

**QUEMADOR DE COMBUSTIÓN SIN LLAMA PARA COMBUSTIBLE GASEOSO, SÓLIDO,
LÍQUIDO Y MEZCLAS DE SÓLIDO - GAS O LÍQUIDO – GAS**

I. CAMPO DE LA INVENCIÓN

5 La presente invención se refiere a quemadores que operan en un régimen de combustión sin llama que permite el insumo de combustibles gaseosos, sólidos pulverizados y líquidos, tanto por separados como en mezclas, gas/sólido o gas/líquido, con relaciones que pueden ir desde 0% hasta 100% con base en aporte energético de uno de los combustibles, esto es, si el combustible base es el gaseoso en el caso de 100% se refiere a
10 que el quemador opera solo en gas, mientras que cuando se especifica que es de 25%, quiere decir que el 25% de la energía la aporta el combustible gaseoso y el otro 75% lo aporta el combustible sólido o líquido. En el presente quemador existe un sistema auto-recuperativo de calor, en el cual se recupera el calor sensible de los gases de combustión para precalentar el aire de combustión, que permite mejorar el quemado del combustible
15 y con ello aumentar la eficiencia de combustión, y a su vez, mejorar la productividad del proceso en el que se utilice.

Considerando que el quemador de la presente invención permite la combustión sin llama, es claro que tiene su aplicación en calentamiento de gases, líquidos, tratamientos térmicos, secado y fusión de materiales dado que se garantiza un calentamiento uniforme,
20 además de reducidas emisiones de óxido nitroso y monóxido de carbono, y baja intensidad de ruido.

II. ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

Los equipos de combustión convencionales empleados para el calentamiento en
25 diferentes procesos presentan varios inconvenientes, entre ellos las bajas eficiencias debido al desperdicio de gran parte de la energía suministrada por el combustible a través de los gases de combustión que son expulsados por la chimenea a alta temperatura. Otro inconveniente a considerar son las altas emisiones contaminantes, principalmente de óxidos de nitrógeno (NOx), debido a los picos de temperatura que se presentan en estos
30 quemadores y por último la restricción de solo poder usar un solo combustible, lo cual se convierte en un problema durante tiempos de escasez y altos costos de ciertos combustibles.

La recuperación de parte del calor de los gases de combustión a partir de tecnologías auto-recuperativas y auto-regenerativas es una solución que permite aumentar la

eficiencia de los quemadores, y por ende del proceso en el que se empleen, en magnitud considerable. En estos quemadores los gases de combustión antes de salir del horno se hacen pasar por una sección del quemador, que absorbe parte de la energía que llevan y se la suministra al aire que se va a usar para el proceso de combustión. La diferencia entre la regeneración y la recuperación radica en cómo se transmite el calor de los gases de combustión al aire. En un quemador auto-regenerativo el calor se transmite por ciclos. Primero los gases de combustión calientan un medio sólido, normalmente de un material cerámico, que luego le transmite el calor al aire en un siguiente ciclo. En un quemador auto-recuperativo el flujo de calor se da simultáneamente en un intercambiador de calor que está incluido en la geometría del quemador.

La capacidad de un quemador de operar con varios tipos de combustible es una gran ventaja, ya que esta flexibilidad le proporciona la capacidad de adaptarse a la oferta de los diferentes combustibles y así poder disminuir costos de producción y no verse afectados por la escasez de un combustible en particular. En la patente US2004210411 se propone un quemador que puede operar con combustibles líquidos y gaseosos, de forma individual y en mezclas y que recupera calor de los gases de combustión por auto-recuperación. En esta patente no se proponen el uso de una matriz cerámica como medio para mejorar la transferencia de calor de los gases de combustión al aire. La patente US 4836772A presenta un quemador para combustible sólido, líquido y gaseoso. En esta no se usa recuperación de calor. Cuando se utilizan combustibles sólidos, la recuperación de calor puede ser un problema debido a que la ceniza puede afectar los elementos auxiliares, como las válvulas 4 vías en el caso del auto-regeneración.

