

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 566 798**

51 Int. Cl.:

**F23C 6/04** (2006.01)

**F23L 7/00** (2006.01)

**F23D 1/02** (2006.01)

**F23C 5/32** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.05.2003 E 03736578 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.03.2016 EP 1537362**

54 Título: **Combustión con bajas emisiones de NOx**

30 Prioridad:

**15.05.2002 US 380818 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**15.04.2016**

73 Titular/es:

**PRAXAIR TECHNOLOGY, INC. (100.0%)  
39 OLD RIDGEBURY ROAD  
DANBURY, CT 06810-5113, US**

72 Inventor/es:

**KOBAYASHI, HISASHI;  
BOOL, LAWRENCE E., III y  
THOMPSON, DAVID R.**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

**ES 2 566 798 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Combustión con bajas emisiones de NOx

**Campo de la Invención**

5 La presente invención se refiere a la combustión de combustibles hidrocarbonados que contienen nitrógeno unido, particularmente de carbón.

**Antecedentes de la Invención**

10 En EEUU y en todo el mundo está creciendo la conciencia medioambiental lo que está conduciendo a aumentar la presión pública y legislativa para rebajar las emisiones de agentes contaminantes procedentes de calderas, incineradores y hornos. Un agente contaminante de particular preocupación es el NOx (por lo cual se quiere decir óxidos de nitrógeno tales como pero no limitados a NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, N<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, y mezclas de los mismos), el cual ha estado implicado en la lluvia ácida, el ozono a nivel de suelo, y la formación de partículas finas.

15 Están disponibles un número de tecnologías para rebajar las emisiones de NOx. Estas tecnologías se pueden dividir en dos grandes clases, primarias y secundarias. Las tecnologías primarias minimizan o previenen la formación de NOx en la zona de combustión mediante el control del proceso de combustión. Las tecnologías secundarias usan compuestos químicos para reducir el NOx formado en la zona de combustión a nitrógeno molecular. La presente invención es una tecnología de control primaria.

20 En las tecnologías de control primarias, se usan diferentes estrategias de combustión para controlar el denominado "NOx térmico" y el "NOx de combustible". El NOx térmico se forma por oxidación de moléculas de nitrógeno, N<sub>2</sub>, principalmente en aire de combustión a alta temperatura. Es la principal fuente de emisiones de NOx procedentes de gas natural y aceites ligeros que no contienen especies de nitrógeno químicamente unido. La principal estrategia de control para reducir las emisiones de NOx térmico es disminuir la temperatura pico de la llama. El NOx de combustible se forma por la oxidación de especies nitrogenadas contenidas en el combustible y es la principal fuente de emisiones de NOx procedentes de la combustión de carbón y aceite pesado. La presente invención se refiere a métodos de combustión mejorados para controlar la emisión de NOx de combustible.

25 La tecnología de control primaria para NOx de combustible comúnmente se denomina combustión escalonada en la cual la mezcla entre el aire de combustión y el combustible se controla cuidadosamente para minimizar la formación de NOx. La formación de NOx a partir del nitrógeno del combustible está basada en una competición entre la formación de NOx y la formación de N<sub>2</sub> a partir de las especies nitrogenadas en los volátiles del combustible y el nitrógeno del residuo carbonoso. Las condiciones ricas en oxígeno conducen la competición hacia la formación de NOx. Las condiciones ricas en combustible conducen las reacciones a la formación de N<sub>2</sub>. La combustión escalonada toma ventaja de este fenómeno al controlar cuidadosamente la mezcla de aire y combustible para formar una región rica en combustible para prevenir la formación de NOx. Para disminuir las emisiones de NOx, la región rica en combustible debe estar suficientemente caliente para hacer funcionar las cinéticas de reducción de NOx. Sin embargo, tiene que transferirse suficiente calor desde la primera etapa rica en combustible a la carga de calor del horno para prevenir la formación de NOx térmico en la segunda etapa.

35 Un quemador de bajo NOx convencional (LNB, del Inglés "Low NOx Burner") incluye una primera zona rica en combustible, cerca del orificio de alimentación, el cual está principalmente controlado mediante la mezcla y combustión de combustible y aire primario, y hasta cierto punto, aire secundario o terciario mezclado en esta zona. Para la combustión de carbón pulverizado el aire primario se usa para transportar las partículas de carbón.

40 En una segunda zona, el resto del aire secundario y cualquier aire terciario se mezclan con el combustible inquemado y los productos de la combustión parcial de la primera etapa y se completa la combustión. Un requerimiento de proceso importante para la combustión escalonada es transferir una cantidad suficiente de calor desde la primera etapa rica en combustible a la carga de calor del horno para enfriar los productos de combustión de la primera etapa. La temperatura inferior de la segunda etapa ayuda a disminuir la conversión de los compuestos nitrogenados restantes a NOx y también previene la formación de NOx térmico en la segunda etapa.

50 En el documento de patente US-A-5 291 841 hay descrito un método de combustión multi etapa de carbón que porta azufre y nitrógeno. En la primera etapa, una gran fracción de los hidrocarburos se consumen totalmente del combustible a alta temperatura y el azufre unido en el carbón se libera del mismo y, a continuación, se captura mediante reacción con un compuesto básico sólido tal como caliza a relativamente baja temperatura. En la etapa 2 los hidrocarburos restantes en el combustible se consumen totalmente, y la mezcla residual de cenizas de carbón y compuestos calcio-azufre se fusionan, encapsulando el azufre en escoria líquida, y una gran porción de los compuestos fundidos se separa de la corriente de gas. En la etapa 3, la oxidación de CO y H<sub>2</sub> casi se completa enteramente y los gases de combustión sustancialmente se enfrían mediante transferencia de calor al medio de funcionamiento. En la etapa 4, la combustión finalmente se completa en exceso de aire.

55 En un LNB aerodinámicamente escalonado, se introduce todo el aire de combustión desde el mismo puerto del quemador o adyacente al puerto del quemador. La configuración más común de un quemador de carbón de bajo

NOx es tener una serie de conductos anulares para el carbón/aire primario, aire secundario y aire terciario. El conducto central con frecuencia se usa para la pistola de aceite o para el gas natural para iniciar el calentamiento. Los flujos de aire secundario y terciario están equipados con generadores de turbulencia para impartir flujos turbulentos para crear una zona de recirculación para la estabilidad de la llama. Las velocidades del aire y el torbellino se ajustan para crear una primera zona rica en combustible relativamente grande a lo largo del eje del quemador, seguido de una mezcla relativamente gradual de aire secundario y terciario a lo largo del horno. Puesto que se deben proporcionar velocidades de aire suficientes para mezclar el combustible y el aire dentro del espacio del horno para completar la combustión, es difícil crear una zona rica de combustible muy grande para proporcionar un tiempo de residencia suficientemente largo para la máxima reducción de NOx.

Aunque el LNB es un modo bastante económico para reducir el NOx y se han realizado muchos avances en el diseño del horno, las versiones actualmente disponibles aún no son capaces de alcanzar los límites de emisiones en regulaciones pendientes de 0,068 kg (0,15 libras) (como NO<sub>2</sub>) por MMBtu de carbón quemado para calderas de servicio.

Los expertos en la técnica han superado las limitaciones de un LNB aerodinámicamente escalonado mediante un plan de combustión globalmente escalonada usando "aire sobre fuego" (OFA, del Inglés "Over Fire Air"). Se inyecta OFA de manera separada de un quemador o un grupo de quemadores para proporcionar una gran zona de combustión primaria (PCZ, del Inglés "Primary Combustion Zone") rica en combustible y una zona de quemado exhaustivo (BOZ, del Inglés "Burnout Zone") donde se complete la combustión mezclando OFA y combustible inquemado y los productos de la combustión parcial de la PCZ. Generalmente los puertos OFA están separados al menos un diámetro de puerto de quemador desde el quemador más cercano y varios diámetros de puerto de quemador desde el quemador más lejano. Aunque el combustible y la mezcla de aire y las condiciones estequiométricas locales cerca del puerto de quemador de un quemador individual sean similares a las de sin OFA, se forma una gran PCZ rica en combustible fuera de la zona de mezcla de aire de combustión cerca del quemador. Debido a la separación física de los puertos de inyección de OFA, el tiempo de residencia en la PCZ rica en combustible es mucho mayor que el generalmente obtenido en la primera zona rica en combustible de un quemador aerodinámicamente escalonado. La combinación de los puertos de LNB y OFA ha posibilitado la reducción adicional en las emisiones de NOx.

Los quemadores de bajo NOx y aire sobre fuego (sistemas OFA) representan una tecnología bastante madura y como tal se tratan ampliamente durante toda la patente y bibliografía de archivo. Se han propuesto muchas ideas para aumentar la eficacia de LNB y OFA mientras se minimizan los impactos perjudiciales tales como escasa estabilidad de la llama y carbón en la ceniza incrementado. De estas ideas dos son particularmente relevantes: precalentar el aire para la primera etapa, y convertir la cámara de combustión para oxicomustión de combustible.

Tanto el precalentamiento de aire como la oxicomustión de combustible aumentan la eficacia de la combustión escalonada para la reducción de NOx del combustible al incrementar la temperatura en la zona de combustión primaria sin incrementar la relación estequiométrica. La oxicomustión de combustible ofrece la ventaja adicional de mayores tiempos de residencia en la región rica en combustible, debido a flujos de gas inferiores, lo cual ha demostrado que reduce las emisiones de NOx. Tal como se ha discutido anteriormente, la combustión escalonada usa una etapa rica en combustible para promover la formación de N<sub>2</sub> en lugar de NOx. Puesto que las reacciones para formar N<sub>2</sub> están cinéticamente controladas, tanto la temperatura como la concentración radical de hidrocarburo son críticas para reducir la formación de NOx. Por ejemplo, si la temperatura es alta y la concentración radical es baja, tal como bajo condiciones no escalonadas o ligeramente escalonadas, se incrementa la formación de NOx. Cuando la concentración radical es alta pero la temperatura es baja, tal como bajo condiciones profundamente escalonadas, se retrasa la conversión de especies intermedias tal como HCN a N<sub>2</sub>. Cuando se añade aire para el quemado exhaustivo completo, los intermedios se oxidan para formar NOx, por lo tanto se incrementa la formación de NOx neto.

Sarofim et al. "Strategies for Controlling Nitrogen Oxide Emissions During Combustion of Nitrogen bearing fuels", "69th Annual Meeting of AIChE", Chicago, IL, Nov. de 1976, y otros han sugerido que las cinéticas de la primera etapa se pueden aumentar mediante el precalentamiento del aire de combustión a temperaturas bastantes altas. Alternativamente Kobayashi et al. ("NOx Emission Characteristics of Industrial Burners and Control Methods Under Oxygen-Enriched Combustion Conditions", "International Flame Research Foundation 9th Members' Conference", Noordwijkerhout, Mayo de 1989), sugirieron que usando oxígeno en lugar de aire para la combustión incrementaría también las cinéticas. La oxicomustión de combustible, cuando la temperatura de llama está controlada por el diseño del quemador, reduce más la formación de NOx térmico mediante la eliminación de manera sustancial de N<sub>2</sub> en el aire de combustión. En ambos casos el resultado neto es que se incrementa la temperatura del gas en la primera etapa, dando como resultado reducida formación de NOx. Además, el uso de tanto el precalentamiento de aire como la oxicomustión de combustible permite que la primera etapa esté más profundamente escalonada sin degradar la estabilidad de la llama. Esto permite incluso más reducciones en la formación de NOx.

