

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 402 333**

51 Int. Cl.:

F23R 3/28 (2006.01)

F23R 3/34 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.03.2009 E 09728028 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.01.2013 EP 2263043**

54 Título: **Elementos refractarios en un quemador**

30 Prioridad:

01.04.2008 EP 08006657

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

30.04.2013

73 Titular/es:

**SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT (100.0%)
Wittelsbacherplatz 2
80333 München, DE**

72 Inventor/es:

MILOSAVLJEVIC, VLADIMIR

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 402 333 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

Elementos refractarios en un quemador

Área técnica

5 La presente invención hace referencia a un quemador, de manera preferente para su uso en motores de turbinas de gas, y más particularmente a elementos refractarios adaptados para estabilizar la combustión de un motor, y además a un quemador que utiliza una cámara de combustión piloto para proporcionar productos de combustión para estabilizar la combustión premezclada pobre principal.

Antecedentes técnicos

10 Los motores de turbinas de gas se emplean en una variedad de aplicaciones que incluyen la generación de energía eléctrica, aviación militar y comercial, conducción por tuberías y transporte marítimo. En un motor de turbina de gas que opera en modo LPP (por sus siglas en inglés, mezcla pobre premezclada y prevaporizada), el combustible y el aire se suministran a una cámara de combustión donde se mezclan y se produce la ignición mediante una llama, iniciando por tanto la combustión. Los principales problemas asociados con el proceso de combustión en motores de turbinas de gas, además de la eficacia térmica y la mezcla apropiada de combustible y aire, están asociados a la
15 estabilización de la llama, la eliminación de pulsos y ruido, y el control de emisiones contaminantes, especialmente óxidos de nitrógeno (NOx), CO, UHC, humos y emisión de partículas

1. En motores de turbinas de gas industriales, que operan en modo LPP, la temperatura de la llama se reduce por medio de la adición de más aire del que se requiere para el proceso de combustión en sí mismo. El exceso de aire que no se hace reaccionar debe ser calentado durante la combustión, y como resultado la temperatura de la llama del proceso de combustión se reduce (por debajo del punto estequiométrico) de aproximadamente 2300K a 1800K y menos. Esta reducción en la temperatura de la llama se requiere para reducir de manera significativa las emisiones de NOx. Un método que se ha mostrado exitoso en la reducción de las emisiones de NOx, es realizar el proceso de combustión con una mezcla tan pobre que la temperatura de la llama se reduce por debajo de la temperatura a la que el Nitrógeno diatómico y el Oxígeno (N₂ y O₂) se disocian y recombinan en NO y NO₂. Los flujos de combustión
20 estabilizados por giro o rotación (swirl) se utilizan comúnmente en motores de turbinas de gas industriales por medio de, tal como se ha indicado anteriormente, el desarrollo de flujo invertido (Zona de Recirculación inducida por Giro) alrededor de la línea central, por lo cual el flujo invertido devuelve calor y radicales libres a la mezcla de combustible y aire sin quemar que se introduce. El calor y los radicales libres provenientes del combustible que se ha hecho reaccionar previamente, son necesarios para iniciar (pirolizar combustible e iniciar el proceso de ramificación en cadena) y sostener la combustión estable de la mezcla de combustible y aire fresca que no se ha hecho reaccionar. La combustión estable en los motores de turbinas de gas requiere un proceso cíclico de combustión que produce productos de combustión que se transportan de regreso aguas arriba para iniciar el proceso de combustión. Un frente de llama es estabilizado en una capa de cortadura de la zona de recirculación inducida por giro. Dentro de la capa de cortadura “la velocidad de la llama turbulenta local de la mezcla de aire/combustible” tiene que ser mayor
25 que la “velocidad de la mezcla de aire/combustible local”, y como resultado el proceso de combustión/frente de llama puede ser estabilizado.

La combustión premezclada pobre es, de manera inherente, menos estable que la combustión de la llama de difusión por las siguientes razones:

40 1. La cantidad de aire que se requiere para reducir la temperatura de la llama de 2300K a 1700-1800 K, es aproximadamente dos veces la cantidad de aire que se requiere para la combustión estequiométrica. Esta circunstancia hace que la relación global de combustible/aire (ϕ) se encuentre muy cercana a (alrededor de o inferior a 0.5; $\phi \geq 0.5$), o sea similar a la relación de combustible/aire a la cual tiene lugar la extinción pobre de la llama premezclada. Bajo estas condiciones, la llama puede extinguirse localmente y puede volver a producirse la ignición de manera periódica.

45 2. Cerca del límite de extinción pobre, la velocidad de llama de las llamas pobres parcialmente premezcladas es muy sensible a las fluctuaciones de la relación de equivalencia. Las fluctuaciones en la velocidad de la llama pueden dar como resultado fluctuaciones/desplazamientos espaciales del frente de llama (zona de recirculación inducida por giro). Un frente de llama menos estable, más fácil de desplazar, de una llama premezclada da como resultado una tasa de liberación de calor periódica, que, a su vez, da como resultado un desplazamiento de la llama, procesos dinámicos de fluidos no homogéneos, y un desarrollo de inestabilidades termo-acústicas.

50 3. Las fluctuaciones de la relación de equivalencia son, probablemente, el mecanismo de acoplamiento más habitual para unir la liberación irregular de calor a oscilaciones de presión irregulares.

4. Para hacer que el combustible sea lo suficientemente pobre, a fin de poder reducir de manera significativa las emisiones de NOx, casi todo el aire utilizado en el motor debe pasar a través del inyector y ser premezclado con el combustible. Por lo tanto, todo el flujo en los quemadores tiene el potencial de ser reactivo y requiere que el punto donde se inicia la combustión sea fijo.

5. Cuando el calor que se requiere para que las reacciones tengan lugar es el factor de limitación de estabilidad, fluctuaciones temporales muy pequeñas en las relaciones de equivalencia de combustible/aire (que podrían o bien ser el resultado de la fluctuación de combustible o del flujo de aire a través del quemador/in inyector), pueden generar que la llama se extinga parcialmente y se vuelva a producir la ignición.

6. Una razón adicional y muy importante para la disminución de la estabilidad en la llama premezclada es que el gradiente pronunciado de la mezcla de combustible y aire se elimina del proceso de combustión. Esto hace que el flujo de combustible premezclado tenga lugar en cualquier lugar donde haya una temperatura suficiente para la reacción. Cuando la llama puede, más fácilmente, ocurrir en múltiples posiciones, se vuelve más inestable. Los únicos medios para estabilizar una llama premezclada en una posición fija, se basan en el gradiente de temperatura producido donde el combustible premezclado sin quemar y el aire se mezclan con los productos calientes de combustión (la llama no puede producirse donde la temperatura es demasiado baja). Esto deja al gradiente térmico producido por la generación, radiación, difusión y convección del calor como un método para estabilizar la llama premezclada. El calentamiento por radiación del fluido no produce un gradiente marcado; por lo tanto, la estabilidad debe venir de la generación, difusión y convección del calor en la zona de reacción previa. La difusión únicamente produce un gradiente marcado en el flujo laminar y no en flujos turbulentos, dejando sólo la convección y la generación de energía para producir los gradientes marcados deseados para la estabilización de la llama, que son en realidad gradientes de calor y radicales libres. Ambos, los gradientes de calor y de radicales libres, se generan, se propagan y se someten a convección por medio de los mismos mecanismos, a través de los productos de combustión que recirculan dentro de la zona de recirculación inducida por giro.

2. En flujos premezclados, además de en flujos de difusión, la rápida expansión que causa separaciones y los flujos de recirculación rotacionales, se utilizan habitualmente para producir gradientes de calor y radicales libres en el combustible y aire de reacción previa.

Se conocen quemadores convencionales para una turbina de gas a partir de las patentes GB 812 317 A, JP 09 264536 A, US 2007/113555 A1, US 5 321 948 A.

Un objeto de la presente invención es presentar un elemento refractario que mejore la estabilización del proceso de combustión de un quemador.

Resumen de la invención

Los aspectos relacionados con el elemento refractario de acuerdo a la presente invención se describen en la presente patente, a modo de ejemplo, en conexión con un quemador de bajas emisiones de premezcla parcial pobre-rica, para una cámara de combustión de una turbina de gas que proporciona un proceso de ignición y de combustión estable en todas las condiciones de carga del motor. Este quemador opera de acuerdo al principio de "suministrar" calor y una alta concentración de radicales libres desde un escape de una cámara de combustión piloto a una llama principal que se quema en un giro de aire/combustible premezclado pobre, por lo cual se facilita una combustión rápida y estable de la principal llama premezclada pobre. La cámara de combustión piloto suministra calor, y suministra complementariamente una alta concentración de radicales libres directamente a un punto de remanso frontal, y a una capa de cortadura de la principal zona de recirculación inducida por giro, donde el principal flujo premezclado pobre se mezcla con productos de combustión de gases calientes proporcionados por la cámara de combustión piloto. Esto permite una mezcla más pobre y temperaturas más bajas de la combustión con giro de aire/combustible principal premezclada, que de otra manera no sería autosostenida en flujos recirculantes estabilizados por giro durante las condiciones de operación del quemador.

