



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS
ESPAÑA



⑪ Número de publicación: **3 018 150**

⑮ Int. Cl.:

F23C 6/04 (2006.01)
F23C 9/00 (2006.01)
F23D 11/40 (2006.01)
F23D 14/20 (2006.01)
F23D 14/62 (2006.01)

⑫

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

⑯ Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.06.2021 E 21182423 (0)**

⑯ Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.01.2025 EP 3940293**

⑭ Título: **Procedimiento para la combustión escalonada de un combustible y cabezal de combustión**

⑯ Prioridad:

10.07.2020 DE 102020118325

⑯ Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
14.05.2025

⑯ Titular/es:

ELCO BURNERS GMBH (100.00%)
Herbert-Liebsch-Strasse 4a
01796 Pirna, DE

⑯ Inventor/es:

SCHMIDT, THOMAS;
HANKA, KATHLEEN;
KRETZSCHMAR, RONNY y
TOBIAS, STEPHAN H.

⑯ Agente/Representante:

SUGRAÑES, S.L.P.

ES 3 018 150 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

Procedimiento para la combustión escalonada de un combustible y cabezal de combustión

- 5 **[0001]** La presente invención se refiere a un procedimiento para la combustión escalonada de un combustible y a un cabezal de combustión para la combustión escalonada de un combustible.
- 10 **[0002]** La combustión de combustibles fósiles en instalaciones de combustión también produce óxidos de nitrógeno, por ejemplo NO, NO₂, además de otros productos de combustión. En lo sucesivo se hablará de manera abreviada únicamente de NO. Estas y otras emisiones contaminantes pueden verse influidas y reducidas por medidas de diseño en los quemadores. Los mecanismos de reacción que conducen a tales óxidos de nitrógeno son ampliamente conocidos y se diferencian generalmente en formación térmica e instantánea de NO, así como formación de NO como resultado de la oxidación del nitrógeno unido químicamente en el combustible.
- 15 **[0003]** A este respecto, se sabe que el NO térmico según el llamado mecanismo de Zeldovich depende, por un lado, del tiempo de permanencia de los reactivos en la zona de combustión y, por otro, en gran medida de la propia temperatura de combustión. La temperatura de combustión está vinculada a la relación combustible/aire λ . La temperatura máxima de combustión se fija en una relación combustible/aire de $\lambda=1$. Esto también se conoce como relación estequiométrica. El aire de combustión contiene el oxígeno justo para que el combustible se queme por completo. Una relación combustible/aire de $\lambda < 1$ se denomina mezcla rica, es decir, hay demasiado combustible. Una relación combustible/aire de $\lambda > 1$ se denomina mezcla pobre, es decir, hay exceso de aire. En ambos casos, la temperatura de combustión vuelve a descender y, en consecuencia, se forma menos NO térmico.
- 25 **[0004]** Además del NO térmico, la formación de NOx instantáneo también desempeña un papel no desdeñable. El NO instantáneo es producido por radicales de hidrocarburos CH formados como intermediarios en las llamas, que están presentes como productos intermedios durante la combustión de combustibles fósiles que contienen carbono. Los radicales de CH reaccionan con el nitrógeno del aire para formar ácido cianhídrico (HCN), que a su vez se convierte en NO en reacciones de formación muy rápida. Un método probado para suprimir la formación de radicales de CH libres y, por tanto, la formación de NO instantáneo es la combustión pobre o la combustión sobreestequiométrica. La combustión pobre se refiere a la combustión con exceso de aire, es decir, con $\lambda > 1$.
- 30 **[0005]** El NO instantáneo se produce en pequeñas cantidades en comparación con el NO térmico, pero es un factor decisivo para reducir la formación de NO, especialmente en aplicaciones de NO ultrabajo.
- 35 **[0006]** También se sabe que la recirculación o la realimentación de los gases de escape producidos durante la combustión tiene un efecto positivo en la reducción de la formación de óxido de nitrógeno. Los gases de escape enfriados realimentados reducen así tanto la temperatura de la propia llama como la presión parcial de O₂ en la zona de combustión. Ambos efectos contribuyen a la reducción de la formación de NO. Sin embargo, la adición de cantidades crecientes de gases de escape tiende a desestabilizar el proceso de combustión continua.
- 40 **[0007]** Los documentos EP 1 754 937 B1 y EP 2 037 173 B1 muestran cabezales de combustión con los que se consigue una reducción de NO. Se trata a este respecto principalmente de procedimientos de combustión de una sola fase que solo permiten optimizar el NO y estabilizar la llama de forma limitada. El documento DE 195 09 219 A1 muestra un cabezal de combustión para una combustión en dos fases con una mezcla de aire-gas sobreestequiométrica en la primera fase y una mezcla de aire-gas subestequiométrica en la segunda fase. El documento DE 44 27 104 A1 muestra un procedimiento para la combustión escalonada de un combustible. En un tubo de quemador se forma una llama primaria muy sobreestequiométrica. Una segunda cantidad de combustible se alimenta aguas abajo para una llama principal de tal manera que se produzca una combustión estequiométricamente completa. El documento EP 3 078 910 B1 muestra un quemador de gas con combustión en varias fases con una llama primaria muy sobreestequiométrica dentro de un tubo de quemador y una llama principal ligeramente sobreestequiométrica a la salida del tubo de quemador.
- 45 **[0008]** El cabezal de combustión primaria presenta un generador de turbulencia, así como toberas de gas principal y estabilizador. Todo el aire de combustión fluye a través de ambas fases de combustión. El quemador de gas consigue una reducción del NOx térmico.
- 50 **[0009]** En un cabezal de combustión se suele distinguir entre las denominadas zonas de mezcla y las denominadas zonas de combustión.
- 55 **[0010]** En una zona de mezcla se mezclan diferentes fluidos que (todavía) no se han quemado. En una zona de mezcla no suelen darse las condiciones necesarias para la combustión. Este puede ser el caso, por ejemplo, si la velocidad de flujo de la mezcla inflamable es significativamente mayor que la velocidad de la llama.
- 60 **[0011]** Una zona de combustión es una región en la que se dan las condiciones necesarias para la combustión. Existe una zona de combustión si hay una mezcla inflamable (por ejemplo, mezcla de combustible-aire de combustión, mezcla de combustible-aire de combustión-gas de escape, mezcla de combustible-agente oxidante, mezcla de

combustible-agente oxidante-gas de escape), la velocidad de flujo de la mezcla inflamable y la velocidad de la llama son esencialmente iguales y hay una temperatura igual o superior a la temperatura de ignición de la mezcla inflamable. El término genérico agente oxidante abarca el término aire de combustión, pero también incluye, por ejemplo, aire ambiente enriquecido con oxígeno adicional. No puede producirse ignición ni combustión en regiones en las que no se cumplan estas condiciones. Las zonas de mezcla a menudo confluyen en zonas de combustión sin una separación espacial clara.

5 [0012] Por estas y otras razones, existe la necesidad de la presente invención. Un objetivo de la invención es proporcionar una combustión ventajosa desde el punto de vista energético con emisiones de NO minimizadas. El objetivo se consigue mediante las características de las reivindicaciones independientes.

10 [0013] Los fines y las características de la presente invención quedarán claros en la siguiente descripción de ejemplos de realización, que se da con referencia a las figuras adjuntas, en las que:

- 15 la Fig. 1 muestra, de manera muy esquemática, una vista lateral de un cabezal de combustión;
 la Fig. 2 muestra, esquemáticamente en perspectiva, partes de un cabezal de combustión desde un lado de alimentación de combustible;
 20 la Fig. 3 muestra, esquemáticamente en perspectiva, partes del cabezal de combustión de la Fig. 2 desde un lado de la llama;
 la Fig. 4 muestra, esquemáticamente, una vista lateral de un cabezal de combustión;
 25 la Fig. 5 muestra, esquemáticamente, una vista en sección de una sección delantera de un cabezal de combustión; y
 la Fig. 6 muestra, esquemáticamente, una vista frontal de un cabezal de combustión.

30 [0014] A continuación, se describen aspectos y formas de realización con referencia a los dibujos, en los que se utilizan generalmente referencias idénticas o similares para referirse a elementos idénticos o similares. En la siguiente descripción, se exponen numerosos detalles específicos para proporcionar una comprensión completa de uno o más aspectos de las formas de realización. Sin embargo, puede resultar evidente para un experto en la materia que uno o más aspectos de las formas de realización pueden implementarse con una menor medida de los detalles específicos.
 35 En otros casos, los elementos se muestran esquemáticamente para facilitar la descripción de uno o más aspectos de las formas de realización. La siguiente descripción no debe interpretarse por ello como limitativa. Cabe señalar que la representación de los distintos elementos en las figuras no está necesariamente a escala.

40 [0015] La terminología direccional utilizada en la descripción con referencia a los dibujos, tal como "arriba", "abajo", "lado superior", "lado inferior", "izquierda", "derecha", "lado delantero", "lado trasero", "vertical", "horizontal", etc., no ha de entenderse como limitativa. Los componentes de las formas de realización pueden colocarse en distintas orientaciones; la terminología direccional se utiliza únicamente con fines explicativos. Se entiende que pueden utilizarse otras formas de realización y que pueden introducirse cambios estructurales o lógicos sin apartarse del concepto de la presente invención.

