



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 309 317**

51 Int. Cl.:

F23C 9/00 (2006.01)

F23D 1/00 (2006.01)

F23C 3/00 (2006.01)

F23N 5/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **03728196 .1**

96 Fecha de presentación : **21.05.2003**

97 Número de publicación de la solicitud: **1532393**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **25.05.2005**

54 Título: **Control de un quemador de ciclón.**

30 Prioridad: **29.05.2002 SE 0201621**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
16.12.2008

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
16.12.2008

73 Titular/es: **TPS Termiska Processer Aktiebolag
S-611 82 Nyköping, SE**

72 Inventor/es: **Ljungdahl, Boo**

74 Agente: **Elzaburu Márquez, Alberto**

ES 2 309 317 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

Control de un quemador de ciclón.

La presente invención se refiere a un procedimiento para hacer funcionar un proceso de combustión en un quemador de ciclón sin cenizas, después de su arranque. Se conoce un procedimiento de este tipo a partir del documento US-A-5029557.

Antecedentes técnicos

Un precalentador o quemador de horno de tipo ciclón se puede describir como un quemador circular “adiabático” que tiene una cámara de combustión en la que se introduce tangencialmente gas de combustión, tal como aire, para formar un flujo turbulento. Se introducen partículas de combustible en el flujo de gas y mediante la fuerza centrífuga que actúa sobre ellas serán transportadas a lo largo de la pared de la cámara. El combustible en un quemador de ciclón comprende preferiblemente partículas trituradas, pero en comparación con un quemador de combustible sólido autoportante vertical la demanda respecto a material fino es mucho más baja.

En muchas aplicaciones la temperatura dentro del quemador de ciclón es tan alta que se funde la ceniza del combustible y se forma escoria, que tiene que ser retirada continuamente del quemador. Éste es típicamente el caso cuando se usa para quemar carbón. En otras aplicaciones, típicamente combustión de madera, la temperatura se controla de tal manera que se evita que la ceniza -pegajosidad- se funda.

En la mayoría de las aplicaciones, el quemador de ciclón está forrado de material refractario, que previene la corrosión y que minimiza las pérdidas de calor. En combinación con una densidad térmica alta, esto conduce a una temperatura aproximadamente adiabática dentro del quemador.

En muchas aplicaciones es deseable mantener la temperatura dentro de cierto intervalo de temperatura a fin de obtener un quemado satisfactorio del carbón, evitando al tiempo los inconvenientes, tales como la pegajosidad anteriormente mencionada, de las altas temperaturas. La temperatura más alta se alcanza justamente por debajo de la condición estequiométrica, es decir, la condición cuando el oxígeno del gas de combustión o aire añadido es igual a la cantidad para quemar completamente el combustible. Si se añade menos oxígeno, es decir una condición sub-estequiométrica, la temperatura será más baja, y lo mismo aplica si se añade más oxígeno, es decir una condición sobre-estequiométrica, puesto que el exceso de oxígeno servirá como medio de enfriamiento. Esto se ilustra en la Fig. 1 que se anexa.

La relación de regulación, es decir, la relación de máxima a mínima carga de combustible que puede funcionar para un quemador de ciclón dado, está limitada por la demanda de circulación de partículas y por el arrastre masivo de partículas (cortocircuitado). En otras palabras, el flujo de gas o la velocidad del gas debería estar por encima de un nivel inferior a fin de enganchar las partículas de combustible al tiempo que se evita el desenganche de las mismas debido a las fuerzas gravitacionales y de rozamiento, y debería estar también por debajo de un límite superior a fin de evitar que las partículas salgan de la cámara de combustión antes de que se quemen completamente.

El quemador de ciclón con escoria es la aplicación más común. Éstos se hacen funcionar en condición sobre-estequiométrica, siendo la razón principal la de evitar un medio corrosivo con las condiciones reductoras cuando se hacen arder los carbones. Típicamente es posible una relación de regulación de aproximadamente 2:1. Se usa un quemador de ciclón con escoria para la fusión completa de las partículas de ceniza, que se retiran principalmente como escoria. En contraposición, un quemador de ciclón sin escoria se hace funcionar en condiciones tales que no se producirán escorias importantes dentro del quemador. De este modo la ceniza se retira principalmente como partículas de cenizas volantes. Los quemadores de ciclón sin escoria se pueden hacer funcionar bajo condiciones tanto sub- como sobre-estequiométricas, aunque la más común es la sub-estequimetría. Típicamente, es posible una relación de regulación de 4:1. Se prefiere el funcionamiento bajo condiciones sub-estequiométricas porque se puede construir el quemador de modo más compacto. El flujo volumétrico específico de gases a través del quemador de ciclón ($\text{m}^3/\text{kg}_{\text{de combustible}}$) se puede considerar como aproximadamente proporcional a la relación estequiométrica y así es posible una carga térmica más alta bajo una condición sub-estequiométrica.

La técnica anterior proporciona poca capacidad de control con respecto al proceso de combustión de los quemadores de ciclón, y es difícil conseguir una relación de regulación mayor que 4:1 al tiempo que se hace funcionar en el intervalo de temperatura deseado. Las principales razones para esto son porque el tiempo de retención de las partículas de combustible dentro de la cámara de combustión está limitado a un caudal de gas elevado o porque la circulación en la cámara de combustión llega a ser insuficiente a un caudal de gas bajo. Una posible solución para obtener una relación de regulación mayor sería proporcionar un quemador más largo. Sin embargo, una construcción de este tipo sería costosa, voluminosa y exigiría mucho espacio. Además, un quemador más largo daría una considerable dificultad de colocación si fuera para sustituir a un quemador convencional existente.

Resumen de la invención

Un objetivo de la presente invención es proporcionar un procedimiento que permita mejores capacidades de control y de ajuste de un quemador de ciclón sin escoria.

Otro objetivo de la presente invención es proporcionar un procedimiento que aumente la posible relación de regulación para un quemador de ciclón dado.

Éstos y otros objetivos que llegarán a ser evidentes a partir de la siguiente descripción, se consiguen por medio de un procedimiento según se define en las reivindicaciones que se acompañan.

La invención se basa en el conocimiento de que cambiando las condiciones entre sub-estequiométricas y sobre-estequiométricas en una misma zona de una cámara de combustión de un quemador de ciclón sin escoria es posible obtener aumento de capacidad de ajuste y mayor relación de regulación que en la técnica anterior.

Comúnmente, es deseable mantener la temperatura en la cámara de combustión del quemador de ciclón dentro de un intervalo limitado de temperatura. Cuanto más baja sea la temperatura en la cámara de combustión, más lenta es la velocidad de combustión de las partículas de residuos carbonizados (que quedan después de la pirólisis) obtenidas, y también con ello la acumulación de residuos carbonizados dentro del quemador dando como resultado una posible potencia útil más baja del quemador de ciclón. Convenientemente, el límite inferior del intervalo de temperatura es al menos 700°C, y preferiblemente 900°C. Sin embargo, bajo ciertas circunstancias, tales como para un material combustible específico el límite puede ser incluso más bajo, tal como 600°C. El límite superior del intervalo de temperatura depende entre otros de la fusión y pegajosidad del combustible quemado. Convenientemente, el límite superior del intervalo de temperatura es a lo sumo 1300°C, y preferiblemente 1100°C. Sin embargo, bajo ciertas circunstancias, tales como para un material combustible específico el límite puede ser incluso más alto, tal como 1400°C. Esto quiere dar a entender que la cantidad de gas de combustión debería ser controlada con relación a la cantidad de combustible presente en la cámara de combustión a fin de mantener la temperatura dentro del intervalo deseado. En otras palabras según al menos una realización de la invención, una de las dos condiciones: condición sub-estequiométrica o condición sobre-estequiométrica, se mantiene controlando la cantidad de oxígeno alimentado respecto a la cantidad de combustible alimentado.

Así, si la carga, es decir, la cantidad de combustible alimentado a la cámara de combustión se disminuye, entonces el flujo de gas de combustión también se puede disminuir a fin de mantener la misma condición estequiométrica. El flujo de gas o la velocidad de gas más baja posible para mantener las partículas de combustible en circulación, fijará normalmente por lo tanto el límite inferior de la carga. Los autores de la presente invención han comprobado que si se hace funcionar el quemador de ciclón bajo condiciones sub-estequiométricas, es posible disminuir la carga no sólo hasta el límite de la carga en el que el flujo del gas estaría en la frontera de ser insuficiente para el movimiento de circulación, sino también hasta una carga incluso más baja cambiando a una condición sobre-estequiométrica en dicho límite de carga. Esto quiere dar a entender que se proporciona repentinamente gas de combustión en exceso permitiendo que la carga se reduzca considerablemente. Ambas condiciones sub- y sobre-estequiométricas pueden mantener la temperatura dentro del intervalo de temperatura deseado.

Según se ha mencionado anteriormente, el funcionamiento de un quemador de ciclón está limitado por a) una velocidad de gas limitante mínima o inferior para asegurar que se hacen circular las partículas de combustible y b) una velocidad de gas limitante máxima o superior fijada por el límite en el que el arrastre de partículas sin quemar llega a ser demasiado alto. Para un horno de ciclón dado y un combustible dado, es posible elegir o bien que funcionen en una condición sobre-estequiométrica con una carga máxima relativamente baja, o que funcionen en una condición sub-estequiométrica con una carga mínima relativamente alta. Combinando los modos de funcionamiento se puede aumentar la relación de regulación.

