

Optimización en el diseño y performance de hornos de proceso

Introducción

Los hornos de proceso son uno de los equipos, dentro de las plantas, que más energía utilizan. Optimizar la operación y/o eficiencia de los mismos, aunque sea pequeñas mejoras, puede llevar a ahorrar miles de dólares a lo largo de un ciclo de operación.

Se debe tomar conciencia que los recursos de los hidrocarburos van disminuyendo y que los niveles de contaminación deben ser reducidos y regulados para tener un mejor hábitat. Los residuos producidos luego de la combustión son generadores de contaminación ambiental y propician el efecto invernadero. El ruido es otro ítem a tener en cuenta a la hora del diseño.

Otros factores, como la seguridad y la disponibilidad, han tomado un rol muy importante para el diseño, la operación cotidiana y tratar situaciones de emergencia. Los hornos generan una reacción exotérmica violenta (combustión) y la misma debe ser controlada y monitoreada apropiadamente. Hay que tener en cuenta que estos equipos poseen una alta peligrosidad en su operación, con lo cual este debe ser tenido en cuenta en la etapa de diseño y en su posterior puesta en marcha y operación. Uno de los mayores enemigos es el “acostumbramiento” a la operación de los mismos.

Los típicos problemas que se presentan en los hornos son:

- Bajo rendimiento en la combustión.
- Defectuoso y/o pobre control y mantenimiento.
- Degradación de los elementos de seguridad.
- Tecnologías anticuadas de combustión (quemadores e instrumentación).

Este trabajo intentará presentar una guía a tener en cuenta para los que especifican, operan y mantienen hornos. Es importante seguir las pautas aquí mencionadas para poder diseñar y analizar en forma correcta, desde el punto de vista técnico y económico, un horno de proceso.

Se puede dividir el desarrollo de este trabajo en tres grandes áreas:

- I. Diseño y operación.*
- II. Medio ambiente.*
- III. Seguridad.*

Desarrollo

I. Diseño y operación

Para poder ver cuales son las mejoras posibles en este apartado, primero debemos reconocer los problemas típicos a los cuales nos enfrentamos, y luego proponer soluciones a los mismos.

Los típicos problemas a rasgos generales son:

- Turndown desconocido y/o no respetados.
- Cambios en las condiciones de operación (caudales, presiones, temperaturas).
- Cambios en los combustibles utilizados (composición, poder calorífico, condiciones de utilización).
- Alto exceso de aire de operación.
- Ensuciamiento en la sección de convección (sector de tubos con superficie extendida).
- Altas temperaturas de chimenea.
- Información deficiente de variables de proceso y seguridad.
- Comportamiento errático o inapropiado de llamas en los quemadores.
- Filtración de aire hacia el interior del horno.

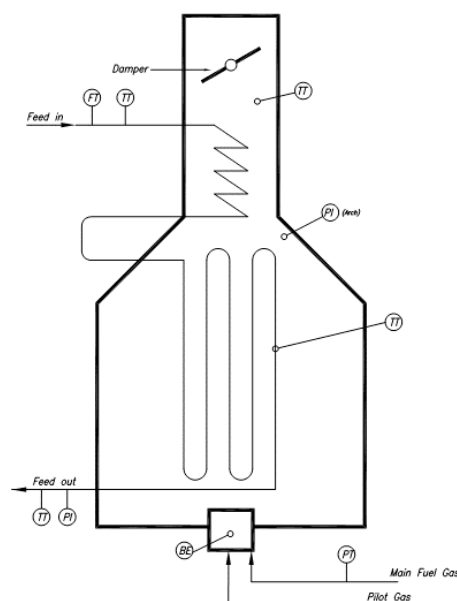
Para poder solucionar estos problemas se debe actuar desde la fase inicial de la ingeniería. Esto conllevará a minimizar las acciones correctivas con el equipo ya en funcionamiento.

Esto implica incluir en la ingeniería básica a todas las áreas involucradas para que puedan transmitir su experiencia con este tipo de equipos y poder definir la mejor solución en relación al costo/beneficio.

Variables de proceso y seguridad

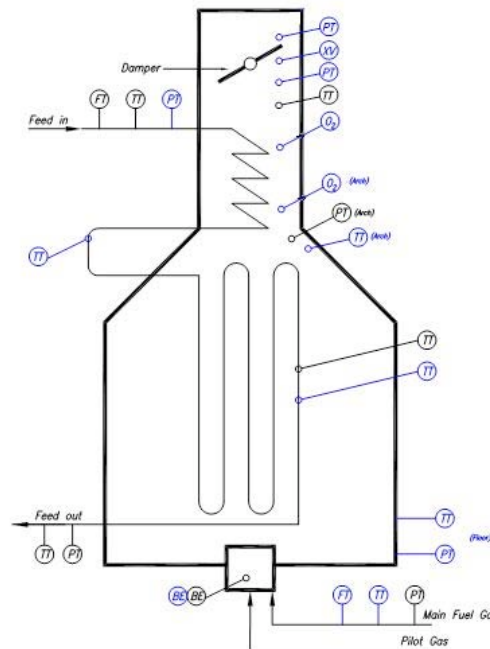
Este es uno de los parámetros más sensibles, ya que generan un costo de inversión mayor pero el cual se recupera prontamente al disminuir el tiempo entre paradas y anticiparse a los problemas, por la información que se tiene en tiempo real del equipo.

En la siguiente figura se puede observar las típicas variables que son medidas generalmente en los hornos de proceso.



Como se puede ver la instrumentación asociada al horno propiamente dicho es la necesaria para poder operar el mismo, pero no permitirá tener un diagnóstico o una evolución del comportamiento del equipo y como consecuencia actuar sobre el problema una vez ocurrido.

En la figura siguiente se puede observar las variables que serían recomendables tener presentes, las cuales permitirían actuar preventivamente y además tener un adecuado control del horno y seguridad del mismo.



Toda la información que brinda esta instrumentación se traduce en poder analizar los cambios a los que se está sujeto permanentemente un horno, por modificación del caudal, de la temperatura de ingreso de fluido al mismo, por la estacionalidad, etc., y corregir a tiempo las desviaciones que generan una no correcta operación de la unidad.