A pesar de que con la recuperación de calor se puede aumentar la eficiencia de los procesos, disminuyendo el consumo de combustible y por lo tanto la producción específica de contaminantes como CO_2 , las emisiones de NO_x siguen siendo un problema, debido a las altas temperaturas que se presentan en la llama. En varias patentes se presentan métodos y sistemas para disminuir las emisiones de NO_x , la inyección de vapor de agua en la zona de combustión o la inyección de gases de combustión recirculados desde la chimenea son conceptos muy comúnmente encontrados. En la patente US2014/0272736A1 se propone una metodología de combustión para disminuir las emisiones de NO_x , mediante la inyección de los reactivos. En este, tres corrientes adyacentes son inyectadas en la cámara de combustión, por una fluye una premezcla de aire-combustible, en la segunda solo se inyecta combustible y en la tercera, se inyectan los productos de combustión tomados de la chimenea.

El modo de combustión sin llama es conocido ya por ser una tecnología que permite obtener temperaturas muy homogéneas lo cual disminuye las emisiones contaminantes, principalmente NOx; aumenta la calidad de los procesos de calentamiento y mejora los flujos de calor hacia la carga. Para lograr el régimen de combustión sin llama se deben

5 tener en cuenta dos condiciones, primero que la mezcla de los reactivos antes de la zona de combustión estén en una condición de dilución tal que la concentración de oxígeno se encuentre entre un 5% y un 15% y segundo que la mezcla de los reactivos alcance una temperatura mayor o igual a la temperatura de autoignición. Estas dos condiciones se pueden conseguir de diversas formas, diluyendo y precalentando los reactivos antes de la

10 inyección en el quemador o haciéndolo luego de la inyección en el quemador. Cuando se hace después de la inyección, la dilución se consigue al inyectar los reactivos en la cámara de combustión con una gran velocidad y por lo tanto con un gran impulso, esto produce una alta recirculación que hace que los gases de combustión fluyan hacia el inicio de la cámara, donde está el quemador, y se mezclen con los reactivos (aire y combustible) antes

15 de que se produzca la reacción, disminuyendo la concentración de oxígeno y aumentando la temperatura, obteniendo así el régimen de combustión sin llama. Para garantizar que la premezcla alcance la temperatura de autoignición y se consiga el régimen de combustión sin llama, normalmente es necesario que las paredes del horno estén previamente a una elevada temperatura.

20 En la patente EP 0463218A1, se presenta un método y un dispositivo para quemar un combustible en una cámara de combustión en la cual el combustible es oxidado preferiblemente con aire precalentado en presencia de gases de escape recirculados. El quemador es auto-regenerativo y tiene dos modos de operación: modo llama y modo sin llama. El modo de operación con llama es utilizado en el arranque en frío. Este modo de

25 operación se mantiene hasta que la temperatura de las paredes de la cámara de combustión sea superior a la temperatura de auto-ignición del combustible. El sistema propuesto en esta patente requiere de un complicado mecanismo de válvulas para poder conseguir los dos modos de combustión y la regeneración de calor. Adicionalmente, este documento no especifica el mecanismo para precalentar el aire para llevar a cabo la

30 combustión, ni menciona si es posible emplear un combustible en un estado de agregación diferente al gaseoso.

De igual manera, la solicitud US20040091830 A1 describe un dispositivo que incluye un quemador para dirigir una mezcla de combustible/aire en una cámara de reacción para la oxidación sin llama de combustibles. El quemador genera una mezcla de combustible /

35 aire que se inyecta a través de una salida de combustible axial en la cámara del horno

como un chorro en relación perpendicular con la pared del horno. A pesar que este documento indica el empleo de una mezcla de combustible/aire, no menciona que se pueda recuperar el calor de los productos de combustión salientes para calentar el aire de combustión entrante.

- 5 El documento US5862858A divulga un aparato para combustión sin llama dando como resultado una distribución de temperatura más uniforme a lo largo de la longitud del quemador. La combustión sin llama se realiza precalentando el combustible y el aire de combustión a una temperatura por encima de la temperatura de autoignición de la mezcla. Sin embargo, para conseguir tal fin, se requiere el empleo de una superficie catalítica dentro de la cámara de combustión, lo cual eleva los costos en materiales y no permite aprovechar el calor remanente de los gases de combustión salientes. 10 Adicionalmente, no se indica la posibilidad de emplear otro tipo de combustibles.