Según un aspecto de la invención, se proporciona un procedimiento de funcionamiento de un proceso de combustión en un quemador de ciclón. Según el procedimiento se alimenta combustible a una cámara de combustión de forma cilíndrica de un quemador de ciclón y se introduce un gas de combustión que contiene oxígeno, tal como aire, con un componente de velocidad tangencial en dicha cámara de combustión de modo que proporcione al menos circulación parcial del combustible a lo largo de la pared de la cámara, para que el combustible se ha de gasificar o quemar. Se definen una velocidad limitante inferior y una velocidad de gas limitante superior para dicho gas de combustión. La velocidad del gas de combustión se mantiene entre dichas velocidades de gas limitantes. Se mantiene o bien una condición sub-estequiométrica o bien una condición sobre-estequiométrica en la cámara de combustión controlando la cantidad de oxígeno alimentado respecto a la cantidad de combustible alimentado. El procedimiento comprende adicionalmente cambiar a la otra de dichas dos condiciones estequiométricas al tiempo que se previene que el gas de combustión alcance una velocidad fuera del intervalo definido por la velocidad de gas limitante inferior y la velocidad de gas limitante superior.

Esto quiere dar a entender que con independencia de la dirección del cambio, es decir de condición de sub-estequiométrica a sobre-estequiométrica o viceversa, la velocidad del gas de combustión no será inferior a la velocidad de gas limitante inferior y no más alta que la velocidad de gas limitante superior. Esto aplica tanto a antes como a después de la actuación de cambiar de una condición estequiométrica a la otra, y también durante el cambio real.

Para una temperatura dada en la cámara de combustión, dicha temperatura define junto con dichas velocidades de gas limitantes, una posible región de transición, es decir un intervalo de cargas de combustible para el que es posible la transición o cambio de una de las dos condiciones estequiométricas a la otra en conformidad con las enseñanzas de al menos una realización de la presente invención. La carga de combustible mínima y la carga de combustible máxima para dicho intervalo dependen de la temperatura.

Se ha encontrado que mezclando gas de salida recirculado con el gas de combustión que contiene oxígeno antes de alimentar el gas de combustión a la cámara de combustión, la posible región de transición se expande. En otras palabras, para cada temperatura dada la adición de gas de salida recirculado al gas de combustión que contiene oxígeno dará como resultado una carga de combustible mínima más baja que la que sería el caso sin la adición del gas de salida recirculado.

La adición de gas de salida recirculado afecta a ambas condiciones tanto sub- como sobre-estequiométricas. La relación de regulación bajo condiciones sub-estequiométricas se puede extender adicionalmente si los gases de salida recirculados se mezclan con el gas de combustión antes de proporcionar el gas de combustión a la cámara de combustión. El efecto es doble. En primer lugar, el gas de salida recirculado aumenta el flujo de gas sin aumentar el calor liberado del combustible. La relación estequiométrica depende de la cantidad de gas que contiene oxígeno. Puesto que algo de este gas que contiene oxígeno puede ser sustituido por gas de salida que esencialmente no contiene oxígeno (o que tiene muy pequeña cantidad de oxígeno) se podrá obtener una condición sub-estequiométrica para una carga todavía más baja que en el caso en que no se recircula gas de salida, sin comprometer el efecto de circulación. Así, el límite mínimo de flujo de gas se alcanza a una carga más baja. En segundo lugar el gas de salida recirculado sirve como lastre. Se demanda así gas que contiene oxígeno adicional, tal como aire de combustión, a fin de liberar más calor del combustible manteniendo de este modo la temperatura, y, en otras palabras, la relación estequiométrica se desplaza algo más cerca de 1. Esto quiere dar a entender que el límite mínimo se alcanza a una carga adicionalmente más baja.

Bajo condiciones sobre-estequiométricas el gas de salida añadido sustituirá parcialmente aire de combustión en exceso. El gas de salida actuará como un lastre, lo que quiere dar a entender que una misma cantidad de combustible calentará una masa mayor, facilitando de este modo el uso de menos aire de combustión para enfriamiento. En el caso de que el flujo de gas total permanezca igual, el beneficio es que la concentración de oxígeno disminuirá. Así, se forma menos óxido de nitrógeno.

El efecto principal de usar gas de salida recirculado es que se aumenta el tramo de carga dentro del que es posible funcionar bajo condiciones sub-estequiométricas.

Como alternativa al gas de salida recirculado, sería posible obtener un resultado similar, es decir que expanda la posible región de transición, mezclando el gas de combustión con cualquier gas inerte o con un gas que contenga un porcentaje de oxígeno más bajo.

Aun cuando es posible variar la cantidad de gas de combustión (tal como aire) a fin de controlar la temperatura en la cámara de combustión, una alternativa es usar gas de salida recirculado (o gas inerte o gas que contiene poco oxígeno) para controlar la temperatura en la cámara de combustión. Esto es ventajoso cuando es deseable mantener una relación estequiométrica predefinida, en la que se controla la temperatura variando la cantidad de gas recirculado añadido al gas de combustión. La velocidad del gas se mantiene dentro de los límites previamente definidos.

Según al menos una realización de la invención las condiciones estequiométricas se controlan sin mezclar gas de salida recirculado ni inerte adicional alguno con el gas de combustión. En este caso es posible mantener una relación estequiométrica esencialmente constante entre el oxígeno y el combustible no igual a 1, es decir en uno de los dos estados: sub-estequiométrico o sobre-estequiométrico, controlando la cantidad de gas de combustión alimentado dependiendo de la cantidad de combustible alimentado. Una relación estequiométrica esencialmente constante se mantiene antes de la actuación de cambio, y otra relación se mantiene después de la actuación del cambio desde una condición estequiométrica a la otra. Así, si una carga relativamente baja está presente, es decir se alimenta una cantidad baja de combustible a la cámara de combustión, se puede mantener una relación sobre-estequiométrica esencialmente constante hasta el momento de cambiar a una relación sub-estequiométrica esencialmente constante, dependiendo dicho momento de cambiar entre otros del tamaño de la carga. La expresión relación estequiométrica esencialmente constante se debería entender que permita una variación de la relación estequiométrica tal que proporcione una temperatura dentro de un cierto intervalo de temperatura deseado. Por ejemplo, meramente como ejemplo ilustrativo, se hace referencia a la Figura 1, en la que para un intervalo de temperatura de 1200°C - 1300°C la relación (sub-)estequiométrica debería estar alrededor de 0,4 - 0,45 y la relación (sobre-)estequiométrica debería estar alrededor de 1,8 - 2. Así, antes y después del momento del cambio pero no durante el momento del cambio, cuando la carga se aumenta o se disminuye, la cantidad de gas de combustión se aumenta o se disminuye, respectivamente de modo que se mantenga la relación estequiométrica esencialmente constante.

Hay diferentes opciones para controlar la cantidad de gas de combustión que se alimenta a la cámara de combustión. Son factores limitantes la velocidad de gas limitante inferior y la velocidad de gas limitante superior en la cámara de combustión. La velocidad del gas de combustión que se suministra desde una entrada de gas de combustión se mantendrá esencialmente según entra el gas y viaja tangencialmente en la cámara de combustión, es decir las pérdidas se pueden considerar como despreciables. Teniendo esto en mente, un diseño de progreso directo es proporcionar una entrada de gas de combustión que tenga un área transversal fijada. Aumentando o disminuyendo la cantidad de gas de combustión que entra en la cámara de combustión, se controla la velocidad del gas. Alternativamente, se puede elegir que el gas de combustión se suministre de modo que alcance una velocidad fijada (en un nivel entre las velocidades de gas limitantes) y variar en cambio el área de apertura de la entrada. Se usa un área de apertura grande cuando se desea un flujo grande, es decir una gran cantidad de gas, mientras que se usa un área de apertura pequeña cuando se desea una baja gran cantidad de gas. La cantidad de gas deseada depende de la cantidad de combustible, según se ha descrito

previamente. Una alternativa de control adicional es variar ambas el área de la sección transversal de la entrada y la velocidad del gas de combustión proporcionado. Así, en los tres casos se puede controlar el flujo de gas, es decir el volumen por unidad de tiempo.

Se puede proporcionar un medidor de velocidad o un rotámetro en la tubería de suministro de gas para medir y calcular la velocidad del gas de combustión. De manera similar, dispositivos de medida, tales como medidor de velocidad o rotámetro, se pueden proporcionar para calcular la cantidad de combustible que se alimenta a la cámara de combustión. Mediciones y cálculos de este tipo sirven adecuadamente como base para decidir sobre el momento de cambiar de una condición estequiométrica a la otra.

El procedimiento descrito para hacer funcionar un proceso de combustión en un quemador de ciclón es aplicable para combustible sólido, líquido o gaseoso. Se ha encontrado que es particularmente adecuado para uso con combustibles sólidos. El combustible sólido es convenientemente algún tipo de biocombustible. El combustible sólido puede estar en forma de partículas, tales como partículas de madera, preferiblemente gránulos de madera, típicamente gránulos de madera triturada de un diámetro de hasta 4 mm.