45 [0016] Los procedimientos de combustión de varias fases se conocen en la práctica desde hace mucho tiempo. En la actualidad, sin embargo, los enfoques conocidos hasta la fecha no son suficientes para poder seguir cumpliendo a largo plazo los requisitos en cuanto a NO, cada vez más estrictos, impuestos al funcionamiento de las instalaciones de combustión. Una reducción más intensa de NO es posible mediante la combustión escalonada de acuerdo con la divulgación. Con una capacidad de regulación apropiada, la reducción de NO también puede garantizarse en un amplio rango de cargas y/o para diferentes combustibles y/o para diferentes cámaras de combustión.

55 [0017] Se proporciona un procedimiento para la combustión escalonada de un combustible alimentando aire de combustión a un tubo de quemador de acuerdo con la reivindicación 1. El combustible puede ser un gas o un combustible líquido. Se alimenta una primera cantidad de combustible al interior del tubo de quemador para formar una llama primaria. Puede alimentarse una segunda cantidad de combustible aguas abajo para formar un frente de llama principal. La llama principal se estabiliza aguas abajo del tubo de quemador y a cierta distancia de este. Las alimentaciones de combustible están diseñadas de modo que la llama primaria arda con una estequiometría superior a 1,5, en particular superior a 2,0. Esto permite alcanzar una temperatura de llama muy baja. Prácticamente no se forma nada de NO instantáneo. La llama principal es ligeramente sobreestequiométrica. La estequiometría puede situarse entre 1,03 ... 1,18. La temperatura de la llama principal puede reducirse significativamente mediante la recirculación de los gases de escape dentro de la cámara de combustión.

60 [0018] En una forma de realización, la primera cantidad de combustible puede regularse independientemente de la segunda cantidad de combustible. Esto garantiza una llama primaria sobreestequiométrica en un amplio rango de cargas.

- 5 [0019] En una forma de realización, la primera cantidad de combustible alimentada puede ser significativamente menor que la segunda cantidad de combustible alimentada. La primera cantidad de combustible puede ser aproximadamente entre el 3 % y el 15 % de la cantidad total de combustible, es decir, la suma de la primera cantidad de combustible y la segunda cantidad de combustible. Preferiblemente, la primera cantidad de combustible se sitúa entre el 5 % y el 10 % de la suma de la primera cantidad de combustible y la segunda cantidad de combustible.
- 10 [0020] En otra forma de realización, una parte del aire de combustión se arremolina. Esto genera aire de combustión turbulento. Una primera cantidad parcial de la primera cantidad de combustible se descarga en la región de generación de turbulencias de aire. Así se crea una mezcla de aire/combustible pobre turbulenta. Se puede conseguir un mezclado muy bueno. En esta región, la velocidad de flujo es alta y la mezcla es pobre, por lo que no se dan las condiciones de ignición. En la siguiente etapa se reduce la velocidad de flujo de la mezcla de aire/combustible pobre turbulenta. Una segunda cantidad parcial de la primera cantidad de combustible se alimenta a la mezcla de aire/combustible pobre turbulenta ralentizada.
- 15 [0021] Se proporciona además un cabezal de combustión para la combustión escalonada de un combustible de acuerdo con la reivindicación 7. El cabezal de combustión proporcionado permite llevar a cabo el procedimiento. El cabezal de combustión está diseñado para quemar una primera cantidad alimentada del combustible en una llama primaria sobreestequiométrica. Una segunda cantidad alimentada del combustible se quema en una llama principal ligeramente sobreestequiométrica.
- 20 [0022] Una alimentación de la primera cantidad de combustible y una alimentación de la segunda cantidad de combustible pueden regularse preferiblemente de forma independiente la una de la otra y garantizarse así una combustión muy baja en óxidos de nitrógeno en un amplio rango de cargas.
- 25 [0023] Las siguientes figuras muestran configuraciones a modo de ejemplo de cabezales de combustión de acuerdo con la invención, con los que se puede llevar a cabo el procedimiento de acuerdo con la invención para la combustión escalonada de un combustible.
- 30 [0024] La Fig. 1 muestra, de manera muy esquematizada, una vista lateral de un cabezal de combustión 10. El cabezal de combustión 10 comprende un tubo de quemador 12, un dispositivo de arremolinado 14, unas primeras toberas de combustible 16a, 16b, unas segundas toberas de combustible 18, un primer conducto de alimentación de combustible 20 y un segundo conducto de alimentación de combustible 22. Las flechas simbolizan la entrada del flujo de combustible. Durante el funcionamiento, se forma una llama primaria sobreestequiométrica 24 dentro del dispositivo de arremolinado 14 y una llama principal o frente de llama principal 26 a cierta distancia del cabezal de combustión 10, ambas representadas en cada caso simbólicamente por una llama en la Fig. 1. De este modo, el cabezal de combustión 10 se utiliza para la combustión escalonada de combustible. El combustible puede ser gaseoso. El combustible puede ser gas natural. El combustible puede incluir hidrógeno. Además del uso como mero quemador de gas, también es posible un quemador de doble combustible, en el que se puede quemar combustible líquido además de combustible gaseoso. También es posible un quemador solo para combustible líquido. La descripción que sigue se refiere, por regla general, de forma no limitativa a una forma de realización como quemador de gas.
- 35 [0025] En la representación de la Fig. 1, el aire de combustión 28 se alimenta al tubo de quemador 12 desde la derecha. El extremo derecho del tubo de quemador 12 en la representación es, por tanto, el extremo situado aguas arriba. El tubo de quemador 12 puede ser esencialmente cilíndrico. El aire de combustión 28 fluye a través del tubo de quemador 12 y lo abandona por el extremo abierto, izquierdo en la representación, del tubo de quemador 12, es decir, el extremo situado aguas abajo. El frente de llama principal 26 se forma aguas abajo del cabezal de combustión 10. Aquí se encuentra la cámara de combustión o de fuego, que no se muestra en más detalle.
- 40 [0026] La cantidad de combustible que sale de las primeras toberas de combustible 16a, 16b puede ser pequeña en relación con la cantidad de combustible que sale de las segundas toberas de combustible 18. Si solo se quema una pequeña cantidad de combustible en la llama primaria 24 de forma fuertemente sobreestequiométrica, no es necesaria una segunda fase de combustión subestequiométrica. Por lo tanto, la llama principal 26 distanciada también puede ser sobreestequiométrica en general. Con el cabezal de combustión 10 de acuerdo con la invención no se genera una zona de combustión subestequiométrica general como en la combustión escalonada con una zona de combustión subestequiométrica y una sobreestequiométrica y el necesario tiempo de permanencia de los gases en estas zonas para la disminución de NO. El procedimiento de acuerdo con la invención prevé una llama primaria fuertemente sobreestequiométrica y una llama principal ligeramente sobreestequiométrica.
- 45 [0027] El dispositivo de arremolinado 14 está dispuesto en el interior del tubo de quemador 12. El dispositivo de arremolinado 14 puede estar abierto en ambos extremos. Un eje longitudinal del tubo de quemador 12 y un eje longitudinal del dispositivo de arremolinado 14 pueden ser paralelos entre sí o situarse uno encima del otro, de modo que el dispositivo de arremolinado 14 se sitúe en el centro del tubo de quemador 12 y esté uniformemente separado radialmente de la pared interior del tubo de quemador. Una parte del aire de combustión 28 fluye por fuera del dispositivo de arremolinado 14 a través del tubo de quemador 12, otra parte del aire de combustión 28 fluye a través del dispositivo de arremolinado 14.

