



- Barrido de purga
- Tiempo de validez de at
- Habilitación para encend
- Habilitación para abrir T
- Reset de mínimo fuego
- Paro de emergencia local
- Eliminación de OOS por

# Implementación de mejoras para minimizar riesgos en hornos de procesos

Por *Georgina Giacomo* y *Emiliano Nicola* (Shell CAPSA)

La operación de hornos en unidades de procesos es un área de riesgo identificada en la industria. Existen numerosos registros de incidentes de seguridad en la industria de refinación asociados a temas de diseño, operación y mantenimiento de los hornos, cuyos aprendizajes son continuamente incorporados como mejoras en los criterios de diseño de equipos, instalaciones, estrategias de control y salvaguarda y procedimientos operativos. Desde 2013, en la Refinería de Buenos Aires se está desarrollando e implementado un proyecto de mejoras de seguridad de procesos para hornos, con el fin de incorporar los últimos estándares y mejores prácticas en esta área.

## Introducción

### Los hornos en la industria del petróleo

En un gran porcentaje de plantas industriales y, en particular, en la industria de refinación del petróleo, abundan los procesos que requieren alcanzar elevadas temperaturas operativas, o en los cuales se requiere que gran cantidad de calor sea entregado al proceso. Los equipos más utilizados en estos servicios suelen ser los hornos, que cumplen la función al generar energía a partir de la combustión. Los combustibles empleados pueden ser tanto líquidos como gaseosos. Esa energía es entregada, en gran parte, por radiación directa de la llama hacia tubos, dentro de los cuales circula el fluido de proceso.

Los hornos operan con fuego abierto. La combustión se desarrolla en los quemadores, la llama se extiende en el hogar para entregar calor al proceso por radiación. Este modo operativo exigente trae numerosos escenarios, que puede dar lugar a la ocurrencia de incidentes severos. Los hornos, si bien son equipos necesarios para muchos procesos en la refinación de crudo, representan un importante riesgo tanto para las personas como para los activos de una empresa, por eso deben ser cuidadosamente estudiados y analizados. Los riesgos en la operación de los hornos, como se verá más adelante, pueden tener consecuencias muy severas y, por ese motivo, deben ser gestionados meticulosamente hasta lograr operar con un nivel aceptable de riesgo.

### Gestión de riesgos en Refinería Buenos Aires

La metodología adoptada en Refinería Buenos Aires

para la gestión de riesgos es conocida como *bow tie*, *diagrama de moño* o *línea de amenaza*. Para los peligros identificados en la refinería, se desarrollan diferentes líneas de amenaza. Esta metodología consiste en evaluar distintos escenarios que puedan desembocar en un evento no deseado (generalmente una pérdida de contención de producto). Este evento, si no logra ser correctamente mitigado, puede traer consecuencias sobre las personas, los activos, el medio ambiente o la reputación. Al reconocer los distintos eventos iniciales que desatan una línea de amenaza, se pueden identificar barreras de control y de recuperación para evitar que ese evento inicial provoque las consecuencias mencionadas.

Con la intención de cuantificar el riesgo y reflejar en números el análisis realizado con las líneas de amenaza, se hace uso de la herramienta LOPA (*Layers of Protection Analysis*). Es una herramienta semi-cuantitativa, que le asigna una frecuencia a cada evento inicial, y una probabilidad de falla a cada barrera. Con esto, se puede obtener un número que es útil para reflejar el nivel de riesgo residual, que se obtiene con las barreras con las que se cuenta en una determinada línea de amenaza, y qué barreras son las más confiables al ser demandadas.

Si bien las líneas de amenaza son desarrolladas para todos los peligros identificados en Refinería Buenos Aires, se han divulgado e implementado las llamadas *Model Bow Ties* (MBT) para gestionar de manera consistente los riesgos más conocidos en la industria de la refinación. Entre las *Model Bow Ties* que más impacto han tenido a la hora de gestionar riesgos en la refinería, se destaca la *Model Bow Tie* de hornos: *Fired Process Heater Model Bow Tie*.