De acuerdo a un primer aspecto de la presente invención, se presenta en la presente patente un elemento refractario que se encuentra caracterizado por las características de la reivindicación 1.

De acuerdo a un segundo aspecto de la presente invención, se presenta un método para la utilización del elemento refractario tal como se caracteriza en la reivindicación del método independiente.

Aspectos adicionales de la presente invención se presentan en las reivindicaciones dependientes.

El quemador utiliza:

Un giro de aire/combustible superior al número de rotación o giro, o número de Swirl (S_N) 0,7 (que se encuentra por encima del número de swirl crítico $S_N=0,6$), generado-transmitido al flujo, mediante un sistema generador de flujos con giro o "swirler" radial;

radicales libres no equilibrados de especies activas que se liberan cerca del punto de remanso frontal,

5 un tipo en particular de la geometría del quemador con un dispositivo con múltiples elementos refractarios (el término elementos refractarios múltiples se utiliza en la presente patente como un nombre de un elemento refractario para un quemador, en donde dicho elemento refractario está compuesto de una pluralidad de secciones de elementos refractarios que forman una estructura de un elemento refractario), y secuenciación interna en etapas de combustible y aire dentro del quemador, para estabilizar el proceso de combustión en todas las condiciones de
10 operación de la turbina de gas.

En resumen, el quemador revelado proporciona un proceso de combustión e ignición estable en todas las condiciones de carga del motor. Algunas características importantes relacionadas con el quemador de la invención son:

La situación geométrica de los elementos del quemador;

15 La cantidad de combustible y aire secuenciada en etapas dentro del quemador;

La cantidad mínima de especies activas – radicales generadas y requeridas en diferentes condiciones de operación del motor/quemador; perfil del combustible;

Mezcla de combustible y aire en diferentes condiciones de operación del motor:

Nivel de giro transmitido;

20 Disposición de múltiples elementos refractarios (como mínimo doble elemento refractario).

Para lograr niveles de emisión tan bajos como sea posible, un objetivo en este diseño/invención es presentar perfiles de mezcla uniformes en la salida de los canales de premezcla pobre. Existen dos distintas zonas de combustión dentro del quemador que engloba esta revelación, donde el combustible se quema de manera simultánea en todo momento. Ambas zonas de combustión se encuentran estabilizadas por giro, y el combustible y el aire se
25 premezclan antes del proceso de combustión. Un proceso de combustión principal, durante el cual más del 90% del combustible se quema, es pobre. Un proceso de combustión auxiliar, que ocurre dentro de la cámara de combustión piloto pequeña, en donde hasta el 1% del flujo de combustible total se consume, podría ser pobre, estequiométrico y rico (relación de equivalencia, $\Phi=1.4$ y mayor).

30 Una diferencia importante entre el quemador revelado y una estructura similar de un quemador del arte previo, es que no se necesita un cuerpo romo (del término inglés "bluff body") en la cámara de combustión piloto, ya que la presente invención utiliza un flujo de enfriamiento no rápido de radicales, dirigidos aguas abajo desde una zona de combustión de la cámara de combustión piloto, a lo largo de una línea central de la cámara de combustión piloto, siendo liberado dicho flujo a través del área de abertura completa de una boca de la cámara de combustión piloto, en una salida de la cámara de combustión piloto.

35 La principal razón por la que el proceso de combustión auxiliar en la cámara de combustión piloto pequeña podría ser pobre, estequiométrico o rico, y aún proporcionar un proceso de ignición y de combustión estable en todas las condiciones de carga del motor, está relacionada con la eficacia de la combustión. El proceso de combustión, que ocurre dentro de la cámara de combustión pequeña piloto, presenta una baja eficacia debido a la gran área superficial que da como resultado el enfriamiento rápido de la llama en las paredes de la cámara de combustión
40 piloto. Un proceso de combustión ineficaz, bien siendo pobre, estequiométrico o rico, podría generar una gran cantidad de especies activas – radicales que es necesaria para aumentar la estabilidad de la llama pobre principal, y es beneficiosa para una operación exitosa del quemador de la presente invención/diseño (Nota: la llama que tiene lugar en la mezcla premezclada pobre de aire/combustible es denominada en la presente patente la llama pobre).

45 Sería muy difícil mantener (pero no de producir la ignición, porque la cámara de combustión piloto pequeña puede actuar como dispositivo de ignición), la combustión en la capa de cortadura de la principal zona de recirculación por debajo de los límites de inflamabilidad pobre o límites LBO (del inglés "Lean Blow Off") de la llama pobre principal (aprox. $T > 1350$ K y $\Phi \geq 0.25$). Para una operación del motor por debajo de los límites LBO de la llama pobre principal, en este diseño de quemador, se utiliza/se proporciona una "secuenciación en etapas" adicional de la cámara de combustión piloto pequeña. El aire que se utiliza para enfriar las paredes internas de la cámara de
50 combustión piloto pequeña (que se realiza mediante una combinación de refrigeración por impacto y por convección), y que representa de manera aproximada un 5-8 % del flujo de aire total a través del quemador, es

premezclado con combustible previamente antes de someterlo al generador de flujo con giro. Una cantidad relativamente grande de combustible puede ser añadida al aire de refrigeración de la cámara de combustión piloto pequeña que corresponde a relaciones de equivalencia muy ricas ($\Phi > 3$). El aire de refrigeración con giro y el combustible y los productos calientes de la combustión proveniente de la cámara de combustión piloto pequeña, pueden mantener de manera muy efectiva la combustión de la llama pobre principal por debajo, en y por encima de los límites LBO. El proceso de combustión es muy estable y eficaz porque los productos de combustión calientes y el aire de refrigeración muy caliente (por encima de 750 °C), premezclado con combustible, proporcionan calor y especies activas (radicales) al punto de remanso frontal de la zona de recirculación de la llama principal. Durante este proceso de combustión, la cámara de combustión piloto pequeña, combinada con aire de refrigeración muy caliente (por encima de 750 °C) premezclado con combustible, actúa como un quemador sin llama, donde los reactantes (oxígeno y combustible) se premezclan con productos de combustión, y una llama distribuida se establece en el punto de remanso frontal de la zona de recirculación inducida por giro.

Para posibilitar una función apropiada y una operación estable del quemador revelado en la presente solicitud, es necesario que el nivel transmitido de giro y el número de swirl (ecuación 1) se encuentre por encima del número de swirl crítico (no inferior a 0,6 y no mayor que 0,8), en el cual se formará la rotura del vórtice – zona de recirculación, y se posiciona firmemente dentro de la disposición de elementos refractarios múltiples. El punto de remanso frontal P debería estar situado dentro del elemento refractario y a la salida de la cámara de combustión piloto. Las principales razones, para este requerimiento, son:

Si el nivel transmitido de giro es bajo y el número de swirl o giro resultante se encuentra por debajo de 0,6, para la mayoría de las geometrías del quemador, se formará una zona débil de recirculación y puede tener lugar una combustión inestable.

Se requiere una zona de recirculación fuerte para permitir el transporte de calor y de radicales libres del combustible y el aire previamente quemado, nuevamente aguas arriba hacia el frente de llama. Se requiere una zona de recirculación fuerte y bien establecida para proporcionar una región de capa de cortadura donde la velocidad de la llama turbulenta pueda “coincidir con” o ser proporcional a la mezcla de combustible/aire local, y pueda establecer una llama estable. Este frente de llama establecido en la capa de cortadura de la zona de recirculación principal, debe ser estable, y no debe ocurrir ningún desplazamiento periódico u ondulaciones en serie del frente de llama. El número de swirl transmitido puede ser alto, pero no debería ser superior a 0.8, ya que a este y por encima de este número de swirl más del 80 % de la cantidad total del flujo volverá a ser recirculado. Un aumento adicional en el número de swirl no contribuirá más al aumento en la cantidad de masa de recirculación de los productos de combustión, y la llama en la capa de cortadura de la zona de recirculación será sometida a un alto nivel de turbulencia y tensión que puede dar como resultado el enfriamiento rápido y la extinción parcial y la re-ignición de la llama. Cualquier tipo de generador de flujo con giro, radial, axial y axial-radial puede ser utilizado en el quemador, cubierto por esta revelación. En la presente revelación se muestra una configuración de un generador de flujo con giro o swirler radial.