- Por su parte, la solicitud colombiana 10-026485 divulga un horno de combustión sin llama con quemador auto-regenerativo para recuperación de calor, en donde la operación en 15 los dos modos de combustión es posible con un quemador, el cual está compuesto por tres ductos concéntricos rodeados de cuatro conductos con matrices cerámicas que descargan a dos plenum diferentes. De esta manera, el horno de combustión descrito en esta patente incluye un quemador auto-regenerativo. No obstante, el horno de combustión descrito en esta patente indica que dicho horno sólo admite un combustible 20 gaseoso para su correcto funcionamiento.

- Por otro lado, en los quemadores que operen en régimen de combustión sin llama con diferentes combustibles es necesario garantizar que cuando se esté operando con cada combustible la inyección de éste tenga el impulso suficiente para que se produzca la dilución necesaria antes de la zona de reacción. Esto es un problema cuando se opera con 25 mezclas, ya que para una potencia dada el flujo másico, y por lo tanto el impulso de la inyección de cada combustible, es menor de la que se tuviera si se estuviera usando solo ese combustible. Ante una disminución en el flujo másico la forma de evitar la caída en el impulso es aumentar la velocidad de descarga y esto se puede lograr cambiando el diámetro de descarga del combustible. En la patente US003902840 se propone un 30 quemador de dilución (*dilution burner*) compuesto por al menos dos inyectores separados con diferente diámetros de descarga (*cross-sections*). Cuando el flujo de gas inyectado en la cámara de combustión cae por debajo de un valor crítico, en función de la mínima velocidad necesaria para evitar la retrollama, el inyector con mayor diámetro se inhabilita y el flujo fluye por el otro inyector. El uso de varios inyectores con diferentes diámetros de 35 descarga es para mantener la estabilidad del quemador (sin retrollama) ante una

disminución en la potencia, aumentando el rango de operación (*turn down*) del quemador, por esto el diámetro de los inyectores tanto del combustible como del aire varían.

5 Considerando lo anterior, está claro que aún existe una necesidad de un quemador que pueda ser operable sin necesidad de llama que permita el suministro simultáneo de combustible gas-sólido pulverizado o gas-líquido mediante un recuperador de calor que comprenda una matriz con perforaciones cilíndricas.

La presente invención pretende proporcionar un quemador auto-recuperativo que opere en el régimen de combustión sin llama que pueda ser alimentado con combustible
10 gaseoso en combinación con sólido pulverizado o líquidos empleando recuperadores de calor que comprenden una matriz con perforaciones cilíndricas, en el cual se recupera el calor sensible de los gases de combustión para precalentar el aire de combustión, para mejorar el quemado del combustible y con ello aumentar la eficiencia de combustión.

15 III. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INVENCION

El quemador desarrollado permite obtener el régimen de combustión sin llama utilizando simultáneamente combustible gaseoso y sólido pulverizado, o combustible gaseoso y líquidos, a diferencia de los quemadores reportados en el estado del arte en los que el
20 régimen de combustión sin llama se obtiene con un único combustible, esto es, quemador de combustión sin llama únicamente para combustible gaseoso, quemador de combustión sin llama únicamente para combustible sólido pulverizado o quemador de combustión sin llama únicamente para combustible líquido.

Mediante el quemador operable en régimen de combustión sin llama de la presente
25 invención se alcanza una mayor rapidez de calentamiento debido a la uniformidad en la temperatura y una mayor eficiencia energética. Adicionalmente, el quemador de la presente invención ofrece una mayor flexibilidad para el uso complementario de combustibles con diferente estado de agregación y composición química, manteniendo el régimen de combustión sin llama en condiciones estables así como una reducción
30 significativa de emisiones contaminantes gaseosas como son el monóxido de carbono (CO) y los óxidos nitrosos (NOx). De igual manera, cuando en el quemador de la presente invención se usan mezclas de combustible gaseoso y combustible sólido, se obtienen reducciones importantes en la cantidad de inquemados sólidos, con respecto a los quemadores que utilizan únicamente combustible sólido.

IV. BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Figura 1a: Esta figura corresponde a una vista frontal del quemador ensamblado de
5 acuerdo con la invención.