## MBT de hornos: peligros, amenazas y consecuencias

Los peligros identificados en la operación de los hornos se pueden dividir en dos: fluido de procesos y combustible. En su gran mayoría, los fluidos de procesos calentados en los hornos en la industria de gas y petróleo son hidrocarburos, desde cortes livianos, como nafta, hasta cortes pesados, como residuos de vacío. Por su lado, el combustible suele ser gas natural (GN), fuel gas (FG-gas de refinería) o fuel oil (FO-combustible líquido). Ambas clases de productos han sido identificados como peligros severos, es decir, que han provocado en la industria consecuencias severas en activos y/o personas.

Los eventos no deseados identificados en la MBT de hornos son dos: pérdida en los tubos de proceso y presencia de combustible sin quemar en el hogar del horno (ambos eventos se refieren a pérdidas de contención). En la MBT se analizan con detalle un total de nueve amenazas. Entre las más destacadas, se citan las siguientes:

- Pérdida de contención por sobrecalentamiento de tubos.
- Presencia de combustible sin quemar previo a la puesta en marcha del horno.
- Presencia de combustible sin quemar, debido a la dificultad del encendido del quemador.
- Pérdida de llama por baja o alta presión de combustible.
- Pérdida de llama por falta de aire (tiro natural o forzado).

Son tres las consecuencias posibles que dan origen a la MBT de hornos: explosión, fuego y fugas de hidrocarburos sin quemar. Estas consecuencias están basadas en

eventos que han ocurrido en las industrias de refinación y petroquímica. A partir de estos incidentes, se han definido claramente las peores consecuencias creíbles que traen aparejadas los riesgos en la operación de los hornos. Los incidentes más destacados han generado daños severos en los tubos del horno y explosiones dentro del hogar del horno, ambos causando largos tiempos de parada de plantas y, en algunos casos, lesiones graves a personas y hasta fatalidades.<sup>1</sup>

Una revisión de los incidentes más destacados de los últimos 50 años en la industria de Oil & Gas permite observar que un 70% de las explosiones en los hornos y alrededor de un 90% de las fatalidades registradas se atribuyen a las secuencias de encendido de los quemadores de los hornos.<sup>2</sup> Uno de los principales temas tratados en este proyecto incluyó importantes mejoras en las secuencias de encendido de varios hornos de la refinería, como se detallará más adelante.

## MBT de hornos: eventos iniciales y barreras propuestas

Para cada línea de amenaza, la MBT propone diferentes eventos que pueden dar inicio a la secuencia propuesta en la amenaza (en otras palabras, ocurrencias que llevan al evento no deseado, y este a las consecuencias posibles). A su vez, enumera una serie de barreras típicas que son implementadas en hornos para mitigar el riesgo analizado. Las barreras en cuestión pueden ser barreras de control (para evitar la pérdida de contención) o barreras de recuperación (para mitigar las consecuencias una vez ocurrida la pérdida de contención). No es requisito que todas las barreras sean implementadas, y es aquí donde es importante definir con claridad el criterio de tolerabilidad y lo que se conoce en la industria como nivel de riesgo ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*).

Para cada horno analizado, se ha definido un criterio para el cual se considera que el riesgo ha sido gestionado a un nivel aceptable mediante la implementación de una suficiente cantidad de barreras. En términos generales, este criterio de tolerabilidad es adoptado en base a prácticas recomendadas en la industria química. Sin embargo, haber gestionado el riesgo a un nivel tolerable no implica que no deban implementarse nuevas barreras. A la hora de gestionar riesgos, en Refinería Buenos Aires se busca llegar a un nivel de riesgo que sea ALARP. En pocas palabras, se considera que se ha llegado a un nivel de riesgo ALARP cuando el costo de agregar una nueva barrera es groseramente desproporcional a la reducción en el nivel de riesgo que dicha barrera logra. Por este motivo, si bien los riesgos en la mayoría de los hornos se encontraban tolerables a la hora de implementar la MBT de Hornos en Refinería Buenos Aires, se decidió incluir en el proyecto nuevas barreras para lograr que el riesgo sea ALARP.

Sobre la base de estas premisas en Refinería Buenos Aires se ha desarrollado un análisis de riesgo exhaustivo para todos los hornos de las distintas unidades de proceso. Utilizando la MBT como guía, se llevó adelante un relevamiento preliminar sobre el estado previo de los hornos. Este relevamiento incluyó la identificación de las barreras que estaban presentes en cada horno para mitigar las distintas amenazas, y las condiciones que debían cumplir esas barreras para ser consideradas válidas en toda circunstancia



## Desarrollo e implementación

### Primer relevamiento de información

El relevamiento previo al estudio incluyó la identificación de las instalaciones, tanto de hardware (instrumentación, salvaguarda y piping, entre otros) como también barreras de las llamadas humanas, dentro de las cuales están incluidos los procedimientos operativos, las secuencias de marcha y las acciones de panelistas y operadores ante alarmas y emergencias.