Cuando se usan partículas de combustible sólido, se fija la velocidad más baja para mantener al menos la mayoría de las partículas de combustible en circulación en la cámara de combustión según dicha velocidad limitante inferior. La velocidad limitante inferior también se puede fijar sobre la base del tamaño de partícula más grande del combustible o sobre otra base. Por ejemplo, alguna clase de partículas de combustible que entra en la cámara de combustión liberará rápidamente su materia volátil, disminuyendo con ello la densidad de la partícula. Por lo tanto en tales casos puede que sea adecuado basar la velocidad tangencial mínima o inferior sobre la densidad de la partícula obtenida después de la eliminación de material volátil. Para partículas de madera esta densidad está típicamente en un orden de magnitud de 250 kg/m³, aproximadamente un cuarto de la densidad de la partícula antes de entrar en la cámara de combustión.

Para un quemador de ciclón “tendido”, es decir que comprende una cámara de combustión que tiene un eje de simetría central que se extiende horizontalmente, la velocidad de gas limitante inferior se fija adecuadamente de modo que se cumplan ciertos criterios en lo alto de la cámara de combustión.

Para una cámara de combustión de quemador de ciclón que tiene un eje central horizontal y sección transversal circular en el plano vertical, el flujo de gas en circulación dentro de la cámara de combustión se puede considerar como no expansivo, y por lo tanto la velocidad tangencial periférica igual a la velocidad de entrada del gas.

Cinco fuerzas actúan sobre las partículas de combustible, a saber:

$$\text{Gravedad} \quad F_g = m_p g$$

$$\text{Centrífuga} \quad F_c = m_p \frac{V_{p,t}^2}{R}$$

$$\text{Rozamiento} \quad F_f = -\mu m_p a_N$$

$$\text{Arrastre tangencial} \quad F_{d,t} = C_d A_p \rho_g \frac{[V_{g,t} - V_{p,t}]^2}{2}$$

$$\text{Arrastre radial} \quad F_{d,r} = C_d A_p \rho_g \frac{[V_{g,r} - V_{p,r}]^2}{2}$$

en las que

m_p = masa de la partícula.

g = constante de la gravedad.

R = radio de la cámara de combustión del quemador de ciclón.

$V_{g,t}$ = velocidad tangencial del gas.

$V_{g,r}$ = velocidad radial del gas.

$V_{p,t}$ = velocidad tangencial de la partícula.

$V_{p,r}$ = velocidad radial de la partícula.

5 μ = coeficiente de rozamiento.

a_N = aceleración en dirección normal.

C_d = coeficiente de arrastre.

10

A_p = área de sección transversal de una partícula de combustible.

ρ_g = densidad del gas de combustión.

15

La velocidad de gas limitante inferior se fija adecuadamente por la situación en la que exactamente se previene que caiga una partícula en la posición más alta (en lo alto). Este es el caso cuando las fuerzas de gravedad y de arrastre radial se equilibran con la fuerza centrífuga dando como resultado rozamiento cero. La velocidad de partícula tangencial limitante llega a ser:

20

$$V_{p,t} = \sqrt{R \left[g + C_d \frac{A_p}{m_p} \rho_g \frac{(V_{g,r} - V_{p,r})^2}{2} \right]} = \sqrt{R \left[g + \frac{3 C_d}{4} \frac{\rho_g}{d_p} \frac{(V_{g,r} - V_{p,r})^2}{\rho_p} \right]}$$

25

Se puede suponer que el arrastre radial es despreciable, y la velocidad de partícula tangencial limitante ($V_{p,t}$) se expresa como:

30

$$V_{p,t} = \sqrt{gR}$$

35

Sin embargo, la velocidad tangencial del gas dentro de la cámara de combustión tiene que ser mayor que la velocidad de partícula limitante. La velocidad de gas limitante inferior se puede encontrar resolviendo la siguiente ecuación diferencial, determinando así la velocidad de gas que asegura la velocidad de partícula deseada en lo alto del quemador de ciclón.

40

$$F_{d,t} + F_f + F_g = m_p \frac{\delta V_{p,t}}{\delta t} = m_p V_{p,t} \frac{\delta V_{p,t}}{\delta S}$$

45

Así:

50

$$C_d A_p \rho_g \frac{[V_{g,t} - V_{p,t}]^2}{2} - \mu m_p \left[g \cos(\varphi) + \frac{V_{p,t}^2}{R} \right] - m_p g \sin(\varphi) = m_p V_{p,t} \frac{\delta V_{p,t}}{\delta S}$$

55

Aquí φ es el ángulo con la vertical, es decir 180° en lo alto de la cámara de combustión, y S es la distancia recorrida por la partícula a lo largo de la periferia.

60

Resolviendo respecto a la velocidad tangencial del gas $V_{g,t}$ que da la velocidad de partícula deseada en lo alto $V_{p,t} = \sqrt{gR}$, se encuentra que ($V_{g,t}$) aumenta cuando el radio de la cámara de combustión del quemador de ciclón y el diámetro de la partícula aumentan.

65

En un quemador de ciclón “vertical”, es decir una cámara de combustión que tiene un eje de simetría central que se extiende verticalmente y una sección transversal circular en el plano horizontal, las fuerzas que actúan sobre la

partícula son similares a las del ciclón “tendido” con la adición de una fuerza de arrastre vertical. Sin embargo, para simplificar, se consideran despreciables ambas fuerzas radial y vertical. Suponiendo esto, la velocidad de gas limitante tangencial inferior $V_{g,t}$ se calcula resolviendo la siguiente ecuación (que se discutirá adicionalmente en conexión con la Fig. 11 que se acompaña):

$$V_{g,t} = \sqrt{gR \frac{\tan(\alpha) - \mu}{\mu \tan(\alpha) + 1}} + \sqrt{\frac{4}{3} d_p \frac{\rho_p}{\rho_g} \frac{\mu}{C_d} \left[g \cos(\alpha) + g \frac{\tan(\alpha) - \mu}{\mu \tan(\alpha) + 1} \sin(\alpha) \right]}$$

para la que

$V_{g,t}$ = velocidad tangencial del gas.

g = constante de la gravedad.

R = radio de la cámara de combustión del quemador de ciclón.

α = ángulo con la horizontal.

μ = coeficiente de rozamiento.

d_p = diámetro de la partícula de combustible.

ρ_p = densidad de la partícula de combustible.

ρ_g = densidad del gas de combustión.

C_d = coeficiente de arrastre.

Alternativamente, la velocidad de gas limitante inferior se puede determinar empíricamente, es decir haciendo pruebas para un quemador de ciclón específico que quema un combustible específico. El procedimiento según la presente invención es aplicable con independencia de cómo se determine la velocidad de gas limitante inferior.

La velocidad de gas limitante superior se fija adecuadamente a la velocidad más alta permisible para minimizar la cantidad de partículas de combustible sin quemar que salen de la cámara de combustión, siendo dicha velocidad 20-50 m/s, preferiblemente 25-40 m/s, tal como del orden de 30 m/s. Otra definición de la velocidad de gas limitante superior es 3-6 veces la velocidad de gas limitante inferior, típicamente 4 veces.

Se podía esperar que la eficacia de separación, es decir la tendencia de las partículas a viajar a lo largo de la pared de la cámara de combustión, aumentaría infinitamente cuando se aumentara la velocidad tangencial de gas. Sin embargo, en la práctica, el re-enganche de partículas hacia el eje central de la cámara de combustión empieza a ser bastante perceptible a cierta velocidad debido al aumento de turbulencia y la rotura de remolino hacia abajo dentro de la cámara de combustión cilíndrica del quemador de ciclón. Aún cuando no es inmediato calcular la velocidad de gas limitante superior, se entiende por experiencia que un valor típico es del orden de 30 m/s.

Otro aspecto que limita la velocidad de gas superior posible es la concentración volumétrica de partículas de combustible sin quemar dentro de la cámara de combustión. Lo que es limitante es el tiempo de quemado de los residuos carbonizados (el resto que queda después de la eliminación del material volátil del combustible). Para una temperatura y una relación estequiométrica dadas, la cantidad de residuo carbonizado sin quemar dentro de la cámara de combustión del quemador de ciclón será proporcional a la carga, y con ello también a la velocidad tangencial del gas. A una cierta carga la concentración de partículas de combustible sin quemar llegará a ser tan alta que el re-enganche será bastante perceptible. En condiciones sobre-estequiométricas el re-enganche debido a la velocidad tangencial alta es probable que sea el factor limitante. En funcionamiento sub-estequiométrico el re-enganche debido a atasco por las partículas de combustible es más probable.

El procedimiento para determinar la velocidad de gas limitante superior puede variar, por ejemplo haciendo pruebas para un quemador de ciclón específico que quema un combustible específico. El procedimiento según la presente invención es aplicable con independencia de cómo se determinen las velocidades de gas limitantes superior o inferior. Éstas tienen la función de valores limitantes. Por ejemplo, según al menos una realización de la invención la actuación de cambio de una de las dos condiciones estequiométricas a la otra se realiza justamente antes de que el gas alcance una de dichas velocidades de gas limitantes. Según al menos otra realización de la invención dicho cambio a la otra de dichas dos condiciones se realiza cuando la cantidad de combustible alimentado en la condición estequiométrica actual requeriría, para la otra condición estequiométrica, una cantidad de gas de combustión tal que correspondería a una velocidad de flujo de gas que esté dentro del intervalo de las velocidades de gas limitantes.