El quemador utiliza la estabilización aerodinámica de la llama y encierra la zona de estabilización de la llama – zona de recirculación – en la disposición de elementos refractarios múltiples. La disposición de elementos refractarios múltiples es una característica importante del diseño del quemador proporcionado por las siguientes razones. El elemento refractario (o el también denominado difusor):

- proporciona un frente de llama (zona de recirculación principal) que ancla la llama en una posición definida en el espacio, sin necesidad de anclar la llama a una superficie sólida/cuerpo romo, y de esa manera se evitan una alta carga térmica y otros problemas relacionados con la integridad mecánica del quemador;

- su geometría (el ángulo medio del elemento refractario α y la longitud L), es importante para controlar el tamaño y la forma de la zona de recirculación en conjunto con el número de swirl. La longitud de la zona de recirculación es aproximadamente proporcional a 2 hasta 2,5 de la longitud del elemento refractario;

- la longitud óptima L se encuentra en el orden de $L/D=1$ (donde D es el diámetro de la boca del elemento refractario). La longitud mínima del elemento refractario no debe ser menor que $L/D=0,5$ y no superior a $L/D=2$;

- el ángulo medio óptimo α del elemento refractario no debe ser menor a 20 ni superior a 25 grados, y permite un giro menor antes de la disminución de la estabilidad, en comparación con un frente de llama menos delimitada; y

- tiene la importante tarea de controlar el tamaño y la forma de la zona de recirculación a medida que la expansión de los gases calientes, como resultado de la combustión, reduce el tiempo de transporte de los radicales libres en la zona de recirculación.

Breve descripción de los dibujos

La Figura 1 es un corte transversal simplificado que muestra de manera esquemática el quemador de acuerdo a los aspectos de la presente invención, incluido en una carcasa sin ningún detalle que muestre cómo está configurado el quemador en el interior de la carcasa.

5 La Figura 2 es un corte transversal a través del quemador que muestra de manera esquemática una sección por encima de un eje de simetría, por donde una rotación alrededor del eje de simetría forma un cuerpo rotacional que muestra un diseño del quemador.

La Figura 3 muestra un diagrama de los límites de estabilidad de la llama en función del número de swirl, nivel de giro transmitido y relación de equivalencia.

La Figura 4a: muestra un diagrama de la cámara de combustión próximo al campo de la aerodinámica.

10 La Figura 4b: muestra un diagrama de la cámara de combustión próximo al campo de la aerodinámica.

La Figura 5 muestra un diagrama de la intensidad de turbulencia.

La Figura 6 muestra un diagrama de tiempo de relajación en función de la presión de la combustión.

La Figura 7 muestra, en principio, un elemento refractario que tiene múltiples secciones de elemento refractario de acuerdo con un aspecto de la presente invención.

15 Modos de realización de la invención

A continuación, se describirán una cantidad de modos de realización en mayor detalle con referencias a los dibujos adjuntos.

En la Figura 1 se encuentra representado el quemador 1 que tiene una carcasa 2 que incluye los componentes del quemador.

20 La Figura 2 muestra, con fines aclaratorios, una vista de un corte transversal del quemador por encima de un eje de simetría rotacional. Las principales piezas del quemador son el generador de flujo con giro o swirler radial 3, los elementos refractarios múltiples 4a, 4b, 4c y la cámara de combustión piloto 5.

25 Tal como se ha expuesto, el quemador opera de acuerdo al principio de "suministrar" calor y una alta concentración de radicales libres desde un escape 6 de una cámara de combustión piloto 5, hasta una llama principal 7 que arde en un giro de aire/combustible premezclado pobre que emerge desde una primera salida 8 de un primer canal 10 de premezclado pobre, y desde una segunda salida 9 de un segundo canal 11 de premezclado pobre, por lo cual se facilita una combustión rápida y estable de la llama principal premezclada pobre 7. Dicho primer canal 10 de premezclado pobre se forma por y entre las paredes 4a y 4b del elemento refractario múltiple. El segundo canal de premezclado pobre 11 se forma por y entre las paredes 4b y 4c del elemento refractario múltiple. La pared simétrica rotacional más exterior 4c del elemento refractario múltiple está provista con una extensión 4c1 para prever la longitud óptima de la disposición de elemento refractario múltiple. Los canales primero 10 y segundo 11 de premezclado pobre, están provistos con alas del generador de flujo con giro que conforman dicho generador de flujo con giro o swirler 3, para transmitir rotación a la mezcla de aire/combustible que pasa a través de los canales.

35 El aire 12 se proporciona a los canales primero 10 y segundo 11 en la entrada 13 de dichos canales primero y segundo. De acuerdo con el modo de realización que se muestra, el generador de flujo con giro 3 está situado cerca de la entrada 13 de los canales primero y segundo. Además, el combustible 14 se introduce en el giro de aire/combustible a través de un tubo 15 proporcionado con pequeños orificios difusores 15b, situados en la entrada 13 de aire 12 entre las alas del generador de flujo con giro 3, por lo cual el combustible se distribuye en el flujo de aire a través de dichos orificios como un pulverizador, y se mezcla de manera efectiva con el flujo de aire. Puede añadirse combustible adicional a través de un segundo tubo 16 que emerge hacia el interior del primer canal 10.

40 Cuando el flujo de aire/combustible premezclado pobre se quema, se genera la llama principal 7. La llama 7 se forma como una capa de cortadura simétrica rotacional cónica 18 alrededor de una zona de recirculación principal 20 (a continuación algunas veces abreviado como RZ, por sus siglas en inglés). La llama 7 se incluye dentro de la extensión 4c1 de la sección más exterior del elemento refractario, en este ejemplo la sección 4c del elemento refractario.

45 La cámara de combustión piloto 5 suministra calor y suministra complementariamente una alta concentración de radicales libres directamente a un punto de remanso P frontal y la capa de cortadura 18 de la zona de recirculación

inducida por giro 20, donde el flujo premezclado pobre principal se mezcla con productos de gases calientes de la combustión proporcionados por la cámara de combustión piloto 5.

5 La cámara de combustión 5 se encuentra provista con paredes 21 que incluyen un compartimento de combustión para una zona de combustión piloto 22. Se suministra aire al compartimento de combustión a través del canal de combustible 23 y canal de aire 24. Alrededor de las paredes 21 de la cámara de combustión piloto 5, hay una placa de distribución 25 provista de orificios por la superficie de la placa. Dicha placa de distribución 25 se encuentra separada a una cierta distancia de dichas paredes 21, formando una capa de una zona de refrigeración 25a. El aire de refrigeración 26 se toma a través de una entrada de refrigeración 27 y se encuentra con el exterior de dicha placa de distribución 25, con lo cual el aire de refrigeración 26 se distribuye a través de las paredes 21 de la cámara de combustión piloto para enfriar de manera efectiva dichas paredes 21. El aire de refrigeración 26 se deja salir después de dicha refrigeración a través de un segundo generador de flujo con giro o swirler 28, dispuesto alrededor de un elemento refractario piloto 29 de la cámara de combustión piloto 5. Se puede añadir combustible adicional a la combustión en la llama pobre principal 7 suministrando combustible en un conducto 30, dispuesto alrededor y en el exterior de la capa del compartimento de refrigeración 25a. Dicho combustible adicional, se deja salir entonces hacia el interior del segundo generador de flujo con giro 28, donde el aire de refrigeración 26 ahora caliente y el combustible añadido a través del conducto 30 se mezclan de manera efectiva.

20 Una cantidad relativamente grande de combustible puede ser añadida al aire de refrigeración de la cámara de combustión piloto pequeña 5, que corresponde a relaciones de equivalencia muy ricas ($\Phi > 3$). El aire de refrigeración, y el combustible con giro y los productos calientes de combustión provenientes de la cámara de combustión piloto pequeña, pueden sostener de manera efectiva la combustión de la llama pobre principal 7 por debajo, en y por encima de los límites LBO. El proceso de combustión es muy estable y eficaz porque los productos calientes de combustión y el aire de refrigeración muy caliente (por encima de 750 °C), premezclado con el combustible, proporcionan calor y especies activas (radicales) al punto de remanso P frontal de la zona de recirculación de la llama principal 20. Durante este proceso de combustión, la cámara de combustión piloto pequeña 5, combinada con aire de refrigeración muy caliente (por encima de 750 °C) premezclado con combustible, actúa como un quemador sin llama, donde los reactantes (oxígeno y combustible) se premezclan con los productos de combustión y se establece una llama distribuida en el punto de remanso P frontal de la zona de recirculación inducida por giro 20.