Figura 1b: Esta figura corresponde a una vista en explosionado del quemador de la
invención que muestra todos los elementos que lo componen.

Figura 1c: Esta figura corresponde a una vista posterior del quemador ensamblado de
la invención.

10 Figura 2a: Esta figura corresponde a una vista frontal del tubo compuesto que
muestra todos los elementos que lo componen.

Figura 2b: Esta figura corresponde a una vista posterior del tubo compuesto que
muestra todos los elementos que lo componen.

Figura 2c: Esta figura corresponde a un acercamiento del quarl, en donde se muestran
15 los ductos que lo componen.

Figura 3: Esta figura corresponde a una vista frontal del soporte central.

Figura 3b: Esta figura corresponde a un corte transversal de la sección B-B del soporte
central del quemador.

Figura 3c: Esta figura corresponde a una vista posterior del soporte central.

20 Figura 4a: Esta figura corresponde a un corte longitudinal del recuperador de calor.

Figura 4b: Esta figura corresponde a una vista frontal de la cubierta del recuperador
de calor.

Figura 5: Esta figura corresponde a una vista frontal del ducto de eyección.

Figura 6: Esta figura corresponde a los datos experimentales de las emisiones en
25 chimenea de NO y CO del quemador.

Figura 7: Esta figura corresponde a imágenes fotográficas comparativas entre el
régimen de combustión convencional (Modo Llama) y el régimen de combustión sin llama
(Modo Sin Llama)

30

V. DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

El quemador de la presente invención que opera en régimen de combustión sin llama que
5 permite el insumo de combustibles gaseosos, sólidos pulverizados y líquidos se describe
en la figura 1. Sus componentes principales son: un tubo compuesto (1'), un soporte
central (2') y dos o más recuperadores de calor (3'), los cuales se describirán en mayor
detalle a continuación.

1. tubo compuesto (1')

10 El tubo compuesto (1') está constituido por el ducto de entrada de aire de
combustión en modo llama (18), por los ductos de los combustibles gaseoso, sólido o
líquido, bien sea operando con cada uno, por separado o en mezclas gas/sólido o
gas/líquido direccionados hacia la cámara de combustión mediante un quarl (8). Los
elementos que lo componen son los siguientes:

15 a) Un cañón de aire (1) como se ilustra en la figura 1. En el cañón de aire (1) es
donde se acoplan los ductos de combustible gas-sólido o gas-líquido tanto para modo
llama como para modo sin llama. En una modalidad preferida el cañón de aire (1)
corresponde a un tubo de acero inoxidable con una longitud de 500 mm y un diámetro de
90 mm.

20 b) Una bujía (9) que permite la ignición del quemador y también hace las veces de
detector de llama cuando se está en este modo. La bujía (9) se encuentra ubicada en el
extremo del tubo compuesto.

c) Un ducto de gas para modo llama (10), que se encuentra conectado a una
boquilla de gas para modo llama con descargas radiales de combustible (14) que permite
25 la entrada de gas para modo llama. En una modalidad preferida el ducto de gas para modo
llama (10) corresponde a un tubo de acero inoxidable con una longitud de 670 mm y un
diámetro de 13.72 mm.

d) Un ducto de gas para modo sin llama con alta relación gas/sólido o gas/líquido
(Cuando el aporte en energía del combustible gaseoso está por encima del 50%) (11), que
30 se encuentra conectado a la boquilla de gas con descarga axial para modo sin llama con
alta relación gas/sólido o gas/líquido (16) que permite el transporte del gas direccionado
mediante el quarl (8) hacia la cámara de combustión. En una modalidad preferida el ducto

de gas para modo sin llama con alta relación gas/sólido o gas/líquido (11) corresponde a un tubo de acero inoxidable de una longitud de 720 mm y un diámetro de 13.72 mm.

e) Un ducto de gas para modo sin llama con baja relación gas/sólido o gas/líquido (Cuando el aporte en energía del combustible gaseoso está por debajo del 50%) (12), que
5 tiene en un extremo una boquilla de gas con descarga axial para modo sin llama (15) con diámetro de descarga de 5.5 veces menor que el diámetro del ducto, que permite el transporte del gas direccionado mediante el quarl (8) hacia la cámara de combustión. En una modalidad preferida el ducto de gas para modo sin llama con baja relación gas/sólido o gas/líquido (12) corresponde a un tubo recto de acero inoxidable con una longitud de
10 770 mm y un diámetro de 13.72 mm.