- [0028] El dispositivo de arremolinado 14 comprende un cuerpo de arremolinado 30, paletas de arremolinado 32 y un tabique 34 perforado. El cuerpo de arremolinado 30 puede tener una forma esencialmente cilíndrica. El tabique 34 perforado puede extenderse sustancialmente en dirección perpendicular al eje longitudinal del cuerpo de arremolinado 30 y dividir un espacio interior del cuerpo de arremolinado 30 en una primera región 36 y una segunda región 38. La primera región 36 puede estar situada aguas arriba de la segunda región 38. El tabique 34 perforado puede provocar una pérdida de presión. De este modo, puede descender localmente la velocidad de flujo aguas abajo del tabique 34 perforado.
- [0029] Las paletas de arremolinado 32 pueden estar dispuestas solamente en la primera región 36. La segunda región aguas abajo del tabique 34 puede estar libre de paletas de arremolinado 32. Pueden estar previstas varias paletas de arremolinado 32.
- [0030] El cuerpo de arremolinado 30 puede tener un diámetro mayor en la primera región 36 que en la segunda región 38. Puede estar prevista una sección cónica en la transición entre la primera región 36 y la segunda región 38.
- [0031] Las primeras toberas de combustible 16a, 16b están dispuestas dentro del cuerpo de arremolinado 30. Están conectadas al primer conducto de alimentación de combustible 20. El primer conducto de alimentación de combustible 20 permite regular la cantidad de combustible/gas de combustión que fluye a las primeras toberas de combustible 16a, 16b, como se muestra con un símbolo 40 en la Fig. 1. Esta regulación es separada e independiente de una regulación 42 en el segundo conducto de alimentación de combustible 22.
- [0032] Las primeras toberas de combustible 16a, 16b pueden comprender toberas de combustible primario, en lo sucesivo también denominadas toberas de gas primario, 16a, que están situadas en la segunda región 38, situada aguas abajo, del dispositivo de arremolinado 14. Las primeras toberas de combustible 16a, 16b pueden comprender otras toberas de combustible –en lo sucesivo toberas de combustible de apoyo o toberas de gas de apoyo 16b– que se sitúan en la primera región 36, situada aguas arriba, del dispositivo de arremolinado 14.
- [0033] Las toberas de combustible de apoyo 16b pueden estar dispuestas distribuidas uniformemente entre las paletas de arremolinado 32. Las toberas de combustible de apoyo 16b pueden estar dispuestas esencialmente paralelas a un eje longitudinal del tubo de quemador 12. Las paletas de arremolinado 32 provocan una fuerte turbulencia del aire de combustión 28. El combustible que sale de las toberas de combustible de apoyo 16b, que también se denomina gas de apoyo, se premezcla de este modo de manera muy eficiente con una parte del aire de combustión 28 para la llama primaria 24. El resultado es una mezcla de combustible/aire de combustión arremolinada. La alimentación de combustible a través de las toberas de combustible de apoyo 16b puede diseñarse de tal manera que se forme una mezcla de aire/combustible pobre turbulenta. Las toberas de combustible de apoyo 16b pueden descargar una primera cantidad parcial de la primera cantidad de combustible. Las toberas de combustible de apoyo 16b pueden presentar orificios para descargar el combustible. Los orificios pueden estar dispuestos de modo que el combustible se descargue al menos parcialmente hacia el interior esencialmente en dirección radial, es decir, en dirección esencialmente perpendicular a la pared del cuerpo de arremolinado 30. Debido a las elevadas velocidades de flujo del aire de combustión arremolinado y a la elevada proporción de aire en relación con la cantidad de combustible o gas, aún no se dan las condiciones de ignición de la mezcla de combustible y aire de combustión arremolinada en la región de las paletas de arremolinado 32, es decir, en la región 36 situada aguas arriba.
- [0034] El tabique 34 puede diseñarse para ralentizar la mezcla de combustible y aire de combustión arremolinada. El tabique 34 puede presentar aberturas para este fin. Para ello, el tabique puede diseñarse esencialmente a modo de rejilla. La geometría del tabique 34 puede diseñarse para reducir la velocidad de flujo de la mezcla de combustible y aire de combustión arremolinada, sin alterar con ello en gran medida la formación de turbulencia. El tabique 34 reduce la velocidad de flujo absoluta del aire primario arremolinado y premezclado y, de este modo, garantiza la ignición de la llama primaria 24, que se enriquece adicionalmente con una segunda proporción de la primera cantidad de combustible en esta región.
- [0035] Las toberas de combustible primario 16a pueden estar distribuidas uniformemente en la región 38 situada aguas abajo. De este modo, las toberas de combustible primario 16a están situadas aguas abajo del tabique 34, en una región de menor velocidad de flujo. Las toberas de combustible primario 16a pueden estar dispuestas esencialmente en perpendicular a un eje longitudinal del tubo de quemador 12. Las toberas de combustible primario 16a pueden estar distribuidas uniformemente en una corona de chorros. Pueden estar previstas varias toberas de combustible primario 16a. En la región 38 situada aguas abajo, las toberas de combustible primario 16a descargan la segunda parte de la primera cantidad de combustible, que se denomina gas primario, a la mezcla de combustible y aire formada en la parte de palas del cuerpo de arremolinado 30 o, en otras palabras, en la primera región 36, generando así la mezcla inflamable para la formación de la llama primaria 24. Las toberas de combustible primario 16a pueden presentar orificios para descargar el combustible. Los orificios pueden estar dispuestos en el lateral de las toberas de combustible primario 16a. Los orificios laterales pueden estar dispuestos de modo que el combustible se descargue esencialmente en dirección tangencial.
- [0036] La relación entre el área de apertura de la totalidad de los orificios de las toberas de combustible primario 16a

- 5 y el área de apertura de la totalidad de los orificios de las toberas de combustible de apoyo 16b puede determinar una relación entre el gas primario y el gas de apoyo, teniendo en cuenta los conductos de alimentación a las toberas de combustible primario 16a y a las toberas de combustible de apoyo 16b. La relación puede seleccionarse en función de la geometría global y de la calidad o composición del combustible. La proporción puede ser de aproximadamente 1:1. Aproximadamente la mitad del combustible que fluye a través del primer conducto de alimentación de combustible 20 puede ser descargado a través de las toberas de combustible primario 16a en la región 38, y aproximadamente la mitad del combustible que fluye a través del primer conducto de alimentación de combustible 20 puede ser descargado a través de las toberas de combustible de apoyo 16b en la región 36.
- 10 15 [0037] La capacidad de regulación por separado del gas primario y de apoyo por el dispositivo de regulación 40 en relación con la capacidad de regulación de la segunda cantidad de combustible principal que fluye a través del segundo conducto de alimentación de combustible 22, así como el diseño del cuerpo de arremolinado 30, de las toberas de combustible primario y de apoyo 16a, 16b y del tabique 34 pueden generar una llama primaria 24 con una estequiometría $\lambda > 1$ en un amplio rango de cargas. En una forma de realización, la estequiometría de la llama primaria 24 es $\lambda > 1,5$. En otra forma de realización, la estequiometría de la llama primaria 24 es $\lambda > 2$.
- 20 [0038] Debido a las muy bajas temperaturas de combustión resultantes, prácticamente no se produce ni NO térmico ni instantáneo en la llama primaria 24.
- 25 30 [0039] Sin embargo, unas temperaturas de combustión tan bajas siempre generan inestabilidades en la llama que hay que interceptar necesariamente. La velocidad de reacción depende exponencialmente de la temperatura en la zona de la llama y de la turbulencia en la misma. La velocidad de reacción se reduce por un mezclado incompleto del combustible y el oxidante. La inestabilidad de la llama se produce cuando la velocidad de flujo en la dirección axial es mayor que la velocidad de la llama turbulenta.
- 35 [0040] Para obtener una llama primaria 24 estable, es importante la alimentación previa del gas de apoyo a través de las toberas de combustible de apoyo 16b al aire de combustión arremolinado y, por tanto, el enriquecimiento y la premezcla del aire primario con combustible, el tipo y la posición de la introducción del gas primario, la relación entre de gas de apoyo y primario y la geometría y la posición del tabique 34 en la parte 38 sin palas del cuerpo de arremolinado 30 en la forma de realización representada. Pueden estar previstos otros medios para conseguir una llama primaria estable con una estequiometría superior a 1, en particular superior a 1,5 o incluso superior a 2.
- 40 45 [0041] Además, la parte cilíndrica, sin palas, del cuerpo de arremolinado 30, la región 38 en la Fig. 1, está diseñada de modo que la llama primaria 24 se forma en una región definida que está protegida del aire de combustión 28 restante, que fluye por fuera del cuerpo de arremolinado 30 a través del tubo de quemador 12.
- 50 [0042] Las segundas toberas de combustible 18, también denominadas toberas de gas principal, están situadas por fuera y aguas abajo del dispositivo de arremolinado 14. Las segundas toberas de combustible 18 están conectadas al segundo conducto de alimentación de combustible 22. El segundo conducto de alimentación de combustible 22 permite regular la cantidad de combustible/gas de combustión que fluye hacia las segundas toberas de combustible 18. La segunda cantidad de combustible comprende, a este respecto, la mayor parte de la cantidad total de combustible, por lo que también se denomina cantidad de combustible principal o gas principal. La capacidad de regulación del gas principal se representa mediante el símbolo 42 en la Fig. 1.
- 55 60 [0043] Las segundas toberas de combustible 18 están situadas dentro del tubo de quemador 12. Las segundas toberas de combustible 18 pueden estar situadas en el extremo situado aguas abajo del tubo de quemador 12 y terminar con él. Las segundas toberas de combustible 18 pueden estar distribuidas uniformemente alrededor de la periferia interior del tubo de quemador 12. En la Fig. 1 no se muestra un disco delta anular que puede llenar una distancia entre el tubo de quemador 12 y las segundas toberas de combustible 18 en el extremo, situado aguas abajo, del tubo de quemador. El disco delta se explica con más detalle en las Fig. 4-6.
- 65 [0044] Las segundas toberas de combustible 18 están diseñadas para garantizar una alta velocidad de salida de combustible. El impulso resultante transporta el combustible lo más lejos posible dentro de la cámara de combustión y forma una zona de combustión a cierta distancia del cabezal de combustión 10. El gas principal puede descargarse esencialmente en la dirección de flujo, es decir, en paralelo al eje longitudinal del tubo de quemador 12. Las segundas toberas de combustible 18 pueden presentar, para ello, una abertura en un lado frontal. Un deflector puede definir la abertura en el lado frontal. La configuración de las segundas toberas de combustible 18 conduce a la formación de la llama principal o frente de llama principal 26, que está a cierta distancia del extremo, situado aguas abajo, del cabezal de combustión 10 y se forma de manera estable en la cámara de combustión, que no se muestra en más detalle. Debido a la disposición de las segundas toberas de combustible con una dirección de salida coaxial con respecto al eje del tubo de quemador, la llama principal 26 puede tener una forma de llama esbelta y alargada. La recirculación interna de los gases de escape, que se explica con más detalle a continuación, puede inyectar gases de escape en las zonas calientes de la llama principal 26 y, por tanto, en las regiones de mayor producción de NO. Esto reduce la producción de NO en la llama principal.
- [0045] Los conductos de alimentación de combustible pueden diseñarse y disponerse de manera que proporcionen

energía de ignición a la llama principal 26 distanciada a partir de la llama primaria y los gases de escape recirculados a fin de encender la mezcla de combustible principal, aire de combustión o agente oxidante en general y gases de escape recirculados y garantizar un progreso continuo y estable de las reacciones de oxidación.