La oxicomustión de combustible ofrece una ventaja adicional para LNB. Timothy et al. ("Characteristics of Single Particle Coal Combustion", "19th Symposium (international) on Combustion", The Combustion Institute, 1983) mostraron que los tiempos de desvolatilización se reducen significativamente, y se incrementa la producción volátil, cuando el carbón se quema en condiciones enriquecidas en oxígeno. Estos ensayos eran ensayos de combustión

de partícula sencilla realizados bajo condiciones altamente pobres en combustible, lo cual no proporciona información sobre cómo se necesita mucho oxígeno para conseguir esto bajo condiciones de combustión más realistas. La mayor producción volátil quiere decir que los combustibles en la fase gaseosa se incrementan en comparación con el punto de referencia - conduciendo a una fase gaseosa más rica en combustible que inhibe la formación de NOx a partir de las especies de nitrógeno volátiles. Además, los volátiles de combustible prenden rápidamente y afianzan la llama al quemador, lo cual ha mostrado que baja la formación de NOx. La aumentada producción de volátil también conduce a acortar los tiempos de quemado exhaustivo puesto que se queda menos residuo carbonoso.

O. Marin, et al., discuten los beneficios del oxígeno para la combustión de carbón en un artículo titulado "Oxygen Enrichment in Boiler" ("2001 AFRC/JFRC/IEA Joint International Combustion Symposium", Kauai, HI, 9-13 de Septiembre, 2001). Propusieron la inyección de oxígeno en el aire sobre fuego (también descrito como "aire terciario" en este artículo), para reducir el carbón inquemado en la ceniza, o perdido en la ignición (LOI, del Inglés "Loss on Ignition"), sin incrementar la emisión de NOx. Los resultados de la simulación en ordenador presentados por Marin, et al. compararon el caso del aire de referencia y un caso enriquecido en oxígeno con una alta velocidad, la corriente enriquecida en oxígeno en el aire terciario (también calificado aire sobre fuego). De acuerdo con Marin, et al., "Se nota un incremento del 5% sobre la transferencia de calor en la cámara de combustión, combinado con un incremento absoluto del 7% en el quemado exhaustivo del residuo carbonoso." (página 8)

El documento de Patente U.S. N° 4.495.874 describe el enriquecimiento en oxígeno del aire primario y/o secundario en quemadores de carbón pulverizado para incrementar el índice de vapor de una caldera de carbón altamente pulverizado a cenizas. El Ejemplo 4, en el que se describe los efectos del enriquecimiento en oxígeno sobre emisiones de NO cuando se quema carbón alto en cenizas, dice que el oxígeno añadido al aire primario o igualmente al aire primario o secundario incrementó inicialmente el contenido de NO a aproximadamente un 2% de enriquecimiento (lo cual está definido en la presente memoria como concentración de O<sub>2</sub> al 23% del aire total), pero descendió bruscamente la cantidad de NO en el gas de la chimenea a mayores enriquecimientos. Por ejemplo, a 4 por ciento de enriquecimiento, se descendió el NO aproximadamente 18 a 21 por ciento. Sin embargo, no hay descenso de NO resultante cuando se añadió oxígeno solamente al aire secundario. De hecho, hubo un incremento en la concentración de NO de aproximadamente 12 por ciento.

Aunque la técnica anterior describe diversos aumentos elegantes para la combustión escalonada y LNB, diversos problemas prácticos han limitado su aplicación. Primero, el precalentamiento del aire de combustión a los niveles requeridos para aumentar las cinéticas requiere diversas modificaciones tanto del sistema como de la canalización del aire. Las secciones de calentador del aire y economizador deben estar modificadas para permitir que el aire entrante se caliente a mayores temperaturas, lo cual puede requerir modificaciones del resto de los componentes del ciclo de vapor. El sistema de conductos y la caja de vientos, así como el propio quemador, también deben estar modificados para manejar el aire caliente. Todas las modificaciones pueden ser costosas y pueden tener un impacto negativo sobre el funcionamiento de la caldera.

La barrera principal para el uso de oxicomustión de combustible en calderas ha sido el coste del oxígeno. Para que el uso de oxígeno sea económico los ahorros de combustible conseguidos mediante el incremento de la eficacia del proceso deben ser mayores que el coste del oxígeno administrado. Para funcionamientos en alta temperatura, tales como hornos sin significativa recuperación de calor, esto se consigue fácilmente. Sin embargo, para funcionamientos más eficientes, tales como calderas, los ahorros de combustible alcanzables mediante el uso de oxicomustión de combustible generalmente es mucho menor que el coste del oxígeno. Por ejemplo, si una caldera de servicio de carbón típica se convirtiera de combustión por aire a de combustión por oxígeno, se requerirá aproximadamente 15 a 20% del rendimiento de energía de esa caldera para producir el oxígeno necesario. Claramente, esto es poco económico para la mayoría de las calderas.

Por tanto queda una necesidad de un método para conseguir reducidas emisiones de NOx en la combustión de combustible (particularmente carbón) que contiene uno o más componentes nitrogenados y especialmente de un método que se pueda llevar a cabo en hornos existentes sin requerir extensas modificaciones estructurales.

### Breve compendio de la invención

Un aspecto de la presente invención, la cual también se puede considerar un método para actualizar dispositivos de combustión existentes, es un método que reduce la cantidad de NOx emitida tal como se define en la reivindicación 1.

Otro aspecto de la presente invención tal como se define en la reivindicación 7 se puede considerar un método para operar un dispositivo de combustión, sea actualizado o construido nuevo que incorpora las características de esta invención, en donde el método reduce la cantidad de NOx emitido.

Tal como se usa en la presente memoria el término "relación estequiométrica" cuando se usa en el contexto de una corriente oxidante que contiene oxígeno y una corriente de combustible quiere decir la relación entre el oxígeno en la corriente oxidante y la corriente de combustible y la cantidad total de oxígeno que se necesitaría para convertir

completamente todo el carbono, azufre e hidrógeno presente en las sustancias que comprenden la corriente de combustible a dióxido de carbono, dióxido de azufre y agua.

5 Tal como se usa en la presente memoria, el término “rico en combustible” quiere decir que tiene una relación estequiométrica menor de 1,0 y el término “pobre en combustible” quiere decir que tiene una relación estequiométrica mayor de 1,0.

Tal como se usa en la presente memoria, el término “nitrógeno unido” quiere decir nitrógeno presente en una molécula en lugar de como  $N_2$ .

Tal como se usa en la presente memoria, “no acuoso” quiere decir no suspendido en, disuelto en, o disperso en agua, y que no contiene agua, excepto que no excluye el agua adsorbida o el agua de hidratación.

10 Tal como se usa en la presente memoria, el término “zona de combustión primaria” quiere decir la región dentro de un dispositivo de combustión inmediatamente adyacente a las salidas del quemador y que está en su mayoría ocupada por la llama o llamas del quemador o quemadores.

15 Tal como se usa en la presente memoria, el término “zona de quemado exhaustivo” quiere decir la región dentro de un dispositivo de combustión que está entre la zona de combustión primaria y la chimenea, fuera de la llama o llamas que están en la zona de combustión primaria, donde se inyecta el aire sobre fuego y se queman los combustibles residuales y los combustibles de la zona de combustión primaria con aire sobre fuego.

Tal como se usa en la presente memoria, el término “aire de combustión primaria” quiere decir que ya ha sido combinado con combustible cuando el combustible y este aire son suministrados dentro de un dispositivo de combustión, por ejemplo, a través de un orificio de un quemador.

20 Tal como se usa en la presente memoria, el término “aire de combustión secundaria” quiere decir aire que se suministra dentro de un dispositivo de combustión a través de uno o más orificios de un quemador, pero el cual no se ha combinado con el combustible cuando este aire es suministrado dentro del dispositivo de combustión.

25 Un quemador que tiene orificios para el aire secundario puede tener orificios adicionales para suministrar aire, dichos orificios adicionales están más lejos del punto de entrada del combustible a través del quemador de lo que están los orificios para el aire secundario. Tal como se usa en la presente memoria, el término “aire de combustión terciario” quiere decir aire que se suministra dentro de un dispositivo de combustión a través de tales orificios adicionales. Si un quemador también tiene orificios colocados incluso más lejos del punto de entrada del combustible que los orificios para el aire terciario, entonces el aire suministrado a través de tales orificios lejanos se califica en la presente memoria “aire de combustión cuaternario”.

30 Tal como se usa en la presente memoria, el término “quemador aerodinámicamente escalonado” quiere decir un quemador en el que todo el aire de combustión se introduce desde el mismo puerto del quemador o adyacente al puerto del quemador, y es capaz de operar bajo condiciones en las que están presentes las velocidades del aire y los patrones de flujo que crean una primera zona rica en combustible relativamente grande a lo largo del eje del quemador, seguido de mezcla relativamente gradual de aire secundario y terciario a lo largo del horno.

35 Tal como se usa en la presente memoria, el término “aire sobre fuego” (o OFA) quiere decir aire que se inyecta dentro de un dispositivo de combustión por separado del quemador o quemadores en el dispositivo de combustión para proporcionar una gran zona de combustión primaria rica en combustible y una zona de quemado exhaustivo donde la combustión se completa al mezclar OFA con el combustible inquemado y los productos de la combustión parcial de la zona de combustión primaria.

40 Las referencias en la presente memoria al suministro de “oxígeno”, al “oxígeno” que se suministra, y otras referencias en la presente memoria al uso de “oxígeno” en un contexto análogo, quiere decir corrientes gaseosas que contienen al menos 35% en volumen de  $O_2$ . Preferiblemente, el oxígeno se proporciona como una corriente gaseosa que contiene al menos 50% en volumen de  $O_2$ , más preferiblemente que contiene al menos 80% en volumen de  $O_2$ , e incluso más preferiblemente que contiene al menos 90% en volumen de  $O_2$ . También se debería  
45 entender que las referencias en la presente memoria a la combustión o reacción que implica “oxígeno” se refiere al propio  $O_2$ .

### Breve descripción de los dibujos

La Figura 1 es una representación de una sección transversal de una realización del aparato para llevar a cabo la presente invención.

50 La Figura 2 es una representación de una sección transversal de un quemador útil para llevar a cabo la presente invención.

Las Figuras 3a-3c son representaciones de una sección transversal de lanzas útiles para suministrar oxígeno dentro de los quemadores las cuales no forman parte de la invención. La Figura 3d representa una lanza de acuerdo con la invención.

La Figura 4 son resultados del ensayo a escala de laboratorio que muestran la reducción de las emisiones de NOx con la presente invención.

La Figura 5 son los resultados del ensayo del quemador de bajo NOx a escala piloto que muestran la reducción de las emisiones de NOx con la presente invención.

- 5 La Figura 6 son los resultados del ensayo del quemador de bajo NOx a escala comercial que muestran la reducción de las emisiones de NOx con la presente invención.

La Figura 7a es una vista de una sección transversal de otro tipo de horno de caldera con el cual se puede utilizar la presente invención, en donde el combustible y el oxidante se suministran desde puertos separados tangencialmente dentro del horno. La Figura 7B es una vista superior del horno representado en la Figura 7A, que muestra el flujo tangencial del combustible y el oxidante dentro del horno. La Figura 7C es una vista frontal desde el interior del horno que examina los frentes de los puertos.

10

### Descripción detallada de la invención

La invención se describirá en referencia a las Figuras, aunque una descripción que se refiere a las Figuras no intenta limitar el alcance de lo que se pretende que sea la presente invención.

- 15 La Figura 1 muestra el dispositivo de combustión 1, el cual puede ser cualquier aparato en donde la combustión se lleva a cabo en el interior 2 del dispositivo. Los dispositivos de combustión preferidos incluyen hornos y calderas que se usan para generar vapor para generar energía eléctrica por medios convencionales, no mostrados.