f) Un ducto para combustible sólido o líquido (13), el cual se puede ajustar dependiendo de la naturaleza del combustible que se va a utilizar en las mezclas con el combustible gaseoso. El ducto hace la función de descarga del combustible sólido, la cual se puede convertir en una inyección de combustible líquido (17) adaptándole en el
15 extremo el inyector para combustibles de esta naturaleza, por ejemplo mediante una rosca. En una modalidad preferida el ducto de combustible sólido o líquido (13) corresponde a un tubo de acero inoxidable de una longitud de 820 mm y un diámetro de 6 mm.

g) Un ducto de entrada de aire de combustión en modo llama (18) que permite la
20 entrada del aire de combustión. En una modalidad preferida el ducto de entrada de aire de combustión en modo llama (18) corresponde a un tubo de acero inoxidable con una longitud de 100 mm y un diámetro de 34 mm.

h) Un quarl (8) que permite direccionar el aire y el combustible hacia la cámara de combustión cuando se está en modo llama, como se indica en la sección A de la figura 2.
25 Dentro del quarl (8) se encuentran: la bujía (9), el ducto de gas para modo llama (10), el ducto de gas para modo sin llama con alta relación gas/sólido o gas/líquido (11), el ducto de gas para modo sin llama con baja relación gas/sólido o gas/líquido (12), el ducto de combustible sólido o líquido (13). En una modalidad preferida el quarl (8) corresponde a un cono hueco de concreto refractario con un diámetro mayor de 180 mm y uno menor
30 de 130 mm, una altura de 100 mm y un espesor de 20 mm.

2. Soporte central (2')

El soporte central (2') comprende un colector (2), el cual hace la función de soporte de los recuperadores de calor (3') y se encuentra ilustrado en la figura 3. En este se hace el

ingreso del aire de combustión cuando se está operando en modo sin llama y se realiza mediante un ducto de entrada de aire de combustión (19), y además se extraen los productos de combustión que pasan por el recuperador de calor mediante un ducto de descarga de gases de combustión (20). En una modalidad preferida el colector (2) corresponde a una lámina rectangular de acero inoxidable con unas dimensiones de 510x720 mm, el ducto de entrada de aire de combustión (19) está hecho de acero inoxidable el cual tiene un diámetro de 60 mm y una longitud de 80 mm y el ducto de descarga de gases de combustión (20) está hecho de acero inoxidable con un diámetro de 60 mm y una longitud de 80 mm.

3. Sistema recuperador de calor (3')

Cada sistema recuperador de calor (3') está conformado por las partes que se describen a continuación:

i) Recuperador de calor (3), el cual es una matriz y consta de agujeros externos por donde pasan los productos de combustión y calientan esta matriz, mientras que por las perforaciones centrales pasa el aire de combustión que es precalentado por el calor que es llevado por conducción a través de la matriz desde los productos de combustión, como se observa en la figura 4. Cada recuperador de calor (3) se encuentra ubicado entre el colector (2) y una junta de dilatación (4) y conectado a una cubierta del recuperador (5). En una modalidad preferida el recuperador de calor (3) corresponde a una matriz cilíndrica fabricada con carburo de silicio, con un diámetro de 200 mm y una longitud de 300 mm, y con perforaciones cilíndricas con un diámetro de 6.35 mm.

j) Junta de dilatación (4) que sirve para el ensamble y ajuste entre el colector (2), los recuperadores de calor (3) y la cubierta del recuperador (5). En una modalidad preferida, la junta de dilatación (4) corresponde a un aro de manta de fibra cerámica con un diámetro de 275 mm y un espesor de 30 mm.

k) Una cubierta del recuperador (5) que sirve para acoplar las boquillas de inyección del aire de combustión y el ducto de eyección (7). En la cubierta del recuperador (5) se observan las entradas de los productos de combustión provenientes de la cámara de combustión y la salida del aire precalentado. En una modalidad preferida, la cubierta del recuperador (5) corresponde a una carcasa de acero inoxidable con un diámetro de 215 mm y una longitud de 250 mm.

l) Un ducto de eyección (7) como se observa en la figura 5. El ducto de eyección (7) es por donde se llevan los gases de combustión desde la cámara de combustión hacia la

cubierta del recuperador (5) y luego al recuperador de calor (3). En una modalidad preferida, el ducto de eyección (7) corresponde a un sistema tubular en forma de T de acero inoxidable con un diámetro de 30 mm.