30 Para posibilitar una función apropiada y una operación estable del quemador 1 revelado en la presente solicitud, se requiere que el nivel de giro transmitido y el número de swirl esté por encima del valor crítico (no inferior a 0,6 y no superior a 0,8, ver también la figura 3), al cual la ruptura de vórtices – zona de recirculación 20 - se formará y se posicionará firmemente dentro de la disposición de elementos refractarios múltiples 4a, 4b, 4c. El punto de remanso frontal P debería estar situado dentro del elemento refractario 4a, 4b, 4c y en la salida 6 de la cámara de combustión piloto 5. Algunas razones principales, para este requerimiento, se mencionaron en el resumen anterior. Una razón adicional es:

Si el número de swirl es mayor que 0,8, el flujo giratorio se extenderá hacia la salida de la cámara de combustión, lo que puede dar como resultado un sobrecalentamiento de los subsiguientes álabes de guía de una turbina.

A continuación, se presenta un resumen de los requerimientos del nivel de giro y el número de swirl transmitido. Véase también las Figuras 4a y 4b.

40 El nivel transmitido de giro (la relación entre el momento tangencial y axial), tiene que ser mayor que el valor crítico (0,4 – 0,6), de manera que se pueda formar una zona de recirculación 20 central estable. El número de swirl crítico, S_N , es también una función de la geometría del quemador, que es la razón por la que varía entre 0,4 y 0,6. Si el número de swirl transmitido es $\geq 0,4$ o se encuentra en el rango de 0,4 a 0,6, la zona de recirculación 20 principal, puede que no se forme en absoluto y que se extinga de forma periódica a bajas frecuencias (por debajo de 150 Hz), y la aerodinámica resultante podría ser muy inestable, lo que daría como resultado un proceso de combustión transitorio.

En la capa de cortadura 18 de la zona de recirculación 20 estable y regular, con un fuerte gradiente de velocidad y niveles de turbulencia, puede tener lugar la estabilización de la llama si:

La velocidad de la llama turbulenta (ST) > la velocidad local de la mezcla de aire combustible (UF/A).

50 Los productos de recirculación que son: fuente de calor y especies activas (simbolizados por medio de flechas 1a y 1b), situados dentro de la zona de recirculación 20, tienen que ser estacionarios en espacio y tiempo aguas debajo de la sección de mezclado del quemador 1, para posibilitar la pirólisis de la mezcla entrante de combustible y aire. Si no predomina un proceso de combustión regular, tendrán lugar inestabilidades termoacústicas.

Las llamas estabilizadas por giro son hasta cinco veces más cortas y tienen límites de inflamabilidad significativamente más pobres que las llamas a chorro.

Un giro de una combustión de difusión turbulenta o premezclada proporciona una manera efectiva de premezclar el combustible y el aire.

- 5 El arrastre de la mezcla de combustible/aire en la la capa de cortadura de la zona de recirculación 20 es proporcional a la fuerza de la zona de recirculación, el número de swirl y las características de la velocidad de la zona de recirculación URZ.

La velocidad característica de la zona de recirculación, URZ, puede ser expresada como:

$$URZ = UF/A \cdot f(MR, dF/A, \text{cent} / dF/A, S_N),$$

- 10 En donde:

$$MR = r_{\text{cent}} (UF/A, \text{cent})^2 / rF/A (UF / A)^2$$

Los experimentos (Driscoll1990, Whitelaw1991) han mostrado que la fuerza de RZ = $(MR) \exp - 1/2 (dF/A / dF/A, \text{cent}) (URZ / UF/A) (b / dF/A)$,

Y

- 15 MR debería ser < 1.

$(dF/A / dF/A, \text{cent})$, sólo es importante para llamas de difusión turbulentas.

El tamaño/longitud de las zonas de recirculación es "fijo" y proporcional a 2-2.5 dF/A .

No más de aproximadamente el 80% de la masa recircula nuevamente por encima del número de swirl $S_N = 0.8$, independientemente de cómo se incremente adicionalmente el número de swirl S_N

- 20 Añadir paredes de elementos refractarios divergentes aguas abajo de la boca del quemador, aumenta la recirculación (Batchelor 67, Hallet 87, Lauckel 70, Whitelaw 90); y Lauckel 70 ha observado que los parámetros geométricos óptimos eran: $\alpha = 20^\circ - 25^\circ$; $L / dF/A, \text{min} = 1$ y superior.

Esto sugiere que d-elemento refractario $dF/A = 2 - 3$, pero la estabilidad de la llama sugiere que los límites de inflamabilidad pobre más pobres se lograron para valores cercanos a 2 (Whitelaw 90).

- 25 Los experimentos y la experiencia práctica sugieren también que UF/A debería estar por encima de 30-50 m/s para llamas premezcladas debido al riesgo de retroceso de la llama (Proctor 85).

Si un paso trasero se coloca en la salida del elemento refractario, entonces se forma la RZ externa. La longitud de la RZ externa, $LERZ$ (por sus siglas en inglés), es habitualmente $2/3 hERZ$.

Especies activas – radicales

- 30 En la combustión estabilizada por giro, el proceso se inicia y estabiliza mediante el transporte del calor y radicales libres 31 desde el combustible y aire combustionado previamente, nuevamente aguas arriba hacia el frente de llama 7. Si el proceso de combustión es muy pobre, como es el caso en los sistemas de combustión premezclados parcialmente pobres, y como resultado la temperatura de combustión es muy baja, el nivel de equilibrio de los radicales libres es también muy bajo. Además, a presiones del motor altas, los radicales libres producidos por el proceso de combustión, se relajan rápidamente, ver la Figura 6, hasta el nivel de equilibrio que corresponde a la temperatura de los productos de combustión. Esto es debido al hecho de que la tasa de esta relajación de los radicales libres hasta el equilibrio, aumenta exponencialmente con el aumento en la presión, mientras que, por otro lado, el nivel de equilibrio de los radicales libres disminuye exponencialmente con la disminución de la temperatura. Entre más elevado sea el nivel de radicales libres disponible para el inicio de la combustión, más rápido y estable tenderá a ser el proceso de combustión. A presiones más elevadas, a las que los quemadores operan en los motores de turbinas de gas modernos en el modo premezclado parcialmente pobre, el tiempo de relajación de los radicales libres puede ser corto en comparación al tiempo de "transporte" que se requiere para que los radicales libres (simbolizados mediante flechas 31) se sometan a convección aguas abajo, desde el punto donde fueron producidos en la capa de cortadura 18 de la principal zona de recirculación 20, y nuevamente aguas arriba hacia el frente de llama 7 y el punto de remanso frontal P de la zona de recirculación 20 principal. Como consecuencia, para
- 45

cuando el flujo de radicales 31 que circula en sentido inverso dentro de la zona de recirculación principal 20 haya conducido los radicales libres 31 nuevamente hacia el frente de llama 7, y cuando empiecen a mezclarse con la mezcla de combustible y aire premezclada “fresca” que se introduce, desde los canales primero 10 y segundo 11 en el punto de remanso frontal P para iniciar/sostener el proceso de combustión, los radicales libres 31 podrían haber alcanzado niveles de equilibrio bajos.

La presente invención utiliza niveles elevados de no equilibrio de radicales libres 32 para estabilizar la combustión pobre principal 7. En la presente invención, la escala de la cámara de combustión piloto pequeña 5 se mantiene pequeña, y la mayor parte de la combustión del combustible ocurre en la cámara de combustión principal de premezcla pobre (en 7 y 18), y no en la cámara de combustión piloto pequeña 5. La cámara de combustión piloto pequeña 5, puede mantenerse pequeña porque los radicales libres 32 se liberan cerca del punto de remanso frontal P de la zona de recirculación principal 20. Esta es, en general, la localización más eficaz para suministrar calor adicional y radicales libres a la combustión estabilizada por giro (7). Debido a que la salida 6 de la cámara de combustión piloto pequeña 5 se encuentra situada en el punto de remanso frontal P del flujo de recirculación pobre principal 20, la escala de tiempo entre el enfriamiento rápido y la utilización de los radicales libres 32 es muy corta, no permitiendo que los radicales libres 32 se relajen hasta niveles de equilibrio bajos. El punto de remanso frontal P de la zona de recirculación pobre principal 20 se mantiene y se estabiliza aerodinámicamente en la sección de elemento refractario (4a), en la salida 6 de la cámara de combustión piloto pequeña 5. Para asegurar que la distancia y el tiempo de la combustión pobre, rica o estequiométrica (zona 22), dentro de la cámara de combustión piloto pequeña 5, sea tan corta y directa como sea posible, la salida de la cámara de combustión piloto pequeña 5 se coloca en la línea central y en la boca 33 de la cámara de combustión piloto pequeña 5. En la línea central, en la boca 33 de la cámara de combustión piloto pequeña 5, y dentro del elemento refractario 4a, los radicales libres 32 se mezclan con los productos de la combustión pobre 31, una mezcla de combustible y aire precalentada de manera elevada, del conducto 30 y el espacio 25a, y posteriormente con combustible premezclado 14 y aire 12 en la capa de cortadura 18 de la zona de recirculación principal pobre 20. Esto resulta muy ventajoso para los motores de turbinas de gas de presión elevada, que muestran de manera inherente las mayores inestabilidades termo-acústicas. Además, debido a que los radicales libres y el calor producido por la cámara de combustión piloto pequeña 5 se utilizan de manera eficaz, su tamaño puede ser pequeño y el proceso de enfriamiento rápido no se requiere. La posibilidad de mantener el tamaño de la cámara de combustión piloto 5 pequeña también tiene un efecto beneficioso en las emisiones.