Cada quemador 3 en una pared lateral o pared de extremo del dispositivo de combustión 1 suministra combustible, aire y oxígeno a partir de fuentes de los mismos fuera del dispositivo de combustión 1 en el interior 2 del dispositivo de combustión 1. Combustibles adecuados incluyen líquidos de hidrocarburo, tales como fuel-oil, y también incluyen sólidos de hidrocarburo pulverulentos, un ejemplo preferido de los cuales es carbón pulverizado o coque de petróleo.

20

Tal como se ve en la Figura 1 y más de cerca en la Figura 2, el quemador 3 preferiblemente está comprendido por diversos conductos dispuestos concéntricamente, aunque se pueden usar otras construcciones para el mismo efecto. El combustible se suministra dentro del dispositivo de combustión 1 por un conducto anular 4, dispuesto concéntricamente alrededor de la lanza 5 por la cual se suministra oxígeno tal como se describe en la presente memoria. Preferiblemente, el combustible es transportado desde una fuente de suministro 20 a uno o más quemadores 3 y es impulsado a través del quemador 3 al interior 2 del dispositivo de combustión 1, mediante medios de bombeo adecuados en el caso de líquidos tales como fuel-oil, y mediante sopladores e impulsores de diseño convencional en el caso de sólidos de hidrocarburo tales como carbón pulverizado, el cual se suministra de manera convencional dentro del dispositivo de combustión con la ayuda de aire de transporte (el cual es el aire de combustión primario). Los combustibles hidrocarbonados líquidos preferiblemente se suministran a través de una o más boquillas de atomización de diseño convencional, para suministrar el combustible líquido dentro de la cámara de combustión como gotitas dispersas, discretas con aire de atomización. Una cantidad eficaz generalmente de aproximadamente 0,68 a 0,907 kg (1,5 a 2,0 libras) de aire primario se usa para transportar 0,454 kg (1 libra) de carbón, lo cual corresponde a aproximadamente el 20% del aire de combustión estequiométrico requerido para la combustión completa de carbón bituminoso. Para la combustión de aceite pesado se usa aproximadamente 0,227 a 0,454 kg (0,5 a 1,0 libras) de aire primario para atomizar 0,454 kg (1 libra) de aceite.

25

30

35

En referencia a la Figura 2, se administra aire de combustión 22 mediante un ventilador FD a una o más cajas de viento 21 y se suministra a conductos de aire de uno o más quemadores 3. El aire de combustión secundario 15 se suministra a través del quemador 3 dentro del dispositivo de combustión 1, preferiblemente por conductos anulares 11 dispuestos concéntricamente alrededor del espacio anular 4 por los que se suministra el combustible de hidrocarburo. Preferiblemente el aire de combustión terciario 16 se suministra a través del quemador 3 dentro del dispositivo de combustión 1, preferiblemente por conductos anulares 12 dispuestos concéntricamente alrededor del conducto de aire secundario. Preferiblemente el aire de combustión también se suministra a través del puerto de aire sobre fuego 7 (véase en la Figura 1) dentro del dispositivo de combustión 1. Preferiblemente, el oxígeno se suministra en el interior 2 del dispositivo aparte de cualquier aire de combustión secundario y terciario. Es decir, el oxígeno que se suministra a través del quemador 3 de acuerdo con esta invención preferiblemente se consume completamente en combustión con el combustible, antes de que el oxígeno tenga una oportunidad de llegar a combinarse con el aire de combustión secundario y terciario antes o inmediatamente después de que sea suministrado dentro del dispositivo de combustión 1, especialmente cuando no se usa aire sobre fuego. Alternativamente, aún en referencia a la Figura 2, el combustible se podría suministrar por el conducto anular 4, y el oxígeno suministrado por la lanza 5 rodeada por el conducto anular 4 o el oxígeno se podría suministrar por el conducto 11 que rodea el conducto anular 4.

40

45

50

Los quemadores de bajo NOx preferidos tienen conductos de aire primario (suministro de combustible), secundario y terciario para la buena adaptabilidad aerodinámica. Sin embargo, se pueden usar otros diseños de quemador de bajo NOx usando solamente suministros de aire primario y secundario. Una vez que se hayan determinado los ajustes óptimos con los tres conductos, los álabes de turbina de aire secundario y el conducto pueden estar diseñados para crear aproximadamente las mismas características de mezcla aerodinámicas que con el diseño de

55

tres conductos. Alternativamente, se pueden usar quemadores con un conducto adicional (cuaternario) (tal como el quemador RSFC™ descrito en el documento de Patente U.S. 5.960.724).

5 Antes de que un dispositivo de combustión sea actualizado de acuerdo con la presente invención para reducir la formación de NOx formado en el funcionamiento del dispositivo de combustión, la lanza 5 para el suministro de oxígeno ya no está presente. La combustión se lleva a cabo entre el combustible de hidrocarburo y el oxígeno en el aire de combustión, dando como resultado la formación de una llama 6. La región 8 de la llama más cercana al extremo del quemador 3, es decir, donde el combustible de hidrocarburo emerge del quemador, es la zona rica en combustible. El área de la llama 6 alrededor de su periferia es relativamente pobre, ya que el aire de combustión secundario y terciario no se han mezclado o reaccionado completamente con el combustible. Cuando se reduce la cantidad de aire de combustión 22 a quemador 3 y se suministra una cantidad suficiente de aire desde el puerto de aire sobre fuego 7 para el escalonamiento de la combustión global, la zona inferior entera del horno, o zona de combustión primaria (PCZ) 10, por debajo del puerto de aire sobre fuego 7 llega a ser rica en combustible, excepto las áreas cerca de los quemadores 3 donde el aire se inyecta y aún no se mezcla o reacciona completamente con el combustible.

15 A continuación, en la implementación de la presente invención, se añade la lanza 5. Alternativamente, se reemplaza un quemador que suministra combustible y aire de combustión con un quemador que funciona tal como se muestra en las Figuras.

20 Preferiblemente, el aire también se suministra a través de la abertura del puerto de fuego sobre aire 7 en el interior del dispositivo de combustión 1, para hacer la zona de combustión primaria 10 menos pobre en combustible o más rica en combustible y para proporcionar oxígeno adicional que ayude a conseguir la combustión completa del combustible en la zona quemado exhaustivo 9. El oxígeno en el aire de combustión suministrado a través del quemador 3, combinado con el oxígeno contenido en el aire suministrado en la abertura 7, si se usa, son suficientes para posibilitar la combustión completa del combustible, y generalmente contienen 10 a 25 por ciento de volumen en exceso de oxígeno sobre la cantidad requerida para la combustión completa del combustible.

25 Preferiblemente, el aire de combustión secundario y terciario se suministra en el quemador 3 para producir turbulencia aproximadamente un eje longitudinal, creando de ese modo una zona de recirculación cerca de cada quemador y mejorando la combinación de aire y combustible. La turbulencia se puede conseguir mediante técnicas conocidas, tal como proporcionar deflectores, 13 y 14, en los conductos anulares para flujo de aire secundario y terciario del quemador que dirige el flujo de las corrientes en la dirección de turbulencia deseada. Se prefiere proporcionar un alto grado de turbulencia, preferiblemente un número de torbellino, tal como el definido en "Combustion Aerodynamics", J.M. Beer and N.A. Chigier, Robert E. Krieger Publishing Company, Inc., 1983, de 0,6 a 2,0.

35 En la práctica de esta invención con aire sobre fuego, se prefiere que la cantidad total de aire suministrado a través del quemador 3, es decir, la suma de aire primario, secundario y terciario, esté entre 60 y 99% del requerimiento de aire estequiométrico para la combustión completa. Lo más preferiblemente es que la cantidad total de aire suministrado a través del quemador 3 dentro de la zona de combustión primaria sea aproximadamente 70 a 85% del requerimiento de aire estequiométrico para la combustión completa.

40 La velocidad de cada corriente de aire de combustión primaria, secundaria y terciaria es preferiblemente de 15,2 a 45,7 m/s (50 a 150 pies por segundo) en la salida de la boquilla a partir de la que emerge el aire. La velocidad del oxígeno inyectado a través de la lanza 5, en la salida de la boquilla a partir de la que emerge el oxígeno, está preferiblemente dentro del 10% al 900%, más preferiblemente dentro del 25% al 400% de la velocidad del aire primario.

45 Los ensayos han sugerido que un planteamiento preferido es exponer al menos algunas de las partículas de combustible o gotitas a una alta concentración de oxígeno en lugar de enriquecer uniformemente el aire de combustión total. El planteamiento sencillo de inyectar oxígeno dentro de la caja de viento 21 de un quemador de bajo NOx de modo que el aire enriquecido se suministre al quemador entero, incluyendo el aire de la etapa primaria crítica, no se considera eficaz.

50 Cuando el oxígeno puro se mezcla previamente o se mezcla rápidamente en la corriente de transporte de carbón (corriente de aire primario) usando el 20% de aire estequiométrico y la relación estequiométrica de combustión total se mantiene constante a 1,15 mediante la extracción de la cantidad estequiométricamente equivalente de aire desde o bien el aire secundario o el terciario (\*), se calculan las siguientes concentraciones promedio de oxígeno en la corriente de aire de transporte y en el aire de combustión total, asumiendo que el aire es seco y contiene 21% de O<sub>2</sub>.

% de aire estequiométrico reemplazado con O <sub>2</sub> (*)	Concentración de O <sub>2</sub> en aire de transporte (% vol)	Concentración de O <sub>2</sub> promedio en aire de combustión total (% vol)
0	21,0	21,0
5	24,9	21,7
10	28,5	22,5
15	31,7	23,4
20	34,7	24,3
25	37,4	25,4

(\* por ejemplo, 0,142 m<sup>3</sup> (5 cf) de aire reemplazado con 0,0297 m<sup>3</sup> (1,05 cf) de O<sub>2</sub> puro para dar la misma cantidad de O<sub>2</sub>)

5 En este ejemplo, debido a la pequeña cantidad de oxígeno usada, se consiguen solamente modestos incrementos en la concentración de oxígeno de aire cuando se mezcla uniformemente incluso cuando se mezcla el oxígeno solamente con el aire de transporte. Un método preferido es inyectar oxígeno dentro de la corriente de transporte carbón/aire en la punta de la boquilla de la lanza. En este caso algunas de las partículas de carbón se mezclan con chorros de oxígeno y crean localmente zonas de mezcla de alto O<sub>2</sub> de carbón. Tales condiciones pueden proporcionar zonas de fuentes de ignición rápida y facilitar ignición temprana y desvolatilización en comparación con el caso en el que el oxígeno está previamente mezclado con la corriente de aire de transporte.

10 Otro método preferido es inyectar oxígeno desde el espacio anular interior o exterior adyacente a la corriente de carbón. En este caso se proporciona la condición de combustión rica en oxígeno favorable en el límite de las corrientes de carbón y oxígeno.

15 Cuando el oxígeno se inyecta por separado a alta velocidad paralelo a la corriente de combustible, como era el caso para Farmayan, et al., el(los) chorro(s) de oxígeno se puede(n) diluir rápidamente con gases circundantes y se puede retardar su eficacia. Por tanto, el método de inyección de oxígeno tiene que estar cuidadosamente diseñado.