Las variables a ser medidas se podrían enumerar como las siguientes:

- Caudal de proceso general y por rama.
- Temperatura de entrada y salida de fluido. Temperaturas intermedias, como el crossover, siempre que se pueda son muy útiles.
- Presión de entrada y salida de fluido.
- Caudal de combustible.
- Presión y temperatura de combustible.
- Poder calorífico o en su defecto tener la composición del combustible.
- Exceso de oxígeno (O₂), en arco o chimenea.
- Temperaturas de piel de tubo en la radiación y de la primera fila escudo.
- Temperatura de arco y de piso.
- Temperatura de chimenea.
- Presión del piso, arco y chimenea (antes y después del damper).
- Posición del damper de chimenea.
- Detección de llama (piloto y principal), conjunta o discriminadas.

Turndown y cambios de composición de producto

En la ingeniería básica estos dos parámetros deben ser analizados cuidadosamente, ya que los mismos son los que generan los mayores problemas en la operación normal de los hornos.

Es común, al diseñar una unidad de proceso, tomarse ciertos márgenes de sobre-diseño para poder tener mayor rango de operación y no comprar equipos pequeños, sino “elásticos”, de acuerdo a los pronósticos de producción presentes y futuros.

En el caso particular de los hornos estos márgenes pueden ser peligrosos, ya que inducen a diseñar equipos muchos más grandes de lo necesario y posteriormente no funcionan correctamente a bajas cargas, como ocurre durante las puestas en marcha y hasta no lograr caudales nominales en las plantas.

El “cuello de botella” pasa a ser los quemadores y erróneamente, en el caso de varios de ellos, se apagan uno o más de los mismos para poder trabajar en caudales bajos e incluso inferiores a los establecidos en el diseño. Esto acarrea una mala distribución del flujo calórico en la zona de radiación, llamas erráticas y elevadas temperaturas tanto en las pieles de tubo como en la chimenea, por una mala regulación del aire en los quemadores.

Además en los hornos que poseen vaporización la velocidad y el régimen de flujo son críticos para verificar la formación de coque, erosión, vibración y ensuciamiento, los cuales son analizados en función del caudal y los escenarios posibles de turndown y la variabilidad de la composición del fluido a ser calentado (crudos más pesado o más livianos, de acuerdo a la disponibilidad de producción).

Todos los análisis antes mencionados se tienen en cuenta, junto a la pérdida de carga admisible, para establecer la cantidad de pasos del serpentín (los cuales deben tender a ser los mínimos posibles). Modificar estas variables puede ser posible siempre y cuando se halla analizado anteriormente para ver las implicancias que traen aparejadas (temperatura de metales, de chimenea, pérdida de carga, vaporización, temperatura de salida de producto, etc.).

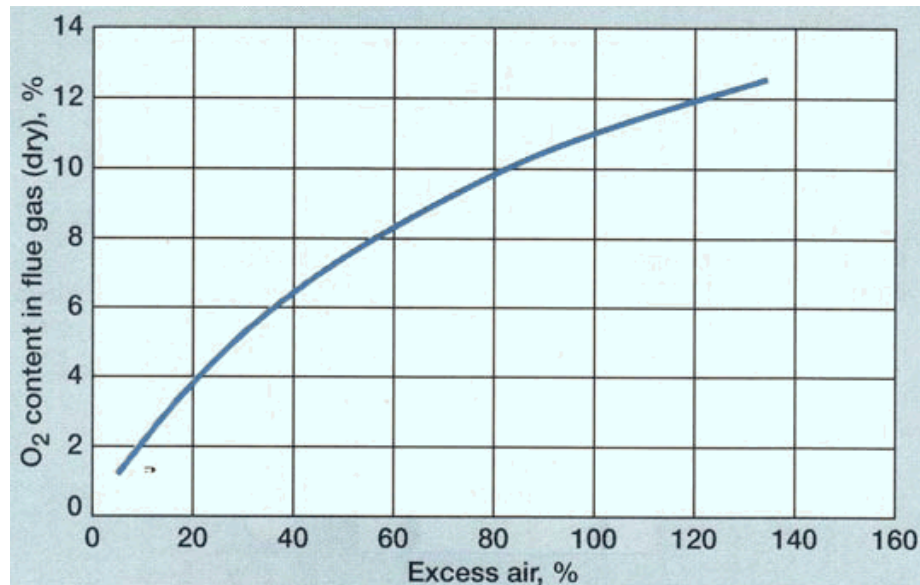
Exceso de aire

Por cada parte de oxígeno (O_2) en el aire existen cuatro partes de nitrógeno (N_2) que ingresan en el proceso de la combustión y salen sin ser parte de la reacción. Este nitrógeno (N_2) absorbe parte del calor generado y es arrastrado hacia la chimenea. Por esto es necesario minimizar el exceso de aire en los quemadores para evitar el exceso de pérdida de calor y energía. Esto comúnmente se conoce como “calentar aire y no el fluido”.

Tampoco es bueno tener defecto de aire, ya que se genera combustión incompleta y como consecuencia de ello aparece en los humos de chimenea monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2), los cuales son combustibles y pueden facilitar que ocurra post-combustión aparte de una merma en la eficiencia de la operación del horno, consumiendo mucho más combustible del necesario para el calentamiento que necesita el fluido del proceso.

Se debe tener en cuenta que un porcentaje de aire se corresponde con un porcentaje de oxígeno (O_2), el cual es que debe ser medido. El rango recomendado en un horno de tiro natural es aproximadamente de 2 a 4 % de O_2 .

En el siguiente gráfico se puede observar la relación entre el aire y el oxígeno.



A continuación se muestran valores recomendados de exceso de aire para distintos combustibles y tipos de tiraje.

Combustible	Tiro Natural	Tiro Forzado
(Gaseoso / Líquido)	% Aire	% Aire
Gas combustible	15 - 20	10 – 15
Fuel Oil (Liviano)	20 - 25	15 – 20
Fuel Oil (Pesado)	25 – 30	20 – 25

Como consecuencia de lo anteriormente expuesto se puede apreciar en la tabla siguiente como varía la eficiencia en función de la temperatura de los humos de chimenea y del exceso de oxígeno.

