corte de reposición manual, para cortar el suministro de gas natural a las calderas en caso de falla de las autorreguladoras de presión. Este corte es por alta presión aguas abajo de la estación reductora.

4) Tendido de todas las cañerías nuevas de gas natural a cada caldera, incluyendo instrumentación y válvulas.

- 5) *Desarrollo de una nueva lógica de salvaguarda instrumentada, incluyendo todas las protecciones necesarias para mitigar los riesgos asociados a la combustión de combustibles gaseoso.*

El desarrollo de la lógica de control y salvaguarda de una caldera constituye un sistema complejo e interconectado entre muchas variables, y fue tal vez el mayor desafío durante las etapas de desarrollo, comisionado y puesta en servicio de las calderas. La implementación de las lógicas de control y salvaguarda de las calderas consistió en tres etapas:

- A. Una primera etapa conceptual y de diseño de la lógica, usando como base los estándares de la empresa preparados para calderas de gas. Durante esta etapa, fue importante la interacción conjunta entre varios departamentos, incluyendo Operaciones, para obtener un resultado que cumpla con los requisitos de seguridad de la caldera y que permita una operación prolija y remota de la caldera.
- B. Una segunda etapa una vez finalizada la programación de la lógica. Se llevó a cabo el *Factory Acceptance Test* (FAT) dentro de refinería, utilizando una simulación de dinámica de la caldera y un sistema muleto de salvaguarda y control. Así, fue posible realizar todas las pruebas necesarias de la nueva lógica en un sistema desconectado de la caldera y sin fuego. La simulación dinámica permitió simular condiciones potencialmente inseguras en la caldera y verificar que la lógica respondiera correctamente ante estas instancias, sin incurrir en un riesgo real que implicaría una prueba con fuego en campo. La respuesta de las variables simuladas permitió probar lazos de control y sus acciones ante perturbaciones en el sistema, especialmente el sistema de control de combustión, que tiene múltiple lazos interactuando constantemente entre sí.
- C. La tercera etapa fue un *Site Acceptance Test* (SAT), en esta oportunidad sí en campo y con la caldera comisionada. La primera parte del SAT abarcó la prueba de todos los lazos de salvaguarda, simulando condiciones de corte con la caldera aún apagada y verificando en campo el correcto accionamiento de válvulas y posicionadores. Una vez probada la salvaguarda instrumentada y con la caldera lista para marchar, se procedió a la calibración de los quemadores nuevos, detallada a continuación.

- 6) *Calibración de los quemadores nuevos y puesta a punto de la caldera.*

La puesta en servicio de la caldera incluyó dos semanas de pruebas con fuego, durante las cuales se realizaron los siguientes ajustes:

NOTA: Los gráficos mostrados corresponden a la operación con gas natural, pero estos mismos gráficos se confeccionaron también para la caldera operando con fuel oil y con una mezcla de ambos combustibles.

- A. Pruebas de máximo caudal de aire, con la caldera apagada y con la caldera en caliente.