20 La presente invención mejora, es decir, reduce, la formación de NOx en el dispositivo de combustión mediante el suministro de oxígeno dentro de la corriente de combustible de hidrocarburo entrante tal como se ha descrito en la presente memoria. Más específicamente y preferiblemente, el oxígeno se suministra como una corriente de oxígeno concentrado que comprende preferiblemente al menos 50% en volumen de O<sub>2</sub>, más preferiblemente al menos 80% en volumen de O<sub>2</sub>, lo más preferiblemente al menos 90% en volumen de O<sub>2</sub> y se suministra directamente dentro del combustible de hidrocarburo cuando emerge del quemador y entra en el interior 2 del dispositivo de combustión 1. Por tanto, al menos algunas de las partículas del combustible sólido, o las gotitas del combustible líquido, como puede ser el caso, entran en el dispositivo de combustión y la zona rica en combustible de la llama 6, en una atmósfera gaseosa que contiene una alta concentración de oxígeno.

25 Cuando se usa aire sobre fuego para el escalonamiento de la combustión global, preferiblemente con quemadores de aire equipados con tres o cuatro conductos de aire separados, el oxígeno se puede mezclar previamente con el aire primario o secundario o ambos, usando burbujeadores adecuados dentro de los conductos de gas en el quemador 3.

30 El oxígeno preferiblemente se suministra por una lanza 5 o vía de suministro similar que se puede abrir en el extremo que se abre dentro del dispositivo de combustión 1, o que se cierra en el extremo y tiene dos o más aberturas en su periferia adyacente a ese extremo cerrado, de modo que los flujos de oxígeno salen a través de esas aberturas directamente dentro del combustible de hidrocarburo que entra en el dispositivo de combustión desde el quemador.

35 En referencia a las Figuras 7A y 7C, un horno de llama tangencial 1 comprende una serie de puertos para inyectar combustible, y puertos para inyectar aire de combustión, en el interior del horno. Generalmente los puertos de combustible y los puertos de aire de combustión se disponen en una fila vertical, alternando uno con otro, tal como se ilustra en las Figuras 7A y 7C en donde los puertos 31 para la inyección de combustible se alternan con los puertos 32 para la inyección de aire de combustión. El combustible entra en combustión en el interior del horno con el aire de combustión. El horno también está equipado con puertos de aire sobre fuego 7.

40 La presente invención se adapta fácilmente a hornos que tienen este tipo de construcción, por ejemplo proporcionando una lanza 5 en uno o más de los puertos de combustible y suministrando a continuación oxidante en las cantidades requeridas tal como se enseña en la presente memoria en el combustible cuando emerge del quemador. Las lanzas de oxígeno 5 también se pueden colocar en uno o más de los puertos de aire de combustión



o fuera de los puertos de aire y combustible, y el oxígeno se inyecta desde la(las) lanza(s) hacia la corriente de combustible adyacente.

Las Figuras 3a a 3d muestran diversas configuraciones de lanza que se pueden emplear. Se pueden usar otras configuraciones de lanza. En la Figura 3a, la lanza 5 termina con un orificio sencillo 31 que preferiblemente está orientado a lo largo del eje de la lanza.

En la Figura 3b, el extremo de la lanza 5 está cerrado y se proporcionan dos o más, preferiblemente dos a dieciséis, más preferiblemente cuatro a ocho boquillas 32 a lo largo del perímetro de la lanza cerca del extremo caliente de la lanza para la inyección de oxígeno radial. Más de una fila de las boquillas radiales también se pueden proporcionar a lo largo del perímetro de la lanza cerca del extremo caliente. Una a cuatro o más boquillas también se pueden proporcionar en el extremo final de esta lanza.

En la Figura 3c, se proporcionan dos o más y preferiblemente dos a dieciséis, más preferiblemente cuatro a ocho boquillas 32 radialmente cerca del extremo a contracorriente cerrado de la lanza 5, y se proporcionan dos o más, preferiblemente dos a dieciséis, preferiblemente cuatro a ocho boquillas 33 cada una de las cuales forman un ángulo mayor de 0 grados y menor de 90 grados al eje de la dirección del flujo de oxígeno dentro de la lanza 5.

En la Figura 3d, se proporcionan dos o más y preferiblemente dos a ocho boquillas 34 a lo largo del perímetro de la lanza 5 cerca del extremo caliente de la lanza 5, cada una de las cuales forma un ángulo de 30 a 90 grados, preferiblemente un ángulo de 30 a 60 grados, con respecto al inverso de la dirección de flujo del oxígeno dentro de la lanza 5.

En estas y otras realizaciones de lanza las boquillas por el lateral de la lanza se pueden disponer sobre una o más de una circunferencia.

El ángulo óptimo de la inyección de oxígeno para el control de NOx depende del momentum tangencial y radial del aire circundante, la geometría del puerto del quemador y la naturaleza del patrón de flujo de aire del quemador cerca de la lanza de oxígeno. Por consiguiente, para mejores resultados en los quemadores que tienen bajo momentum de aire radial, el ángulo óptimo es de 90° o mayor desde el eje del quemador, mientras que para obtener mejores resultados en quemadores que tienen mayor momentum radial generalmente se requerirá que el ángulo se reduzca para evitar mezclar el oxígeno con la corriente de aire. Con flujo de aire altamente radial el ángulo óptimo es de 15° o menor (en gran parte inyección axial). Para aquellos quemadores que usan técnicas que crean un componente de flujo de aire fuerte en la dirección radial, tal como alta turbulencia con un puerto de quemador divergente superficial o deflectores de aire, boquillas de oxígeno que están principalmente en ángulo en la dirección axial (ángulo de menos de 30° desde el eje) son óptimas. Para quemadores en los que el flujo de aire es predominantemente axial (es decir, el componente radial del flujo de aire es pequeño o no existente) se prefiere inyectar el oxígeno en la dirección radial (ángulos entre 45° y 135° desde el componente de flujo axial).

Cuando el oxígeno se inyecta dentro del dispositivo de combustión 1 tal como se ha descrito en la presente memoria, el caudal del aire de combustión suministrado a través del quemador 3 se reduce simultáneamente para mantener o reducir la relación estequiométrica de la zona de combustión primaria. Cuando se usa aire sobre fuego, la relación estequiométrica de la zona de combustión primaria con la inyección de oxígeno está preferiblemente entre 60 y 99%, más preferiblemente entre 60 y 85%, lo más preferiblemente entre 70 y 85%, del requerimiento de aire estequiométrico para la combustión completa. La cantidad de oxígeno suministrado de esta manera debería ser suficiente para estabilizar una relación estequiométrica en la zona rica en combustible 8 de la llama 6 que es de aproximadamente 0,85 y es preferiblemente mucho menor de 0,85, por ejemplo, 0,65 o menos. La cantidad de oxígeno suministrado por la línea 5 debería ser menor de 20% de la cantidad estequiométrica requerida para la combustión completa del combustible. Preferiblemente, la cantidad corresponde a menos del 15% de la cantidad estequiométrica requerida para la combustión completa del combustible. Más preferiblemente, la cantidad corresponde a menos del 10% de la cantidad estequiométrica requerida para la combustión completa del combustible. Lo más preferiblemente, la cantidad corresponde a menos del 5% de la cantidad estequiométrica requerida para la combustión completa del combustible.

Al contrario que en la presente invención, el documento de Patente U.S. Nº 4.495.874 describe NO incrementado con 2% de enriquecimiento en oxígeno, lo cual tal como se define en esa patente es equivalente a aproximadamente 13% de la cantidad estequiométrica requerida para la combustión completa del combustible. También describe NO disminuido bruscamente a mayores enriquecimientos (enriquecimiento al 4%), lo cual tal como se define en esa patente es equivalente a aproximadamente 23% de la cantidad estequiométrica requerida para la combustión completa del combustible. La patente claramente no anticipa las conclusiones de la presente invención de que una cantidad pequeña de oxígeno, es decir, menos del 20% de la cantidad estequiométrica requerida para la combustión completa del combustible, puede inesperadamente reducir las emisiones de NOx cuando se inyecta oxígeno o aire enriquecido con oxígeno en la zona rica en combustible de la zona de combustión primaria.

La emisión de NOx depende fuertemente de las condiciones estequiométricas locales. Ya que la inyección de oxígeno hace la condición estequiométrica local más pobre, uno tiene que considerar el cambio en las condiciones estequiométricas locales después de la inyección de oxígeno. Por ejemplo, la inyección de oxígeno, equivalente al

10% del aire estequiométrico, dentro de una zona localmente rica en combustible a una relación estequiométrica de 0,4 ( $SR=0,4$ ), sin cambiar el caudal del aire de combustión que es suministrado, alteraría las condiciones estequiométricas locales a  $SR=0,5$  y se esperaría que disminuyese sustancialmente las emisiones de  $NO_x$ . Sin embargo, esto es porque  $SR=0,4$  es demasiado rico en combustible para la reducción óptima de  $NO_x$ . Tal efecto es mucho mayor que el de “reemplazar el 10% de aire con oxígeno” mientras se mantiene la condición estequiométrica local constante a  $SR=0,4$ . Si se inyecta la misma cantidad de oxígeno dentro de la zona de combustión rica en combustible, sin cambiar el caudal del aire de combustión, donde la condición estequiométrica local es  $SR=0,95$ , se espera que se incremente bruscamente la emisión de  $NO_x$  cuando se incrementa la condición estequiométrica local a  $SR=1,05$ .

10 Por tanto, generalmente se prefiere inyectar oxígeno dentro del área más rica de la llama. En un dispositivo de combustión usando quemadores aerodinámicamente escalonados, la relación estequiométrica en la zona rica en combustible de la llama con inyección de oxígeno está entre 0,1 y 0,85, preferiblemente entre 0,4 y 0,75.

15 La inyección o mezcla de oxígeno en el aire terciario y cuaternario, si se usa, debería evitarse en un quemador aerodinámicamente escalonado sin OFA. Esto es porque el aire terciario y el cuaternario se mezclan en el área relativamente pobre de una llama. Si el quemador de bajo  $NO_x$  tiene solamente aire primario y secundario, se debería evitar la inyección o mezcla de oxígeno en el aire secundario. En teoría la optimización de la condición estequiométrica local se puede hacer con cualquier aire que incluya oxidantes. Sin embargo, el oxígeno es más eficaz porque solamente se requiere un pequeño volumen y la condición estequiométrica local se puede cambiar sin un gran impacto sobre las condiciones de mezcla aerodinámica total de la llama.

20 Otro requerimiento importante es que el enriquecimiento en oxígeno tiene que hacerse de tal manera para preservar o aumentar el tamaño físico de la zona rica en combustible (la “zona que forma  $N_2$ ”) de una llama aerodinámicamente escalonada. El método de inyección de oxígeno y la consecuente reducción de los flujos de aire en ciertos conductos de aire de un quemador influenciarán las condiciones de escalonamiento aerodinámico del quemador, y por lo tanto el tamaño físico y las condiciones estequiométricas locales. Si el tamaño de la zona rica en combustible se reduce y el tiempo de residencia del gas promedio en la zona rica en combustible se reduce como resultado de la inyección de oxígeno, tal cambio podría causar incrementos de  $NO_x$ . Por ejemplo, inyección de oxígeno a alta velocidad a través de una lanza axial tal como la mostrada en la Figura 3a incrementará eficazmente el momentum axial de la corriente de carbón/aire circundante, lo cual de uno en uno puede aumentar la mezcla con aire secundario y terciario. Como resultado el tamaño de la zona de reducción de  $NO_x$  rica en combustible de la llama se puede reducir y el  $NO_x$  puede incrementar. Por otro lado cuando el flujo de oxígeno se inyecta radialmente desde una lanza de oxígeno axialmente localizada tal como la mostrada en la Figura 3b cerca de la punta del quemador, puede incrementar eficazmente la zona de recirculación cerca del quemador y por lo tanto incrementar el tamaño de la zona rica en combustible y promover más la reducción de  $NO_x$  mediante enriquecimiento en oxígeno. Los impactos complejos de la inyección de oxígeno sobre las condiciones aerodinámicas del quemador tienen que ser evaluados cuidadosamente para que un quemador específico consiga la reducción de  $NO_x$ .