Según se ha descrito anteriormente, el procedimiento según la presente invención proporciona una relación de regulación para quemadores de ciclón, que es considerablemente mayor que la que ha sido posible conseguir en la técnica anterior. Aún cuando es deseable mantener la temperatura dentro de un cierto intervalo, para ambas condiciones sub- y sobre-estequiométricas, dicho intervalo puede ser realmente bastante útil para aumentar adicionalmente la relación de regulación. Aún cuando se puede preferir un intervalo de temperatura entre 900°C - 1100°C dentro del quemador de ciclón, el intervalo se puede extender aceptablemente a 700°C - 1300°C o todavía más. Por ejemplo, si se puede permitir una temperatura más alta de la normal durante las condiciones sub-estequiométricas, tales como cerca o de aproximadamente 1300°C, se necesita más oxígeno del habitual a fin de elevar la temperatura para la misma cantidad de carga. Dado que se permite que se introduzca más gas que contiene oxígeno en el quemador de ciclón con relación a la cantidad de carga, esto quiere dar a entender que la relación estequiométrica está más cerca de 1, lo que tiene la consecuencia de que se permite una carga mínima más baja, al tiempo que se introduce todavía suficiente gas para mantener las partículas en circulación. De modo similar, durante las condiciones sobre-estequiométricas puede ser permisible una temperatura relativamente más baja, es decir más oxígeno con relación a la carga. Esto también conducirá a una posible carga mínima más baja.

Aún cuando es posible hacer uso de temperaturas variables, en muchos casos puede ser deseable mantener la temperatura lo más uniforme posible. Esto puede aplicar particularmente al momento real de cambiar la relación de sub- a sobre-estequiométrica, y viceversa. Por lo tanto, adecuadamente, un cambio de este tipo se realiza rápidamente de modo que se mantenga el nivel de temperatura lo más uniforme posible. Esto se puede conseguir por medio de un sistema regulador, por ejemplo que comprende un ordenador, rotámetros para el combustible y el gas de combustión y válvulas. El sistema puede ser programado de la siguiente manera. En el funcionamiento sobre-estequiométrico se presenta una situación en la que una cantidad decreciente de gas de combustión de entrada conduce a un aumento de temperatura. También se fija una relación estequiométrica permitida mínima, por encima de 1,0. En condiciones sub-estequiométricas se cambia a dicha condición cuando un aumento de cantidad de gas de combustión de entrada da como resultado un aumento de temperatura, y la relación estequiométrica mínima se sustituye con una máxima, que está por debajo de 1,0. En el punto de cambio a funcionamiento sub-estequiométrico, las nuevas condiciones se dan inmediatamente el sistema regulador, lo que quiere dar a entender que se obtiene el cambio tan rápidamente como la o las válvulas pueden cambiar de posición. El cambio de condición y valor límite inversos aplican al ir del funcionamiento sub-estequiométrico a sobre-estequiométrico.

A partir de la descripción anterior ahora debería estar claro que el procedimiento según al menos una realización de la presente invención facilita un cambio entre gasificación (es decir condición sub-estequiométrica) a cargas más altas y combustión a cargas más bajas. La invención permite que esto se realice durante el funcionamiento del quemador de ciclón, y no sólo durante el arranque del mismo. Además, con diferencia respecto a otros quemadores de la técnica anterior que se pueden hacer funcionar simultáneamente con condiciones sub-estequiométricas en una zona y sobre-estequiométricas en otra zona, el procedimiento presente hace posible utilizar una misma zona de un quemador de ciclón para cambiar entre las dos condiciones estequiométricas diferentes.

También debería estar claro que la idea de la invención facilita un aumento de la relación de regulación (la relación entre la carga posible más grande y la más pequeña que se ha de quemar en un quemador de ciclón). Esto puede ser útil por ejemplo cuando es deseable cambiar la potencia útil de un horno conectado a un quemador de ciclón, típicamente en una planta de calefacción por distritos (hasta 30-50 MW) o incluso en una caldera doméstica (un par de 100 kW). La temperatura en el quemador se puede mantener relativamente constante durante el funcionamiento, pero, la cantidad de combustible, y por consiguiente la potencia útil, se pueden variar por ejemplo dependiendo del funcionamiento de día o de noche. Un aumento de la relación de regulación del quemador de ciclón facilita el cambio entre la necesidad de más o menos potencia útil. En quemadores de la técnica anterior a veces puede ser necesario interrumpir el funcionamiento del quemador, porque no es posible producir una potencia útil suficientemente baja, y por lo tanto cuando se desea de nuevo mayor potencia útil, el quemador tiene que ser arrancado otra vez. Sin embargo, la idea de la presente invención proporciona un posible intervalo de regulación mayor.

Breve descripción de los dibujos

La Figura 1 es un diagrama que ilustra la correlación entre relación estequiométrica y temperatura adiabática cuando se usan gránulos de madera como combustible.

La Figura 2 es un diagrama que ilustra la velocidad de partícula mínima teórica en lo alto de la cámara de combustión como una función del diámetro de la cámara de combustión.

La Figura 3 es un diagrama que ilustra la velocidad de gas limitante inferior calculada como una función del diámetro de partícula y del diámetro de la cámara de combustión.

La Figura 4 es otro diagrama que ilustra la velocidad de gas limitante inferior calculada como una función del diámetro de partícula y del diámetro de la cámara de combustión.

La Figura 5 es un diagrama que ilustra la relación de regulación dependiente de la relación estequiométrica y del flujo de gas relativo.

La Figura 6 es otro diagrama que ilustra la relación de regulación.

La Figura 7 es un diagrama que ilustra la relación de regulación en el caso de que se añadan gases de salida recirculados al gas combustión.

La Figura 8 es otro diagrama que ilustra la relación de regulación en el caso de que se añadan gases de salida recirculados al gas combustión.

La Figura 9 es todavía otro diagrama que ilustra la relación de regulación en el caso de que se añadan gases de salida recirculados al gas combustión.

La Figura 10 es otro diagrama adicional que ilustra la relación de regulación en el caso de que se añadan gases de salida recirculados al gas combustión.

La Figura 11 ilustra las fuerzas que actúan sobre una partícula en un quemador de ciclón vertical.

Descripción detallada de los dibujos

La Figura 1 es un diagrama que ilustra la correlación entre relación estequiométrica y temperatura adiabática cuando se usan gránulos de madera como combustible. Los gránulos de madera pueden tener un poder calorífico inferior (o poder calorífico neto) de 18,2 MJ/kg. El diagrama muestra que se obtiene la temperatura más alta para una relación estequiométrica de aproximadamente 0,95. Si se proporciona más oxígeno con relación al que se necesita para la combustión completa del combustible, es decir una condición sobre-estequiométrica, la temperatura llega a ser más baja. Por ejemplo, una relación estequiométrica de 2,0 da como resultado una temperatura adiabática de 1200°C. De modo similar, si se proporciona menos oxígeno de modo que se consiga una condición más sub-estequiométrica, la temperatura también llegará a ser más baja. Por ejemplo, una relación estequiométrica de 0,5 dará como resultado una temperatura de aproximadamente 1400°C. Como se ha descrito previamente, para obtener una capacidad de funcionamiento satisfactoria, puede ser deseable mantener la temperatura dentro de un cierto intervalo. Así, para este combustible particular, si fuera deseable funcionar dentro del intervalo de temperatura de 1100°C - 1300°C se mantendrían las relaciones sub- y sobre-estequiométricas aproximadamente en 0,37-0,45 y 1,8-2,25, respectivamente.

La Figura 2 es un diagrama que ilustra la velocidad de partícula mínima teórica en la porción más alta de la cámara de combustión de un quemador de ciclón tendido como una función del diámetro de la cámara de combustión. Según se ha descrito previamente, el flujo de gas limitante inferior se fija en el caso en que exactamente se previene que caiga una partícula en la posición más alta (en lo alto) de la cámara de combustión. Si se supone que el arrastre radial es despreciable, la velocidad tangencial de partícula ($V_{p,t}$) es $V_{p,t} = \sqrt{gR}$. Esto se ilustra en la Figura 2. Por ejemplo, una cámara de combustión que tiene un diámetro de 0,3 m, 0,6 m ó 1,2 m daría como resultado una velocidad de partícula mínima en lo alto de 1,2 m/s, 1,7 m/s y 2,4 m/s, respectivamente.