Geometría del quemador con disposiciones de elemento refractario múltiple

El quemador utiliza la estabilización de la aerodinámica de la llama y limita la zona de estabilización de la llama – zona de recirculación (5), en la disposición de elemento refractario múltiple (4a, 4b y 4c). La disposición de elemento refractario múltiple es una importante característica del diseño del quemador revelado por las razones que se detallan a continuación. El elemento refractario (o el en ocasiones denominado difusor):

- proporciona un frente de llama 7 (la zona de recirculación principal 20 se encuentra anclada sin necesidad de anclar la llama a una superficie sólida/cuerpo romo y de esa manera se evitan una carga térmica elevada y problemas relacionados con la integridad mecánica del quemador),

- la geometría (el ángulo medio del elemento refractario α y su longitud L) es importante para controlar el tamaño y la forma de la zona de recirculación 20 en conjunto con el número de swirl. La longitud de la zona de recirculación 20 es aproximadamente proporcional con 2 a 2,5 de la longitud del elemento refractario L,

- La disposición de elemento refractario múltiple permite un elemento refractario de mayor longitud (L) y una tasa de expansión mayor que la de un elemento refractario único,

- controla la distribución de la presión y la expansión del flujo a continuación de la boca del quemador de la cámara de combustión (en la salida del elemento refractario).

- la longitud óptima se encuentra en el orden de $L/D = 1$ (D es el diámetro de la boca del elemento refractario). La longitud mínima del elemento refractario no debería ser inferior a 0,5 y no superior a 2 (Ref1: The influence of Burner Geometry and Flow Rates on the Stability and Symmetry of Swirl-Stabilized Nonpremixed Flames; V. Milosavljevic et al; Combustion and Flame 80, pages 196-208, 1990),

- el ángulo medio óptimo α del elemento refractario (Ref1), no debería ser inferior a 20 ni mayor que 25 grados,

- permite un número de swirl menor antes de la disminución en la estabilidad, en comparación a un frente de llama menos delimitado,

- es importante controlar el tamaño y la forma de la zona de recirculación debido a la expansión como resultado de la combustión y reduce el tiempo de transporte de los radicales libres en la zona de recirculación.

- 5 El elemento refractario se forma a partir de una pluralidad de secciones del elemento refractario (4a, 4b, 4c), en donde cada sección del elemento refractario (4a, 4b, 4c) tiene la configuración de la cubierta cónica de un cono truncado, y está distribuida de manera consecutiva una tras otra en dirección aguas abajo del quemador (1), en donde una parte más estrecha de la cubierta de una sección del elemento refractario (4b) aguas abajo rodea la parte más ancha de la cubierta de la sección más cercana aguas arriba (4a). El canal (10, 11) para el aire y el combustible premezclados se encuentra dispuesto entre dos secciones consecutivas del elemento refractario (4a, 4b). Por consiguiente, dichos canales son canales anulares. La parte más estrecha de una sección del elemento refractario aguas abajo (4b) cubre aproximadamente 1/3 de la parte más ancha de la sección del elemento refractario aguas arriba más cercana (4a), según se ve a lo largo de la dirección axial del elemento refractario.
- 10 Escalado del quemador
- El elemento refractario (o difusor) y el giro transmitido proporcionan la posibilidad de un cambio de escala simple de la geometría del quemador revelado para diferentes potencias del quemador.
- Para cambiar el tamaño del quemador a una escala menor (ejemplo):
- 15
- El canal 11 debe eliminarse y el elemento refractario que forma la cubierta 4c debe por tanto sustituir al elemento refractario que previamente forma la cubierta 4b, que es eliminado; la geometría del elemento refractario 4c debe ser la misma que la geometría del elemento refractario 4b que existía anteriormente,
 - El número de swirl en el canal 10 debe permanecer igual,
 - Todas las demás partes del quemador deben permanecer igual; las etapas de combustible dentro del quemador deben permanecer igual o similares.
- 20 Para cambiar el tamaño del quemador a una escala mayor:
- Los canales 10 y 11 deben permanecer como están,
 - El elemento refractario 4c debe estar diseñado de la misma forma que el elemento refractario 4b (conformado como una placa divisora delgada),
 - Debe estar dispuesto un nuevo tercer canal (denominado en la presente patente de manera figurada 11b y que no se revela) en el exterior y rodeando el segundo canal 11, y un nuevo elemento refractario 4d (que no se muestra en los dibujos) exterior y rodeando el segundo canal 11, conformando de esta manera una pared externa del tercer canal; la forma del nuevo elemento refractario 4d debe ser de una forma similar a la forma del elemento refractario más exterior anterior 4c.
- 25
- 30
- El número de Swirl en los canales debe ser S_N , $10 > S_N$, $11 > S_N$, $11b$, pero todos ellos deben estar por encima del $S_N = 0,6$ y no superior a $0,8$
 - Todas las otras partes del quemador deben ser iguales
 - La operación del quemador y las etapas del combustible dentro del quemador deben permanecer iguales o similares.
- Secuenciación en etapas del combustible y operación del quemador
- 35 Cuando el dispositivo de ignición 34, como en los quemadores del arte previo, se encuentra situado en el exterior de la zona de recirculación, que se ilustra en la Figura 4b, la mezcla de combustible/aire que se introduce en esta región debe a menudo ser rica, a fin de hacer que la temperatura de la llama sea lo suficientemente caliente para sostener la combustión estable en esta región. La llama, entonces, no puede ser propagada con frecuencia hacia la principal zona de recirculación, hasta que el combustible premezclado principal y el flujo de aire se vuelva
- 40 suficientemente rico, caliente y tenga una cantidad suficiente de radicales libres, lo que ocurre a tasas de flujo de combustible más elevadas. Cuando la llama no puede propagarse desde la zona de recirculación exterior hasta la zona de recirculación principal interna poco después de la ignición, debe propagarse a una presión más elevada después de que la velocidad del motor empiece a aumentar. Esta transferencia del inicio de la llama principal desde el piloto de la zona de recirculación exterior, únicamente después de que la presión de la cámara de combustión
- 45 empieza a elevarse, da como resultado una relajación más rápida de los radicales libres hasta niveles de equilibrio bajos, lo cual es una característica no deseable que resulta contraproducente para la ignición de la llama en el punto de remanso frontal de la principal zona de recirculación. La ignición de la zona de recirculación principal puede no ocurrir hasta que el piloto eleve suficientemente la temperatura global a un nivel donde los niveles de equilibrio de

los radicales libres arrastrados en la zona de recirculación principal y la producción de la adición de radicales libres en la mezcla de aire y combustible principal, sean suficientes para producir la ignición de la zona de recirculación principal. En el proceso para conseguir que la llama se propague desde la zona externa hasta la zona de recirculación principal, cantidades significativas de combustible salen del motor sin quemar, de la mezcla de aire y combustible premezclado principal sin quemar. Un problema tiene lugar si las transiciones de la llama a la zona de recirculación principal en algún quemador antes que en otros en el mismo motor, ya que los quemadores donde las llamas están estabilizadas en el interior se queman aún más, ya que se quema todo el combustible. Esto conduce a una variación de la temperatura de quemador a quemador, lo que puede dañar los componentes del motor.

La presente invención permite además que la ignición de la combustión principal 7 tenga lugar en el punto de remanso frontal P de la zona de recirculación principal 20. La mayoría de los motores de turbina de gas deben utilizar una zona de recirculación externa, ver la Figura 4b, como la localización donde la chispa, o dispositivo de ignición, enciende el motor. La ignición puede tener lugar únicamente si la combustión estable puede también ocurrir; de otra manera la llama sencillamente se extinguirá inmediatamente después de la ignición. La zona de recirculación principal o interna 22, como en la presente invención, es en general más exitosa en la estabilización de la llama, ya que el gas recirculado 31 se transporta nuevamente, y el calor de los productos de combustión del gas recirculado 31 se focaliza hacia una pequeña región en el punto de remanso frontal P de la zona de recirculación principal 20. La combustión – el frente de llama 7, también se expande hacia el exterior en una forma cónica desde este punto de remanso frontal P, tal como se ilustra en la Figura 2. Esta expansión cónica aguas abajo permite que el calor y los radicales libres 32 generados aguas arriba, faciliten la combustión aguas abajo permitiendo que el frente de llama 7 se amplíe a medida que se desplaza aguas abajo. El elemento refractario (4a, 4b, 4c), ilustrado en la Figura 2, en comparación con la combustión estabilizada por giro sin el elemento refractario, muestra cómo el elemento refractario da forma a la llama para que sea más cónica y menos hemisférica en su naturaleza. Un frente de llama más cónico permite que un punto de fuente de calor inicie la combustión de toda el área de flujo de manera efectiva.