40 Sin intención de estar obligado por cualquier explicación particular de la realización inesperada de esta invención, la realización del dispositivo de combustión operado de acuerdo con esta invención es consistente con un mecanismo en el que el oxígeno inyectado causa un incremento en la temperatura de esa porción de la llama lo más cerca al quemador, lo cual de uno en uno causa que los componentes relativamente volátiles presentes en el combustible de hidrocarburo entren en la fase gaseosa desde el combustible y se sometan a reacción parcial con el oxígeno ambiente, creando de ese modo una atmósfera relativamente reductora que permite que las especies que contienen nitrógeno liberadas a partir del combustible de combustión se conviertan en nitrógeno molecular, es decir,  $N_2$ , en lugar de convertirse en  $NO_x$  y otros compuestos nitrogenados tales como  $HCN$  y  $NH_3$ .

45 Generalmente, la temperatura de la zona rica en combustible en la que entran el combustible y el oxígeno está en el orden de  $1.371\text{ }^\circ\text{C}$  ( $2.500\text{ }^\circ\text{F}$ ) o superior. El suministro de oxígeno de esta manera puede causar que la base de la llama se dibuje más cerca de la abertura del quemador 3, o incluso llegue a estar unida al quemador 3. Sin embargo, el suministro de oxígeno de la manera descrita en la presente memoria dentro del combustible de hidrocarburo mientras emerge del quemador se desarrolla de la misma manera, incluso si la llama llega a estar unida al quemador. En un funcionamiento de estado constante, por ejemplo después de que se haya actualizado un dispositivo de combustión de acuerdo con las instrucciones de la presente memoria, el funcionamiento del dispositivo de combustión continua sobre la base de que se suministre dentro del combustible menos del 20%, preferiblemente menos del 15%, más preferiblemente menos del 10%, lo más preferiblemente menos del 5%, de la cantidad estequiométrica de oxígeno requerida para que la combustión completa del combustible, mientras se suministra el aire de combustión a través del quemador en una cantidad menor que la que de otra manera sería el caso, de manera que la cantidad total de oxígeno suministrado dentro del dispositivo sea al menos la cantidad estequiométrica necesaria para la combustión completa del combustible.

60 El funcionamiento de un dispositivo de combustión, alimentado con combustible líquido de hidrocarburo o combustible de hidrocarburo sólido pulverulento, de acuerdo con las instrucciones en la presente memoria, se ha encontrado que produce sorprendente y significativa reducción en la cantidad de  $NO_x$  formado por combustión en el dispositivo de combustión.

**Ejemplo 1**

El oxígeno se mezcló dentro del aire de combustión administrado a la primera etapa de un horno experimental de llama baja (“downfired”) auto-sostenido de 17 kW con 15,24 cm (6”) de diámetro interno. El aire de combustión enriquecido con oxígeno se suministró a un quemador de carbón pulverizado-aire no turbulento. Se usó carbón bituminoso A altamente volátil (Illinois N° 6). El oxígeno se suministró a un índice para reemplazar el 20% en volumen del aire de combustión, sobre una base equivalente de oxígeno, administrado a la zona de combustión primaria (PCZ). Esto era equivalente a 10 a 20% del requerimiento de aire estequiométrico. Se inyectó “aire sobre fuego” dentro del horno aproximadamente 2,44 m (ocho pies) a contracorriente del frente del quemador, lo cual proporcionó tiempo de residencia del gas de aproximadamente 1 segundo en la PCZ. Se inyectó suficiente aire sobre fuego para mantener la relación estequiométrica total a aproximadamente 1,2. Aunque la temperatura en el punto de inyección de aire sobre fuego varió de acuerdo con la relación estequiométrica de la zona de combustión primaria, se mantuvo como constante entre el aire (referencia) y los casos enriquecidos con oxígeno. Tal como se puede ver en la Figura 4 la adición de pequeñas cantidades de oxígeno redujo la emisión de óxidos de nitrógeno cuando se operó la primera etapa a por debajo de una relación estequiométrica de aproximadamente 0,9.

**Ejemplo 2**

Se prendió un quemador de carbón-aire de bajo NOx a aproximadamente 1,17 MW (4 MMBtu/h) en un horno de ensayo en línea refractario con dimensiones internas de aproximadamente 1,097 m (3,6 pies) de ancho x 1,097 m (3,6 pies) de alto y 12,5 m (41 pies) de largo. Se localizaron un par de puertos de aire sobre fuego a aproximadamente 3,2 m (10,5 pies) a partir de la salida del quemador. El quemador es similar a uno mostrado en la Figura 2 y consiste en un conducto circular central y diversos conductos anulares para corrientes de carbón, aire, oxígeno y gas natural. El conducto central o bien se usó para insertar una lanza de oxígeno de 4,83 cm (1,9”) OD y 3,81 cm (1,5”) ID o se bloqueó para proporcionar un cuerpo romo para aumentar la recirculación de gas para la estabilidad de la llama. Se inyectaron carbón y aire primario desde el primer conducto anular de 7,79 cm (3,068”) OD y 4,83 cm (1,9”) ID. Se usó el segundo conducto anular (10,23 cm (4,026”) OD y 8,89 cm (3,5”) ID) para inyectar o bien gas natural u oxígeno. Se usaron los conductos anulares tercero (15,405 cm (6,065”) OD y 11,43 cm (4,5”) ID) y cuarto (20,27 cm (7,981”) OD y 16,83 cm (6,625”) ID) para los flujos de aire secundario y terciario y se equiparon con generadores de turbulencia variable para impartir flujos turbulentos. El quemador está diseñado para proporcionar una condición de combustión aerodinámicamente escalonada. Las velocidades axiales del aire primario y aire secundario son similares para proporcionar una mezcla lenta del aire secundario con la corriente de carbón. El aire terciario tiene una velocidad significativamente mayor que la del aire secundario. Por tanto, el aire secundario proporciona un “tampón” para la mezcla entre el aire terciario y la corriente de carbón. Se crea una zona de combustión rica en combustible relativamente grande a lo largo del eje del quemador con mezcla relativamente gradual del aire secundario y terciario a lo largo del horno.

La Figura 5 muestra los resultados de las emisiones de NOx medidas bajo diferentes métodos de inyección de oxígeno. Se inyectó oxígeno puro a través de una lanza cilíndrica localizada en el eje del quemador. Se usaron diferentes diseños de boquilla para inyectar oxígeno y para mezclar con la corriente de carbón anular adyacente. La cantidad de oxígeno inyectada osciló entre 5 y 15% del oxígeno estequiométrico. Cuando se inyectó el oxígeno, se extrajo la cantidad estequiométricamente equivalente de aire de las corrientes de aire secundaria y terciaria para mantener la misma zona de combustión primaria y la relación estequiométrica de combustión total (fijada en  $SR=1,15$ ). El caudal de aire primario se mantuvo constante a aproximadamente  $SR=0,15$ . El aire sobre fuego para el escalonamiento de la combustión global se inyectó perpendicular al eje del horno desde dos boquillas de aire directamente opuestas.

Por debajo de una SR de la zona de combustión primaria (la relación estequiométrica de la zona de combustión primaria) de aproximadamente 0,80, se obtuvo reducción significativa de NOx, en comparación con la referencia de aire, a pesar del tipo de boquillas de oxígeno usadas. A mayor SR (del Inglés “Stoichiometric ratio”) del quemador las emisiones de NOx fueron mayores cuando se usó una boquilla de ángulo opuesto, la cual tiene ocho agujeros de 0,635 cm (1/4 de pulgada) de diámetro tal como se muestra en la Figura 3d (también referida en la presente memoria como boquilla Tipo B) y aproximadamente la misma o inferior con una boquilla del tipo mostrado en la Figura 3.c, la cual tiene ocho agujeros radiales de 0,635 cm (1/4 de pulgada) de diámetro y cuatro agujeros de ángulos delanteros de 0,635 cm (1/4 de pulgada) de diámetro (también referida en la presente memoria como boquilla Tipo A), dependiendo de la cantidad de oxígeno inyectado.

Los resultados observados se pueden explicar en términos de los cambios causados mediante la inyección de oxígeno en las condiciones de escalonamiento aerodinámico del quemador, es decir, el tamaño físico de la zona rica en combustible y las condiciones estequiométricas locales. Cuando la zona de combustión primaria se somete profundamente a escalonamiento (SR menor del 0,8), un gran volumen del espacio de horno entre el quemador y el punto de inyección de aire escalonado se mantiene rico en combustible. Aunque la inyección de oxígeno y la reducción de los flujos de aire secundario y terciario cambiarán las condiciones estequiométricas locales cerca del quemador (y o bien incrementarán o disminuirán el volumen de la zona rica en combustible cerca del quemador), la mayoría de la combustión primaria permanece rica en combustible. El efecto principal del oxígeno es incrementar la temperatura y acelerar las cinéticas de la reducción de NOx en la mayoría de la zona de combustión primaria.

Puesto que se cambia un poco el volumen de la gran zona rica en combustible, se consigue significativa reducción de NOx relativamente independiente del tipo de boquilla de oxígeno.

Mientras se reduce la cantidad de aire sobre fuego, el tamaño de la zona rica en combustible se reduce progresivamente. A una SR=1,15 de quemador, no se usa escalonamiento de aire y se crea la zona rica en combustible únicamente mediante escalonamiento aerodinámico del quemador. La inyección de oxígeno afectará al patrón de mezcla de los flujos de aire secundario y terciario con la corriente de carbón y el tamaño de la zona rica en combustible podrá cambiar significativamente. Si el tamaño de la zona rica en combustible se reduce y el tiempo de residencia del gas promedio en la zona rica en combustible se reduce como resultado de la inyección de oxígeno, tal cambio podrá causar incrementos de NOx.

Las emisiones de NOx a SR=1,15, es decir, sin escalonamiento de aire, eran muy sensibles a los tipos de boquilla de O<sub>2</sub> y la cantidad de oxígeno usados. Los estudios CFD mostraron las siguientes condiciones de mezcla con una boquilla mostrada en la Figura 3b con ocho agujeros radiales de 0,635 cm (1/4 de pulgada). Los chorros de oxígeno radiales penetran en la corriente de carbón anular durante una corta distancia y se mezclan rápidamente con la corriente de carbón circundante. La corriente de carbón anular fluye parcialmente entre los "dedos" de los chorros de oxígeno y parcialmente se expande de manera radial. Como resultado, se incrementa el diámetro de la zona de recirculación cerca del quemador, causando que se expanda el tamaño de la zona rica en combustible.

Con una boquilla de O<sub>2</sub> Tipo B se cree que el ángulo a favor de corriente de los chorros de oxígeno han causado mezcla significativa de la corriente primaria de carbón y la terciaria, dando como resultado el incremento de NOx. En general mayor flujo de O<sub>2</sub> desde las boquillas radiales o radiales anguladas incrementa la velocidad del chorro de oxígeno y causa más mezcla. Por tanto, el tamaño y el ángulo de las boquillas de oxígeno tienen que estar cuidadosamente diseñadas para mezclar rápidamente oxígeno en la corriente de carbón, incluso sin causar demasiada mezcla entre el aire terciario y la corriente de carbón.