La Fig. 3 es un diagrama que ilustra la velocidad de gas limitante inferior calculada como una función del diámetro de partícula y del diámetro de la cámara de combustión en un quemador de ciclón tendido. La velocidad tangencial de gas ($V_{g,t}$) tiene que ser más alta que la velocidad de partícula mínima ($V_{p,t}$). Como se ha descrito previamente la velocidad tangencial del gas $V_{g,t}$ debería ser tan alta que la velocidad de partícula en la posición superior ($\varphi = 180^\circ$) en la cámara de combustión del quemador de ciclón sea más alta que la velocidad de partícula mínima calculada ($V_{p,t}$). Usando esto como condición frontera la velocidad del gas se resuelve a partir de la siguiente ecuación diferencial

$$C_d A_p \rho_g \frac{[V_{g,t} - V_{p,t}]^2}{2} - \mu m_p \left[g \cos(\varphi) + \frac{V_{p,t}^2}{R} \right] - m_p g \sin(\varphi) = m_p V_{p,t} \frac{\delta V_{p,t}}{\delta S}$$

Se encuentra que la velocidad de gas limitante inferior ($V_{g,t}$) aumenta cuando aumentan el radio de la cámara de combustión del quemador de ciclón y el diámetro de partícula. Esto se ilustra en la Figura 3. El eje horizontal en el diagrama representa el diámetro de partícula en mm y el eje vertical representa la velocidad de gas limitante inferior en m/s. Se dibujan tres curvas, en las que la curva de abajo es para un diámetro de cámara de combustión de 0,3 m, la curva media es para un diámetro de cámara de combustión de 0,6 m, la curva de arriba es para un diámetro de cámara de combustión de 1,2 m. Para los cálculos se han supuesto un coeficiente de rozamiento de 0,5 un coeficiente de arrastre de 0,44, una densidad de gas de 0,28 kg/m³ y una densidad de partícula de 1000 kg/m³. El diagrama muestra que para un diámetro de partícula por ejemplo de 2,0 mm (por ejemplo gránulo de madera triturada) la velocidad de gas limitante inferior es aproximadamente 11 a 13 m/s dependiendo del tamaño de la cámara de combustión. Para un diámetro de partícula más pequeño por ejemplo de 0,5 mm (tal como un gránulo triturado) la velocidad de gas limitante inferior es tan baja como 6 a 8 m/s.

Cuando las partículas de combustible entran en la cámara de combustión del quemador de ciclón liberarán rápidamente su materia volátil. Así, la densidad de la partícula también disminuirá. Puede ser por lo tanto adecuado calcular la velocidad de gas limitante inferior sobre la base de la densidad de la partícula después de la eliminación de materiales volátiles. Para partículas de madera esta densidad está típicamente en el orden de magnitud de 250 kg/m³. Esto se muestra en la Figura 4. Así, todos los datos de entradas son iguales que para el diagrama que se muestra en la Figura

3, excepto para la densidad de partícula que en la Figura 4 es 250 kg/m^3 en lugar de 1000 kg/m^3 . Para un diámetro de partícula de $0,5 \text{ mm}$ la velocidad de gas limitante inferior es aproximadamente 3 a 5 m/s , que es suficiente para obtener la velocidad de partícula mínima ($1,2 \text{ m/s}$, $1,7 \text{ m/s}$ y $2,4 \text{ m/s}$) anteriormente calculada para los diferentes diámetros de cámara de combustión. Si la velocidad de gas limitante superior, que se ha encontrado empíricamente, es aproximadamente 30 m/s , la relación de regulación para una temperatura de combustión dada y una partícula de $0,5 \text{ mm}$ de diámetro sería de aproximadamente $30:5$, es decir $6:1$. La relación de regulación se puede extender adicionalmente si se permite también que la temperatura se varíe con la carga.

La Figura 5 es un diagrama que ilustra la relación de regulación dependiente de la relación estequiométrica y el flujo de gas relativo. En este ejemplo se presume una temperatura adiabática de aproximadamente 1300°C en la cámara de combustión de un quemador de ciclón. El eje horizontal representa el factor de carga relativo del quemador de ciclón. El eje vertical izquierdo representa la relación estequiométrica dentro de la cámara de combustión. El eje vertical derecho representa el flujo de gas relativo dentro de la cámara de combustión, es decir la relación entre el flujo de gas real y el flujo de gas mínimo, o en la mayor parte de los casos la relación entre la velocidad de gas real y la velocidad de gas limitante inferior.

Observando la parte izquierda del diagrama, cuando se alimenta a la cámara de combustión una cantidad de combustible relativamente pequeña, es decir una carga pequeña, se suministra una cantidad comparativamente grande de gas de combustión que contiene oxígeno tal como aire de modo que existe una condición sobre-estequiométrica en la cámara de combustión. La relación estequiométrica se mantiene aproximadamente a $1,8$, según se ilustra mediante la línea de trazos L1, a fin de mantener la temperatura de aproximadamente 1300°C . Cuando se aumenta la carga también se aumenta la cantidad de gas de combustión aumentando la velocidad con la que es alimentado a la cámara de combustión, manteniendo con ello una condición sobre-estequiométrica. Esto se muestra mediante la porción izquierda inclinada de la curva L2. En este caso la relación estequiométrica se mantiene esencialmente constante a $1,8$. La cantidad de carga con la que se ha de funcionar en condición sobre-estequiométrica se determina por la velocidad de gas limitante inferior y la velocidad de gas limitante superior que es típicamente 4 veces la inferior. Las velocidades de gas limitantes se indican por las líneas horizontales L4 (límite inferior) y L5 (límite superior) que cruzan el diagrama. Así, cuando se aumenta la carga desde un factor de carga relativo de 1 sobre la escala horizontal, y por consiguiente también la velocidad del gas, se alcanzará eventualmente la velocidad de gas limitante superior. Esto sucede en 4 sobre la escala horizontal. Un quemador de ciclón que funciona en condición sobre-estequiométrica estaría limitado así a una relación de regulación de $4:1$.

Habiendo alcanzado la velocidad de gas limitante superior en condición sobre-estequiométrica, se realiza una operación de cambio de tal modo que se obtenga una condición sub-estequiométrica, que permita de este modo un incremento adicional de la carga. La acción de cambiar a una condición sub-estequiométrica se realiza reduciendo la velocidad del gas antes de que la velocidad del gas alcance o sobrepase dicha velocidad de gas limitante superior, según se indica mediante la línea L6. En este caso coincide con la velocidad de gas limitante inferior a una relación sub-estequiométrica de aproximadamente $0,45$ (en 4 sobre la escala horizontal), a fin de mantener la temperatura aproximadamente a 1300°C . Ahora, en lugar de tener exceso de oxígeno, hay una restricción de oxígeno. La relación sub-estequiométrica de aproximadamente $0,45$ se mantiene esencialmente constante, según se ilustra por la línea de trazos L7, al tiempo que se permite que se aumente adicionalmente la cantidad de combustible que se alimenta a la cámara de combustión. Se puede aumentar la cantidad de combustible, y por lo tanto también el flujo de gas según se indica por la línea L8, hasta una carga tal que se alcance la velocidad de gas limitante superior. Esto es en 16 sobre la escala horizontal. Esto quiere dar a entender que si un quemador de ciclón se hiciera funcionar solamente en esta relación sub-estequiométrica, se obtendría una relación de regulación de $16:4$, es decir $4:1$. Combinado los dos modos de funcionamiento, haciendo uso de ambas condiciones estequiométricas, se puede obtener una relación de regulación teórica de $16:1$.

El proceso es reversible. Así, es posible empezar en el lado derecho de la curva en la Figura 5, es decir en una condición sub-estequiométrica. Cuando se reduce la carga, y por lo tanto también la velocidad del gas, se alcanza eventualmente la velocidad de gas limitante inferior. En este punto, se hace el cambio a relación sobre-estequiométrica aumentando la velocidad del gas. Después de esto, se puede disminuir la carga todavía más, hasta que la velocidad del gas se reduce, para mantener la relación sobre-estequiométrica esencialmente constante, a la velocidad de gas limitante inferior.

La Figura 6 es otro diagrama que ilustra la relación de regulación. En este caso se usa el mismo combustible en la misma cámara de combustión que en la Figura 5. Sin embargo, ahora se desea una temperatura adiabática de aproximadamente 1100°C dentro de la cámara de combustión. Esta temperatura se obtiene para una relación sobre-estequiométrica de aproximadamente $2,2$, y para una relación sub-estequiométrica de aproximadamente $0,38$. Como se puede observar a partir de la Figura 6, indicada por una flecha que apunta hacia abajo, un cambio desde condición sobre-estequiométrica en la velocidad de gas limitante superior hacia la condición sub-estequiométrica conduciría a una velocidad de gas por debajo de la velocidad de gas limitante inferior. De modo similar, un cambio desde la condición sub-estequiométrica, al tener la velocidad de gas limitante inferior, hacia la condición sobre-estequiométrica, sería como se indica por la flecha que apunta hacia arriba da como resultado una velocidad de gas muy por encima de la velocidad de gas limitante superior. Esto quiere dar a entender que a fin de mantener la temperatura deseada y obtener un solapamiento, al cambiar de una condición estequiométrica a la otra, la velocidad del gas sobrepasará las velocidades de gas limitantes superior y/o inferior.

La dificultad que se ilustra en la Figura 6 se resuelve añadiendo gases de salida recirculados que tienen contenido de oxígeno bajo o nulo al gas de combustión que tiene contenido de oxígeno alto, tal como el aire.