En la presente invención el proceso de combustión dentro del quemador 1 está graduado en etapas. En una primera etapa, la etapa de ignición, la llama pobre 35 se inicia en la cámara de combustión piloto pequeña 5 añadiendo combustible 23 mezclado con aire 24, y produciéndose la ignición de la mezcla utilizando un dispositivo de ignición 34. Después de la ignición, la relación de equivalencia de la llama 35 en la cámara de combustión piloto pequeña 5, es ajustada a una condición pobre (por debajo de la relación de equivalencia 1, y a una relación de equivalencia de aproximadamente 0,8), o a una condición rica (por encima de la relación de equivalencia 1, y a una relación de equivalencia aproximadamente entre 1,4 y 1,6). La razón por la que la relación de equivalencia dentro de la cámara de combustión piloto pequeña 5 se encuentra en condiciones ricas en el rango entre 1,4 y 1,6, son los niveles de emisión. Es posible operar y mantener la llama 35 en la cámara de combustión piloto pequeña 5 en condiciones estequiométricas (relación de equivalencia de 1), pero esta opción no se recomienda porque puede dar como resultado niveles de emisiones altos, y carga térmica más elevada de las paredes 21. El beneficio de operar y mantener la llama 35 en la cámara de combustión piloto pequeña en condiciones pobres o ricas, es que las emisiones generadas y la carga térmica de las paredes 21 son bajas.

En la siguiente etapa, una segunda etapa de carga baja, se añade combustible a través de un conducto 30 hacia el aire de refrigeración 27 y se transmite movimiento giratorio en el generador de flujo con giro 28. De esta manera, la combustión de la principal llama pobre 7, por debajo, en y por encima de los límites LBO, se sostiene de manera muy efectiva. La cantidad de combustible que puede añadirse al aire de refrigeración caliente (precalentado a temperaturas bastante por encima de 750 °C), pueden corresponder a las relaciones de equivalencia > 3.

En la siguiente etapa de la operación del quemador, un combustible de una etapa de tres partes y de carga completa 15a, se añade de manera gradual al aire 12, que es el principal flujo de aire hacia la llama principal 7.

45

REIVINDICACIONES

1. Quemador (1) para un motor de turbina de gas, donde dicho quemador (1) comprende:
- porciones extremas aguas arriba y aguas abajo opuestas axialmente y dispuestas para recibir combustible y aire mezclados para ser quemados en una llama principal (7) del quemador (1),
- 5
- dicho elemento refractario (4a, 4b, 4c) dispuesto para alojar dicha llama principal (7),
 - dicho elemento refractario está formado a partir de una pluralidad de secciones del elemento refractario (4a, 4b, 4c), en donde cada sección del elemento refractario (4a, 4b, 4c) tiene la configuración de la cubierta cónica de un cono truncado, y donde son distribuidas de manera consecutiva una tras otra en la dirección aguas abajo del quemador (1),
- 10
- un canal anular (10, 11) para el combustible y el aire premezclado dispuesto entre dos secciones consecutivas del elemento refractario (4a, 4b), **caracterizado porque** una parte más estrecha de la cubierta de una sección del elemento refractario aguas abajo (4b), es la parte más ancha del extremo aguas debajo de la cubierta de la sección del elemento refractario aguas arriba más cercana (4a).
- 15
2. Quemador de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el ángulo medio α de un elemento refractario se encuentra por encima de 20 grados y por debajo de 25 grados para cada una de dichas secciones del elemento refractario (4a, 4b, 4c).
3. Quemador de acuerdo con la reivindicación 2, en donde una longitud L del elemento refractario que comprende dichas secciones del elemento refractario (4a, 4b, 4c) es mayor que $L/D = 0,5$ y la longitud L del elemento refractario es menor que $L/D = 2$, en donde D es el diámetro del elemento refractario en su extremo aguas abajo; de manera preferente, la longitud L del elemento refractario es del orden de $L/D = 1$.
- 20
4. Quemador de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el elemento refractario tiene una pluralidad de dichos canales anulares (10, 11) distribuidos a lo largo de la dirección aguas abajo del elemento refractario, dichos canales anulares (10, 11) dispuestos para la adición de combustible y aire premezclados a una llama principal (7) dispuesta para ser alojada en dicho elemento refractario.
- 25
5. Quemador de acuerdo con las reivindicaciones precedentes, en donde la parte más estrecha de una sección del elemento refractario aguas abajo (4b) cubre aproximadamente 1/3 de la parte más ancha de la sección del elemento refractario aguas arriba más cercano (4a), tal como se ve a lo largo de la dirección axial del elemento refractario.
6. Un método para quemar un combustible sustancialmente en un proceso de combustión de mezcla pobre del quemador (1) para una turbina de gas de acuerdo con la reivindicación 1, que incluye los pasos de:
- 30
- quemar una parte principal del combustible en una llama principal (7) alojada en dicho elemento refractario,
 - anclar dicha llama principal (7) en una posición definida en el espacio, mediante la utilización del elemento refractario dividido en secciones del elemento refractario (4a, 4b, 4c).
7. El método de acuerdo con la reivindicación 6, que además incluye el paso de:
- 35
- proporcionar aire y combustible premezclado a la llama pobre principal (7) a través de al menos un canal anular (10, 11) dispuesto entre dos secciones consecutivas del elemento refractario (4a, 4b, 4c), para facilitar una combustión estable y rápida de la llama premezclada pobre principal 7.