% Exceso de Aire	% O ₂ en Flue Gas	150 °C	200 °C	260 °C	315 °C	370 °C	427 °C	483 °C	534 °C
15	3	91.76	89.11	86.42	83.60	80.59	78.11	75.25	72.35
20	3,82	91.52	88.77	85.98	83.15	80.28	77.36	74.40	71.39
40	6,46	90.58	87.43	84.24	81.00	77.71	74.37	70.99	67.55

Como se puede observar el análisis del flue gas es la herramienta más poderosa para maximizar la eficiencia de la combustión.

Es altamente recomendable la instalación de un analizador de oxígeno. La posición óptima de instalación del mismo es discutible, algunos recomiendan que deber ser instalado en el arco y otros a la salida del serpentín de convección (breeching). Ambas tienen sus beneficios y problemas, sin embargo es indiscutible el beneficio energético en la utilización del mismo.

Control de tiraje y operación de dampers

Sin lugar a dudas este ítem tiene una relación directa con el exceso de aire, pero es importante tratarlo como un tema separado.

Normalmente el accionamiento del damper de chimenea es realizado en forma manual, como se puede apreciar en las siguientes fotos.



Este mecanismo trae aparejado varios inconvenientes, los cuales generalmente son:

- Poca a nula atención del tiraje en el horno por solo tener accionamiento local.
- Fragilidad de los cables y propias del mecanismo, por falta de mantenimiento.
- Información de la posición solo localmente.
- Desconocimiento de falla.



Cables Suelos

Para solucionar estos problemas es conveniente instalar un actuador neumático inteligente como se muestra a continuación.



Esto permite tener las siguientes ventajas:

- Sistema robusto de operación, por su comunicación directa al eje del damper.
- Atención permanente desde sala de control (acción remota) o desde el tablero local BMS (acción local).
- Información en tiempo real de posición detallada.
- Conocimiento de fallas desde sala de control, importante para tomar acciones rápidamente.
- Si se lo instala con un analizador de oxígeno en línea, es una herramienta exacta para trabajar sobre la eficiencia del horno.

Además de tener las dos variables (movimiento de damper y % de oxígeno), instalando un transmisor de presión absoluta en el arco del horno, se puede controlar en forma precisa y segura el

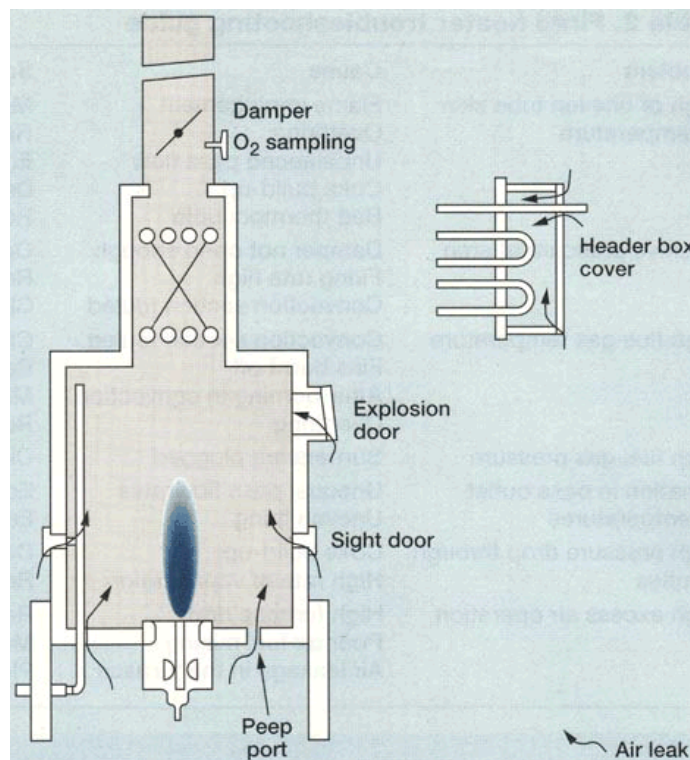
tiraje apropiado en la cámara de radiación de acuerdo a las condiciones de proceso presentes. En el caso de cambiar la carga al horno, se puede corregir rápidamente estas variables haciendo las maniobras en forma local o remota.

Filtración de aire

En la mayoría de los hornos la presión interior es relativamente cercana a la atmosférica. A medida que van ascendiendo los humos hacia la chimenea, dentro de la unidad la presión negativa va disminuyendo y esto favorece al ingreso de aire al interior del horno.

Se puede ver en la siguiente figura los lugares más comunes de filtración:

Para minimizar estas filtraciones se debe:



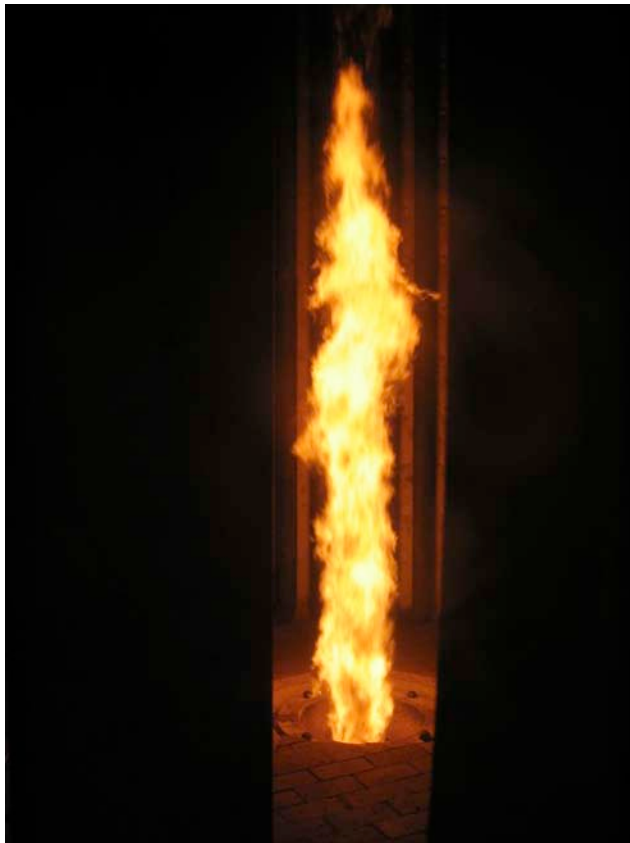
- Cerrar todas las mirillas de los quemadores.
- Cerrar todas las mirillas del cuerpo del horno.
- Cerrar puertas de explosión.
- Asegurarse que es mínima la filtración por las guías de tubo en el piso (horno cilíndrico vertical).
- Instalación de juntas entre todas las partes del horno.

