

Pt

PETROQUÍMICA

**R. Martin
y C. Rosencutter**
Callidus Technologies,
L.L.C. by Honeywell
(EE.UU.)



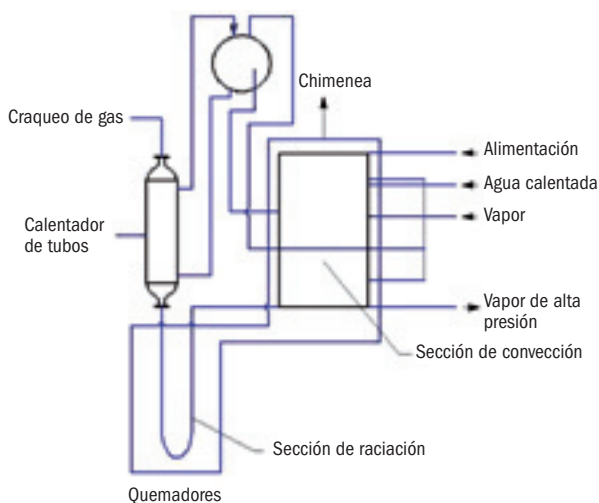
Nuevas tecnologías de quemadores para hornos de craqueo de etileno

En las plantas de craqueo o “crackers” se produce la mayor parte de las olefinas fabricadas en el mundo, con el etileno como principal producto obtenido en las mismas. El corazón de estas plantas es el horno de craqueo, donde tiene lugar el proceso de craqueo térmico de la alimentación utilizada (nafta, frecuentemente) en olefinas ligeras. El presente artículo ofrece una revisión de la tecnología de los quemadores que se instalan en el interior de los hornos y expone diversos avances tecnológicos recientes impulsados por la cada vez más exigente regulación de las emisiones de NOx.

ACTUALMENTE, EL ETILENO es el producto petroquímico más producido en el mundo. Su producción se lleva a cabo principalmente a través del proceso de craqueo térmico de hidrocarburos en presencia de vapor. El proceso de pirólisis, o craqueo de vapor, se muestra en la Figura 1. El calor que se transfiere en la sección de radiación del horno de craqueo térmico es crítico. El periodo de funcionamiento del horno, el tiempo de vida de los tubos y la eficiencia, dependen en gran medida de la distribución de la transferencia de calor producida por los quemadores. Por tanto, el buen comportamiento de los quemadores es crítico para asegurar la adecuada transferencia de calor que se produce en toda la sección de radiación.

Los hornos de craqueo presentan retos tanto en el diseño, como en la operación de los quemadores, en comparación con los calentadores usuales. Estos retos son atribuidos a las altas temperaturas en la caja de radiación, así como a la necesidad de producir una distribución definida del flujo de calor a través de la sección de radiación del horno. En los últimos cinco años, el principal factor impulsor para desarrollar tecnología de quemadores de “nueva generación” ha sido bajar el con-

Figura 1
Esquema de un horno de craqueo



tenido de óxidos de nitrógeno (NOx) en las emisiones. En años recientes, varios proveedores de quemadores han explorado tecnologías de combustión no probadas en un intento de reducir la emisión de NOx en los hornos de craqueo. Este tipo de tecnologías no probadas son poco fiables y sacrifican seguridad, flujo de calor, geometría de la llama y eficiencia global de la unidad.

1

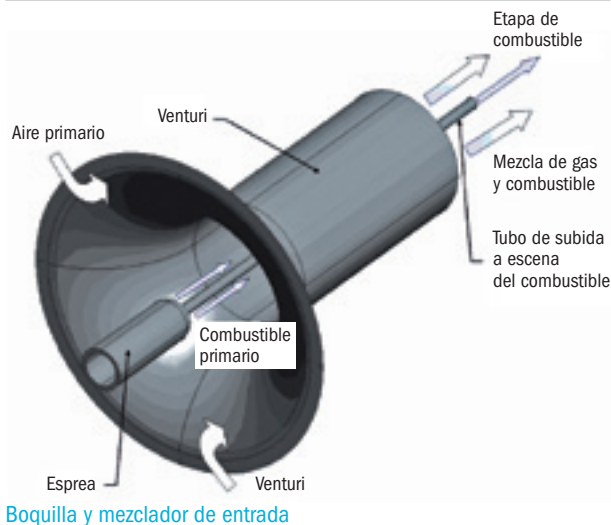
REVISIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE QUEMADORES