El alcance del estudio abarcó 23 hornos de la refinería, dentro de los cuales se destacan los siguientes:

- Hornos de las unidades de destilación atmosférica y de vacío (4).
- Hornos de las unidades de craqueo térmico - *Coker* y *Visbreaking* (4).
- Horno de la unidad de HF Alky (1).
- Hornos de la unidad de reformado catalítico - *Platforming* (5).
- Hornos de la unidad de hidroprocesos – HT de Nafta (1); GOHDS (1) y KeroHDS (1).
- Hornos de las unidades de solventes – *Special Boiling Point* y *Redistillation Unit* (4).
- Hornos de las unidades de lubricantes (2).

El relevamiento consistió en un trabajo interdisciplinario entre el personal de operaciones y tecnología, con soporte exterior de especialistas de Shell Global Solutions. Tres características fueron las primeras en ser identificadas para determinar qué amenaza aplica a cada horno. Así, por ejemplo, para los hornos de tiro natural no se evaluó la amenaza de soplado de llama por exceso de aire de tiro forzado.

- Caracterización general del horno en relación con la unidad a la que pertenece.
- Tipo de tiraje.
- Naturaleza de combustible utilizado (gas, líquido, o ambos) y de los quemadores.

Una vez identificados y agrupados los hornos en base a estas clasificaciones, se relevaron la presencia de los elementos necesarios para validar las barreras propuestas por la MBT en cada línea de amenaza, y el estado en que se encontraban, junto con el plan de mantenimiento para dichos elementos. El listado es extenso, abarcando más de 150 preguntas claves para detectar gaps en las barreras, según el tipo de horno. En el cuadro 1, a modo de ejemplo, se enumeran algunas de las barreras que se estudiaron en detalle.

### Hallazgos encontrados y alcance del proyecto

Terminado el relevamiento preliminar, se evaluaron las amenazas aplicables a los distintos hornos. Los gaps y puntos de mejora identificados haciendo uso de esta herramienta fueron la base para la elaboración de un plan de implementación a largo plazo, que se conoció como el proyecto “HEMP - Model Bow Tie en Hornos”. La propuesta se inició con una base de diseño preliminar, en las cuales se incluyeron los gaps por cubrir en cada horno. Fue iniciada en conjunto por Tecnología y Seguridad de Procesos, quienes determinaron los lineamientos y el alcance preliminar. La ingeniería de detalle fue desarrollada por el departamento de Proyectos, con el soporte continuo de Operaciones y Tecnología.

Salvaguarda - lado procesos	<p>Se instala un interruptor de disparo manual local y remoto que inicia el cierre de todo el combustible y procesa el suministro de gas residual al calentador.</p> <p>Los calentadores que tienen controles de flujo de paso individuales tienen flujo de paso bajo, lo que inicia el cierre del combustible principal y suministro de gas residual.</p> <p>Los disparos de flujo bajo están activos para todas las condiciones de operación, incluido el arranque.</p> <p>Se hace una excepción para los modos de de-cocking de vapor de aire.</p>
Puesta en marcha	<p>El procedimiento de puesta en marcha del calentador incluye un requisito para purgar la caja de fuego con vapor antes de iniciar la primera llama en el calentador.</p> <p>Se verifica la firmeza de las válvulas del quemador. Las llamas principales del quemador se encienden mediante un sistema de encendido comprobado. Esto puede incluir pilotos continuos, pilotos interrumpidos o encendedores retráctiles de alta energía, todos los cuales están dimensionados y diseñados apropiadamente para la aplicación.</p>
salvaguarda - lado combustible	<p>El calentador está equipado con detectores de llama que cortan el suministro de combustible si no se detecta una llama principal. El calentador está equipado con control de restricción de <math>O_2</math> (es decir, el <math>O_2</math> que rige el control de carga en caso de que <math>O_2</math> esté demasiado bajo). Los detectores de llama no están equipados con interruptores de anulación de mantenimiento que pueden anular la acción de disparo. El calentador está equipado con un disparo de baja presión de combustible (disparando completamente el gas combustible).</p>

Cuadro 1. Barreras estudiadas.