Distribución del calor

La distribución del calor dentro de la cámara de radiación es importante ya que con este parámetro se asegura que todos los pasos del serpentín recibirán un calentamiento uniforme. Uno de las recomendaciones más críticas es tratar de tener a todos los quemadores encendidos y regulados de la misma manera, sin embargo además de esto hay que tener en cuenta:

- Que los quemadores estén distanciados de los tubos lo más posibles. Es prioritario usar quemadores pequeños en el caso de estar utilizando quemadores de bajo NOx.

- Utilizar la misma cantidad de combustible y aire para cada quemador. Esto se puede controlar con la presión de combustible a cada quemador y tener los registros de aire abiertos para todos los quemadores en la misma posición.
- En el caso de tener quemadores “Staged”, tener los dos o tres registros de aire abiertos de la misma manera.
- Los quemadores que estén fuera de servicio (por razones de mantenimiento u otra) que tengan los registros de aire completamente cerrados.
- Mantener los caudales de cada rama de ingreso al serpentín del horno iguales, con un margen de $\pm 10\%$ como máximo.
- Chequear las temperaturas de piel de tubo de cada serpentín frecuentemente. En lo posible tener más de una medición por rama, para tener mayor seguridad y/o disponibilidad.
- Mantener las lanzas de los quemadores limpias para que las llamas sean lo más parejas posibles y que se mantengan alejadas de los tubos.



II. Medio ambiente

Hoy la industria se enfrenta a una encrucijada que se constituye a partir de las problemáticas que debe afrontar, no solo en la parte de producción, sino también en la parte de cuidado del medio ambiente.

De la mano de la producción y explotación de los hidrocarburos también se le suma:

- La relación con la comunidad que la rodea.
- Las normas gubernamentales de emisiones.
- Las propias especificaciones técnicas internas de la empresa.

Para ello deberá a comenzar a atacar los problemas que tiene actualmente en las plantas instaladas y comenzar el diseño de las nuevas instalaciones con nuevos criterios a tener en cuenta. Para los hornos particularmente existen varios factores, para los cuales hay soluciones concretas, las cuales a veces por desconocimiento y/o no analizar su impacto técnico/económico no se aplican.

El tema más sobresaliente es el de las emisiones a la atmósfera de contaminantes generados a partir de la reacción de la combustión de combustibles líquidos y gaseosos. Estos son: NO_x, SO_x, partículas sólidas, CO, entre otros. Las más importantes entre estas son las emisiones de NO_x, las cuales son las más frecuentes y normales de ocurrir.

Las emisiones más características poseen las siguientes causas:

NO_x: Hay varios mecanismos para la formación pero la más importante es “Thermal NO_x”, que es la oxidación del nitrógeno presente con el oxígeno del aire de combustión a altas temperaturas. El crecimiento de las emisiones es exponencial a medida que la temperatura de llama aumenta.

SO_x: Estos contaminantes se generan a partir de un combustible rico en azufre y la combinación con oxígeno a alta temperatura. Es generalmente generado cuando se quema fuel oil.

CO: Emisiones que se producen cuando la combustión es incompleta.

Partículas: Clásico del quemado de combustibles líquidos, los cuales por poseer porcentajes altos de sólidos o al estar mal atomizado con vapor o aire generan residuos sólidos en gran cantidad.

Como se podrá observar la gran mayoría de los contaminantes tienen grandes similitudes puesto que tienen orígenes similares. El gran desafío para reducir los mismos es trabajar sobre la temperatura de la llama y los caudales de aire, lo cual nos llevará a tener en cuenta lo mencionado anteriormente en este trabajo sobre la eficiencia y el exceso de aire.

La cantidad de aire necesario para lograr una reacción de combustión completa está definida por la por la relación estequiométrica de la reacción. A lo largo de los años, las estrategias para reducir las emisiones de NO_x, se han estado basando en lograr una mezcla controlada de aire y combustible con la finalidad de bajar la temperatura de la reacción química que se produce.

Tanto la concentración de oxígeno con la temperatura de llama son parámetros que afectan a las emisiones de NO_x. Estos dos variables están directamente relacionadas con:

- Exceso de aire □ Eficiencia.
- Composición del combustible □ Temperatura de llama.
- Temperatura de aire de combustión.
- Temperatura de la cámara de radiación.

En la siguiente tabla se puede apreciar como varían las emisiones de NO_x, para quemadores convencionales frente a quemadores Low NO_x, todos corregidos a @ 3% de exceso de O₂.

Quemadores convencionales		Quemadores Low NO _x	
Gas Natural	90 / 100 ppm	Gas Natural	55 / 60 ppm
Fuel Oil Liviano (#2)	100 / 110 ppm	Fuel Oil Liviano (#2)	65 / 70 ppm
Fuel Oil Pesado (#6)	230 / 260 ppm	Fuel Oil Pesado (#6)	140 / 170 ppm

Estos valores son solo orientativos para tomar conciencia en cuanto se reduce la contaminación, cada proveedor de quemadores posee su tecnología y valores asociados de emisiones de acuerdo al diseño implementado.