Históricamente, la mayoría de los hornos de craqueo térmico utilizaban quemadores de pared radiante de premezcla. Los quemadores de premezcla son bien conocidos por su llama corta y compacta, los cuales pueden producir un flujo de calor uniforme a través de la sección de radiación, como se muestra en la Figura 2. Los quemadores de premezcla de bajo NOx incorporan además la combustión por etapas y la recirculación de los gases de combustión para reducir el nivel de NOx generado. La Figura 3 ilustra la entrada al venturi, un montaje típico del quemador y los detalles de

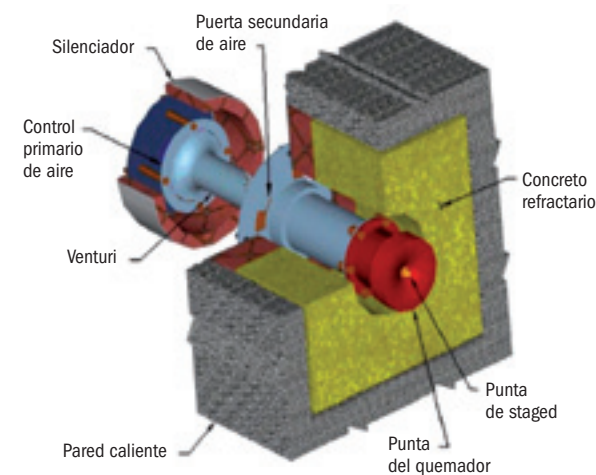
Figura 2
Sección de radiación de un horno de craqueo con quemadores de premezcla



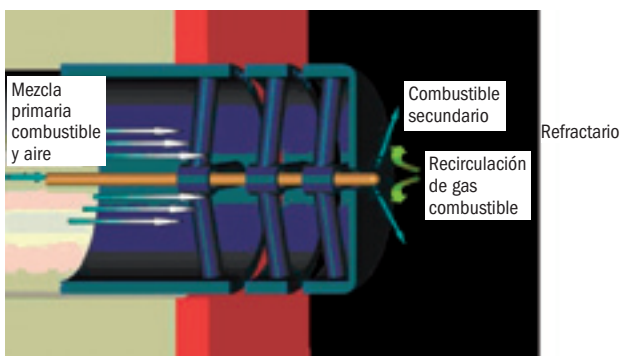
Figura 3
Quegador de pared radiante de bajo NOx