Por consiguiente, la Figura 7 es un diagrama que ilustra la relación de regulación en el caso de que se añadan gases de salida recirculados al gas de combustión. Como en la Figura 6, la temperatura deseada en la cámara de combustión es 1100°C. Una cantidad fijada de gas de salida recirculado (15% del flujo de gas mínimo) se mezcla con el gas de combustión antes de alimentarlo a la cámara de combustión. La cantidad de gas de salida recirculado se ilustra como una línea recta horizontal de puntos L9 en la porción de abajo del diagrama. Las líneas que se corresponden con las líneas en la Figura 5 se han designado con las mismas referencias.

Como se puede observar a partir del diagrama en la Figura 7, la carga mínima bajo condiciones sub-estequiométricas se extiende adicionalmente ahora que se aplica gas de salida recirculado. El gas de salida recirculado aumenta el flujo de gas total sin aumentar el calor liberado del combustible. Así, el límite mínimo de flujo de gas, es decir la velocidad de gas limitante inferior, se alcanza con una carga más baja. Además, el gas de salida recirculado sirve como lastre. Por lo tanto se demanda gas de combustión adicional a fin de mantener la temperatura deseada. Esto aumenta adicionalmente el flujo de gas total, y el límite mínimo se alcanza a una carga adicionalmente disminuida. Según el diagrama en la Figura 7 este límite está aproximadamente en 3,5 sobre la escala horizontal, en lugar de 6 como en la Figura 6.

Bajo condición sobre-estequiométrica el gas de salida añadido sustituirá parcialmente el gas de combustión exceso. Así, el flujo de gas total permanecerá igual que sin nada de recirculación de gas de salida, aunque la relación estequiométrica variará entre aproximadamente 1,8 y 2,1 cuando cambie la carga (véase la línea de trazos L1). El beneficio es que la concentración de oxígeno disminuirá cuando disminuya la carga, dando como resultado que se forme menos óxido de nitrógeno. Así, en el diagrama en la Figura 7, y en el diagrama en la Figura 6, el límite de carga superior para condiciones sobre-estequiométricas se alcanza en 4 sobre la escala horizontal. Mientras no hay solapamiento en la Figura 6, se obtiene en el diagrama de la Figura 7 un solapamiento y por tanto una posible región de transición PRT debido a la extensión de la carga mínima bajo condiciones sub-estequiométricas. La posible región de transición PRT se define por la velocidad limitante inferior en condición sub-estequiométrica y la velocidad limitante superior en condición sobre-estequiométrica. En lugar de tener una “delgada” línea L6 como se muestra en la Figura 5, se obtiene una posible región de transición PRT más ancha en el caso que se muestra en la Figura 7. Esto quiere dar a entender que, en el caso que se muestra en el diagrama, no es necesario esperar hasta que se alcance una velocidad de gas limitante para hacer el cambio a la otra condición estequiométrica. En lugar de ello, se puede realizar el cambio en un punto anterior cuando la cantidad de combustible es tal que no se pasa fuera del límite fijado por la otra velocidad de gas limitante para la otra condición estequiométrica. Por ejemplo, cuando el cambio de condición sub-estequiométrica a sobre-estequiométrica se puede hacer en una cantidad de carga que corresponde a 4 (límite superior, sobre-estequiométrico) sobre la escala horizontal en la Figura 7, o más tarde tan lejos por abajo como una cantidad de carga que corresponde a aproximadamente 3,5 (límite inferior, sub-estequiométrico) sobre la escala horizontal. Se puede destacar que la relación de regulación, según el diagrama en la Figura 7, es 18:1. Sin embargo, puesto que un quemador de ciclón dado tiene una capacidad de carga máxima, es decir un límite de acumulación debido a la acumulación de partículas sin material volátil que se queman, y puesto que la velocidad del gas es proporcional a la carga, es bastante posible que esta carga máxima se alcance antes de que la velocidad del gas en condiciones sub-estequiométricas alcance la velocidad de gas limitante superior. Así, la capacidad de carga máxima o el límite de acumulación determina indirectamente el límite de velocidad. Sin embargo, una ventaja es que se agranda el tramo (relación de regulación) dentro del que es posible funcionar en condiciones sub-estequiométricas, siendo esto preferido desde el punto de vista medioambiental puesto que se forma menos óxido de nitrógeno. Esto se ilustra adicionalmente en la Figura 8.

La Figura 8 es otro diagrama que ilustra la relación de regulación en el caso de que se añadan gases de salida recirculados al gas de combustión. En este caso la temperatura deseada es 1300°C, y el diagrama se dibuja para la misma clase de combustible y el mismo quemador de ciclón que para la Figura 5. Sin embargo, la Figura 8 ilustra un 15% de recirculación de gas de salida en el gas de combustión. Comparando los diagramas de esas dos Figuras, es obvio que la posible región de transición es mayor cuando se usa gas de salida recirculado, puesto que la carga mínima en condiciones sub-estequiométricas se mueve adicionalmente a la izquierda en el diagrama en la Figura 8. Aun cuando se prefiere funcionar lo más posible en condiciones sobre-estequiométricas, el uso de gas de salida puede afectar negativamente a la relación de regulación global si la recirculación de gas de salida no se retira a una carga más alta. En la Figura 8, por ejemplo, la relación de regulación global es aproximadamente 12,2:1 en lugar de 16:1 como en la Figura 5.

Las Figuras 9 y 10 ilustran el efecto de que una parte mayor del gas introducido sea gas de salida recirculado. En estos ejemplos el gas de salida recirculado es 45% del flujo de gas mínimo, y en la Figura 9 la temperatura deseada es 1100°C mientras en la Figura 10 la temperatura deseada es 1300°C. Se puede destacar que que esta recirculación más alta de gas de salida da como resultado una posible región de transición mayor. También se puede destacar, en la Figura 10, que el intervalo de funcionamiento en combustión sub-estequiométrica se extiende casi a un factor de carga relativa de 1.

En lo siguiente, la Figura 11 se discutirá respecto a la deducción de la velocidad de gas tangencial limitante inferior para un quemador de ciclón “vertical”, es decir que comprende una cámara de combustión que tiene un eje de simetría central que se extiende verticalmente y una sección transversal circular en el plano horizontal. De manera similar que para un ciclón tendido la velocidad de gas limitante se fija por las partículas que caen verticalmente. En lo siguiente se supone que las partículas de combustible no se escapan fuera por la salida de la cámara de combustión. Por razones

ES 2 309 317 T3

de simplificación el flujo de gas se describe como un flujo rotatorio horizontal (sin fuerza de arrastre vertical) y el flujo radial se considera despreciable, dando como resultado un equilibrio de las fuerzas que actúan sobre la partícula de combustible 2 según se ilustra en la Figura 11. La partícula de combustible se apoya en la pared interior 4 de la cámara de combustión. A fin de prevenir que caiga la partícula, la fuerza de la gravedad F_g se equilibra con la fuerza de rozamiento F_f y la fuerza centrífuga F_c en la dirección del plano inclinado, estando dicho plano inclinado con un ángulo α respecto al plano horizontal H.

$$F_f + F_c \cos(\alpha) = F_g \sin(\alpha)$$

La fuerza centrífuga F_c y la fuerza de la gravedad F_g se pueden expresar como

$$F_c = m_p \frac{V_{p,t}^2}{R}$$

$$F_g = m_p g$$

en las que m_p es la masa de la partícula, $V_{p,t}$ es la velocidad tangencial de la partícula, R es el radio de la cámara de combustión del quemador de ciclón y g es la constante de la gravedad. La fuerza de rozamiento F_f es proporcional a la fuerza normal F_N de acuerdo con:

$$F_f = \mu F_N$$

$$F_N = F_g \cos(\alpha) + F_c \sin(\alpha)$$

$$F_f = \mu m_p \left[g \cos(\alpha) + \frac{V_{p,t}^2}{R} \sin(\alpha) \right]$$

en las que μ es el coeficiente de rozamiento o factor de fricción. Esto conduce a la siguiente relación.

$$F_f + F_c \cos(\alpha) = F_g \sin(\alpha)$$

$$\mu m_p \left[g \cos(\alpha) + \frac{V_{p,t}^2}{R} \sin(\alpha) \right] + m_p \frac{V_{p,t}^2}{R} \cos(\alpha) = m_p g \sin(\alpha)$$

$$\mu \left[1 + \frac{V_{p,t}^2}{gR} \tan(\alpha) \right] + \frac{V_{p,t}^2}{gR} = \tan(\alpha)$$

$$\tan(\alpha) = \frac{\mu + \frac{V_{p,t}^2}{gR}}{1 - \mu \frac{V_{p,t}^2}{gR}}$$

Así, la velocidad de partícula tangencial mínima será

$$V_{p,t} = \sqrt{gR \frac{\tan(\alpha) - \mu}{\mu \tan(\alpha) + 1}}$$

A partir de lo anterior es claro que es posible tener una inclinación más pronunciada si a) se disminuye el radio R , b) se aumenta la velocidad de partícula tangencial $V_{p,t}$, o c) se aumenta el coeficiente de rozamiento μ .