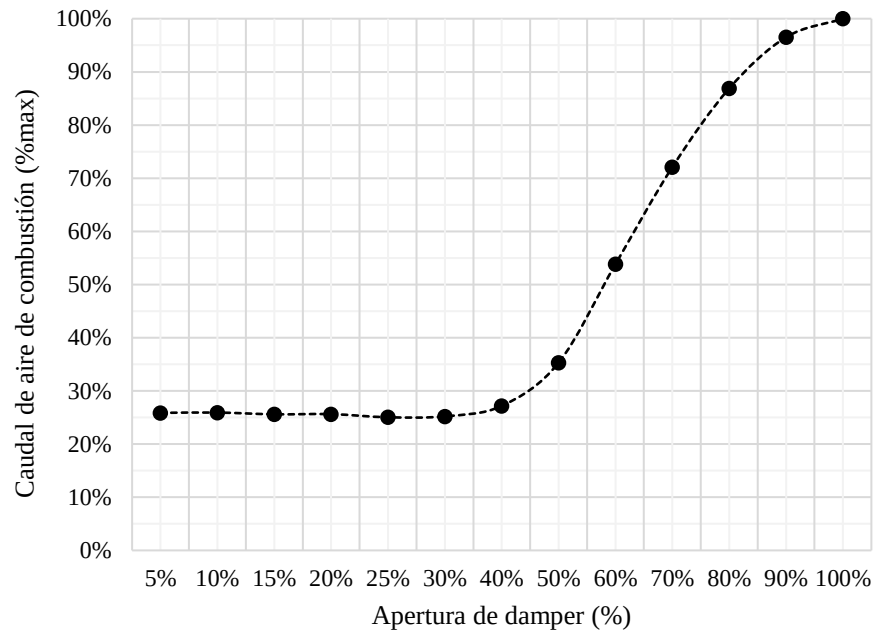


FIG. 1 CURVA DE DESEMPEÑO DEL VENTILADOR DE AIRE FORZADO CON LA CALDERA APAGADA, SEGÚN LA APERTURA DEL DAMPER CONTROLADOR. EL CAUDAL DE AIRE SE MUESTRA EN % RESPECTO AL MÁXIMO ALCANZADO.

Por el diseño propio del damper del ventilador de tiro forzado, no se aprecia un cambio en el caudal de aire de combustión a la caldera hasta lograr un 40% de apertura.

- B. Registro de caída de presión en los quemadores (lado aire) para distintos caudales de aire de combustión.

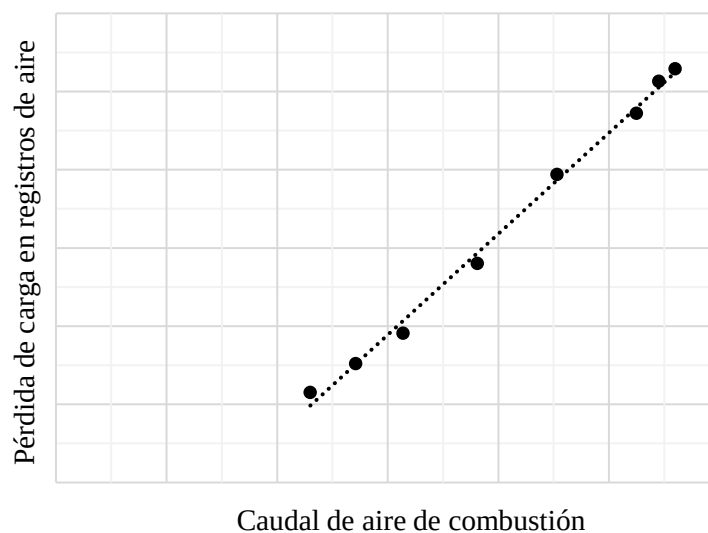


FIG. 2 CAÍDA DE PRESIÓN EN REGISTROS DE AIRE, MEDIDOS A DISTINTOS CAUDALES DE AIRE DE COMBUSTIÓN.

- C. Ajuste de mínimo stop de gas natural y fuel oil. Esto incluye el mínimo stop mecánico de las controladoras de combustibles, ajustado para el encendido

correcto del primer quemador, y una curva de mínimo stop dinámico, considerando el número de quemadores encendidos, para que el sistema de control pueda mantener fuego mínimo con llama estable en todos los escenarios y sin importar cuantos quemadores hay encendidos en la caldera.

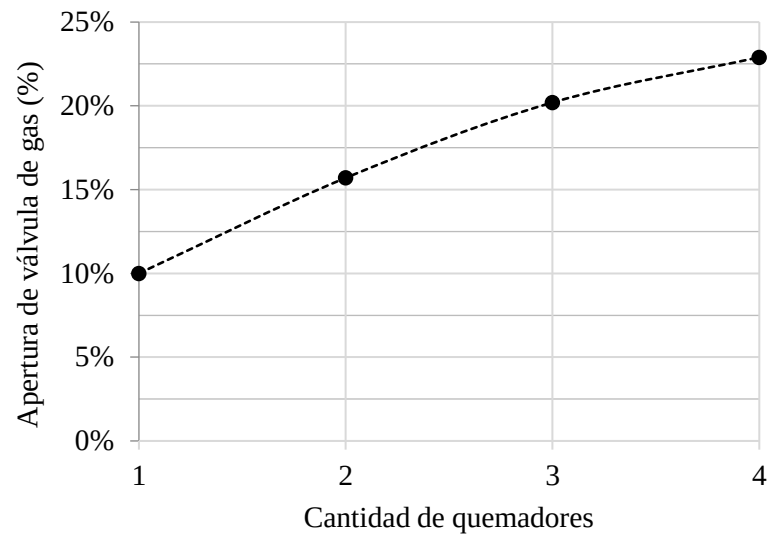


FIG. 3 CONFIGURACIÓN PROGRAMADA EN EL SISTEMA DE CONTROL PARA LA POSICIÓN DE MÍNIMO FUEGO, SEGÚN CUÁNTOS QUEMADORES HAY ENCENDIDOS EN LA CALDERA.