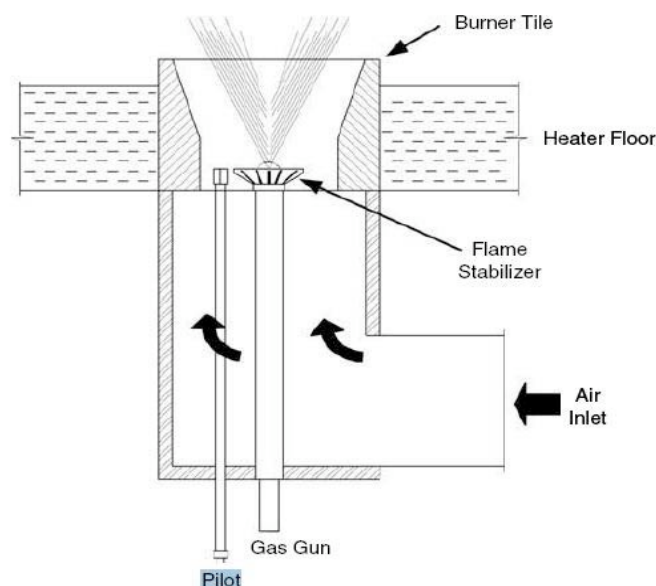
Para poder llevar control de las emisiones se deben realizar análisis periódicos de las mismas en la chimenea, para lo cual se debe tener una plataforma de muestreo en la misma y seguir un procedimiento de toma de muestras de acuerdo a la EPA 40 CFR 60. Esta normativa es internacional y es una de las que se puede tener en cuenta de acuerdo a lo que se considere en la etapa de diseño como de mejor práctica u optar por otras que tenga estipulada la empresa o el país a ser instalado el horno.

La legislación Argentina posee dos leyes que tocan este tema:

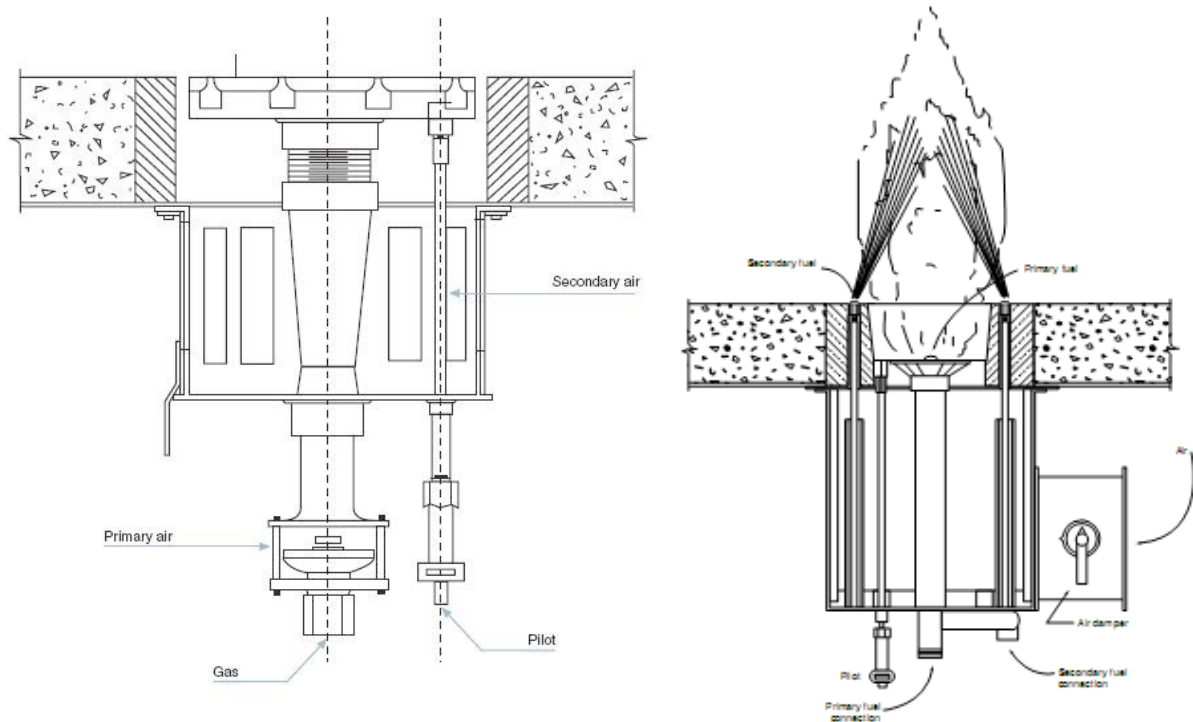
- Ley Nacional 24051 – Desechos peligrosos, Decreto 831/93, el cual establece las máximas concentraciones de NO_x en: 2 ppmv desde superficie y 600 ppmv desde una chimenea a 30 mts. de altura.
- Ley 5965 – Decreto reglamentario 3395/96, el cual establece para la provincia de Buenos Aires una concentración de NO_x de 219 ppmv. Valor promedio para 1 hr y en funcionamiento normal.

El diseño de los quemadores ha ido evolucionando de acuerdo a estos requerimientos para poder lograr bajar la temperatura de llama y bajar las emisiones de NO_x drásticamente. Originalmente se utilizaban los quemadores convencionales, luego se ha evolucionado los tipos de quemadores “Staged”, de los cuales hay dos tipos: “Staged Air” y “Staged Fuel”. A continuación se muestran gráficos de los mismos para ver las diferencias que poseen:

Quemador Convencional



Quemadores Staged Air y Staged Fuel



A lo expuesto anteriormente se le suma otro tema no menor que es el ruido generado a partir de los quemadores, no hay que olvidarse que la combustión es una reacción exotérmica violenta y la misma produce un alto nivel de ruido.

El control del nivel de ruido se ha convertido en un tema de suma importancia para mejorar el ambiente de los operadores de planta como así también de la comunidad que los rodea. El ruido en los quemadores tiene tres causas bien marcadas: caudal de gas a través de los orificios de los picos, caudal de aire a través de los registros de aire y la propia reacción de combustión.