Los gaps encontrados fueron los siguientes:

- Cambio de combustible en los pilotos/chisperos. Se pasa de FG a GN, ya que este último es un combustible más limpio. El piloto puede actuar como salvaguarda, en caso de no contar con detectores de llama, por lo cual es obligatorio tener el combustible lo más limpio posible, GN en nuestro caso, para evitar su ensuciamiento.
- Los *manifold* de habilitación de vapor de sofocación deben estar ubicados a 15 m o más del horno. La mayoría de los *manifold* de vapor se encontraban muy próximos al horno, con lo cual son inoperables en caso de un incendio.
- Los detectores de llama deben contemplar tanto a los combustibles líquidos como a los gaseosos. En el caso del FG, luego de las TSOV (*tight shut off valves*) y la controladora se tienen válvulas manuales de cuarto de giro, aptas para poseer proximeters de apertura. Al saber si la válvula manual se encuentra abierta o cerrada, se puede configurar una lógica clara de encendido y comienzo de detección de los detectores de llama. En el caso de los combustibles líquidos es un poco más complicado, ya que las válvulas manuales no admiten proximeters. Para ello se diseña una lógica que identifique si están ambos combustibles conviviendo o no para tomar una acción diferente según del combustible habilitado.
- Encendido de los hornos con FG. Las lógicas de salvaguarda se modifican de manera que los hornos se enciendan siempre con FG y de forma segura. Una vez encendido el horno con FG se puede pasar cualquiera de los quemadores individualmente a FO.
- Sistema de sofocación con vapor de emergencias independiente para cada horno. En las plantas que contaban con más de un horno existía un sistema de sofocación general. Ahora se busca tener sistemas individuales de sofocación en caso de incendio que, además, sean independientes del vapor utilizado para el barrido previo al encendido.
- Analizadores de CO y  $O_2$  para los gases de combustión en todos los hornos, y ubicados en la zona adecuada, que suele ser en el pasaje de la zona radiante a la convectora o en la chimenea.
- Dos detectores de llama por quemador y/o detector de llama en el piloto continuo. El *trip* ocurre con 2002 detectores que no vean llama.
- Eliminación de los MOS (*maintenance override switch*) sobre los detectores de llama. Un MOS es un permisivo que *bypas*sea a la salvaguarda mientras esté activo. El MOS de los detectores de llama es eliminado, ya que su mantenimiento se puede hacer perfectamente con el horno en marcha teniendo *trip* con falla 2002. De esta manera queda asegurada la visibilidad de la llama (salvaguarda activa) en todo momento.
- Eliminación de los OOS (*operation override switch*) de los cortes por bajo caudal de alimentación de proceso. El OOS cumple la misma función de un MOS, pero es empleado en situaciones operativas determinadas. Este OOS es eliminado para evitar que se encienda el horno con caudal de proceso más bajo del mínimo y así proteger a los serpentines de sobrecalentamiento. Detector de llama o piloto de uso continuo con GN como salvaguarda. Si se elige usar detectores de llama, deben ser dos por quemador. Si se opta por los pilotos continuos, estos deben quemar GN y tener corte por muy alta presión y muy baja presión de gas a pilotos.
- Las TSOVs deben tener proximeters para chequear la apertura o el cierre de las mismas además de ver su estado de energizada o desenergizada.

Dentro del alcance del proyecto se contemplaron modificaciones en las lógicas de salvaguarda y en instrumentación que no son posibles de realizar con las unidades en funcionamiento, por eso resultó imperioso desarrollar un plan de implementación para poder realizar las tareas necesarias en las ventanas provistas por las paradas de plantas programadas.

## Desarrollo técnico del proyecto

Como se mencionó, todas las *Model Bow Tie* hacen hincapié en el “diagrama de moño” o “diagrama de barreras”, en el cual para un cierto peligro se identifican sus amenazas



y las barreras de control que evitan llegar al evento no deseado. Si se produce el evento no deseado, luego se tienen las barreras de mitigación para evitar las consecuencias.

En el caso de *Model Bow Tie* de hornos, contamos con la matriz del cuadro 2.