Boquilla y mezclador de entrada



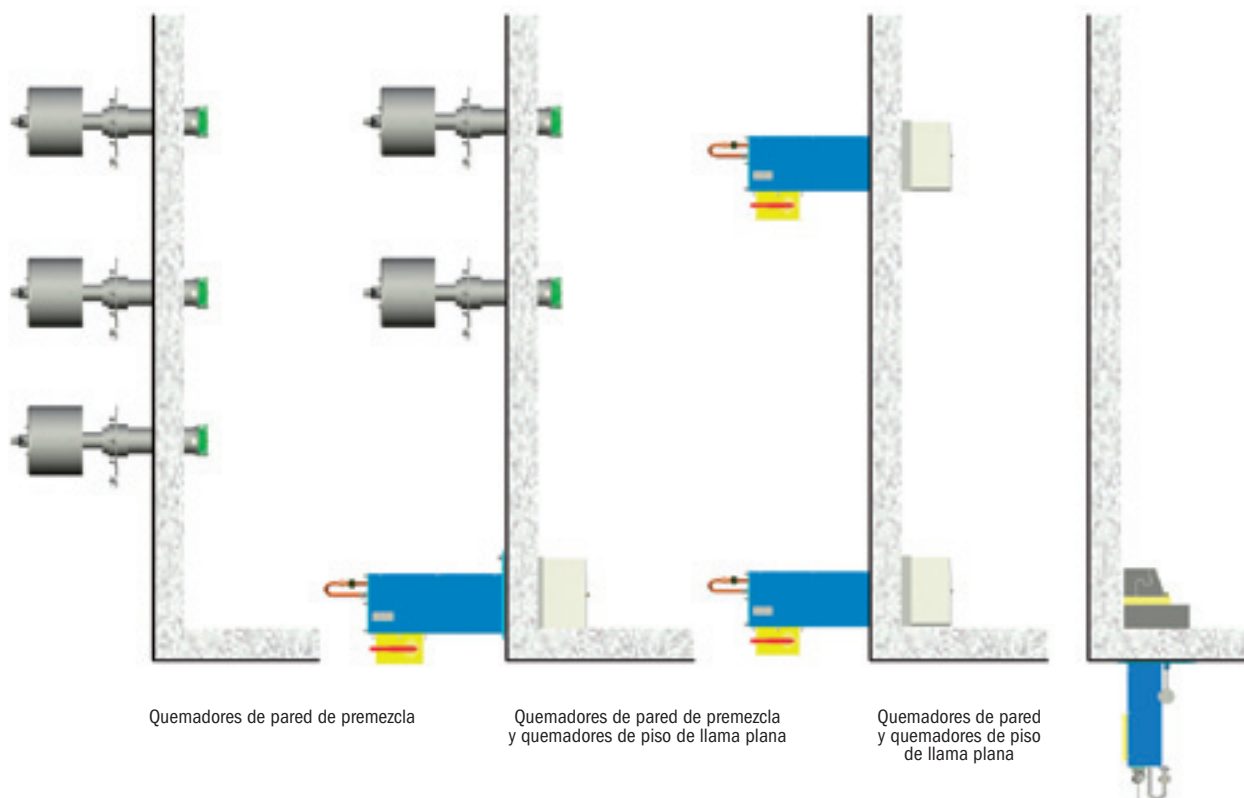
Quegador de pared radiante de bajo NOx



Boquilla del quemador

su boquilla. La boquilla de gas con el orificio primario de gas combustible se muestra en la entrada al venturi. Una porción del gas combustible, llamada combustible primario, descarga a la entrada del venturi induciendo al aire primario. Si la cantidad de aire primario es insuficiente para la combustión, el aire adicional se lleva dentro del quemador a través de la puerta secundaria de aire mostrada en la segunda ilustración de la Figura 3. A pesar de que los quemadores de premezcla han sido los más usados en el diseño de hornos de craqueo

Figura 4
Disposición de los quemadores en un horno de craqueo térmico



desde hace muchos años, puede haber coste significativo asociados al uso de estos quemadores.

Los costes de instalación pueden ser altos debido al gran número de quemadores que deben ser utilizados. Además, los quemadores de premezcla se diseñan para mezclar el aire y el combustible antes de la combustión, lo que incrementa la posibilidad de ensuciamiento, aumentando sus costos de mantenimiento para asegurar la adecuada operación de éstos. Los hornos de craqueo típicos presentan cascarilla de tuberías o aceite crudo en el sistema de gas combustible, lo cual comúnmente puede tapan las boquillas de gas de los quemadores causando retroceso de llama (*flashback*) o la combustión dentro del quemador y no en el horno. La tecnología de quemadores de pared de premezcla está limitada en su capacidad para reducir las emisiones de NOx. El principal mecanismo para reducir las emisiones de NOx de los quemadores de premezcla es su diseño para bajar la cantidad de gas combustible primario directamente en la zona primaria de combustión e incrementar la cantidad de gas combustible en la zona secundaria. En respuesta a las regulaciones ambientales, cada vez más estrictas en la reducción de NOx, algunos

fabricantes de quemadores han suministrado diseños de quemadores de premezcla de pared radiante con un alto volumen de gas combustible usado en la zona secundaria de combustión, que tiene por objeto reducir las emisiones de NOx. Se debe tener precaución con estos volúmenes de gas combustible (por ejemplo, exceso del 35% al 49%) ya que pueden dar como resultado que la llama choque con los tubos, que se tenga un perfil no uniforme del flujo de calor a través de la sección de radiación y una baja eficiencia global en la sección de radiación.

Debido a la naturaleza de los problemas de operación que pueden ocurrir con los quemadores de premezcla, así como la reducción de NOx que se debe alcanzar, la industria se está moviendo hacia el 100% de quemadores de piso (*hearth burners*) o una combinación de quemadores de piso con quemadores de pared lateral (*balcony burners*). En la Figura 4, se presentan varios esquemas de quemadores en hornos de craqueo. Para mantener un perfil de temperatura de pared similar al obtenido cuando se usan quemadores de piso, se puede emplear un quemador de llama plana en lugar de los quemadores de premezcla de pared radiante.