El ruido causado por el gas y por el aire puede ser reducido considerablemente por el uso de plenum de aire aislado, antirruido, en cada quemador por separado. Los mismos tienen distintos diseños de acuerdo al proveedor utilizado. Además de esto se puede aislar los plenum de aire de cada quemador con una manta de material absorbente al ruido. Con respecto al ruido de la reacción se lo puede reducir en gran medida al dejar de utilizar quemadores convencionales con entradas de aire que permiten dejar salir el ruido al exterior del mismo. Los quemadores “Staged” son generalmente cerrados y con el plenum de aire a 90° con lo cual esto permite contener de una manera óptima el ruido generado.

Es responsabilidad del usuario final hacer hincapié en que los quemadores que serán provistos con el horno no generen ruido más allá de los 85 dB(A).

La legislación Argentina estipula en el artículo 5 de la Resolución 295/2003 lo siguiente: el valor límite para una jornada laboral de 8 hs. es de 85 dB(A). Esto indica que ningún trabajador deberá estar expuesto a un nivel de presión acústica mayor a la establecida por esta resolución.

Esta Resolución sustituye a lo especificado en el Decreto 351/79 – Reglamento de la Ley 19587 de higiene y seguridad en el trabajo, donde se tomaba un valor límite de 90 dB(A), para la jornada laboral de 8 hs.

En las siguientes fotos se puede observar los cambios de tecnología y seguridad que ha habido en los quemadores:





III. Seguridad

Hoy las necesidades de la industria en cuanto al campo de la seguridad se han expandido y son de importante aplicación. Hay una concientización amplia en tratar de lograr un ambiente de trabajo más seguro no solo para los empleados de la compañía, sino también para las comunidades vecinas a las plantas de tratamiento.

En el caso de los hornos además de las “reglas del buen arte” hoy en día hay una cantidad de normativas aplicables para tratar de lograr un diseño y operación más seguros. Dentro del conjunto de normas que se pueden utilizar hay de dos tipos, las normas prescriptivas y las normas de desempeño.

Normas prescriptivas: Son aquellas que dan procedimientos y/o métodos. Nos indican que hacer

- API 560 – Fired Heaters for General Refinery Service
- NFPA 85 – Boiler and Combustion Systems Hazard Code
- NFPA 86 – Ovens and Furnaces
- ENARGAS – Ente Nacional Regulador del Gas (Normas NAG)

Normas de desempeño: Son aquellas que establecen objetivos, incluyendo métodos o procedimientos. Nos indican como hacer

- IEC 61511 – Functional Safety: Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector
- IEC 61508 – Functional Safety of Electrical / Electronic / Programmable Electronic Safety – Related Systems

Con este conjunto de normas se posee una base muy potente para poder diseñar un horno de procesos con toda la seguridad asociada al mismo. No solo sobre para el horno, sino también para el sistema de combustibles y el sistema de control y seguridad del mismo.

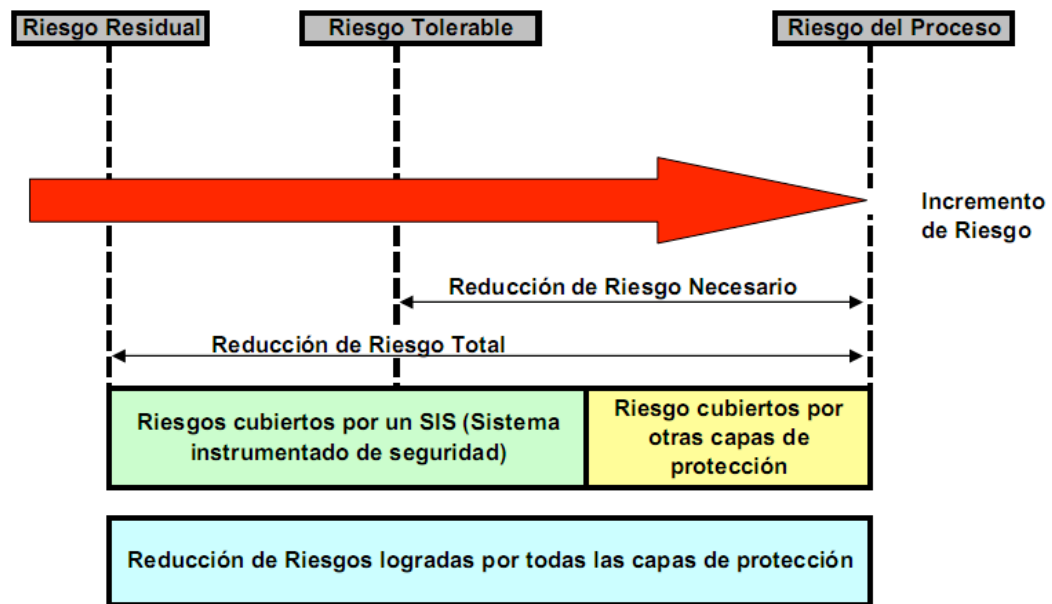
Cuando se quieren implementar en un horno las normas de desempeño, primeramente el usuario final del mismo debe definir un nivel de riesgo tolerable y el mismo lo establece a partir de una “Matriz de Riesgo”, la cual debe ser parte de la política de seguridad de la empresa. A continuación se muestra una matriz de riesgo típica:

Table 3 – Safety integrity levels: probability of failure on demand

DEMAND MODE OF OPERATION		
Safety integrity level (SIL)	Target average probability of failure on demand	Target risk reduction
4	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	$> 10,000$ to $\leq 100,000$
3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	> 1000 to $\leq 10,000$
2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	> 100 to ≤ 1000
1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	> 10 to ≤ 100

Esta matriz debe ser utilizada para luego analizar que modificaciones realizar al diseño original para mejorarlo en aras de la seguridad a la cual se quiere llegar. La identificación de peligros consiste en descubrir y acotar los riesgos inherentes de un determinado proceso en forma sistemática. Se pueden utilizar herramientas como el HAZOP, LOPA, ETA, etc., los cuales posteriormente deberán ser contrastados contra la matriz para poder definir que acciones tomar.

En conclusión, luego de un análisis de los peligros, se puede recién establecer que capas de seguridad tener y/o agregar para que el diseño final garantice el nivel de riesgo tolerable que la empresa pretende de su horno.