### Primer evento no deseado: presencia de combustible sin quemar en el hogar

En Refinería Buenos Aires se utilizan dos tipos de combustibles: líquidos y gaseosos. El fuel oil es el único combustible líquido empleado actualmente, aunque en el pasado también se contaba con el asfalto de combustión. El fuel oil, como todo combustible, posee una fórmula genérica  $CH_x$ , siendo la relación másica C/H de 8. Tiene un poder calorífico inferior (PCI) menor que el de los combustibles gaseosos (39750 kJ/kg, aproximadamente) lo que significa que, para una misma masa de combustible, el fuel oil entregará menos calor que el fuel gas. Los combustibles líquidos necesitan ser atomizados para su combustión y cuanto menos viscoso, más fácil es atomizarlo y mejor será la combustión.

En cuanto a combustibles gaseosos se utilizan tres tipos: fuel gas, gas natural y off-gas. El fuel gas es producido en la refinería por las distintas unidades de proceso; el gas natural es suministrado desde la red pública de distribución; y el off-gas es gas residual no condensable de los sistemas de vacío de las unidades, que no pasa por la red de fuel gas y entra continuamente al horno más cercano para ser quemado. El fuel gas está constituido mayormente por  $CH_4$  (metano) y por  $H_2$  (hidrógeno proveniente de la

unidad de reformado y las de hidrotratamiento) y posee un PCI típico de 48.100 kJ/kg, mientras que el gas natural es principalmente metano y tiene un PCI de 47.300 kJ/kg.

Muchos de los hornos cuentan con ambos tipos de combustible gracias a la existencia de los quemadores duales. El evento no deseado considerado por la MBT es la presencia de combustible sin quemar en el hogar, generando una atmósfera explosiva. Esto es un problema mayor en el caso de los combustibles gaseosos, ya que no son tan fáciles de detectar como los líquidos. Para ello se piensan distintas barreras que ayudarán a prevenir la ocurrencia del evento no deseado, dentro de las cuales se destaca una lógica de salvaguarda adecuada:

- Baja presión de combustible: para prevenir la inestabilidad de llama y el soplado de la misma.
- Alta presión de combustible: para prevenir el desprendimiento de la llama. Lo que suele ocurrir cuando hay mucha presión de combustible es que la llama se despegue de la punta del quemador, corriendo el riesgo de impactar sobre los serpentines y de perder la detección de llama.
- Bajo caudal de aire de combustión: para prevenir combustión sub-estequiométrica y *after-burn*, fenómeno en el cual se produce la combustión tardía del combustible sin quemar que fue arrastrado hacia el banco convectivo y chimenea junto con los gases de combustión.
- Falla del confirmado de marcha del blower (para hornos de tiro forzado): para prevenir ingresar combustible sin aire para la combustión.