En 2004 fue desarrollada la tecnología de nueva generación de Callidus para quemadores, conocida como CUBL (*Callidus Ultra Blue*). Esta tecnología fue desarrollada para resolver los problemas operacionales de los hornos de craqueo y alcanzar los nuevos niveles de NOx con tecnología de quemadores de llama plana. La abertura de descarga rectangular del refractario de los quemadores que se instalan en la pared del horno proporciona la forma "plana" de la llama. Una pequeña porción del combustible se mezcla con la corriente de aire y se quema con gran exceso de aire para enfriar

LA INDUSTRIA SE ESTÁ MOVIENDO HACIA EL 100% DE QUEMADORES DE PISO O UNA COMBINACIÓN DE QUEMADORES DE PISO CON QUEMADORES DE PARED LATERAL

la llama antes de salir del refractario del quemador. El resto del combustible se inyecta casi verticalmente desde un conjunto de tubos ascendentes localizados junto a la cara del refractario, los cuales están paralelos a la pared del horno. La alta velocidad arrastra al combustible y se mezcla con los productos de combustión, antes de que la combustión se inicie cerca de la parte superior del refractario. El retraso en la mezcla del combustible y/o productos de combustión con el aire permite una mayor transferencia del calor que se produce durante el proceso de combustión, lo cual proporciona una menor temperatura de la llama. La masa de productos de combustión arrastrados proporciona un descenso de calor adicional, lo cual hace descender la temperatura de la llama. Los resultados son baja temperatura de combustión y retraso en la mezcla del combustible secundario con la corriente de aire en el quemador, lo cual reduce significativamente los niveles de NOx cuando se compara con el diseño de quemadores tradicionales.

Algunos proveedores de quemadores están experimentando con el retraso de la mezcla hasta el punto donde no hay una buena definición de la llama, en un esfuerzo por reducir las emisiones de NOx y producir mayor flujo de calor uniforme hacia los tubos de pirólisis. Esta tecnología se etiqueta como combustión de "llama reducida". En teoría, debido a que este tipo de combustión disminuye la temperatura máxima de la llama, puede minimizar la existencia de regiones con altos flujos de calor que generan puntos calientes en la superficie de los tubos, incluso aunque la combustión pueda ocurrir en la superficie de los tubos de proceso. La dificultad de este enfoque es la incapacidad para controlar el lugar donde ocurre la combustión, a causa de las corrientes que fluyen en el horno, y que da lugar a una reducción de la eficiencia y posibles problemas de seguridad a temperaturas de operación del horno inferiores.

En la Figura 5 se muestran dos configuraciones de la tecnología de nueva generación CUBL para quemadores de llama plana, como una alternativa a la tecnología de "llama reducida". La primera ilustración es una configuración que está instalada en el piso y se usa a menudo para quemadores de piso. La segunda configuración está montada sobre la pared y puede usarse tanto para quemadores de piso, como quemadores de pared. La última imagen de la Figura 5 es una fotografía que presenta la tecnología CUBL en operación.

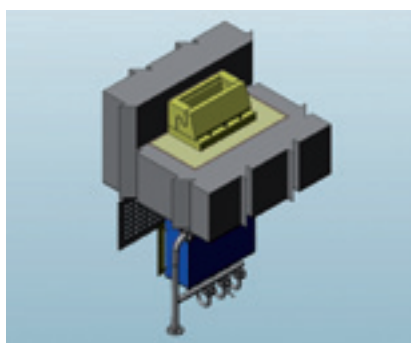
La tecnología CUBL utiliza los principios de diseño de los quemadores de mezcla de boquilla tradicionales, tecnología que ha sido usada en hornos de craqueo desde hace más de 30 años. Esta tecnología está siendo utilizada en más de diez hornos de craqueo en todo el mundo y ha demostrado ser una solución viable para las necesidades de operación.

Cuando se selecciona la tecnología de los quemadores que han de instalarse en un horno de craqueo, hay cuatro criterios que deben evaluarse para asegurar que las necesidades operativas del horno se cumplan. La tecnología CUBL está específicamente diseñada para alcanzar estos cuatro criterios preponderantes, que son críticos para la operación. Estos criterios son: seguridad, una distribución adecuada y fiable del flujo de calor en la sección de radiación, alcanzar unas emisiones de NOx por debajo de 80 mg/Nm³ (40 PPMv) y la disminución del potencial de formación de arrastre de llama (*flame rollover*), que en estos procesos es la forma más común de llama de baja calidad.