Generalmente un horno de procesos tiene asociado al mismo un sistema de control y seguridad local, llamado BMS (Burner Management System). Es un tablero local en el cual se puede tener las funciones de encendido, monitoreo, control y seguridad del horno y además poseer una comunicación e interacción con el sistema de control y seguridad de la planta.

El BMS es una herramienta que permite localmente al operador tener control absoluto de la unidad, siempre y cuando haya sido establecido de esta manera, o puede ser solo una caja de paso de las acciones que se toman en sala de control y seguridad. Es altamente recomendable que las acciones de control y seguridad se realicen en conjunto desde el BMS y la sala de control, para tener una versatilidad y disponibilidad más amplias. Igualmente creemos que el encendido de un horno se debe iniciar desde el BMS, ya que ante cualquier imprevisto, el operador puede generar un paro seguro de la unidad y además observar cual puede ser el problema. Además localmente puede regular los quemadores y verificar que el horno responda favorablemente.

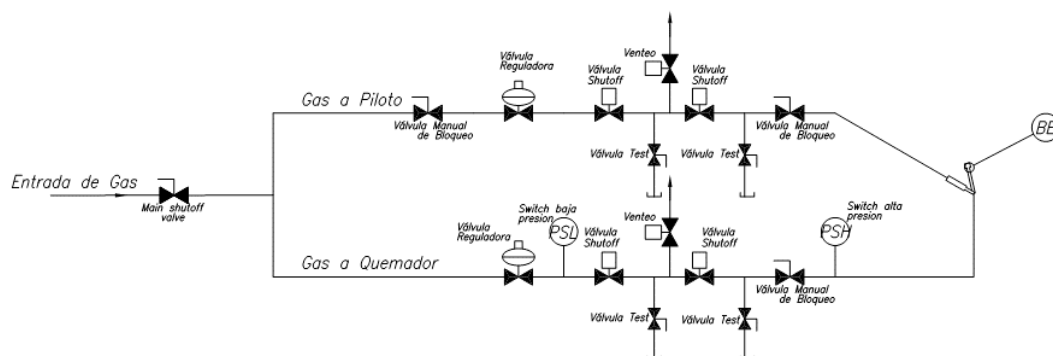
En muchas ocasiones se solicita un BMS apto para un nivel de SIL determinado, ya que se cree que esto es más seguro a tener un BMS “común”. Esto es un error ya que no sirve de nada tener un tablero e instrumentación que cumplan con ciertos requisitos que luego en el conjunto de la unidad de proceso no se cumplen, porque además del BMS e instrumentos, en la totalidad de la instalación se deben implementar un sistema de gestión de la seguridad funcional. Para que realmente se logre obtener una instalación más segura es primordial que se realicen todos los pasos antes mencionados y además se acompañe esto con capacitación, mantenimiento, evidencias y procedimientos escritos de seguridad.

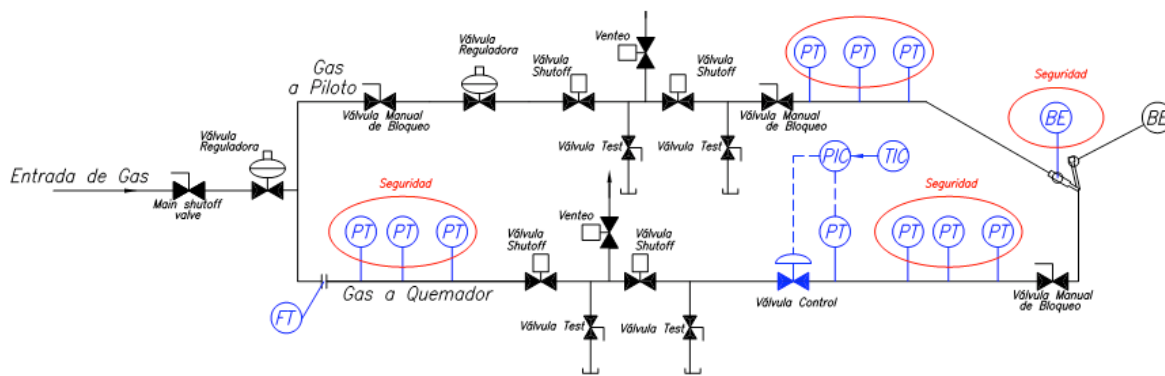
En conclusión el BMS puede adoptar cualquier opción posible a las mencionadas, pero siempre considerándolo en un conjunto de funciones de seguridad, las cuales deben ser aptas de acuerdo al nivel de seguridad que se desea lograr. Como se puede observar en las siguientes fotografías puede ser un simple dispositivo de acción e indicación hasta un centro de funciones de control y seguridad:



Cuando en un horno además debemos implementar las normas prescriptivas y las de desempeño el trabajo es completo ya que tenemos que tener en cuenta asegurarnos que se cumpla lo mismo para los sistemas de combustible del horno, sean líquidos o gaseosos. Para ello, lo mejor es utilizar los lineamientos de la NFPA 86 y hacer el estudio de riesgo correspondiente, analizando tanto el horno, el BMS y el sistema de combustible como un solo conjunto.

A continuación presentamos un esquema típico para un sistema de gas combustible y su posterior modificación acorde a los resultados del estudio de riesgo:





Además de trabajar con variables de proceso, introduciendo redundancias y mejorar el sistema de control del horno con un robusto BMS, también se puede tener en cuenta la seguridad de operación y mantenimiento de diaria, la cual es realizar tareas en forma local que conllevan un riesgo por ser un equipo con alta peligrosidad. Desde este punto de vista es necesario que todos los elementos instalados en el horno, sean de control, seguridad o equipamiento de mantenimiento posean un adecuado acceso y permanencia. Esto implica tener adecuadas escaleras y plataformas que permitan la circulación y lugar preparados para hacer tareas. Además se pueden complementar estos elementos con tener previsto tareas riesgosas, como el encendido de quemadores con combustible líquido, para lo cual es preferible que el operador tenga las válvulas de maniobra en la plataforma inferior del horno y regule los mismos desde ahí y no estando debajo del quemador, con una alta posibilidad de que se pueda quemar con fuel oil por una mala atomización en el encendido.