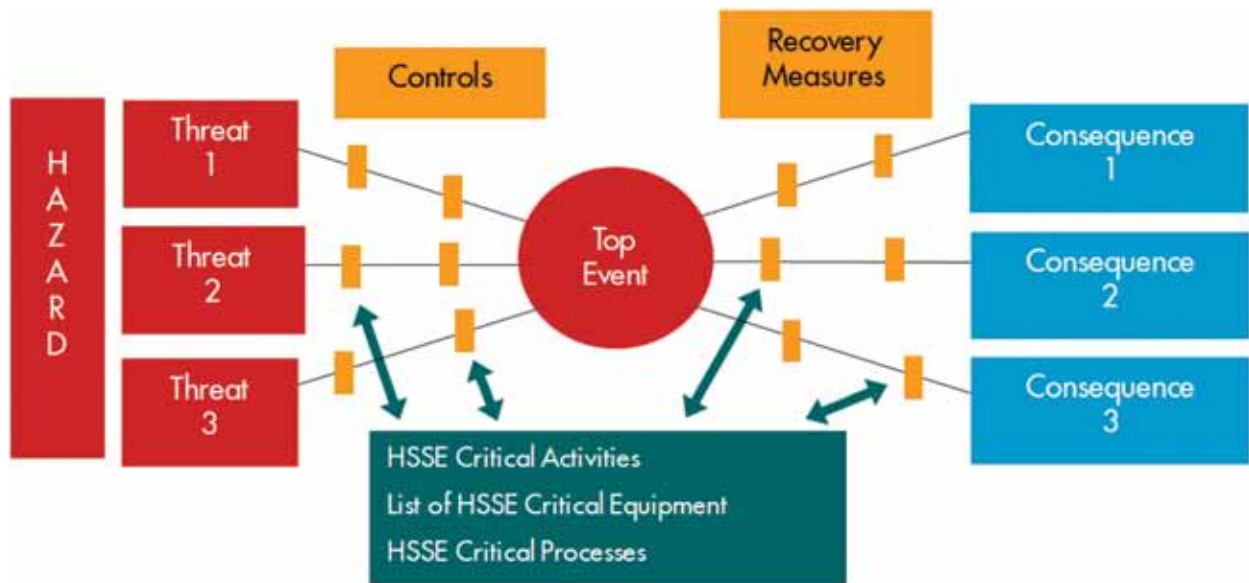


Figura 1. Esquema típico de diagrama de moño.

Hazard	Top Event	Consequence	(P)	(A)	(E)	(R)	Systems containing hazard Location
Fuel (gas or liquid)	Presence of un-burned fuel in firebox	Explosion	4C	5C	3C	2C	Hydrocarbon Fired Heaters
		Fire	3C	4C	2C	2C	Hydrocarbon Fired Heaters
Process Fluid	Loss of Containment - Tube Rupture	Fire and Explosion	Per the DSM Hazard Register				Hydrocarbon Fired Heaters

Figura 2. Eventos no deseados destacados en la gestión de riesgos de hornos.

- Paros de emergencia (desde campo y desde sala): deben existir interruptores de corte de emergencia, que apaguen el horno y lo envíen a condición segura en caso de que el operador o panelista decida hacerlo
- Falta de detección de llama: para prevenir el ingreso de combustible al horno sin quemar.
- Bajo caudal de fluido de proceso: para impedir el sobrecalentamiento de los serpentines y evitar comprometer su integridad.
- Temperatura de piel de tubo: suele tener un corte por alta temperatura para preservar la integridad del serpentín. El valor del corte dependerá del material del tubo. En caso de poseer termocuplas skin, se monitorea la temperatura de transferencia con el mismo fin.
- Temperatura de *bridgewall*: se trata de la temperatura medida a la salida de la zona radiante, previo a la entrada del banco convectivo. Este parámetro suele tener un corte asociado también, cuyo fin es preservar la integridad del material refractario y de los soportes y anclajes. Se mide en esa zona porque es donde se alcanzan las temperaturas más elevadas en el hogar.

Cualquiera de estas condiciones lleva el horno a *trip*, es decir a condición segura. Para ello se producen las siguientes acciones:

- Cierre de la TSOV de colector del combustible\*.
- Cierre de las TSOVs individuales a cada quemador (si es que hay).
- La válvula controladora de combustible va a "mínimo stop".
- El operado de campo debe cerrar las válvulas manuales de cada quemador.

Como se mencionó, las consecuencias de combustible sin quemar pueden ser explosión, *after burn* y fuego. Las barreras de mitigación que existen para evitar llegar a estas consecuencias, o minimizar su impacto, son las siguientes:

- Tapas antiexplosivas: son pasos de hombre con tapas, en el tope de la zona radiante, que están sin sellar y que abren en caso de que se presurice el hogar lo suficiente.
- Sistema de vapor de sofocación: en caso de un incendio se activa (manualmente) el sistema de vapor de

\* Para los hornos que pueden quemar ambos tipos de combustible, un problema que surja con el combustible líquido hará caer solo las TSOV y las controladoras, sin afectar al combustible gaseoso. En el caso contrario, problemas con el combustible gaseoso, mandan a detener todo el horno: cierre de las TSOVs y controladoras de ambos combustibles. Esto es así, ya que el combustible gaseoso es capaz de formar una atmósfera explosiva de gases en el hogar, que puede terminar en *after burn*, explosiones o fuego.

sofocación que abarca todas las zonas del horno (zona radiante, zona convectiva, ventilador de tiro forzado e inducido, chimenea).

### Segundo evento no deseado: pérdida de contención - ruptura de tubos

Este peligro está asociado al fluido de proceso (el que recibe calor del horno) y no a los gases de combustión. Las pérdidas de contención se dan por las siguientes causas:

- Pinchaduras en serpentines.
- Pérdidas en bridas.
- Pérdidas en los codos de conexión de serpentines.
- Rotura de serpentín por daño en los soportes de contención.