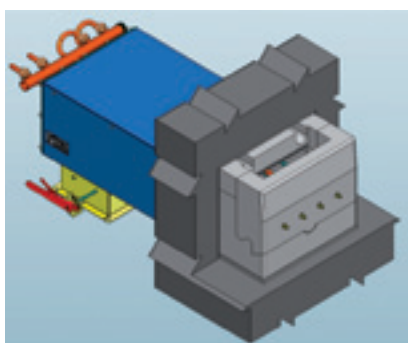
2 SEGURIDAD

Con regulaciones cada vez más estrictas en materia ambiental, la industria está estudiando "soluciones de combustión" que excedan los límites de seguridad tradicionales. A fin de ser aceptables técnicamente, el comportamiento de los quemadores debe ser seguro en todos los rangos de operación de los hornos de craqueo. Durante la puesta en marcha de los hornos, los quemadores están sujetos a temperaturas relativamente bajas, dado que la sección de radiación está por debajo de la temperatura de auto-ignición del gas del quemador; sin embargo, los quemadores deben ser estables en todo el rango de operación de los hornos, sin verse afectados por la temperatura de la sección de radiación del horno. Los quemadores deben ser estables sin la necesidad de pilotos y/o lanzas especiales para su encendido. Las lanzas de encendido son del tipo cañones de gas, que se instalan en el quemador y se operan sólo en la puesta en marcha y en otras condiciones de bajo encendido para asegurar que la flama no se extinga en el quemador. Los quemadores con diseños que requieren de lanzas de encendido para la puesta en marcha, aumentan su complejidad de operación al añadir un paso adicional en el encendido. Este paso adicional da

Figura 5
Quemadores de pared y de piso



Quemador montado en el piso



Quemador montado en la pared



Encendido montado en la pared

como resultado un incremento de la probabilidad de error del operador y un innecesario riesgo del equipo.

Además de la inestabilidad de los quemadores en las condiciones de puesta en marcha, la inestabilidad también puede ocurrir mientras el quemador está encendido en condiciones de bajo fuego durante el proceso de descoquización del horno. Después de un periodo de operación, los hornos de craqueo forman coque dentro de los tubos de proceso, que restringen el flujo. Como operación rutinaria, los hornos tienen un ciclo que se conoce como descoquización. El proceso de descoquización requiere una menor temperatura en la sección de radiación en comparación con la operación normal del horno. Para alcanzar una baja temperatura en la caja de radiación, los quemadores deben ser apagados para reducir la temperatura de la llama en la caja o deben ser diseñados para operar en un rango reducido de encendido, el cual es a menudo citado como “liberación máxima/mínima” o *turndown*. El *turndown* es el rango mínimo de encendido que el quemador puede alcanzar produciendo una llama estable. Si un quemador se diseña para quemar a una máxima liberación de calor de 10 MMBtu/hr y puede alcanzar una llama estable a 2 MMBtu/hr, el rango de *turndown* es de 5:1 (*turndown* = máximo calor liberado / mínimo calor liberado). En años recientes, la tendencia en la industria es a operar los quemadores con la capacidad de alcanzar altas tasas de “*turndown*” en el proceso de quemado, para evitar la necesidad de apagarlos. Muchos diseños de quemadores están limitados en su capacidad de *turndown* y, como resultado, los quemadores pueden experimentar inestabilidad debido a las bajas temperaturas en la caja de quemado durante la descoquización. Por lo tanto, los operadores necesitan apagar los quemadores durante el ciclo de descoquización. Un *turndown* típico para la nueva generación de quemadores es de 5:1. La tecnología CUBL puede alcanzar procesos seguros y fiables de *turndown* de hasta 10:1. La capacidad de un quemador para alcanzar un *turndown* por encima de los 10:1 asegura que el quemador tiene una capacidad de mantener una llama estable más allá de los límites mínimos de presión del gas combustible con el que puede operar el sistema de gas combustible de la planta. Un rango