- D. Registro de curva de quemador. Se tomó nota de la relación presión vs. caudal de los quemadores nuevos, en condición limpia, para tener de referencia en futuro.

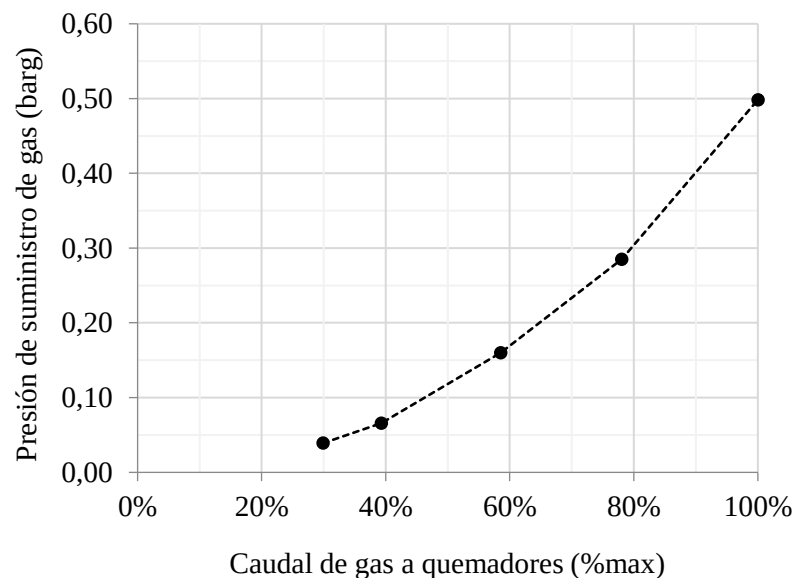


FIG. 4 CURVA DE LOS QUEMADORES NUEVOS (TODOS LOS QUEMADORES ENCENDIDOS). LA CURVA FUE REALIZADA REGISTRANDO DATOS MEDIDOS EN PLANTA Y LUEGO COMPARADA CON LA CURVA ESPECIFICADA POR EL PROVEEDOR DE LOS QUEMADORES. EL CAUDAL DE GAS SE MUESTRA EN % RESPECTO AL MÁXIMO ALCANZADO.

- E. Monitoreo de la operación de la caldera, empezando con mínima carga y aumentando gradualmente el suministro de gas a quemadores, hasta alcanzar la carga máxima de la caldera.

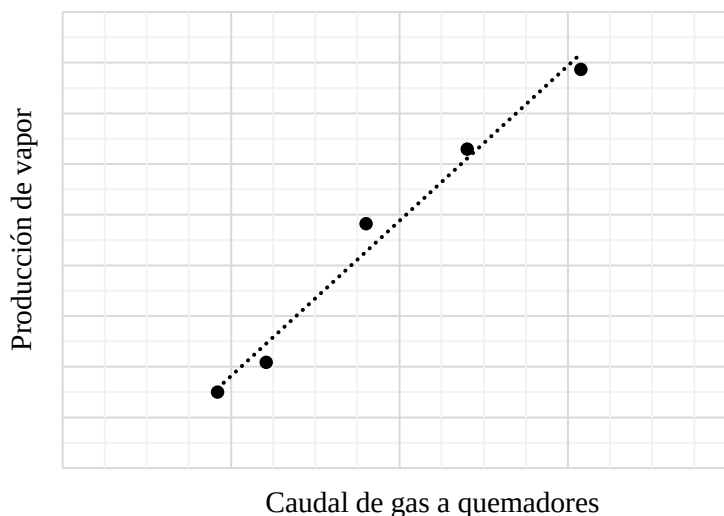


FIG. 5 REGISTRO DE PRODUCCIÓN DE VAPOR EN FUNCIÓN DE LA CANTIDAD DE GAS QUEMADA. SE REGISTRARON LOS VALORES OPERATIVOS CON LA CALDERA RECIENTEMENTE PUESTA EN SERVICIO.

- F. Configuración del control de oxígeno en chimenea. Como se comentó previamente, la caldera se configuró para operar con todos sus lazos de control en automático, incluyendo el controlador de oxígeno en exceso, cuya medición se encuentra en el techo de la caldera, buscando controlar el largo de llamas y optimizar eficiencia al mismo tiempo.