### Ejemplo 3

Se prendió un quemador de carbón-aire de bajo NOx comercial, el quemador RSFC™ descrito en el documento de Patente 5.960.724, a aproximadamente 7,03 MW (24 MMBtu/h) en un horno de ensayo en línea refractario con dimensiones internas de aproximadamente 2,286 m (7,5 pies) de ancho x 2,286 m (7,5 pies) de alto y 10,36 m (34 pies) de largo. Uno o dos pares opuestos de los puertos de aire sobre fuego estaban localizados a aproximadamente 7,925 m (26 pies) a partir de la salida del quemador. El quemador consiste en un conducto circular central y diversos conductos anulares para las corrientes de carbón, aire, oxígeno. El conducto central se usó para insertar una lanza de oxígeno de 4,826 cm (1,9") OD y 3,81 cm (1,5") ID. Se inyectaron carbón y aire primario desde el primer conducto anular. Los conductos segundo, tercero y cuarto se usaron para los flujos de aire secundario, terciario y cuaternario y se equiparon con generadores de turbulencia variables para impartir flujos turbulentos. El quemador está diseñado para proporcionar una condición de combustión aerodinámicamente escalonada. Se crea una zona de combustión rica en combustible relativamente grande a lo largo del eje del quemador con mezcla relativamente gradual de aire terciario y cuaternario a lo largo del horno.

Se inyectó oxígeno a través de una lanza circular localizada en el eje del quemador. Se usó el diseño de boquilla similar al mostrado en la Figura 3c, el cual tiene ocho agujeros radiales de 0,953 cm (3/8 de pulgada) de diámetro y cuatro agujeros axialmente orientados de 0,953 cm (3/8 de pulgada) de diámetro para inyectar oxígeno y para mezclar con la corriente de carbón anular adyacente. La cantidad de oxígeno inyectada osciló entre 5 y 15% del oxígeno estequiométrico. Cuando se inyectó oxígeno, se extrajo la cantidad estequiométricamente equivalente de aire de las corrientes de aire secundario, terciario y cuaternario para mantener la misma zona de combustión primaria (SR=0,75) y la relación estequiométrica de combustión total (SR=1,15). El caudal de aire primario se mantuvo constante a aproximadamente SR=0,20. El aire sobre fuego para el escalonamiento de la combustión global se inyectó perpendicular al eje del horno desde dos a cuatro puertos de aire directamente opuestos.

Los ajustes de los álabes de turbina ajustables para los flujos de aire secundario, terciario y cuaternario se optimizaron para dar las menores emisiones de NOx para la combustión solamente por aire y se usaron los mismos ajustes cuando se inyectó oxígeno. La Figura 6 muestra los resultados de las emisiones de NOx como función de la inyección de oxígeno, medidas bajo tres periodos de ensayo diferentes. Aunque las emisiones de NOx de referencia con aire variaban dependiendo de los periodos de ensayo, se consiguieron significantes reducciones de NOx mediante la presente invención.

Aunque la presente invención ha sido descrita con referencia principal a las calderas de pared tales como el tipo ilustrado en las Figuras 1 y 2, esta descripción no intenta sugerir que la invención está limitada en aplicabilidad a ese tipo de sistema de combustión. La invención es aplicable a otros sistemas en donde el combustible y el aire entran en combustión, incluyendo sin limitación a los sistemas de llama tangencial del tipo descrito con respecto a las Figuras 7A-7C, y los sistemas de combustión se conocen en la técnica como hornos "en ciclos", en donde la zona de combustión primaria del horno incluye uno o más anexos que tienen cada uno una pared cilíndrica, una pared de extremo cerrada, y un extremo abierto que se abre dentro de la cámara principal del horno por una pared del horno, en donde se suministran el combustible, el aire de combustión y el oxidante (suministrados en las cantidades enseñadas en la presente memoria en el combustible) a través de la pared cilíndrica y la pared del extremo dentro

del anexo en una dirección de modo que rotan alrededor del eje central de rotación del anexo y entran en combustión para formar una llama y calor de combustión que se emiten por el extremo abierto dentro de la cámara principal del horno.

- 5 Se pueden emplear otros tipos de quemadores además de aquellos ejemplificados en la presente memoria, tales como los denominados quemadores de corriente dividida en donde la corriente del combustible se divide en una pluralidad de corrientes separadas unas de otras, e incluso divergen unas de otras, cuando el combustible entra en la cámara de combustión. Con este tipo de quemador, el oxígeno se suministra desde una correspondiente pluralidad de lanzas en cada corriente de combustible, o desde una lanza con una pluralidad de boquillas orientadas hacia cada corriente de combustible, y los requerimientos estequiométricos de oxígeno se basan en las cantidades
- 10 totales de combustible y oxígeno que se suministran.

## REIVINDICACIONES

1. Un método de combustión que reduce la cantidad de NOx emitido que comprende:
- proporcionar un dispositivo de combustión (1) que tiene una zona de combustión primaria (10) y una zona de quemado exhaustivo (9);
- 5
- suministrar aire, y combustible no acuoso que contiene nitrógeno unido y se selecciona entre el grupo que consiste en líquido de hidrocarburo atomizado y sólidos de hidrocarburo pulverulento, a través de un quemador (3) dentro de dicha zona de combustión primaria (10); y
  - hacer arder el combustible en una llama (6) en la zona de combustión primaria (10) que tiene una zona rica en combustible (8), mientras
- 10
- se suministra oxígeno como una corriente que contiene al menos 35% en volumen de O<sub>2</sub> dentro de dicho combustible inyectándolo directamente dentro de dicho combustible en dicha zona de combustión primaria (10) cuando dicho combustible emerge de dicho quemador (3), de manera que el oxígeno entra en combustión con dicho combustible en dicha zona rica en combustible (8), en donde se suministra dicho oxígeno dentro de dicho combustible en una cantidad de dicho oxígeno que es menor del 20% de la cantidad estequiométrica requerida para
- 15
- la combustión completa de dicho combustible, y ajustar la cantidad de aire suministrado a través de dicho quemador (3) de manera que la relación estequiométrica en dicha zona de combustión primaria (10) está entre 0,6 y 0,99,
  - y añadir aire dentro de dicha zona de quemado exhaustivo (9) desde una fuente (7) aparte de dicho quemador (3) en una cantidad que contiene suficiente oxígeno para que la cantidad total de oxígeno suministrado dentro de dicho dispositivo (1) sea al menos la cantidad estequiométrica necesaria para la combustión completa de
- 20
- dicho combustible, y hacer arder los combustibles residuales de dicha zona de combustión primaria (10) en dicha zona de quemado exhaustivo (9), caracterizado porque,
  - dicho oxígeno se inyecta directamente dentro de dicho combustible a través de una lanza (5) que tiene un extremo cerrado y que tiene al menos dos boquillas (34) proporcionadas a lo largo del perímetro de la lanza (5) cerca del extremo cerrado de la lanza (5), cada una de las cuales forma un ángulo de 30 a 90 grados con respecto a
- 25
- la inversa de la dirección de flujo de oxígeno dentro de la lanza (5).
2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1 en donde se suministra una corriente de combustible a través de dicho quemador (3) y el oxígeno se suministra dentro de dicho combustible inyectándolo a través de dicha lanza hueca (5), colocada en dicha corriente, dentro del combustible cuando el combustible emerge del quemador (3).
3. Un método de acuerdo con la reivindicación 1 en donde cualquier aire secundario y terciario suministrado por dicho quemador tiene un número de torbellino de 0,6 a 2,0.
- 30
4. Un método de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la relación estequiométrica en dicha zona de combustión primaria (10) está entre 0,7 y 0,85.
5. Un método de acuerdo con la reivindicación 1 en donde la cantidad de dicho oxígeno suministrado dentro de dicho combustible es menor del 10% de la cantidad estequiométrica requerida para la combustión completa de dicho combustible.
- 35
6. Un método de acuerdo con la reivindicación 1 en donde la cantidad de aire suministrado a través de dicho quemador (3) se reduce mediante una cantidad que contiene suficiente oxígeno para que la relación estequiométrica de la zona de combustión primaria varíe por no más del 10% en comparación con la relación estequiométrica sin dicha adición de oxígeno.
- 40
7. Un método de combustión que reduce la cantidad de NOx emitido, que comprende:
- proporcionar un dispositivo de combustión (1);
  - suministrar aire, y combustible no acuoso que contiene nitrógeno unido y está seleccionado entre el grupo que consiste en líquido de hidrocarburo atomizado y sólidos de hidrocarburo pulverulentos, a través de un quemador aerodinámicamente escalonado (3) dentro de dicho dispositivo; y hacer arder dicho combustible en una llama (6)
- 45
- que contiene una zona rica en combustible (8), mientras que
  - se suministra oxígeno como corriente que contiene al menos 35% en volumen de O<sub>2</sub> dentro de dicho combustible inyectándolo directamente dentro de dicho combustible en dicha zona rica en combustible (8) cuando dicho combustible emerge de dicho quemador (3), de manera que el oxígeno entra en combustión con dicho combustible en dicha zona rica en combustible (8), en donde dicho oxígeno se suministra dentro de dicho combustible en una cantidad de dicho oxígeno que es menor del 20% de la cantidad estequiométrica requerida para
- 50
- la combustión completa de dicho combustible, y ajustar la cantidad de aire suministrado a través de dicho quemador (3) de manera que la relación estequiométrica en dicha zona rica en combustible (8) está entre 0,1 y 0,85, mientras que se mantiene y agranda el tamaño de dicha zona rica en combustible (8) en comparación con su tamaño cuando

la combustión se lleva a cabo en dicho dispositivo de combustión (1) sin dicha etapa de suministro de oxígeno pero bajo por otro lado condiciones idénticas, caracterizado porque,

- dicho oxígeno se inyecta directamente dentro de dicho combustible a través de una lanza (5) que tiene un extremo cerrado y que tiene al menos dos boquillas (34) proporcionadas a lo largo del perímetro de la lanza (5)
- 5
- cerca del extremo cerrado de la lanza (5), cada una de las cuales forma un ángulo de 30 a 90 grados con respecto a la inversa de la dirección de flujo de oxígeno dentro de la lanza (5).
8. Un método de acuerdo con la reivindicación 7 en donde una corriente de combustible se suministra a través de dicho quemador (3) y el oxígeno se suministra dentro de dicho combustible inyectándolo a través de dicha lanza hueca (5), colocada en dicha corriente, dentro del combustible cuando el combustible emerge del quemador (3).
- 10
9. Un método de acuerdo con la reivindicación 7 en donde cualquier aire secundario y terciario suministrado a través de dicho quemador tiene un número de torbellino de 0,6 a 2,0.
10. Un método de acuerdo con la reivindicación 7 en donde la relación estequiométrica en dicha zona rica en combustible (8) está entre 0,4 y 0,75.
- 15
11. Un método de acuerdo con la reivindicación 7 en donde la cantidad de dicho oxígeno es menor del 10% de la cantidad estequiométrica requerida para la combustión completa de dicho combustible.
12. Un método de acuerdo con la reivindicación 7 en donde la cantidad de aire suministrado a través de dicho quemador (3) se reduce mediante una cantidad que contiene oxígeno suficiente para que la relación estequiométrica de la zona de combustión primaria varíe mediante no más del 10% en comparación con la relación estequiométrica sin dicha adición de oxígeno.