5 [0046] Ambas tomas de gas, es decir, el conducto de alimentación de combustible 20 para el gas primario y de apoyo para la llama primaria 24 y el conducto de alimentación de combustible 22 para el gas principal para la llama principal 26, se regulan por separado mediante dispositivos reguladores de gas 40 y 42 en la forma de realización mostrada. De este modo, la cantidad de gas en la llama primaria 24 y en la llama principal 26 puede ajustarse por separado la una de la otra, regulando así individualmente la estequiométría en la zona de combustión respectiva. Esto 10 permite el ajuste de una zona de combustión primaria estable y sobreestequiométrica y, por tanto, la formación de una llama primaria 24 casi libre de NO en un amplio rango de cargas, así como la adaptación a diferentes cámaras de combustión.

15 [0047] La Fig. 2 muestra, esquemáticamente, en una vista en perspectiva, partes de un cabezal de combustión 10a desde un lado de alimentación de combustible. El cabezal de combustión 10a puede presentar las mismas características que las descritas para el cabezal de combustión 10 representado en la Fig. 1. El cabezal de combustión 10a puede representar una implementación del cabezal de combustión 10. Por lo tanto, se utilizan las mismas referencias que en la Fig. 1. La descripción de la Fig. 2 se limita esencialmente a los detalles que no se desprenden de la representación de la Fig. 1. El tubo de quemador 12 no se muestra en la Fig. 2.

20 [0048] El segundo conducto de alimentación de combustible 22 del cabezal de combustión 10a está realizado como un tubo, que presenta una brida de conexión 44 para la conexión a un suministro de combustible. Tubos 46 más pequeños o lanzas de gas principal 46 se extienden desde el segundo conducto de alimentación de combustible 22. Las lanzas de gas principal 46 conducen el combustible desde el segundo conducto de alimentación de combustible 22 hasta las segundas toberas de combustible 18 y terminan con ellas. En la forma de realización representada, el cabezal de combustión 10a presenta seis segundas toberas de combustible 18. Las lanzas de gas principal 46 discurren por el exterior del cuerpo de arremolinado 30.

30 [0049] El segundo conducto de alimentación de combustible 22 confluye en un tubo de combustible 48, que puede pasar por el centro del cuerpo de arremolinado 30 en paralelo al eje longitudinal del cuerpo de arremolinado 30. El tubo de combustible 48 está realizado preferiblemente como un tubo de combustible central. El tubo de combustible 48 conduce el gas principal a la primera región situada aguas arriba. Aguas abajo de la bifurcación de las lanzas de gas principales 46, una chapa separadora de gases 50 aísla el segundo conducto de alimentación de combustible 22 del tubo de combustible 48 situado aguas abajo. La chapa separadora de gases 50 está dispuesta en el segundo 35 conducto de alimentación de combustible 22/tubo de combustible 48 y se sitúa sustancialmente en perpendicular a un eje longitudinal del segundo conducto de alimentación de combustible 22/tubo de combustible 48.

40 [0050] Aguas abajo de la chapa separadora de gases 50, el primer conducto de alimentación de combustible 20 desemboca en el tubo de combustible 48. Aguas abajo de la chapa separadora de gases 50, el tubo de combustible 48 sirve, por tanto, para conducir la primera cantidad de combustible. Aguas abajo de la chapa separadora de gases 50 se extienden tubos 52 más pequeños, las llamadas lanzas de gas de apoyo. Las lanzas de gas de apoyo 52 conducen el combustible desde el primer conducto de alimentación de combustible 20 hasta las toberas de gas de apoyo 16b. En la forma de realización representada, el cabezal de combustión 10a presenta tres toberas de gas de apoyo 16b. Las toberas de gas de apoyo 16b están situadas dentro del cuerpo de arremolinado 30. Las paletas de arremolinado 32 pueden verse junto a la tobera de gas de apoyo 16b.

45 [0051] La Fig. 2 también muestra a modo de ejemplo una forma del cuerpo de arremolinado 30. En la primera región 38 con las paletas de arremolinado 32 y las toberas de gas de apoyo 16b, el cuerpo de arremolinado 30 está diseñado de manera cilíndrica con un primer diámetro. En la segunda región 38 sin aletas de arremolinado, el cuerpo de arremolinado 30 está diseñado de manera cilíndrica con un segundo diámetro. En una forma de realización, el primer diámetro es mayor que el segundo diámetro. Ambas regiones 36, 38 pueden entonces conectarse entre sí por una región cónica.

55 [0052] El cuerpo de arremolinado 30 está montado de manera deslizante sobre el tubo de combustible 48 a través de un tubo interior de cuerpo de arremolinado 54, lo que permite, por ejemplo, la adaptación a diferentes geometrías de cámara de combustión y parámetros de proceso. Desplazando axialmente el cuerpo de arremolinado 30 sobre el tubo de combustible 48 se puede influir, dentro de unos límites, en la relación de las cantidades de aire que fluyen a través del cuerpo de arremolinado 30 y que salen del hueco formado por el diámetro exterior del cuerpo de arremolinado en la región 38 y el diámetro interior del disco delta 66.

60 [0053] Aunque el tubo de quemador 12 no se muestra en la Fig. 2, debe entenderse que el aire de combustión 28 fluye desde la parte delantera derecha hacia la parte trasera izquierda en la representación de la Fig. 2, tanto a través del cuerpo de arremolinado 30 como por fuera del cuerpo de arremolinado 30. Las lanzas de gas principal 46 se encuentran en el flujo de aire.

65 [0054] La Fig. 3 muestra, esquemáticamente en una vista en perspectiva, el cabezal de combustión 10a desde un

lado de la llama. Las partes ya ilustradas con referencia a las figuras 1 y 2 no se describen de nuevo en detalle. Todas las características descritas hasta ahora se aplican también al cabezal de combustión 10a representado en la Fig. 3. En la Fig. 3, la parte cónica del cuerpo de arremolinado 30 no se muestra y partes del cuerpo de arremolinado 30 que envuelven la región 38 situada aguas abajo se han omitido para permitir que se vean las partes que se encuentran dentro del cuerpo de arremolinado 30. Como en la Fig. 2, no se muestra el tubo de quemador 12.

5 [0055] Para iniciar el proceso de combustión, puede estar previsto un encendido eléctrico directo 56, que solo se utiliza inicialmente para el encendido (por ejemplo, inicial). Una vez que la llama se ha formado y estabilizado, se produce la ignición de la mezcla de combustible y aire por reacción de la llama. En una forma de realización, el dispositivo de encendido 56 está fijado a una de las toberas de gas de soporte 16b.

10 [0056] En la forma de realización representada, el tubo de combustible 48 termina aguas abajo en un distribuidor de combustible 58 cilíndrico. El distribuidor de combustible 58 también puede denominarse distribuidor de gas primario 58, ya que en este punto el tubo de combustible 48 solo transporta todavía el gas primario. En la forma de realización, 15 cuatro toberas de gas primario 16a están dispuestas en el distribuidor de gas primario 58 en forma de radios sobre una superficie lateral del distribuidor de gas primario 58. Las toberas de gas primario 16a están dispuestas a intervalos regulares y apuntan en sentido opuesto al tubo de combustible 48 o al distribuidor de gas primario 58 hacia el tubo de quemador 12, no representado.

20 [0057] Las toberas de gas primario 16a pueden presentar orificios 60. Cada tobera de gas primario 16a puede presentar varios orificios 60. Hay representados dos orificios 60. Sin embargo, también puede haber más o menos orificios. Los orificios 60 están dispuestos en las toberas de gas primario 16a de tal manera que el gas primario sale esencialmente en dirección tangencial. La orientación de los orificios 60 puede coordinarse con la disposición y el diseño de las paletas de arremolinado 32 de tal manera que el gas primario se descargue con el flujo de la mezcla de combustible/aire de combustión arremolinada en la primera región 36. El gas primario sale por los orificios laterales en dirección tangencial, determinada por la dirección de arremolinado. Adicional o alternativamente, las toberas de gas primario 16a pueden presentar un orificio axial del que también sale gas primario.