Figura 6
Flujo de calor normalizado

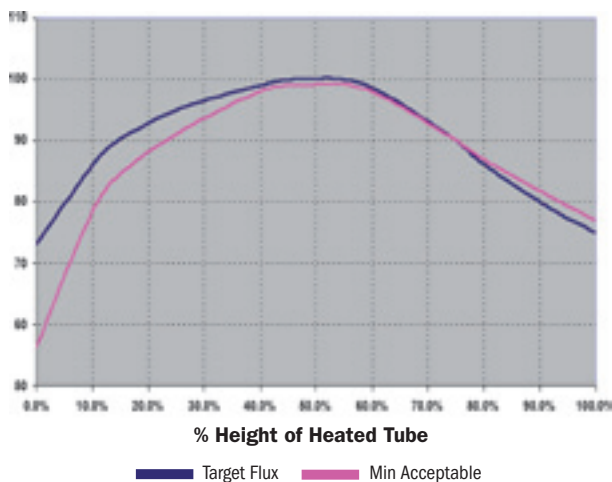
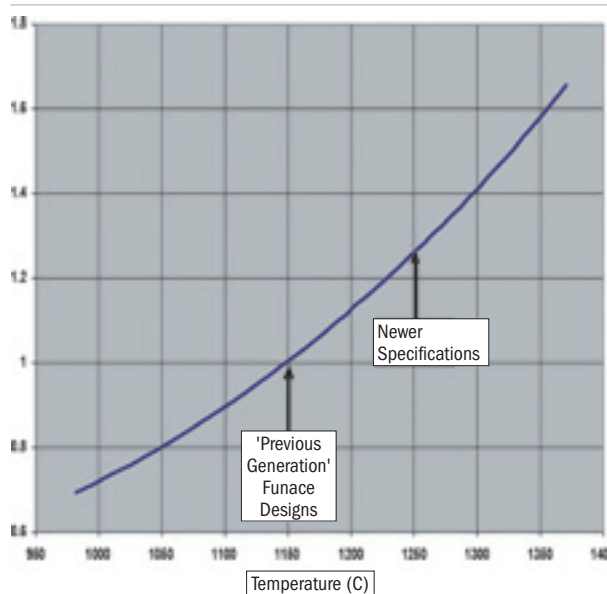


Figura 7
Emisiones de NOx como función de la temperatura de pared del horno



alto de *turndown* da mayor flexibilidad al personal de operación cuando opera la unidad, así como también proporciona un incremento en la seguridad en caso de error por parte del operador.

3 FLUJO DE CALOR EN LA SECCIÓN DE RADIACIÓN

El flujo de calor en un horno de craqueo térmico es importante. Todos los serpentines de craqueo con una alimentación dada deben ser mantenidos a la misma temperatura; y la temperatura individual de los serpentines debe incrementarse gradualmente desde la entrada hasta la salida. Los patrones de encendido contribuyen a la distribución de la temperatura y afectan al tiempo de ejecución del proceso de descoquización. Los quemadores deben diseñarse y ajustarse para dar un perfil de temperatura en la sección de radiación de forma que la temperatura del metal de los serpentines de radiación aumente suave y gradualmente desde la entrada hasta la salida. El calentamiento no uniforme de los serpentines conduce a tener puntos calientes en los tubos, con excesiva formación de coque, alto consumo de combustible y altos costos de mantenimiento.

Los diseñadores de hornos de craqueo han desarrollado perfiles “deseados” de flujo de calor para la sección de radiación en los hornos, como se muestra en la Figura 6. Los perfiles originales fueron desarrollados a partir de datos recogidos a través de hornos de prueba específicos. La experiencia de campo indica que, si estos perfiles se pueden alcanzar en hornos de prueba específicos, tendría lugar una operación satisfactoria en los hornos de craqueo actuales.

El flujo de calor en cualquier elevación en el horno es una función de la temperatura de la llama/gas y las temperaturas de las superficies radiantes. El logro del perfil deseado de flujo de calor no es difícil cuando el horno opera con un 100% de quemadores de pared radiante. La tendencia de usar menos quemadores añade complejidad al diseño de quemadores que propor-

cionen el perfil de flujo deseado mientras cumplen los niveles de emisión en chimenea. Usualmente, la eliminación de quemadores de pared viene acompañada por la eliminación de varias filas inferiores de quemadores y la instalación de quemadores de piso de llama plana. Los quemadores de piso de llama plana tienen una mayor liberación de calor y son los responsables del calentamiento uniforme de la pared del calentador desde el suelo hasta la fila superior de quemadores de pared radiante que han sido eliminados. Esto requiere de quemadores de piso de llama plana, con dimensiones específicas de llama para lograr operaciones satisfactorias.

4

EMISIONES DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NOx)

Las relativamente altas temperaturas de combustión en los hornos de craqueo llevan a la formación de NOx térmico. Los antiguos hornos de craqueo que utilizan tecnologías viejas de quemadores, típicamente producen niveles de NOx desde 100 mg/Nm³ hasta más de 200 mg/Nm³, y potencialmente más. La Figura 7 presenta una correlación de NOx producido como una función de la temperatura de pared.