A máxima carga, la caldera se encuentra con un límite en el largo de las llamas, como ya se mencionó. La manera de achicar las llamas es usando más aire de combustión, es decir, mayor %O₂ en exceso. Entonces, cuando la caldera está quemando gas, la curva solicitará un set point de %O₂ más elevado, priorizando la integridad de la caldera.

A menor carga, la caldera no tiene límite de integridad que la afecte, y puede buscar optimizar el aire de combustión para lograr la mejor eficiencia posible. Entonces, el set point remoto del controlador de O₂ será más bajo a medida que la carga de la caldera disminuye.

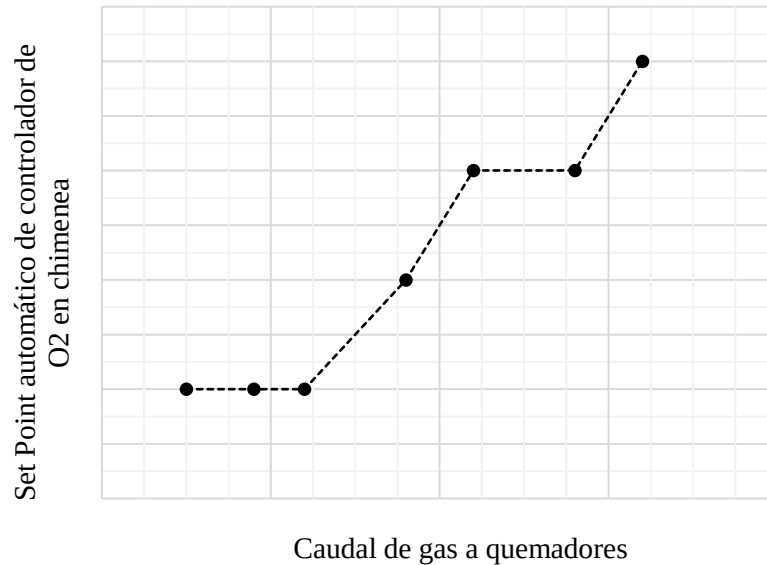


FIG. 6 CURVA DE OXÍGENO CONFIGURADA EN EL SISTEMA DE CONTROL. UN BLOQUE DE CONTROL RECIBIRÁ EL SET POINT ESPECIFICADO POR ESTA CURVA SEGÚN EL CAUDAL DE GAS A QUEMADORES MEDIDO.

Conclusiones

La puesta en marcha de las calderas luego de la conversión a 100% gas natural fue exitosa en aspectos de seguridad, eficiencia y medioambiente.

Seguridad

Se han operado las calderas sin incidentes de seguridad de procesos luego de la conversión. No se han registrado condiciones inseguras durante encendidos ni paradas de emergencia. La salvaguarda ha respondido satisfactoriamente ante algún upset de proceso que requiera accionamiento de una protección instrumentada.

Operación y eficiencia

Las calderas han operado casi por completo con gas natural desde la implementación del proyecto. La facilidad de encendido remoto de las calderas le ha brindado al parque de generación de vapor una mayor flexibilidad, pudiendo operar con menos calderas en servicio, menor reserva de vapor en caliente (margen para subir producción en las calderas que están encendidas). Todo esto contribuye favorablemente a la eficiencia en la generación de vapor.

Medioambiente y emisiones

Medición de emisiones en chimenea. Se realizaron mediciones de CO, NOx y SOx en chimenea, quemando 100% gas natural y 100% Fuel Oil. Se observa una mejora muy significativa en la reducción de emisiones de contaminantes en la chimenea.

CO: Se logró una reducción del 43% quemando gas natural en vez de fuel oil.

NOx: Se logró una reducción del 67% quemando gas natural en vez de fuel oil.

SOx: Se logró una reducción del 100%. No se detectó SOx en las mediciones mientras la caldera quemó 100% gas natural.

CV:

Emiliano Nicola

Ingeniero Químico, Instituto Tecnológico Buenos Aires (ITBA)

Tecnólogo de FCCU & HF Alky – Refinería Buenos Aires, Raízen Argentina.

Trayectoria:

- Tecnólogo de Combustión y Energía – Shell CAPSA/Raízen Argentina
- Tecnólogo de Seguridad de Procesos – Shell CAPSA/Raízen Argentina