ES 2 309 317 T3

A fin de mantener la velocidad de partícula tangencial, la fuerza de arrastre tangencial $F_{d,t}$ se tiene que equilibrar con la fuerza F_f . La fuerza de rozamiento es igual en todas direcciones.

$$F_{d,t} = C_d A_p \rho_g \frac{[V_{g,t} - V_{p,t}]^2}{2}$$

en la que C_d es el coeficiente de arrastre, A_p es el área de la sección transversal de una partícula de combustible, ρ_g = densidad del gas de combustión, $V_{g,t}$ = velocidad de gas tangencial.

$$F_f = \mu m_p \left[g \cos(\alpha) + \frac{V_{p,t}^2}{R} \sin(\alpha) \right] = \rho_g A_p C_d \frac{(V_{g,t} - V_{p,t})^2}{2}$$

Así, la velocidad de gas tangencial mínima será:

$$V_{g,t} = V_{p,t} + \sqrt{\frac{2\mu m_p}{\rho_g A_p C_d} \left[g \cos(\alpha) + \frac{V_{p,t}^2}{R} \sin(\alpha) \right]}$$

Sustituyendo la masa m_p con la densidad de partícula ρ_p multiplicada por el volumen de partícula, siendo d_p el diámetro de la partícula, y reescribiendo el área de la sección transversal A_p de la partícula

$$m_p = \rho_p \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_p}{2} \right)^3$$

$$A_p = \pi \left(\frac{d_p}{2} \right)^2$$

da

$$V_{g,t} = V_{p,t} + \sqrt{\frac{4}{3} d_p \frac{\rho_p}{\rho_g} \frac{\mu}{C_d} \left[g \cos(\alpha) + g \frac{V_{p,t}^2}{R} \sin(\alpha) \right]}$$

Sustituyendo la expresión de la velocidad de partícula tangencial mínima se obtiene la siguiente ecuación.

$$V_{g,t} = \sqrt{gR \frac{\tan(\alpha) - \mu}{\mu \tan(\alpha) + 1}} + \sqrt{\frac{4}{3} d_p \frac{\rho_p}{\rho_g} \frac{\mu}{C_d} \left[g \cos(\alpha) + g \frac{\tan(\alpha) - \mu}{\mu \tan(\alpha) + 1} \sin(\alpha) \right]}$$

Cuanto más grande o más pesada sea la partícula, se requiere un radio de cámara de combustión más grande y una velocidad de gas tangencial más alta. Además, la velocidad de gas limitante inferior se aumenta cuando el ángulo α se aumenta y el coeficiente de rozamiento se disminuye.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de funcionamiento de un proceso de combustión en un quemador de ciclón sin escoria,
después de la arrancada del mismo, que comprende:
 - alimentar un combustible a la cámara de combustión de forma cilíndrica del quemador de ciclón;
 - alimentar un gas de combustión que contiene oxígeno con una velocidad tangencial a dicha cámara de combustión,
siendo definidas para dicho gas de combustión una velocidad de gas limitante inferior y una velocidad de gas limitante superior;
 - mantener la velocidad del gas de combustión entre dichas velocidades de gas limitantes;
 - mantener una de las dos condiciones estequiométricas en una misma zona de la cámara de combustión: una condición sub-estequiométrica y una condición sobre-estequiométrica, controlando la cantidad de oxígeno alimentado respecto a la cantidad de combustible alimentado, denominada de aquí en adelante la carga de combustible;
 - cambiar a la otra de dichas dos condiciones estequiométricas al tiempo que se previene que el gas de combustión alcance una velocidad fuera del intervalo definido por la velocidad de gas limitante inferior y la velocidad de gas limitante superior, consiguiendo de este modo una relación de regulación mayor.
2. El procedimiento según se describe en la reivindicación 1, que comprende además:
 - mantener la temperatura en la cámara de combustión dentro del intervalo de temperatura de 700°C - 1300°C, preferiblemente 900°C - 1100°C, en el que cada punto de temperatura en dicho intervalo de temperatura define, junto con dichas velocidades de gas limitantes, una respectiva carga de combustible mínima y una respectiva carga de combustible máxima para el cambio de una de las dos condiciones estequiométricas a la otra.
3. El procedimiento según se describe en la reivindicación 2, que comprende además:
 - mezclar gases de salida recirculados, u otro gas que contiene poco oxígeno o gas inerte, con el gas de combustión que contiene oxígeno antes de alimentar el gas de combustión a la cámara de combustión, reduciendo de este modo dicha carga de combustible mínima bajo condiciones sub-estequiométricas.
4. El procedimiento según se describe en la reivindicación 2, que comprende además:
 - mezclar gases de salida recirculados, u otro gas que contiene poco oxígeno o gas inerte, con el gas de combustión que contiene oxígeno antes de alimentar el gas de combustión a la cámara de combustión, reduciendo de este modo, en el mismo flujo de gas total, la concentración de oxígeno y de este modo la formación de óxido nitroso bajo condiciones sobre-estequiométricas.
5. El procedimiento según se describe en la reivindicación 1 ó la 2, en el que la actuación de mantener una condición estequiométrica comprende mantener una relación estequiométrica esencialmente constante a fin de controlar la temperatura.
6. El procedimiento según se describe en la reivindicación 2 ó la 3, en el que la relación estequiométrica se mantiene dentro de límites definidos al tiempo que la temperatura en la cámara de combustión se controla por la cantidad de dicho gas de salida recirculado, u otro gas que contiene poco oxígeno o gas inerte que se ha de mezclar con el gas de combustión que contiene oxígeno.
7. El procedimiento según se describe en una cualquiera de las reivindicaciones 1-6, que comprende alimentar dicho combustible en la forma de partículas de combustible sólido, tal como partículas de madera, preferiblemente gránulos de madera, típicamente gránulos de madera triturada de un diámetro de hasta 4 mm.
8. El procedimiento según se describe en la reivindicación 7, que comprende:
 - controlar, para una cantidad relativamente pequeña de combustible que se alimenta a la cámara de combustión, la cantidad de gas de combustión de modo que prevalezca en la cámara de combustión una condición sobre-estequiométrica;
 - aumentar, cuando se aumenta la cantidad de combustible, la cantidad de gas de combustión, aumentando la velocidad a la que se alimenta a la cámara de combustión, manteniendo de este modo una condición sobre-estequiométrica;
 - cambiar a una condición sub-estequiométrica reduciendo la cantidad relativa de gas de combustión, reduciendo la velocidad del gas de combustión, antes de que la velocidad del gas alcance dicha velocidad de gas limitante superior o cuando la cantidad de combustible sea tal que se pueda obtener una condición sub-estequiométrica que cumpla los

ES 2 309 317 T3

criterios de que la temperatura en la cámara de combustión sea 700°C - 1300°C, preferiblemente 900°C - 1100°C, y que la velocidad del gas sea igual o más alta que dicha velocidad de gas limitante inferior.

9. El procedimiento según se describe en la reivindicación 8, en el que, después de cambiar a una condición sub-estequiométrica, el procedimiento comprende adicionalmente:

aumentar, cuando se aumenta adicionalmente la cantidad de combustible, la cantidad de gas de combustión aumentando la velocidad con la que se alimenta a la cámara de combustión, manteniendo al tiempo una condición sub-estequiométrica.

10. El procedimiento según se describe en la reivindicación 7, que comprende:

controlar, para una cantidad relativamente grande de combustible que se alimenta a la cámara de combustión, la cantidad de gas de combustión de modo que prevalezca en la cámara de combustión una condición sub-estequiométrica;

reducir, cuando se reduce la cantidad de combustible, la cantidad de gas de combustión, reduciendo la velocidad con la que se alimenta a la cámara de combustión, manteniendo de este modo una condición sub-estequiométrica;

cambiar a una condición sobre-estequiométrica aumentando la cantidad relativa de gas de combustión, aumentando la velocidad del gas de combustión, antes de que la velocidad del gas alcance dicha velocidad de gas limitante inferior o cuando la cantidad de combustible sea tal que se pueda obtener una condición sobre-estequiométrica que cumpla los criterios de que la temperatura en la cámara de combustión sea 700°C - 1300°C, preferiblemente 900°C - 1100°C, y que la velocidad del gas sea igual o más baja que dicha velocidad de gas limitante superior.

11. El procedimiento según se describe en la reivindicación 10, en el que, después de cambiar a una condición sobre-estequiométrica, el procedimiento comprende adicionalmente:

reducir, cuando se reduce adicionalmente la cantidad de combustible, la cantidad de gas de combustión reduciendo la velocidad con la que se alimenta a la cámara de combustión, al tiempo que se mantiene una condición sobre-estequiométrica.

12. El procedimiento según se describe en una cualquiera de las reivindicaciones 7-11, en el que dicha velocidad de gas limitante inferior es la velocidad más baja para mantener al menos una parte mayoritaria de las partículas de combustible en circulación en la cámara de combustión.

13. El procedimiento según se describe en una cualquiera de las reivindicaciones 7-12, en el que, para un quemador de ciclón con una cámara de combustión que tiene un eje de simetría central que se extiende horizontalmente, la velocidad de gas limitante tangencial inferior $V_{g,t}$ en lo alto de la cámara de combustión se calcula resolviendo la siguiente ecuación diferencial:

$$C_d A_p \rho_g \frac{[V_{g,t} - V_{p,t}]^2}{2} - \mu m_p \left[g \cos(\varphi) + \frac{V_{p,t}^2}{R} \right] - m_p g \sin(\varphi) = m_p V_{p,t} \frac{\delta V_{p,t}}{\delta S}$$

que cumple la condición frontera $V_{p,t} = \sqrt{gR}$, para $\varphi=180^\circ$.

en la que

μ = coeficiente de rozamiento.