30 [0058] Las segundas toberas de combustible 18, o toberas de gas principal, están dispuestas en círculo alrededor del extremo situado aguas abajo del cuerpo de arremolinado 30. Presentan orificios 62 en sus lados frontales. Los orificios 62 están diseñados para garantizar una alta velocidad de salida de combustible del gas principal, de modo que el frente de llama principal 26 se forme a cierta distancia del cabezal de combustión.

35 [0059] La Fig. 4 muestra, esquemáticamente, una vista lateral de un cabezal de combustión 10b. El cabezal de combustión 10b puede corresponder al cabezal de combustión 10 y/o al cabezal de combustión 10a. Las partes ya ilustradas con referencia a las figuras 1 a 3 no se describen de nuevo en detalle. En la vista lateral, se han omitido partes individuales para visualizar mejor los detalles. La parte del cuerpo de arremolinado 30 orientada hacia el observador está omitida para que pueda observarse la estructura interna. La región donde el primer conducto de alimentación de combustible 20 desemboca en el tubo de combustible 48 está recortada.

40 [0060] En la representación en vista lateral de la Fig. 4, son visibles orificios 64 en las toberas de gas primario 16a. Los orificios 64 están diseñados para descargar el combustible esencialmente hacia el interior en dirección radial. Las toberas de gas primario pueden presentar, adicional o alternativamente, orificios axiales.

45 [0061] La Fig. 4 también muestra el tubo de quemador 12. El tubo de quemador 12 puede estar cerrado en su extremo situado aguas abajo por un disco delta 66 anular, que se extiende radialmente hacia el interior desde el tubo de quemador 12. En la forma de realización mostrada, el disco delta 66 presenta una pluralidad de medios de dirección 68 orientados radialmente hacia el interior. Las aberturas de las segundas toberas de combustible 18 pueden terminar al ras con el disco delta 66. El diseño del disco delta 66, que se describe con más detalle con referencia a la Fig. 6, sirve para la recirculación interna de los gases de escape en la llama principal 26. La recirculación puede efectuarse, a este respecto, por la parte del aire de combustión 28 que fluye más allá del dispositivo de arremolinado 14 e incide directamente sobre el anillo del disco delta 66 anular. Como resultado, se forman zonas de presión negativa y áreas de vórtice en el lado aguas abajo de los medios de dirección 68, es decir, en los lados de los medios de dirección 68 orientados hacia la cámara de combustión. Los gases de escape así recirculados se inyectan, a este respecto, en las 55 zonas calientes de la llama principal 26. En estas zonas, los gases de escape recirculados reducen la temperatura y la presión parcial de O₂. Ambos efectos contribuyen a la reducción de la formación de NO, o a la formación de NO.

60 [0062] La cantidad de combustible que sale de las toberas de gas primario 16a y de las toberas de gas de apoyo 16b es pequeña en relación con la cantidad de combustible que sale de las segundas toberas de combustible 18. Es preferiblemente del 3 % al 15 %, de manera particularmente preferible del 5 % al 10 % de la cantidad total de combustible.

65 [0063] En algunas formas de realización, el exceso de aire necesario para la combustión completa de las cantidades parciales de combustible procedentes de las toberas de gas primario 16a, las toberas de gas de apoyo 16b y de las toberas de combustible 18 puede estar comprendido entre 1,075 y 1,2. Las zonas de combustión de la llama primaria y de la llama principal distanciada son en cada caso sobreestequiométricas. Localmente, el flujo de combustible que

entra en la cámara de combustión axialmente desde las segundas toberas de combustible 18 puede dar lugar a la formación de zonas subestequiométricas antes de que el gas combustible, el aire y los gases de escape recirculados se hayan mezclado suficientemente.

- 5 [0064] La disminución de los valores de NO es el resultado de la combustión extremadamente baja de NO en la llama primaria parcialmente premezclada y muy pobre, en combinación con la llama principal distanciada, que no puede desarrollar las perjudiciales altas temperaturas para la formación de NO debido al intenso mezclado de los gases de escape recirculados internamente y a la reducción de la presión parcial de O₂ en la mezcla. La ventaja es la formación de una llama esbelta, pero no demasiado larga, que desacopla eficazmente el calor liberado durante la 10 combustión del combustible por la conversión de la entalpía química hacia las paredes circundantes enfriadas de la cámara de combustión por radiación y convección.

15 [0065] La Fig. 5 muestra, esquemáticamente, una vista en sección de una sección delantera del cabezal de combustión 10b. Las partes ya ilustradas con referencia a las figuras 1 a 4 no se describen de nuevo en detalle.

15 [0066] Es visible el tubo interior de cuerpo de arremolinado 54, que es guiado por encima del tubo de combustible 48. De este modo, el cuerpo de arremolinado puede desplazarse longitudinalmente y fijarse en su posición mediante un tornillo 70. La capacidad de movimiento permite una mejor adaptación a diferentes cámaras de combustión en las 20 que se forma el frente de llama principal 26.

20 [0067] El tabique 34 perforado está dispuesto en la región 38. El tabique 34 perforado está colocado y diseñado de tal manera que, en la forma de realización descrita, la llama primaria 24 se estabiliza o se mantiene de forma segura en la región 38 del cuerpo de arremolinado 30.

25 [0068] La Fig. 6 muestra, esquemáticamente, una vista frontal del cabezal de combustión 10b desde el lado de la llama o, lo que es lo mismo, desde la cámara de combustión. El distribuidor de combustible 58 está situado en el centro, y desde él se extienden las toberas de gas primario 16a con sus orificios 60. Detrás se encuentra el tabique 34 perforado. En el ejemplo de realización representado, las aberturas se implementan mediante dos filas concéntricas de orificios, siendo los orificios circulares. Ha de entenderse que las aberturas también pueden tener una forma 30 diferente. La relación entre las áreas de apertura y el área total también puede ser diferente a la mostrada. El tabique 34 perforado sirve para reducir la velocidad de flujo de la mezcla de aire/combustible arremolinada desde la región 36 del cuerpo de arremolinado 30. El tabique 34 está delimitado por la pared del cuerpo de arremolinado 30. A través de las aberturas pueden verse las toberas de gas de apoyo 16b situadas detrás.

35 [0069] Las segundas toberas de combustible 18 con sus orificios 62 están dispuestas a intervalos regulares en un círculo alrededor del eje central del cuerpo de arremolinado 30. Alrededor se encuentra el disco delta 66 anular, que aísla el tubo de quemador 12. Los medios de dirección 68 se extienden hacia el interior en dirección radial desde la circunferencia interior del disco delta 66. En la forma de realización representada, están previstos tres medios de dirección 68. Los tres medios de dirección 68 están distribuidos uniformemente alrededor de la circunferencia interior. 40 El cabezal de combustión 10b también puede presentar más o menos medios de dirección 68, que también pueden estar distribuidos uniformemente alrededor de la circunferencia interior. En el ejemplo de realización representado, los medios de dirección 68 tienen forma triangular y están orientados con una punta hacia el interior en dirección radial. Los triángulos apuntan con una punta sentido opuesto al disco delta 66 anular. Como puede verse en la Fig. 5, los medios de dirección 68 no están situados en el plano de dibujo de la Fig. 6, sino que apuntan en sentido opuesto al 45 cuerpo de arremolinado 30. Están en ángulo.

50 [0070] Los medios de dirección 68 con el disco delta 66 están configurados de tal modo que provocan la formación de una zona de presión negativa, que extrae los gases de escape de la cámara de combustión. El disco delta 66 y los medios de dirección 68 dan lugar, por tanto, a una recirculación interna de los gases de escape. La forma a modo de triángulo inclinado que apunta en sentido opuesto al cuerpo de arremolinado genera "vórtices estacionarios" en los medios de dirección 68, que contribuyen a la estabilización del frente de llama principal 26. En consecuencia, los gases de escape realimentados se inyectan en las zonas calientes de la llama principal y, por tanto, en las regiones de mayor producción de NO.

55 [0071] La geometría de los medios de dirección 68 se ha optimizado de tal manera que la mayor cantidad posible de gases de escape internos es atraída hacia la llama principal 26. A este respecto, tanto el número como la geometría de los medios de dirección 68 deben tenerse en cuenta para el efecto de la reducción de NO, así como para la estabilidad de la llama principal.

60 [0072] El disco delta 66 anular puede presentar una pluralidad de protuberancias 72 en su circunferencia interior entre los medios de dirección 68. Las protuberancias 72 forman una geometría dentada. La Fig. 6 muestra protuberancias semicirculares, pero el dentado puede diseñarse con otras geometrías. El dentado 72 está diseñado para crear una superficie mayor. La mayor superficie da lugar a una mayor área de contacto entre los gases de escape, el aire de combustión y el combustible principal, lo que produce un mezclado más intenso y uniforme de la mezcla de combustible-aire-gases de escape. Esto permite una distribución más uniforme de zonas de combustión enriquecidas con gases de escape y, por tanto, más favorables desde el punto de vista de la estequiometría en la llama principal 65

26. Los inventores han descubierto que esto reduce aún más la formación de NO térmico en general.

5 **[0073]** Como ya se ha mencionado, las segundas toberas de combustible 18 tienen una forma que permite alcanzar las velocidades de salida más altas posibles. Para ello, puede estar previsto un deflector delante de la abertura axial de la tobera de combustible. El elevado impulso del gas de salida puede aumentar aún más la intensidad del mezclado de los gases de escape recirculados internamente y el combustible. Una optimización adicional se consigue mediante la colocación de las segundas toberas de combustible 18 en coordinación con la geometría de los medios de dirección 68. Las segundas toberas de combustible 18 se sitúan distribuidas uniformemente entre los medios de dirección 68.