5 m) Boquillas de inyección del aire de combustión (6), en donde los diámetros son calculados para la obtención del impulso necesario para generar la recirculación que permita obtener el régimen de combustión sin llama, como se observa en la figuras 1a, 1b y 1c, que transporta el aire de combustión a la cámara de combustión. En una modalidad preferida, las boquillas de inyección del aire de combustión (6) corresponden a una reducción cónica de material dámetro con unas dimensiones 10 a 16 mm en la descarga.

10

MODO DE OPERACIÓN

En un primer ciclo, el cañón de aire (1) entra en operación en modo llama mientras se precalienta la cámara de combustión y se obtienen las condiciones de temperaturas necesarias para alcanzar el régimen de combustión sin llama mediante la entrada de gas a través del ducto de gas para modo llama (10) que tiene en un extremo una boquilla de gas para modo llama con descargas radiales de combustible (14), el cual entra en contacto con una chispa generada por la bujía (9) y en donde el aire de combustión ingresa por el ducto de aire de combustión (18). A continuación, el quarl (8) direcciona el aire y el combustible hacia la cámara de combustión.

20 Posteriormente, cuando se opera en modo sin llama, el gas ingresa al quemador mediante el ducto de gas para modo sin llama con baja relación gas/sólido o gas/líquido (12) o con alta relación gas/sólido o gas/líquido (11) que se encuentran ubicados en el extremo del tubo compuesto (1') pasando por la boquilla de gas con descarga axial para modo sin llama, bien sea de baja relación gas/sólido o gas/líquido (15), o de alta relación gas/sólido o gas /líquido (16), para llegar a la zona de reacción entre el combustible y el oxidante dentro de la cámara de combustión. Así mismo, el combustible sólido o líquido ingresa por un ducto de combustible sólido o líquido (13) que lo transporta hasta una boquilla de descarga del combustible sólido o líquido (17), ubicada en el centro del quarl (8), que se encarga de direccionarlo hacia la zona de reacción entre el combustible y el oxidante. Por su parte, el aire de combustión ingresa por los ductos de entrada de aire de combustión (19), los cuales se encuentran conectados al colector (2). El aire de combustión posteriormente pasa a través del recuperador de calor (3), el cual está previamente calentado de manera que calienta el aire que sale por las boquillas de inyección del aire de combustión (6) hacia la zona de reacción dentro de la cámara de combustión. Después de realizada la combustión en la cámara de combustión o zona de reacción, los productos de

combustión ingresan al ducto de eyección (7), atraviesan la cubierta del recuperador (5) que los conduce al recuperador de calor (3), de manera tal que calientan la matriz interna del recuperador y finalmente son evacuados por el ducto de descarga de gases de combustión (20) que se encuentra unido al colector (2), cumpliéndose así el ciclo auto-recuperativo del calor.