20

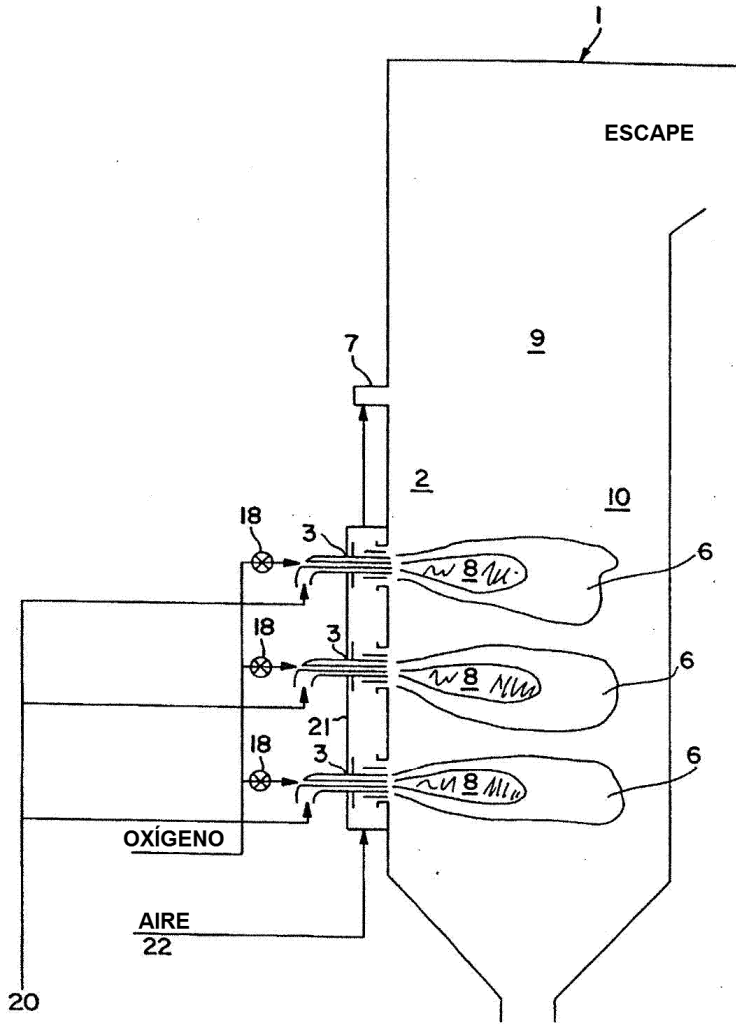


FIG. 1



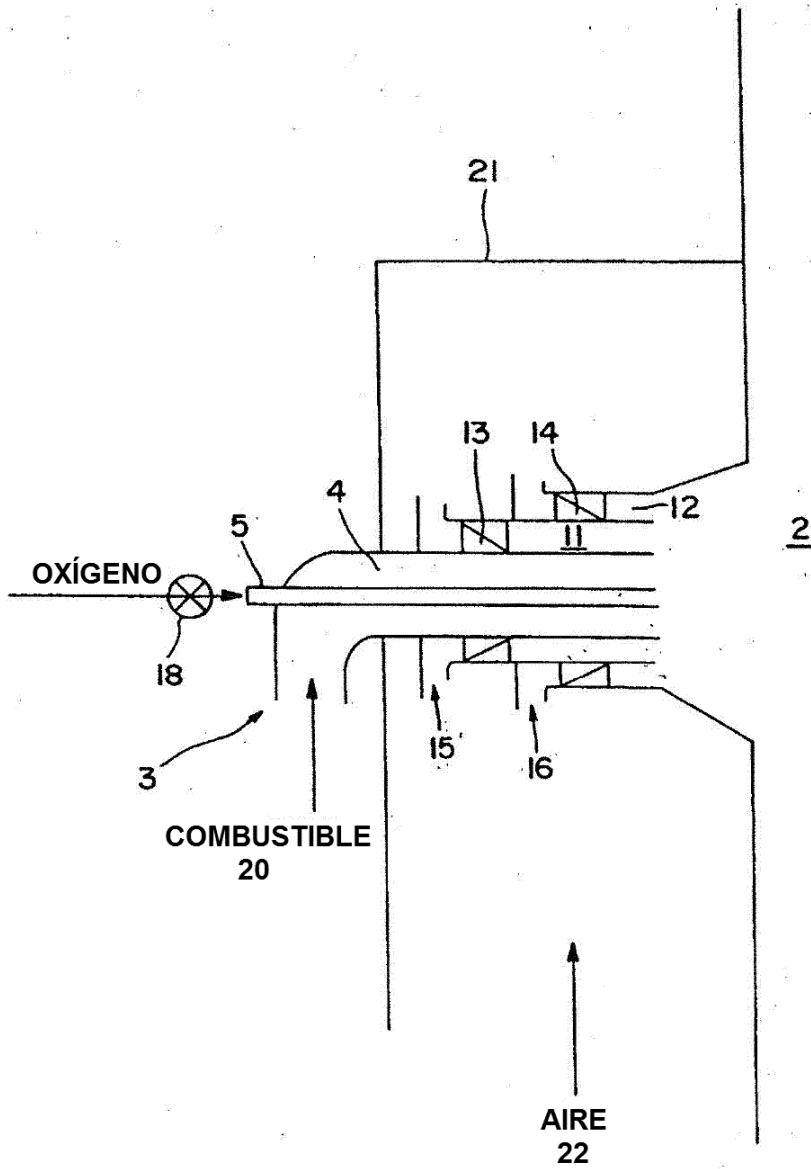
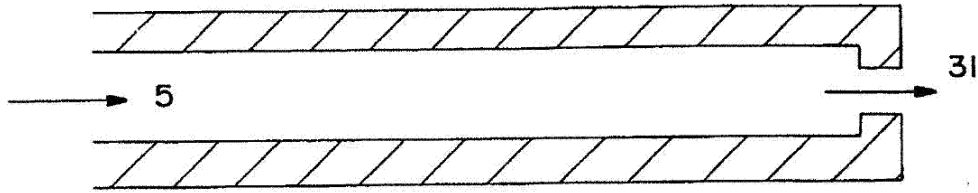
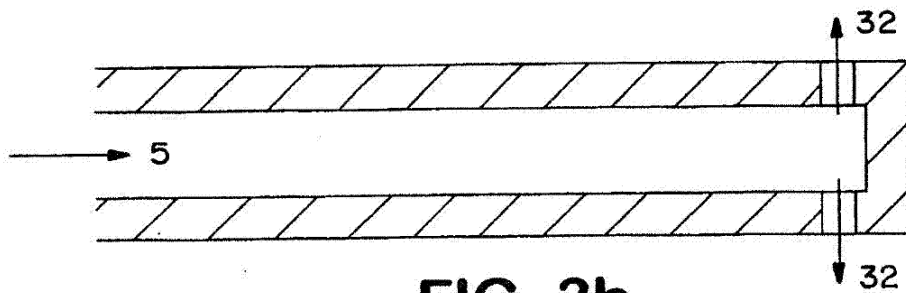