10 **[0074]** Durante el funcionamiento, la combustión ventajosa, baja en nitrógeno, se consigue alimentando primero aire de combustión 28 al tubo de quemador 12 con un extremo abierto situado aguas abajo. Una parte del aire de combustión 28 se arremolina en el dispositivo de arremolinado 14 dispuesto en el tubo de quemador 12. Una primera cantidad de combustible se alimenta directamente al cuerpo de arremolinado 30, donde se mezcla con el aire de combustión 28 arremolinado. Se forma una llama primaria en la mezcla de combustible/aire de combustión 15 arremolinada en el interior del cuerpo de arremolinado. Una segunda cantidad de combustible se alimenta aguas abajo del dispositivo de arremolinado 14. Se forma un frente de llama principal que se estabiliza aguas abajo del tubo de quemador y a cierta distancia de este. A este respecto, la primera cantidad de combustible se regula independientemente de la segunda.

20 **[0075]** La regulación por separado del combustible permite lograr emisiones de NO muy bajas en un amplio rango de cargas. Con cargas más bajas, puede ser óptima una relación diferente entre la primera y la segunda cantidad de combustible que con cargas altas. Si la relación entre las dos cantidades de combustible fuera fija, no podría garantizarse un bajo nivel de emisiones de NO en todo el rango de cargas del quemador. Con el cabezal de combustión 25 de acuerdo con la invención, por ejemplo, se puede alimentar menos gas primario/gas de apoyo como porcentaje del gas principal a baja carga que a alta carga. Si la capacidad de regulación no fuera independiente, la primera cantidad de combustible disminuiría a una carga más baja proporcionalmente menos que la cantidad de aire que fluye a través del cuerpo de arremolinado, debido a razones de dinámica de flujo, de modo que las emisiones de NO podrían aumentar a una carga más baja incluso con una llama primaria sobreestequiométrica.

30 **[0076]** Aunque se han representado y descrito formas de realización específicas, el experto promedio en la materia comprenderá que pueden sustituirse diversas implementaciones alternativas y/o equivalentes por la forma de realización específica mostrada y descrita sin apartarse del alcance de protección de la presente invención tal y como se define en las reivindicaciones. La presente solicitud pretende abarcar todas las adaptaciones o variaciones de las formas de realización específicas explicadas en el presente documento dentro de los límites del alcance de protección definido en las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para la combustión escalonada de un combustible alimentando aire de combustión (28) a un tubo de quemador (12), que comprende:

5 - alimentar una primera cantidad de combustible para formar una llama primaria (24) fuertemente sobreestequiométrica dentro del tubo de quemador (12) con una estequiometría superior a 1,5, en particular superior a 2,0;

10 - alimentar una segunda cantidad de combustible aguas abajo para formar una llama principal (26) ligeramente sobreestequiométrica en una cámara de combustión, en donde una temperatura de la llama principal (26) se reduce mediante gases de escape recirculados dentro de la cámara de combustión, y en donde la llama principal (26) se estabiliza aguas abajo del tubo de quemador, en donde

15 la llama principal (26) es ligeramente sobreestequiométrica, preferiblemente con una estequiometría entre 1,03 y 1,18, y la segunda cantidad de combustible se alimenta a la cámara de combustión a una velocidad de salida de combustible elevada, de modo que la llama principal (26) se estabiliza a una distancia del tubo de quemador (12) debido al impulso resultante.

- 20 2. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende, además:

25 - regular la primera cantidad de combustible independientemente de la segunda cantidad de combustible, en donde la regulación tiene lugar de tal manera que la primera cantidad de combustible se sitúe aproximadamente entre el 3 % y el 15 %, preferiblemente entre el 5 % y el 10 %, de la suma de la primera cantidad de combustible y la segunda cantidad de combustible.

- 30 3. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, que comprende, además:

35 - arremolinar una parte del aire de combustión (28) para generar aire de combustión turbulento,
 - alimentar una primera cantidad parcial de la primera cantidad de combustible a la región del aire de combustión turbulento para formar una mezcla de aire/combustible pobre turbulenta;
 - reducir la velocidad de flujo de la mezcla de aire/combustible pobre turbulenta; y
 - alimentar una segunda cantidad parcial de la primera cantidad de combustible a la mezcla de aire/combustible pobre turbulenta.

- 40 4. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 3, en donde la alimentación de al menos una parte de la primera cantidad parcial de la primera cantidad de combustible tiene lugar en dirección radial hacia el interior.

- 45 5. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 3 o la reivindicación 4, en donde la alimentación de al menos una parte de la segunda cantidad parcial de la primera cantidad de combustible tiene lugar en dirección tangencial al flujo de la mezcla de combustible/aire de combustión arremolinada.

6. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, que comprende, además:

45 - formar remolinos, en particular remolinos estacionarios en la región de alimentación de la segunda cantidad de combustible, de modo que los gases de escape se realimenten hacia las zonas calientes del frente de llama principal (26).

7. Cabezal de combustión (10) para la combustión escalonada de un combustible, que presenta:

50 un tubo de quemador (12) configurado para que el aire de combustión (28) fluya a través de él, en donde el tubo de quemador (12) presenta un extremo abierto situado aguas abajo;

55 un dispositivo de arremolinado (14) dispuesto dentro del tubo de quemador (12) para ser atravesado por una parte del aire de combustión (28), con un cuerpo de arremolinado (30) que envuelve una primera y una segunda región, en donde la primera región (36) se sitúa aguas arriba de la segunda región (38), y únicamente en la primera región están dispuestas unas paletas de arremolinado (32);

unas primeras toberas de combustible (16a, 16b) dispuestas dentro del cuerpo de arremolinado (30) para alimentar combustible a fin de formar una llama primaria (24) dentro del cuerpo de arremolinado (30);

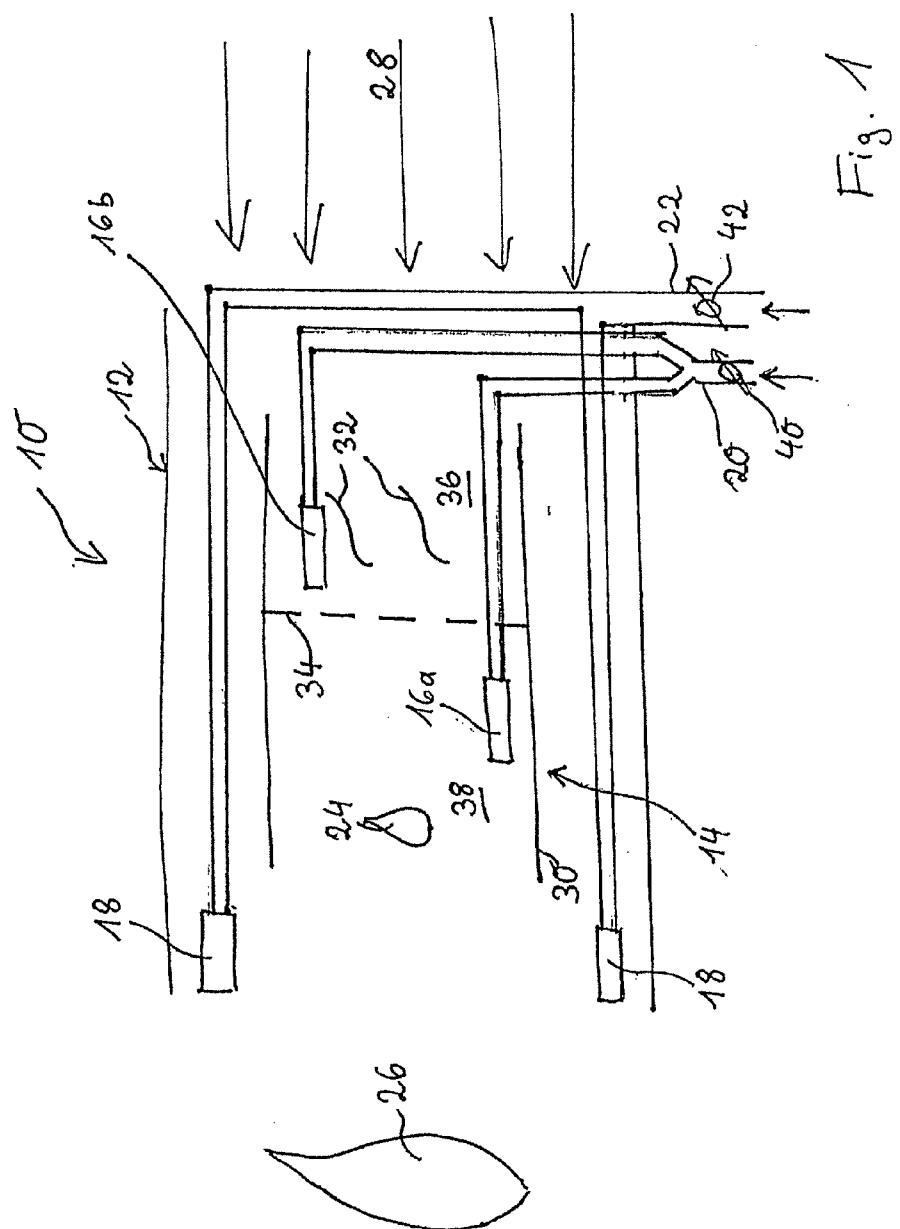
60 unas segundas toberas de combustible (18) dispuestas aguas abajo del dispositivo de arremolinado (14) para alimentar combustible a fin de formar un frente de llama principal (26) libre, en donde las segundas toberas de combustible (18) están configuradas de modo que el frente de llama principal (26) se estabilice aguas abajo del cabezal de combustión (10) y a cierta distancia de este;

un primer conducto de alimentación de combustible (20), que está conectado a las primeras toberas de combustible (16a, 16b); y

65 un segundo conducto de alimentación de combustible (22) que está conectado a las segundas toberas de combustible (18), en donde el cuerpo de arremolinado (30) y las primeras toberas de combustible (16a, 16b) están configurados para obtener la llama primaria (24) con una estequiometría superior a 1,5, en particular

superior a 2,0.