Las mirillas es otro tema a tener en cuenta, para lo cual se puede implementar con un vidrio templado para seguridad y tener una barrera de protección, como es mostrado en la foto:



Conclusiones

Como se ha desarrollado durante todo este trabajo los hornos de proceso son equipos muy complejos, a los cuales se debe poner mucha atención desde la fase inicial de ingeniería hasta la final de puesta en marcha y operación, siempre balanceando lo técnico y lo económico.

Para demostrar las mejoras que se pueden introducir en su diseño y operación se explicará el desarrollo de un proyecto de un nuevo horno de topping que reemplaza a uno viejo, utilizado para el mismo servicio.

Las mejoras fueron las siguientes:

Ítems	Horno de Topping Viejo	Horno de Topping Nuevo
Serpentín	6 pasos de diámetro 4".	3 pasos de diámetro 6". Mejor distribución de flujo.
Quemadores	8 quemadores convencionales	12 quemadores Low NOx de menor liberación de calor.
Distancia tubos - quemadores	La llama tocaba a los tubos	Se respetó la distancia por API 560 y las llamas no tocan los tubos.
Inyección de vapor	Había sin lazo de control.	Inyección permanente por lazo de control para evitar formación de coque a bajas cargas y mejorar coeficiente de transferencia.
Temperatura de piel de tubo	Alta por formación de coque, velocidad de fluido baja en los tubos.	Baja por Heat Flux bajo de diseño y velocidad de flujo recomendada en los tubos.
Damper Chimenea	Actuado manualmente	Actuador inteligente.
Analizador de O ₂	No tenía	Analizador continuo en línea
Instrumentación	Básica, sin redundancia	Parámetros completos en sala de control y redundancia para sistema de seguridad.
Lay Out	Horno cilíndrico vertical, ocupando poco espacio. Sistema de decoquizado móvil.	Horno cilíndrico vertical, ocupando poco espacio. Con el agregado del sistema de decoquizado propio.
Plataformas y escaleras	No todos los elementos tenían acceso.	Las necesarias para tener acceso a todos los elementos del horno y sus utilities.
Sopladores de hollín	No tenía.	6 sopladores retráctiles para limpieza de convección. (Combustible líquido)
Encendido de quemadores (pilotos)	Manual, con hisopo.	Desde BMS con encendido electrónico y desde plataforma superior para combustible líquido.
Detección de llama	Ninguna.	Detección de piloto por varilla y apagado del quemador por falla de piloto.
Sistema de combustibles	Básico.	De acuerdo a NFPA 86 y recomendaciones de HAZOP.
Control	Desde sala, con lazo de temperatura.	Desde sala, con lazo en cascada de temperatura de producto y presión de combustibles.
Seguridad	La realizaba el propio sistema de control.	Sistema ESD/SIS dedicado al horno, triple redundante. Señales independientes.
Nivel de ruido	Quemadores abiertos, ruido por encima de 100 dB(A).	Quemadores cerrados, ruido por debajo de los 85 dB(A).
Alarmas	Primera con acción de corte.	Pre-alarmas para acción de operador y segunda alarma de corte.

Con la inversión incurrida en todo el equipamiento nombrado se logró tener una operación estable de la unidad, mejorando los tiempos de paro para mantenimiento de 1 por año a 1 cada 3 años.

Además el consumo de combustible bajo entre un 10 % a 15 %, por el agregado del analizador de oxígeno y el actuador en el damper de chimenea, que permiten chequear y corregir el exceso de aire en forma remota y sencilla.

Con la presión en el arco hacen el seguimiento del tiraje en forma permanente y con la variación de la temperatura de chimenea chequean posibles filtraciones de aire en la unidad.

La distribución del calor en la sección de radiación se mejoró y los serpentines mantienen una temperatura baja. Los lazos de control actúan en forma automática y corrigen las desviaciones cuando hay cambio de carga.

Se realizó el test-run de la unidad, dando en forma satisfactoria por encima de la eficiencia garantizada del 80%.

Los operadores fueron capacitados y se les tomo examen sobre lo aprendido y tomaron conocimiento del riesgo que implica operar un horno. Se implementó un sistema de gestión en operaciones para poder seguir los desvíos en forma anticipada y un procedimiento de acciones en caso de incidentes y/o emergencias.

Desde el inicio se involucró al personal de ingeniería, operaciones y mantenimiento para el desarrollo del proyecto y se trabajo en conjunto para lograr el mejor diseño posible.

A continuación se muestran fotos del horno viejo y del nuevo:

Horno viejo de Topping



Horno nuevo de Topping



Datos del autor

Jorge G. Vozzo, es actualmente el Gerente de Ingeniería de la empresa Flargent S.A. y posee una experiencia de 9 años en la industria del gas y el petróleo. A lo largo de toda su carrera ha participado en el diseño básico y de detalle, construcción y puesta en servicio de muchos proyectos de hornos de proceso para la industria entre otros. Es Ingeniero Químico graduado de la Facultad de Ingeniería de Buenos Aires (UBA).

Contacto: jvozzo@flargent.com

Bibliografía

- API Standard 560, “Fired Heaters for General Refinery Service”.
- API 535, “Burners for Fired Heaters In General Refinery Service”.
- API 530, “Recommended Practice for Calculations of Heaters Tube Thickness in Petroleum Refineries”
- NFPA 85, “Boiler and Combustion Systems Hazard Code”
- NFPA 86, “Ovens and Furnaces”
- “Optimized Fired Heater Operation Saves Money” – A. Garg.
- “Heat Transfer in the Radiant Section of Petroleum Heaters” – W.E. Lobo & J.E. Evans.
- “Furnace Operations” – Robert D. Reed
- “Hornos para refinerías” – Oscar E. Salmoiraghi.
- “The John Zink Combustion Handbook” – Charles E. Baukal.
- “Fundamentals and Technology of Combustion” – F. El-Mahallawy & S. El-Din Habik.
- “Industrial Burners Handbook” – Charles E. Baukal.