Una reducción en la temperatura de la llama y una reducción en la presión parcial del oxígeno en la llama reducirán la cantidad de NOx térmico formado en el proceso de combustión. Ambos objetivos pueden ser alcanzados a través del uso de la combustión por etapas. La combustión por etapas implica el retraso de la mezcla del combustible y aire, y promueve la mezcla de los productos de combustión con la mezcla de combustible/aire para alcanzar una reducción de la temperatura de la llama y una reducción en la presión parcial de oxígeno. La tecnología CUBL utiliza usualmente tecnologías de combus-

tión por etapas contrastadas que alcanzan unas emisiones de NOx por debajo de los 80 mg/Nm³ (40 PPMv).

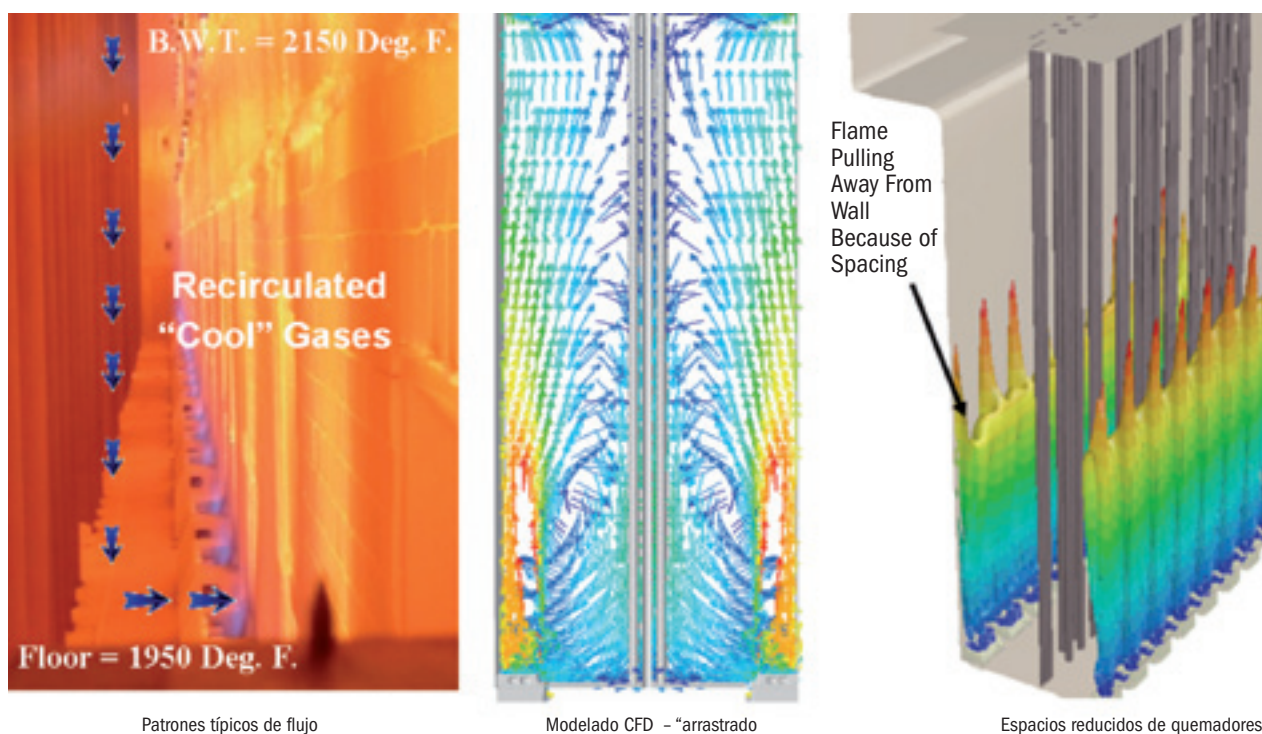
5

ARRASTRE DE LLAMA (FLAME ROLLOVER)

Las líneas de flujo de los productos de combustión en la sección radiante del horno tienen un impacto significativo en el rendimiento de los quemadores. El patrón de flujo deseado se ilustra en la fotografía de la Figura 8. El flujo ascendente ocurre a lo largo de la pared caliente, mientras hay un flujo hacia abajo (recirculación) adyacente a los tubos de más baja temperatura. Con este patrón de flujo, las llamas del quemador tienden a viajar verticalmente hacia arriba de la pared caliente, eliminando cualquier contacto con los tubos de proceso que pueden crear puntos calientes e internamente coque en los tubos, que limitan el tiempo de funcionamiento severamente.