Las pinchaduras en los serpentines pueden darse por varias razones. Las más comunes son por la generación de puntos calientes. Los puntos calientes se originan por la formación de una capa aislante de carbón en el interior del serpentín, en la superficie externa del mismo o ambas. Cuando se forma una capa aislante en el interior es porque el fluido de proceso coqueificó formando un film que actúa como aislante térmico entre el calor que recibe el acero por radiación de las llamas y el fluido de proceso. Al existir este coque, el fluido de proceso no cumple su función de extraer el calor de esa porción de superficie del serpentín y refrigerarlo, entonces se generan los puntos calientes que pueden provocar la rotura del tubo con la asociada pérdida de producto. Si la capa aislante se forma en la superficie exterior del serpentín, lo más común es que sea debido al fenómeno de creep. El creep es la tendencia que tienen los materiales (como los aceros) a deformarse permanentemente bajo la influencia de esfuerzos mecánicos. Este fenómeno también debilita la pared del tubo, y así promueve su rotura. El creep es más severo cuando el material es sujeto a altas temperaturas por períodos prolongados, situación que se da en los hogares de los hornos (Figura 3).

Las pérdidas por bridas o por los codos de los serpentines son comunes durante las puestas en marcha de los hor-

nos. Son pérdidas fácilmente detectables, ya que se producen fuera de los hornos y se pueden solucionar ajustando los espárragos o los tapones.

Los anclajes de serpentines suelen ser metálicos y si la llama los alcanza, los deforma provocando la caída o la pérdida de funcionalidad (Figuras 4 y 5).

Las barreras de control identificadas para este segundo peligro son las siguientes:

#### a. Con el horno en marcha

- Monitoreo de la temperatura de piel de tubo o *skin points*: el objetivo de este monitoreo en línea es controlar la temperatura del metal para no comprometer la integridad del material del serpentín. Cada material, según la norma API 530 tiene su temperatura de diseño y una temperatura crítica mínima a partir de la cual se empieza a observar el fenómeno de creep por exposición continua. Muchas veces no es posible tener termocuplas de piel de tubo confiables instaladas por distintos motivos: el difícil acceso a los serpentines, la dificultad de realizar la soldadura adecuada que evite el ingreso de gases calientes en el espacio remanente entre el tubo y el instrumento de medición, lo que daría una medición falsa de la temperatura de piel de tubo o simplemente la corta vida útil de los cables expuestos a tan altas temperaturas.
- En los casos en que las mediciones de los *skin points* no son confiables se realiza el monitoreo y el control de la temperatura de transferencia en cada serpentín (temperatura de salida del fluido de proceso) y de los caudales de alimentación a cada uno, también conocido como *coil balancing*. El fin del *coil balancing* es ajustar individualmente los caudales a cada serpentín de manera que la temperatura de salida sea siempre la misma, asegurándose así que ningún serpentín supere el límite de temperatura aceptable.
- Termografías (IR): esta técnica mide la temperatura de superficie de cada serpentín a partir de la emisión de radiación infrarroja, su única limitación es que se está







Figura 2. Diagrama de moño para la presencia de combustible sin quemar en el hogar.



Figura 3. Daños en tubos de hornos provocados por sobrecalentamiento.

acotado a la visión que se tiene desde las mirillas. Los hornos suelen tener mirillas pequeñas, ya que estas son una fuente de pérdida de calor y de ingreso de aire no deseado si no se encuentran en condiciones óptimas.

#### b. Con el horno parado

- Medición de espesores: con esta técnica se pueden ver los serpentines más afectados y las zonas más comprometidas. Con el pigging inteligente, por ejemplo, se puede tener registro del espesor de todo el largo de



Figura 4 (izq). Anclajes de los serpentines.

Figura 5 (der). Daños observados dentro del hogar del horno.

los serpentines de menar precisa. Esto consiste en el ingreso de un “chanchito” por el principio de los serpentines y que, movilizados con agua a presión, recorre todo el largo de los mismos y va tomando la medición del espesor a lo largo de su recorrido.