8. Cabezal de combustión según la reivindicación 7, en donde las cantidades de combustible alimentadas por el primer conducto de alimentación de combustible (20) o por el segundo conducto de alimentación de combustible (22) pueden regularse independientemente una de otra.
- 5 9. Cabezal de combustión de acuerdo con la reivindicación 7 u 8, en donde el dispositivo de arremolinado (14) comprende un tabique (34) perforado entre la primera región (36) y la segunda región (38).
- 10 10. Cabezal de combustión de acuerdo con una de las reivindicaciones 7 a 9, en donde las primeras toberas de combustible (16a, 16b) comprenden toberas de combustible primario (16a) dispuestas en la segunda región (38) del cuerpo de arremolinado (30) y toberas de combustible de apoyo (16b) dispuestas en la primera región del cuerpo de arremolinado (30).
- 15 11. Cabezal de combustión de acuerdo con la reivindicación 10, en donde las toberas de combustible de apoyo (16b) están distribuidas uniformemente entre las paletas de arremolinado (32) y configuradas para descargar combustible hacia el interior en dirección radial a fin de formar una mezcla de combustible/aire de combustión arremolinada.
- 20 12. Cabezal de combustión de acuerdo con la reivindicación 10 u 11, en donde las toberas de combustible primario (16a) están distribuidas uniformemente en una corona de chorros y configuradas para descargar combustible en dirección tangencial al flujo de la mezcla de combustible/aire de combustión arremolinada.
- 25 13. Cabezal de combustión según una de las reivindicaciones 10-12, en donde al menos una parte de la salida de combustible de las primeras toberas de combustible (16a) tiene lugar a través de orificios laterales (60) en las primeras toberas de combustible.
- 30 14. Cabezal de combustión de acuerdo con una de las reivindicaciones 10-13, en donde el primer conducto de alimentación de combustible (20) está conectado a las toberas de combustible primario (16a) y a las toberas de combustible de apoyo (16b) a través de un tubo de combustible (48) en el cuerpo de arremolinado (30), en donde el tubo de combustible (48) termina con un distribuidor de combustible (58) al que están fijadas las toberas de combustible primario (16a).
- 35 15. Cabezal de combustión según la reivindicación 14, en donde el cuerpo de arremolinado (30) está dispuesto sobre el tubo de combustible (48) de manera desplazable en la dirección longitudinal.
- 40 16. Cabezal de combustión según una de las reivindicaciones 7-15, que presenta, además: un disco delta (66) anular que se extiende radialmente hacia el interior desde el extremo, situado aguas abajo, del tubo de quemador (12) y que presenta varios medios de dirección (68) orientados radialmente hacia el interior.
17. Cabezal de combustión según la reivindicación 16, en donde el disco delta (66) anular presenta una pluralidad de protuberancias (72) en su periferia interior entre los medios de dirección (68).