El esfuerzo para reducir el tamaño físico de los hornos de craqueo térmico ha reducido el volumen del horno e incrementado la densidad de calor o la cantidad de calor por volumen de la sección de radiación. El área horizontal de la sección transversal de los hornos se reduce, lo cual favorece la tendencia a la formación de productos de combustión calientes, que normalmente viajan hacia arriba a lo largo de la pared, para expandirse a la salida del horno causando la disminución del flujo hacia abajo del horno de productos de combustión a lo largo de los tubos de proceso. Un número que se usa algunas veces para cuantificar la tendencia de recirculación prematura de los productos de combustión es la liberación total de calor por los quemadores, dividida por el área trasversal entre la pared del horno y los tubos de proceso.

Figura 8
Patrones de llama/flujo



SI LOS DISEÑADORES DE HORNOS Y LOS DISEÑADORES DE QUEMADORES TRABAJAN JUNTOS, SE PUEDEN DESARROLLAR NUEVAS MEJORAS

Cuando la longitud de los hornos se reduce y la capacidad del horno se mantiene, la distancia entre los quemadores debe ser reducida o se debe utilizar una menor cantidad de quemadores. Si el espacio entre los quemadores se reduce, puede ocurrir la superposición de llamas (interferencia de llama). La superposición de llamas incrementa la emisión de NOx, y además, incrementa la longitud de la llama y produce una llama entre los quemadores que sobresale dentro del espacio entre los tubos de proceso y la pared del horno. Si el horno tiene una proporción alta de liberación de calor hacia el área de flujo transversal, que es generalmente el caso cuando la longitud del horno se reduce, el patrón de recirculación “prematura” en el horno puede empujar o desviar la parte superior de la llama hacia los tubos de proceso. En cualquier situación en la cual las llamas son desviadas hacia los tubos de proceso, se pueden crear puntos calientes e incrementar la formación prematura de coque en los tubos.

Los cálculos en CFD (Computational Fluid Dynamics) proporcionan una herramienta útil para el estudio de los patrones de flujo de los productos de la combustión en todos los tipos de hornos/calentadores de fuego directo. La recirculación prematura hacia abajo de los productos de combustión viene ilustrada por los resultados de un estudio reciente de CFD para un horno de craqueo, mostrado en la Figura 8. Cuando este patrón de flujo ocurre, los extremos superiores de las llamas de los quemadores de piso de llama plana pueden ser “empujadas” en sentido horizontal y tocar los tubos de proceso. Esto se denomina algunas veces llama “arrastrada”. Los diseños tradicionales utilizan un bloqueo en el cuello del quemador para crear un “cuerpo forzado” que estabilice el mecanismo para estabilizar la llama. Estos diseños requieren como mínimo un 50% de bloqueo del cuello del quemador, y a su vez, se requiere un refractario en el mismo cuello del quemador con un aumento de su área de hasta un 50% para compensar la obstrucción. El cuello más grande del quemador empuja la llama hacia el interior del horno, y se incrementa la posibilidad que la llama choque con los tubos de proceso. La tecnología CUBL

Figura 9
Diseños de quemador



Figura 10
Horno de prueba



utiliza un mecanismo de estabilización que no requiere del 50% de bloqueo en el cuello, lo que reduce considerablemente el tamaño del quemador. La reducción del tamaño permite al quemador dirigir su llama plana contra la pared y evita verse afectado por el flujo descendente de productos de la combustión en la cercanía de los tubos de proceso. Mediante pruebas con el uso de monóxido de carbono, la llama de los CUBL ha demostrado ser aproximadamente un 40% más delgada que en diseños anteriores. La Figura 9 ilustra la proyección del refractario en diseños tradicionales de quemadores en comparación con la tecnología CUBL.

6 CONCLUSIONES

Aunque las regulaciones de emisiones, y los esfuerzos encaminados a reducir la inversión inicial y los costes de mantenimiento para hornos de craqueo térmico, han introducido mayor complejidad en el diseño de nuevos quemadores, existen quemadores que pueden alcanzar tanto los requisitos de transferencia de calor, como los requisitos estrictos en materia de emisiones. Si los diseñadores de hornos y los diseñadores de quemadores trabajan juntos usando herramientas como pruebas de fábrica y cálculos mediante CFD para evaluar el sistema completo quemadores/horno, se pueden desarrollar nuevas mejoras. La Figura 10 muestra un horno típico de prueba usado para verificar el comportamiento. Además de los criterios típicos para aceptar el comportamiento de los quemadores, deben evaluarse temas específicos de los hornos de craqueo térmico, como seguridad, perfil de flujo de calor radiante, comportamiento de NOx térmico y perfil de la llama del quemador.