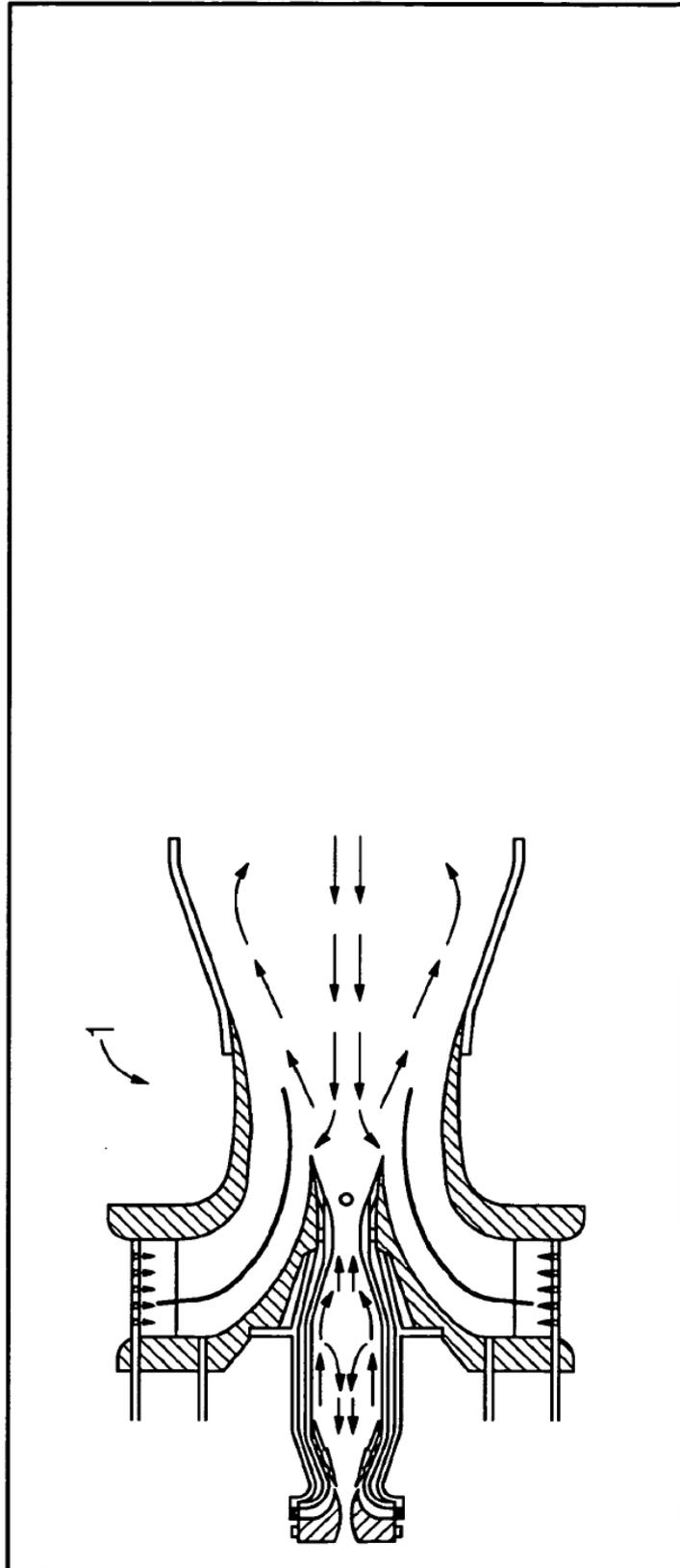


FIG 1

FIG 2

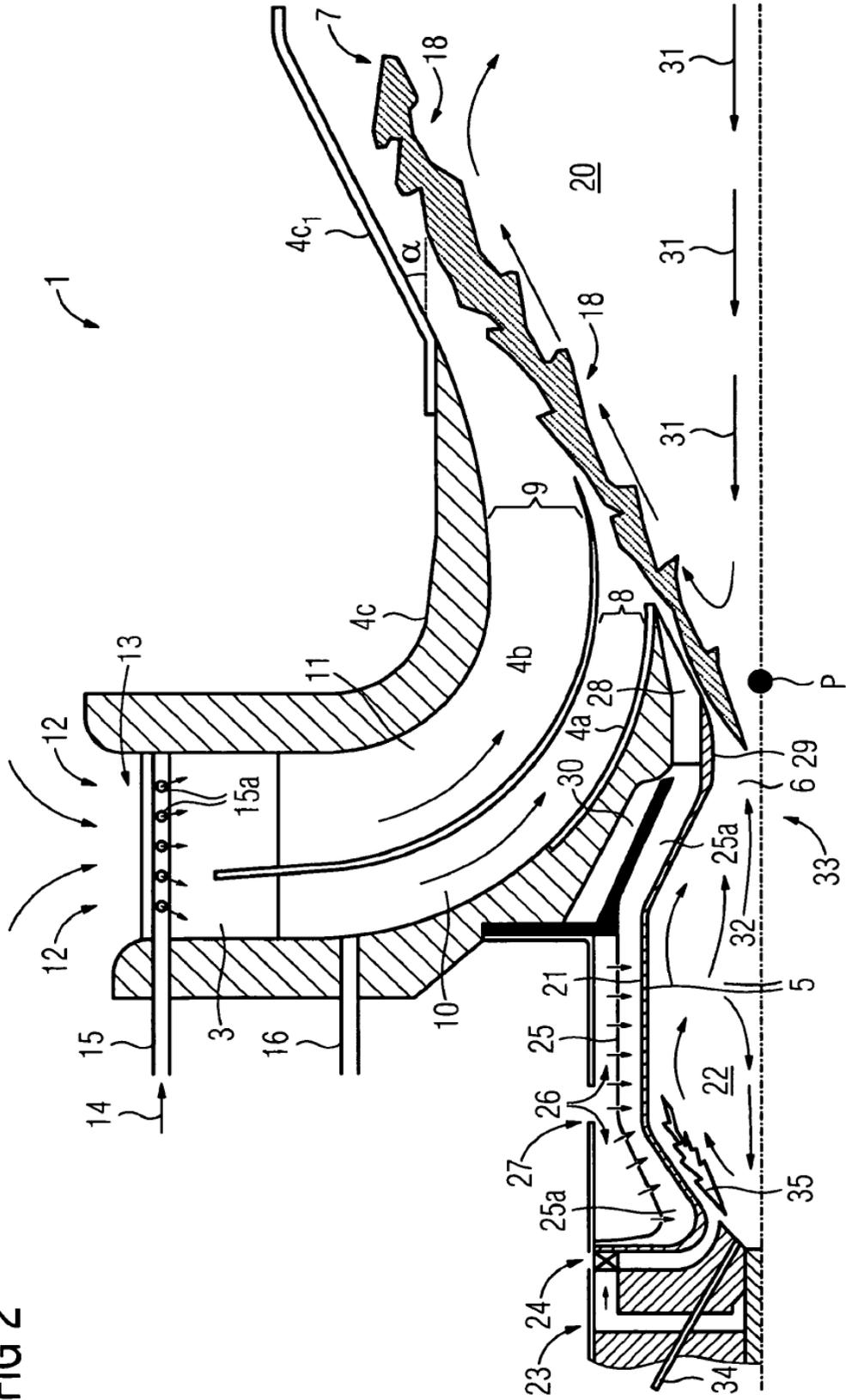


FIG 3

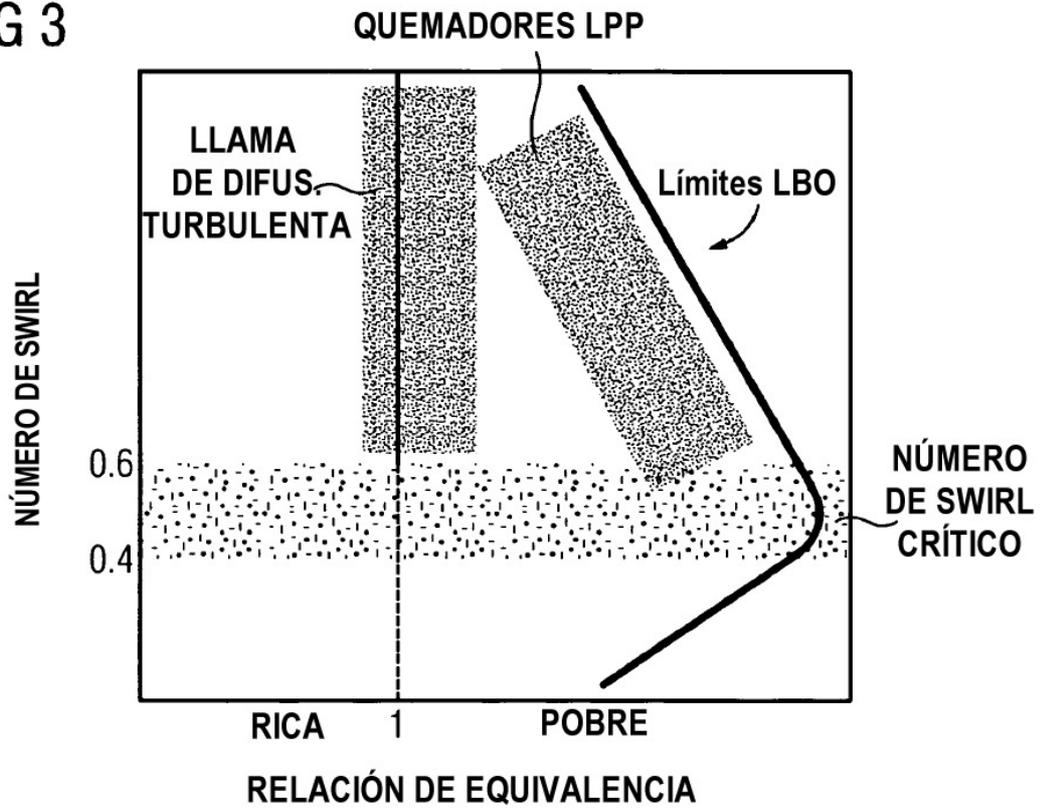


FIG 4a