- Réplicas metalográficas: sirven para evaluar la microestructura de los metales y analizar creep y PH.
- Inspección visual: se hace el relevamiento de los skins y se revisa el estado integral de los tubos.

En caso de que se produzca el evento no deseado (pérdida de contención-pinchadura de serpentín), las consecuencias serían el fuego o una explosión. Las barreras de mitigación son las mismas que las descritas para el primer peligro: sofocación con vapor, tapas antiexplosivas, etc.

## Conclusiones y avances

Todos estos análisis genéricos tienen como fin el estudio específico de cada horno en particular y la aplicabilidad de las mejores. La refinera cuenta con 25 hornos de proceso, de los cuales el 50% ya tiene tanto los cambios mecánicos en campo como los cambios en la lógica de salvaguarda implementados con éxito. Del 50% restante hay 10 hornos que necesitan algunos cambios y quedarán completamente bajo los estándares de *Model Bow Tie* para fines de este año y un horno que solo consume combustible líquido, cuyo cambio está planificado para la próxima parada de planta.

El estudio para cada horno en particular y los cambios que se deben realizar quedan plasmados en un documento que llamamos BOD (*Basis of Design*) donde se describen en detalle los cambios mecánicos y de salvaguarda pensados para ese horno. Para las modificaciones en la lógica de salvaguarda se emite además una narrativa con los distintos instrumentos, equipos, switches y señales que están involucrados en el encendido, operación normal y parada de los hornos. Una vez terminadas las modificaciones de la lógica, se sigue un riguroso set de pruebas para simular todos los posibles casos de falla y ver que la lógica y los instrumentos en campo respondan correctamente. El primer test es el FAT (*factory acceptance test*) donde el personal de Shell que trabajó en la narrativa junto con el contratista que la modificó prueban en pantalla el funcionamiento de los pasos lógicos como los veía el panelista. Una vez aprobada, se pasa al SAT (*Site acceptance test*) donde se prueba que los instrumentos en campo (válvulas neumáti-



Figura 6. Diagrama de moño para el evento no deseado de pérdida de contención de fluido de proceso.

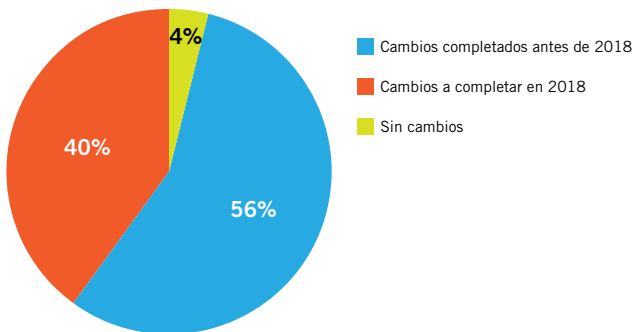


Figura 7. Avance de implementación del proyecto en Refinería Buenos Aires.

cas, válvulas *tight shut-off TSOVs*, detectores de llama, etc.) respondan a las señales simuladas sin fuego en una instancia inicial y con fuego en una instancia final. En el SAT se involucra además a los operadores que habitualmente trabajan con el horno en cuestión, panelistas, supervisores de turno e ingenieros de producción.

A todo esto, todavía le falta una pieza fundamental: las capacitaciones extensivas a todo el personal. Para ello se convoca a los operadores, los panelistas y los supervisores

de cada turno. Se realizan dos etapas de capacitación: la primera es previa a la realización de los cambios para interiorizarlos y la segunda es pos-SAT donde se explica en detalle todos los casos de *trip* de combustible gaseoso, *trip* de combustible líquido, *trip* a fuego mínimo, secuencias de encendido, tiempos de barrido y de detección de llama, entre otros. ■

### Bibliografía

Workplace Health, Safety and Compensation Commission of New Brunswick. (1999). *Accident Investigation Report on the Explosion and Fire at the Irving Oil Refinery Saint John, New Brunswick*. Recuperado de <http://www.petroblog.com.br/wp-content/uploads/1998-Irving-refinery-Hydrocracker-furnace-accident-report.pdf>

Dugué, J. (2017). Fired equipment safety in the oil & gas industry. A review of changes in practices over the last 50 years. *Energy Procedia* 120, 2-19.

Baukal, Jr., C. E. (2001). *the John Zink Combustion Handbook*. Boca Raton, USA. CRC Press.