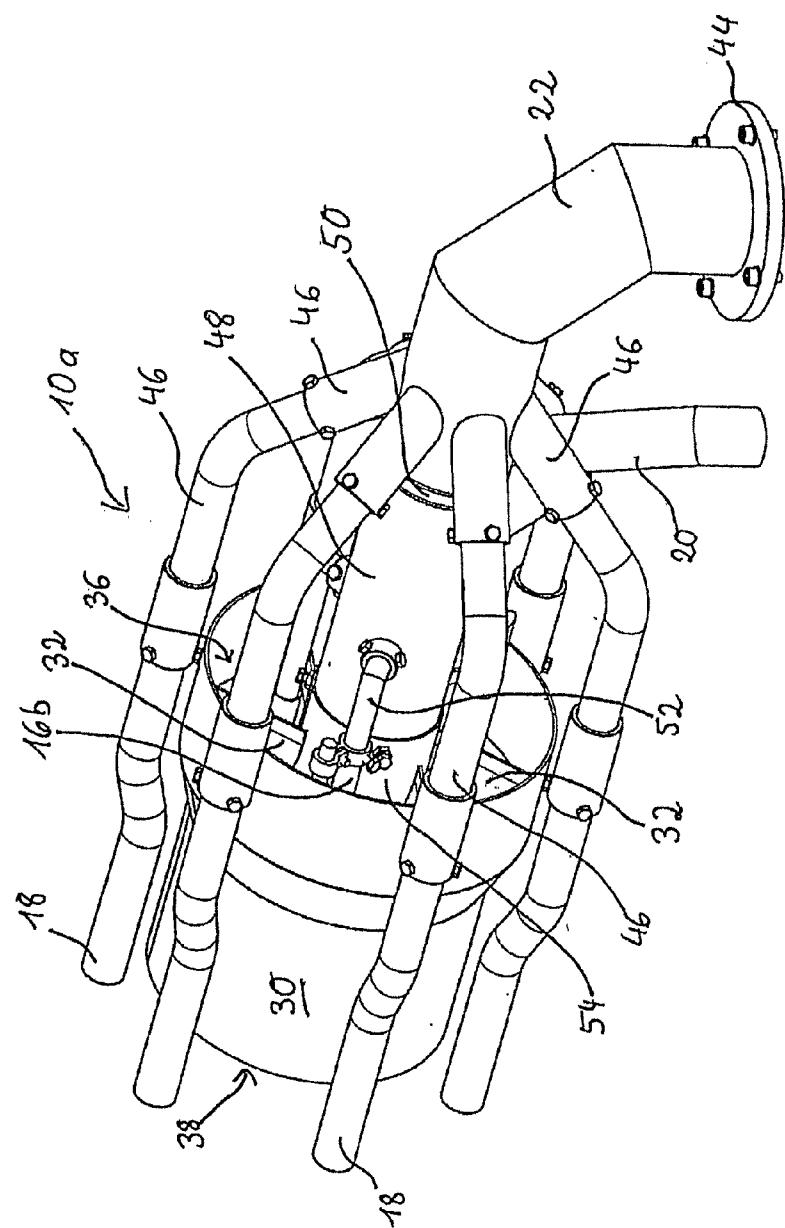


Fig. 2

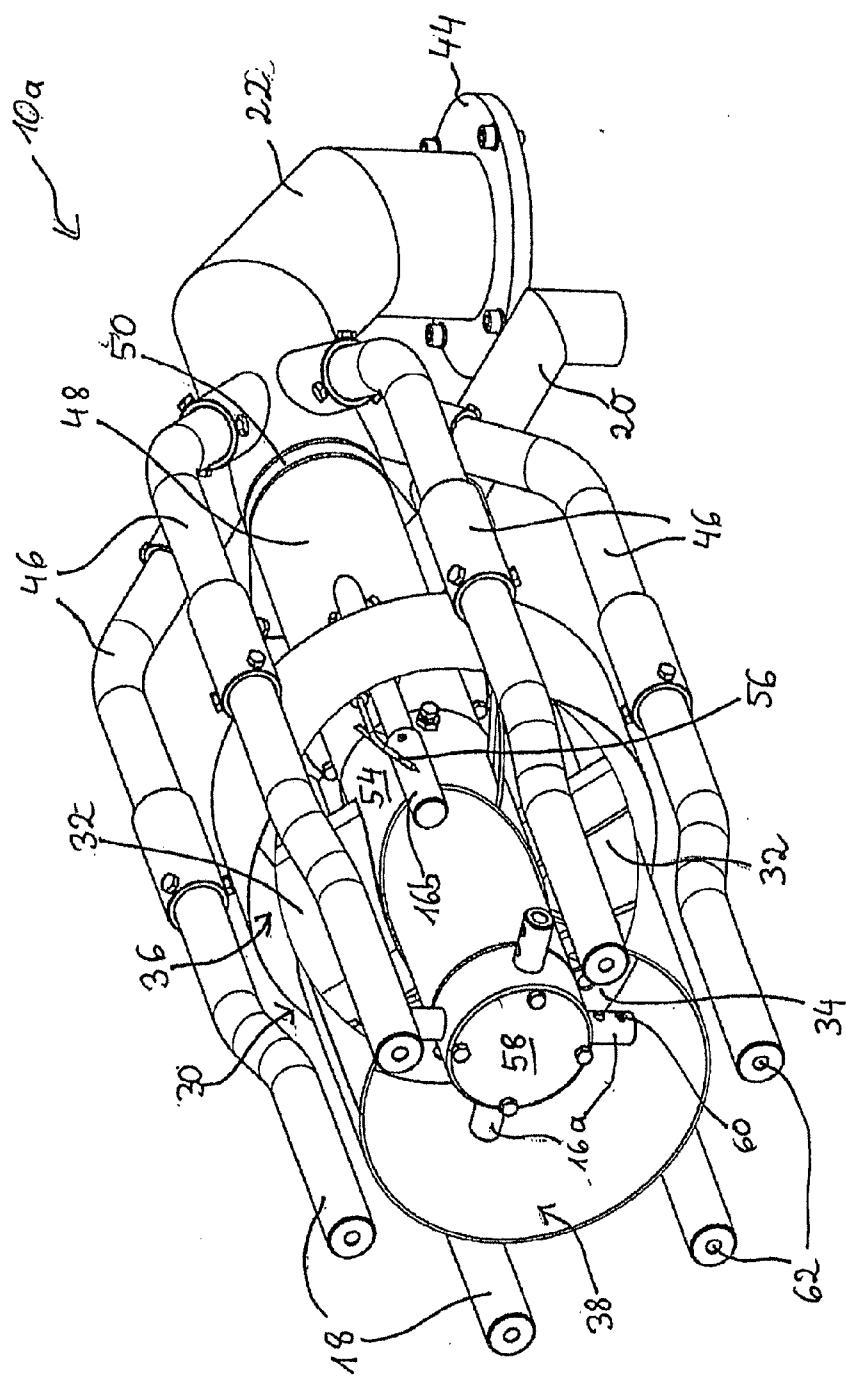


Fig. 3

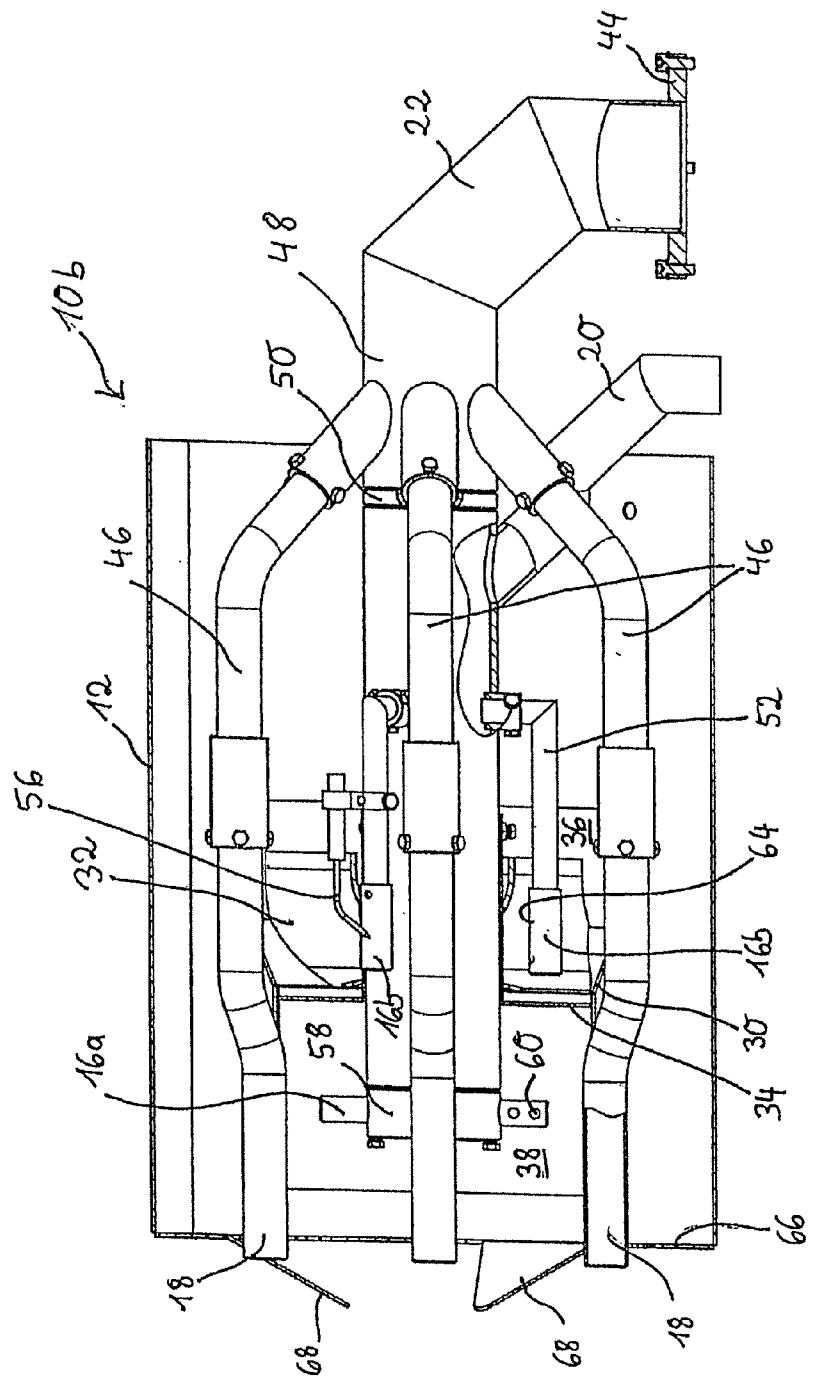


Fig. 4

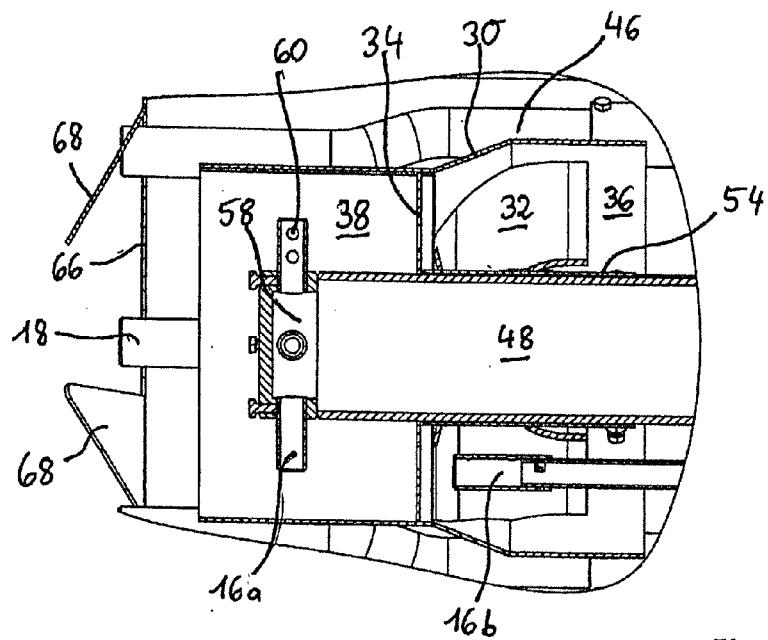


Fig. 5

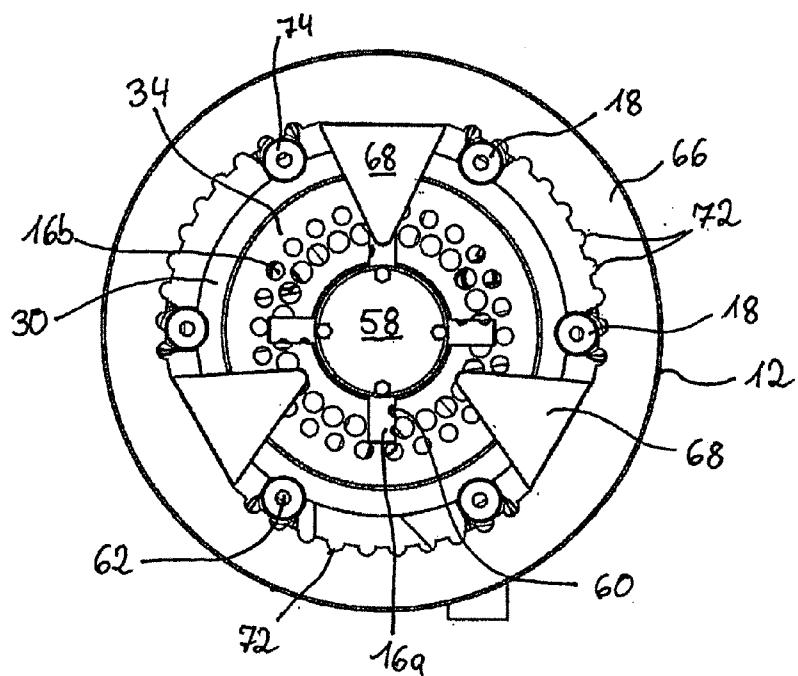


Fig. 6