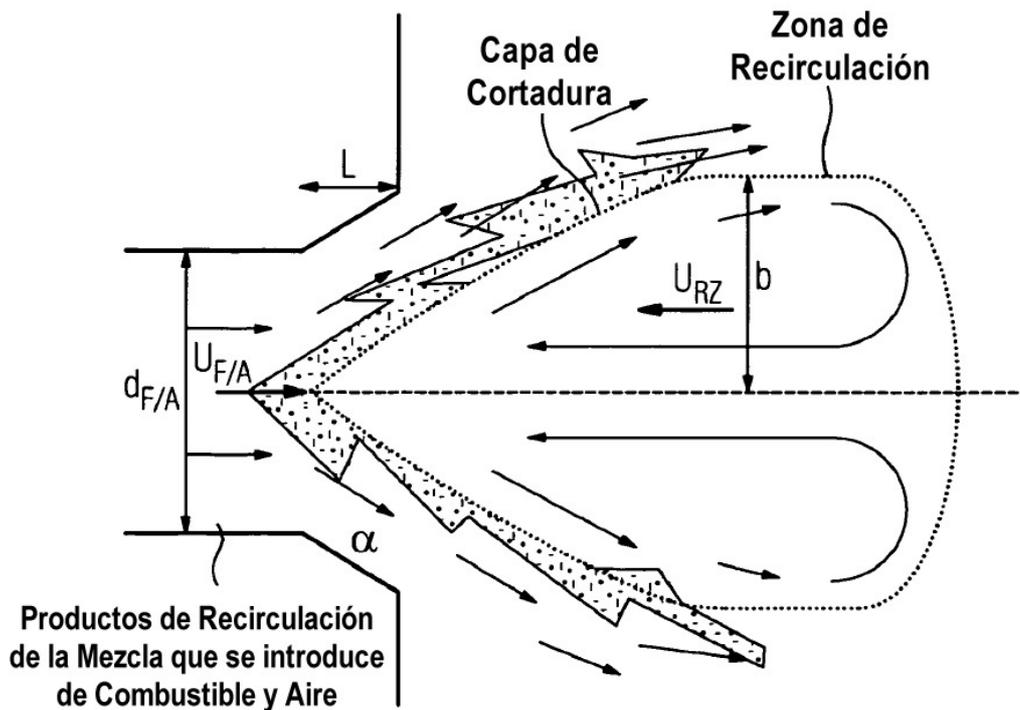


FIG 4b

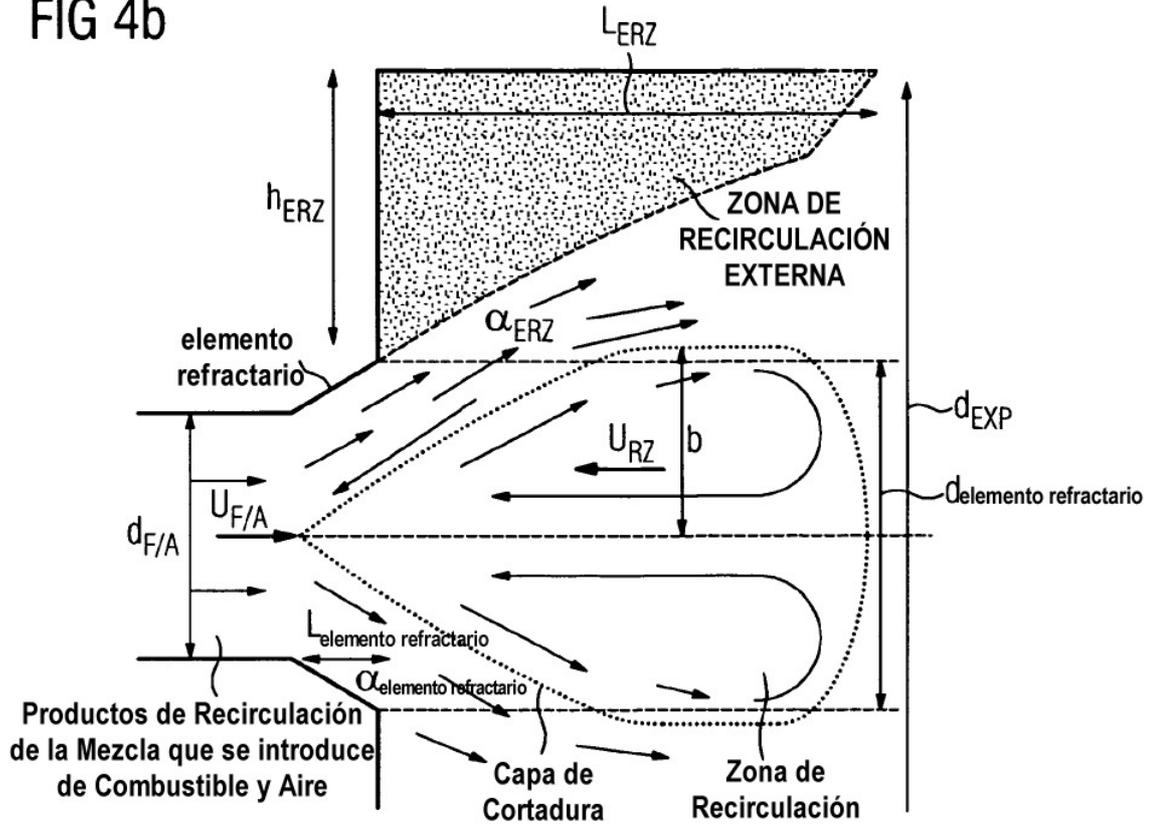


FIG 5

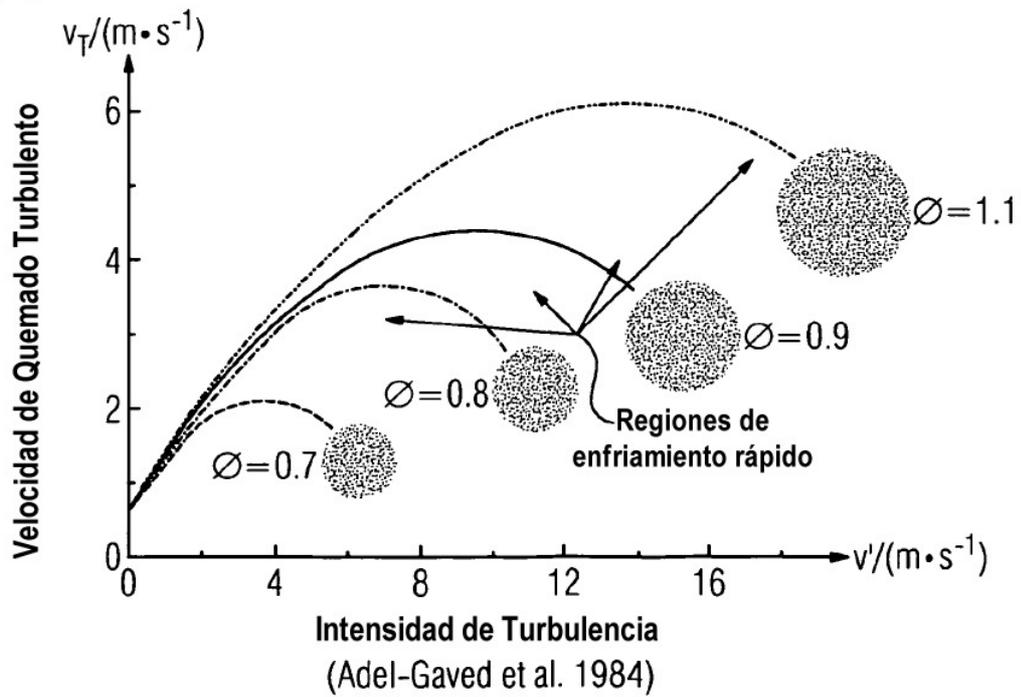


FIG 6

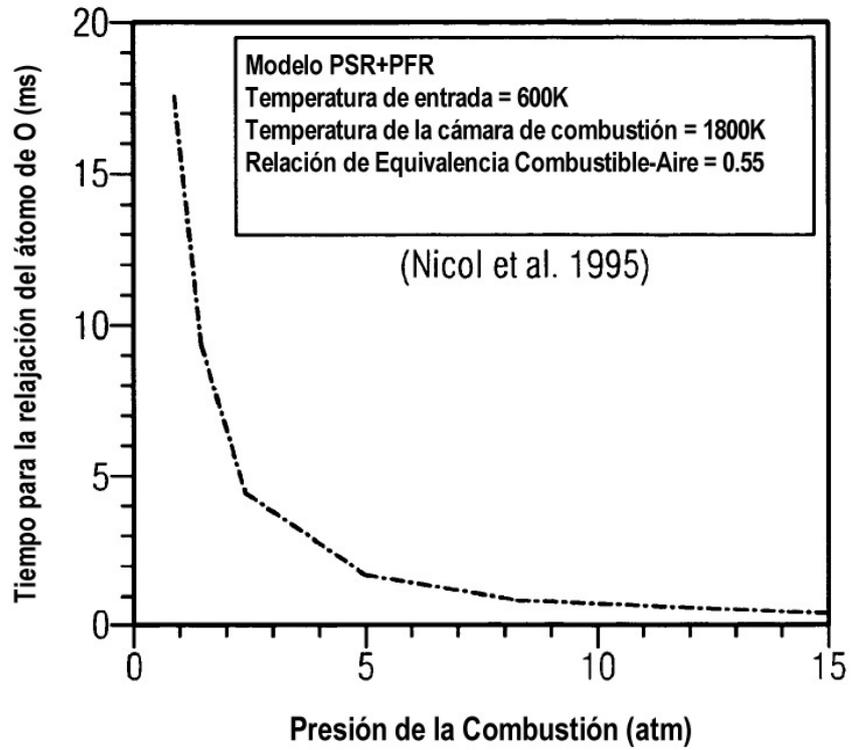


FIG 7