VI. EJEMPLOS

En la figura 6 se presentan datos experimentales de las emisiones en chimenea de NO y CO del quemador objeto de la solicitud de patente, operando tanto en modo llama como en modo sin llama, con mezclas de gas natural y carbón pulverizado que van desde 0% hasta 100% con base en la potencia aportada por el carbón. Estas mediciones corresponden al quemador operando a una potencia de 28 kW con base en el Poder Calorífico Inferior, un factor de aireación de 1.3 y en una cámara de combustión de sección transversal cuadrada de 0.3x0.3 m y una longitud de 1.6 m. Los combustibles utilizados fueron un carbón sub-bituminoso de Amagá, con 11% de humedad y 8.6% de cenizas, y gas natural con 99% metano (CH₄). En esta figura se observa como las emisiones de CO son menores a 50 ppm para todas las mezclas operando en régimen de combustión sin llama, incluso para las de mayor porcentaje de carbón, lo cual evidencia que la mezcla combustible se está quemando correctamente al interior del horno. Para la operación en modo llama con 100% carbón pulverizado se obtiene mayores emisiones de CO (por encima de 80 ppm) y al mismo tiempo una mayor variabilidad. Por último, en las emisiones de NO se observan dos tendencias. La primera es el aumento de las emisiones de NO al aumentar el porcentaje de carbón en las mezcla combustible, lo cual se atribuye al nitrógeno que hace parte de la composición química del carbón. La segunda tendencia es la reducción de las emisiones de NO en régimen de combustión sin llama en comparación a la combustión convencional. Por ejemplo para el caso de 0% carbón (El quemador operando únicamente con gas natural) las emisiones de NO pasan de alrededor de 60 ppm a menos de 10 ppm, lo cual es un cambio considerable, teniendo en cuenta que cuando se opera en combustión sin llama se está recuperando calor, lo cual aumenta las emisiones de NOx debido al aumento en la temperatura del aire de combustión. Esta reducción en las emisiones de NO también se observan para el caso de 100% carbón cuando se pasa al régimen de combustión sin llama. Si se opera el quemador en modo combustión sin llama sin activar la recuperación de calor, las emisiones de NO se mantienen por debajo de 150 ppm para todas las mezclas de gas natural – carbón pulverizado.

El quemador de la presente invención funciona con bajas emisiones tanto en modo llama como modo sin llama, así para 100% carbón las emisiones de CO fueron 46ppm y 40ppm, y las de NO fueron 284ppm y 210ppm para modo llama y modo sin llama respectivamente. Es importante resaltar la disminución del NO ya que en modo sin llama
5 el horno opera con aire precalentado lo que en condiciones convencionales conlleva a obtener más NO, lo que confirma que se está obteniendo el régimen de combustión sin llama. Con gas, las emisiones de CO fueron 50ppm y 15ppm, de NO 57ppm y 20ppm para modo llama y sin llama respectivamente.

En la figura 7 se presentan imágenes fotográficas comparativas entre el régimen de combustión convencional (Modo Llama) y el régimen de combustión sin llama (Modo Sin
10 llama) usando como combustible tanto gas natural (0% Carbón) como 100% carbón pulverizado, donde el quemador objeto de la solicitud de patente se encuentra ubicado en la pared a la izquierda de las imágenes. En las imágenes se observa como las zonas de alta luminosidad, características de una llama convencional, desaparecen por completo al
15 pasar al régimen de combustión sin llama. En el caso en el que el combustible es carbón pulverizado, las partículas de carbón que viajan a lo largo del horno siguiendo las corrientes de recirculación, generan una nube luminosa por el hecho de estar a alta temperatura. No obstante, esta luminosidad es muy diferente a la obtenida cuando la combustión del carbón se da de manera convencional (modo llama).

20 **NÚMEROS DE REFERENCIA**

- (1') Tubo compuesto
- (1) Cañón de aire
- (2') Soporte central
- (2) Colector
- 25 (3') Sistema recuperador de calor
- (3) Recuperador de calor
- (4) Junta de dilatación
- (5) Cubierta del recuperador
- (6) Boquillas de inyección del aire de combustión
- 30 (7) Ducto de eyección
- (8) Quarl
- (9) Bujía

- (10) Ducto de gas para modo llama
- (11) Ducto de gas para modo sin llama con alta relación gas/sólido o gas/líquido
- (12) Ducto de gas para modo sin llama con baja relación gas/sólido o gas/líquido
- (13) Ducto de combustible sólido o líquido
- 5 (14) Boquilla de gas para modo llama con descargas radiales de combustible
- (15) Boquilla de gas con descarga axial para modo sin llama con baja relación gas/sólido o gas/líquido
- (16) Boquilla de gas con descarga axial para modo sin llama con alta relación gas/sólido o gas/líquido
- 10 (17) Descarga o boquilla para combustible sólido o líquido
- (18) Entrada de aire de combustión en modo llama
- (19) Entrada de aire de combustión en modo sin llama
- (20) Ducto de descarga gases de combustión