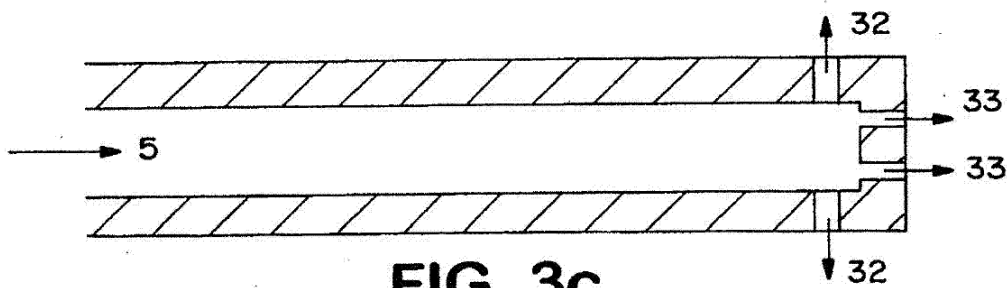
FIG. 2



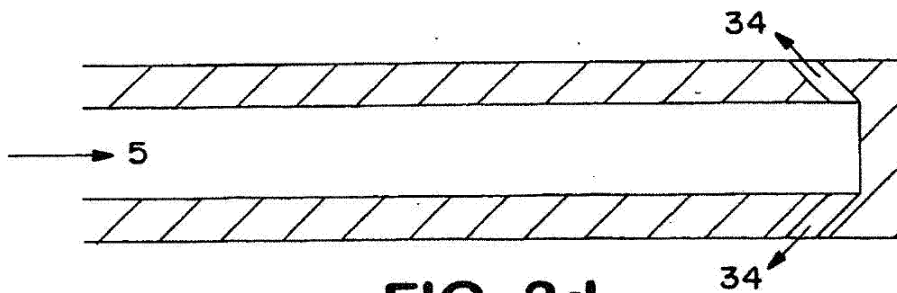
**FIG. 3a**



**FIG. 3b**



**FIG. 3c**



**FIG. 3d**

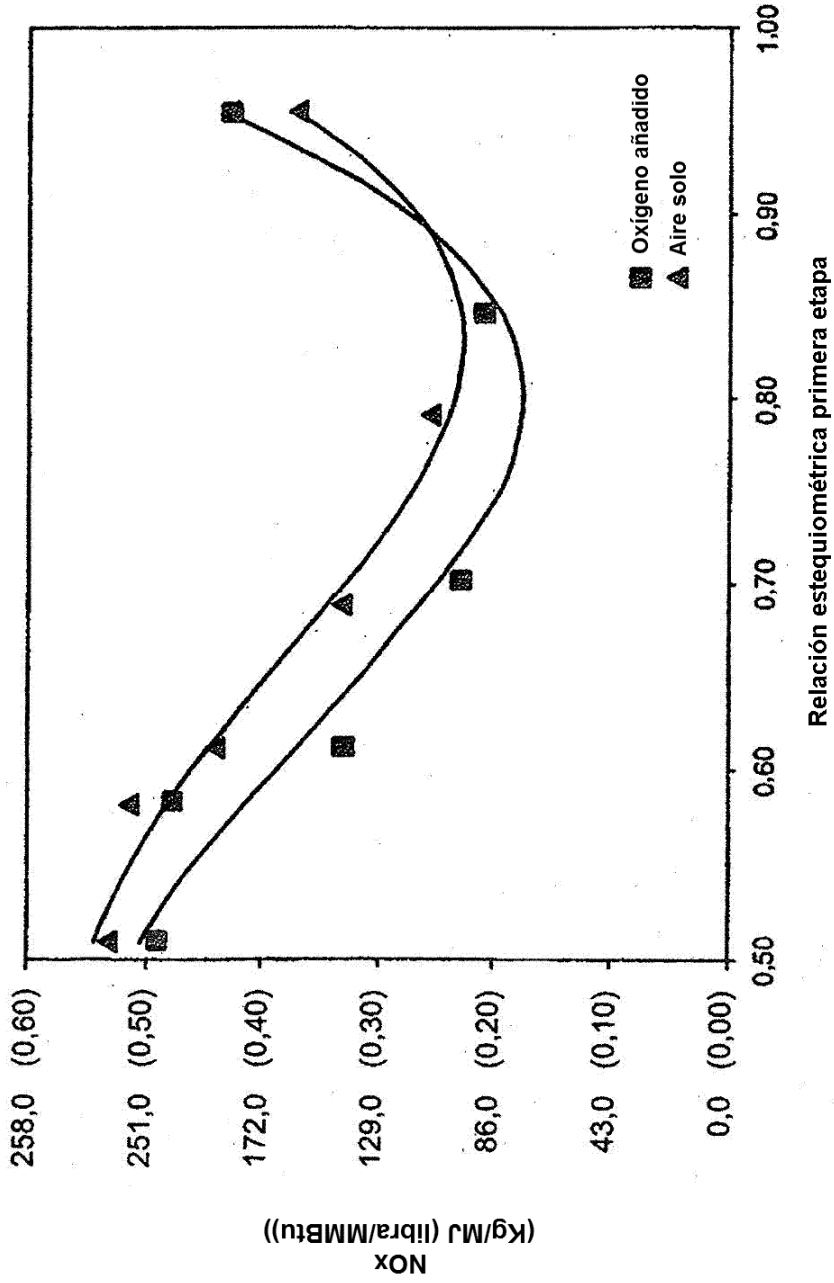


FIG. 4

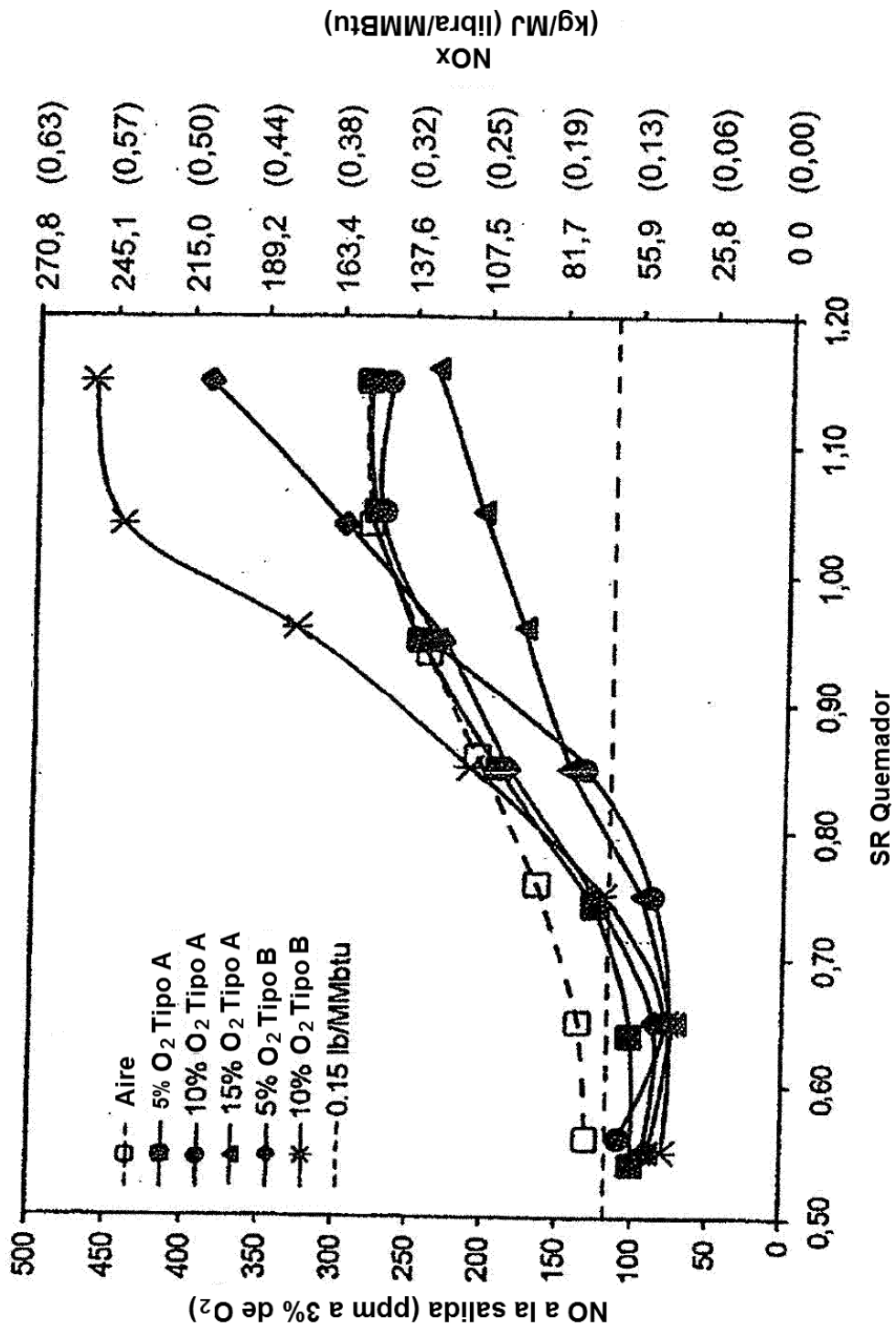


FIG. 5

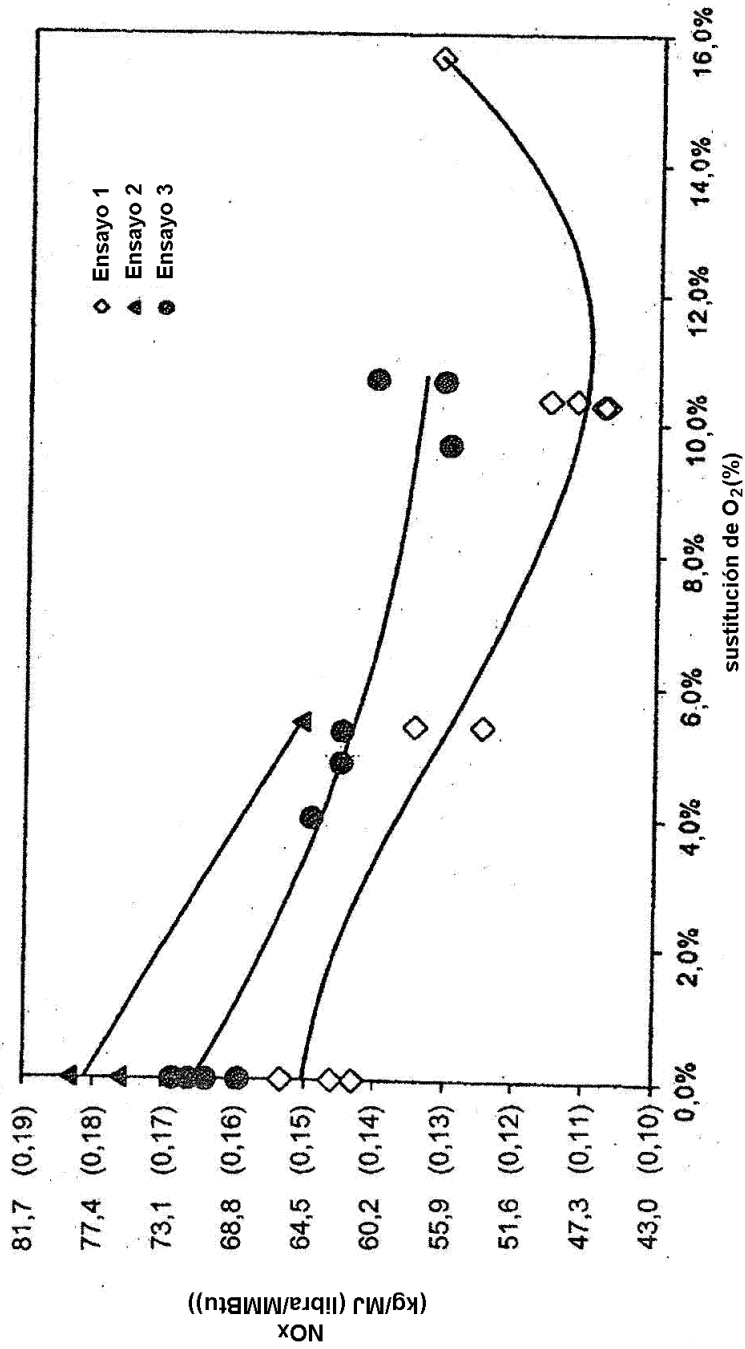


FIG. 6

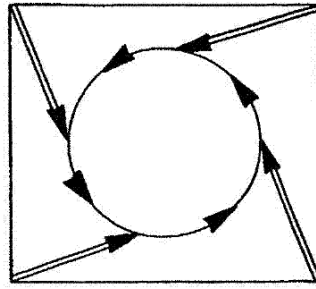


FIG. 7b

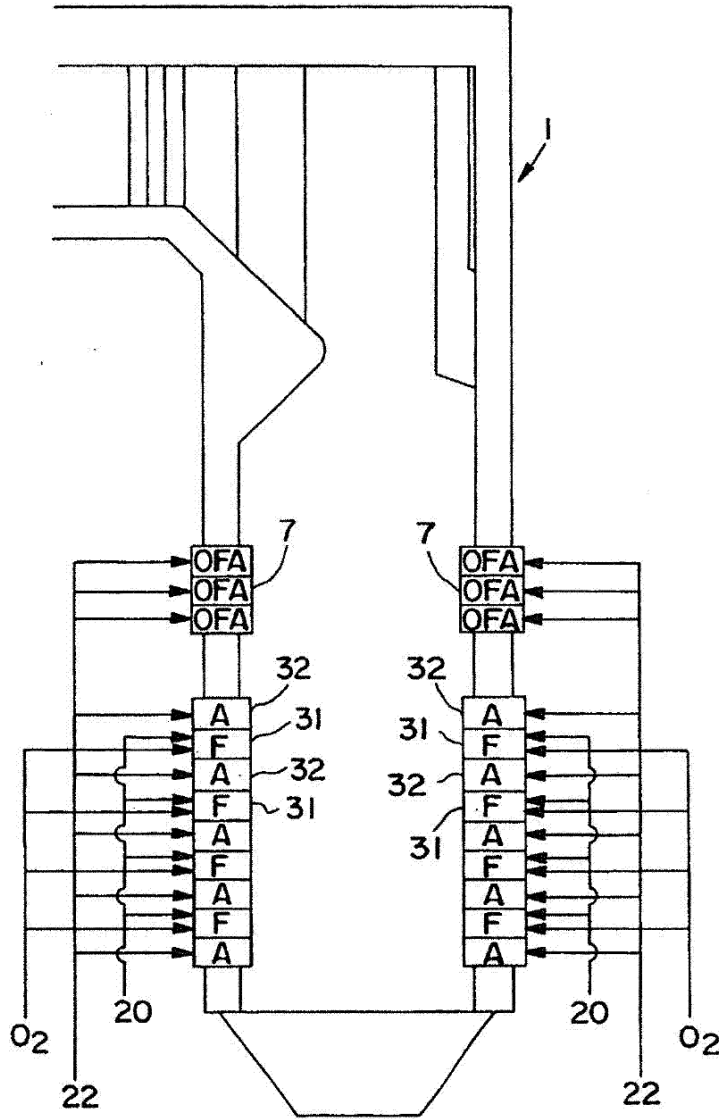
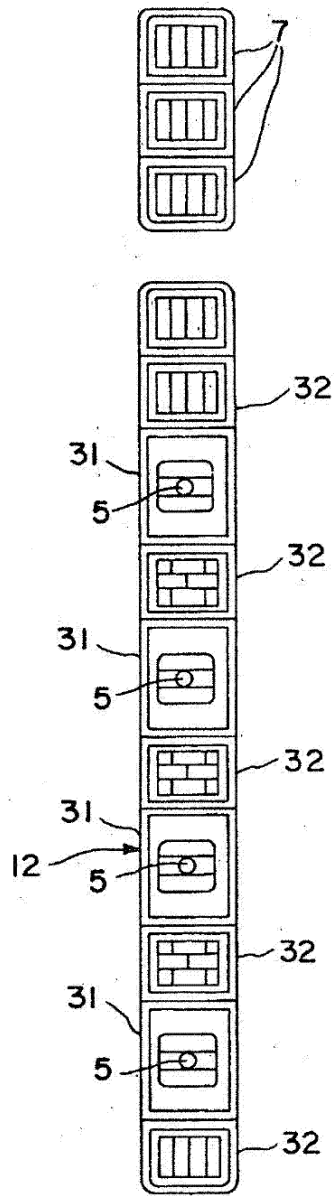


FIG. 7a



**FIG. 7c**