C_d = coeficiente de arrastre.

A_p = área de sección transversal de una partícula de combustible.

ρ_g = densidad del gas de combustión.

φ = el ángulo con la vertical, es decir 180° en lo alto de la cámara de combustión.

$V_{g,t}$ = velocidad tangencial del gas.

$V_{p,t}$ = velocidad tangencial de la partícula.

m_p = masa de la partícula.

g = constante de la gravedad.

ES 2 309 317 T3

R = radio de la cámara de combustión del quemador de ciclón.

S = la distancia recorrida por la partícula a lo largo de la periferia.

- 5 14. El procedimiento según se describe en una cualquiera de las reivindicaciones 7-12, en el que para un quemador de ciclón con una cámara de combustión que tiene un eje de simetría central que se extiende verticalmente, la velocidad de gas limitante tangencial inferior $V_{g,t}$ se calcula resolviendo la siguiente ecuación diferencial:

10
$$V_{g,t} = \sqrt{gR \frac{\tan(\alpha) - \mu}{\mu \tan(\alpha) + 1}} + \sqrt{\frac{4}{3} d_p \frac{\rho_p}{\rho_g} \frac{\mu}{C_d} \left[g \cos(\alpha) + g \frac{\tan(\alpha) - \mu}{\mu \tan(\alpha) + 1} \sin(\alpha) \right]}$$

15 en la que

$V_{g,t}$ = velocidad tangencial del gas.

g = constante de la gravedad.

20 R = radio de la cámara de combustión del quemador de ciclón.

α = el ángulo con la horizontal.

25 μ = coeficiente de rozamiento.

d_p = diámetro de la partícula de combustible.

ρ_p = densidad de la partícula de combustible.

30 ρ_g = densidad del gas de combustión.

C_d = coeficiente de arrastre.

- 35 15. El procedimiento según se describe en una cualquiera de las reivindicaciones 7-14, en el que dicha velocidad de gas limitante superior es la velocidad más alta permisible para prevenir que una cantidad grande de partículas sin quemar salgan de la cámara, siendo dicha velocidad 20-50 m/s, preferiblemente 25-40 m/s, tal como del orden de 30 m/s.

40

45

50

55

60

65

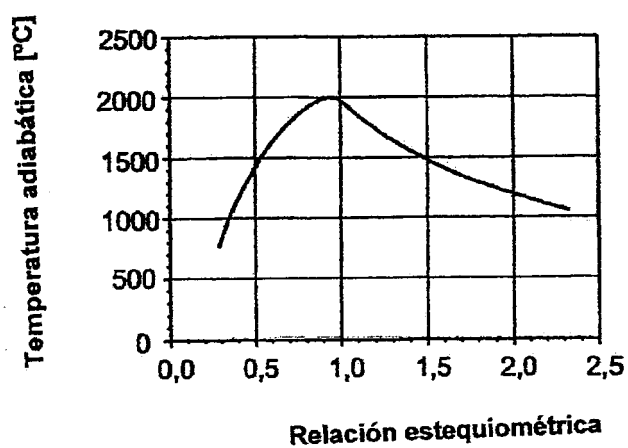


Fig. 1

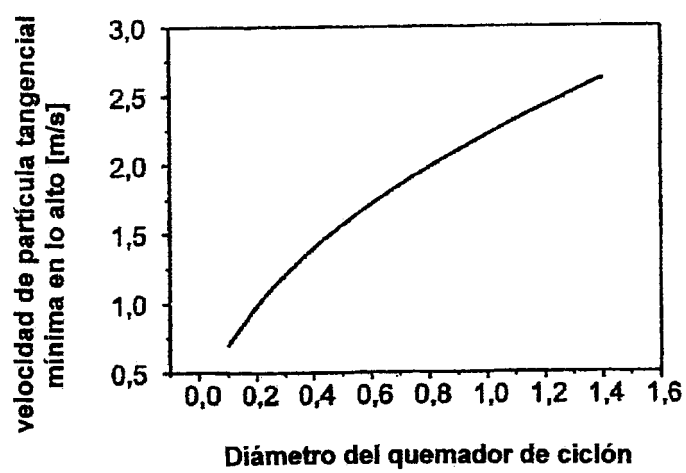


Fig. 2

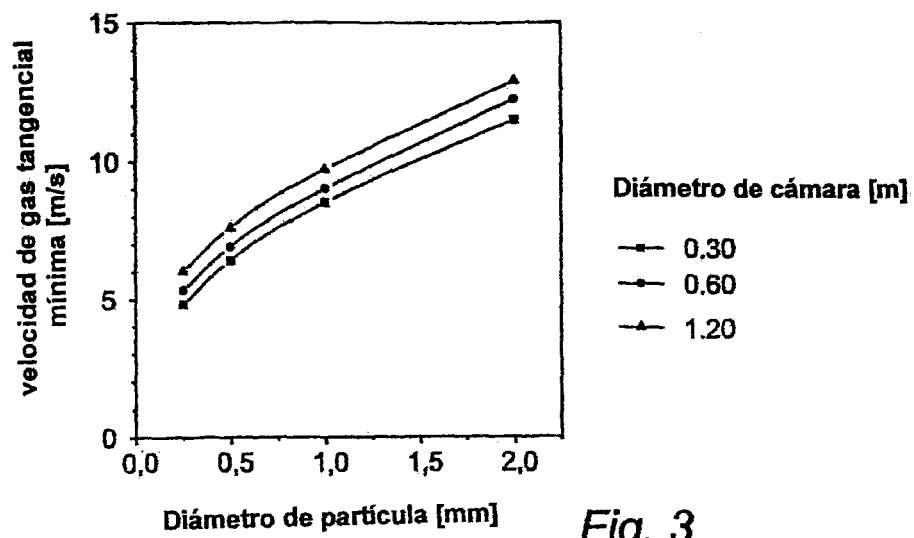


Fig. 3

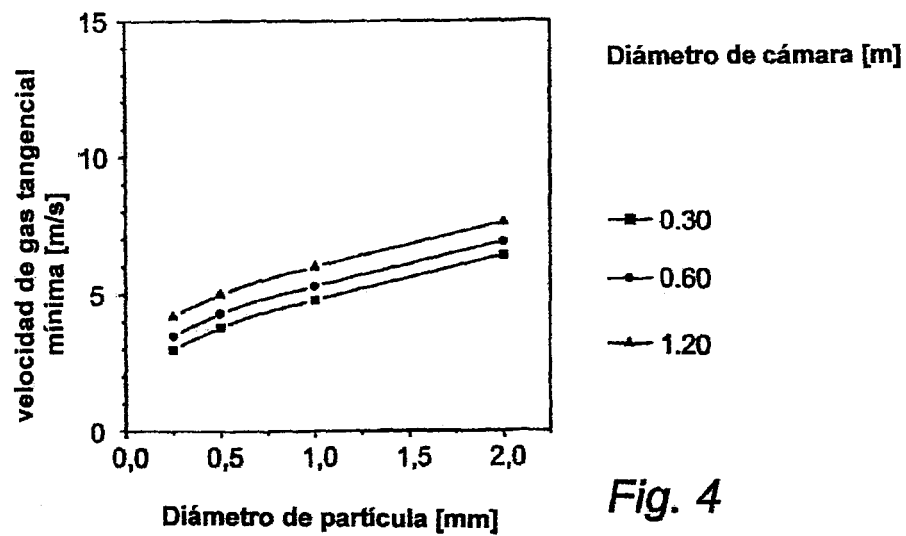


Fig. 4

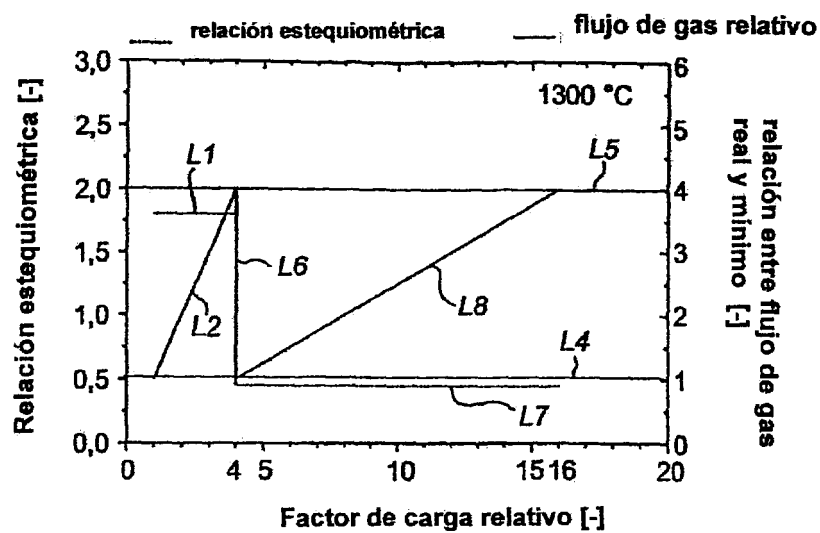


Fig. 5

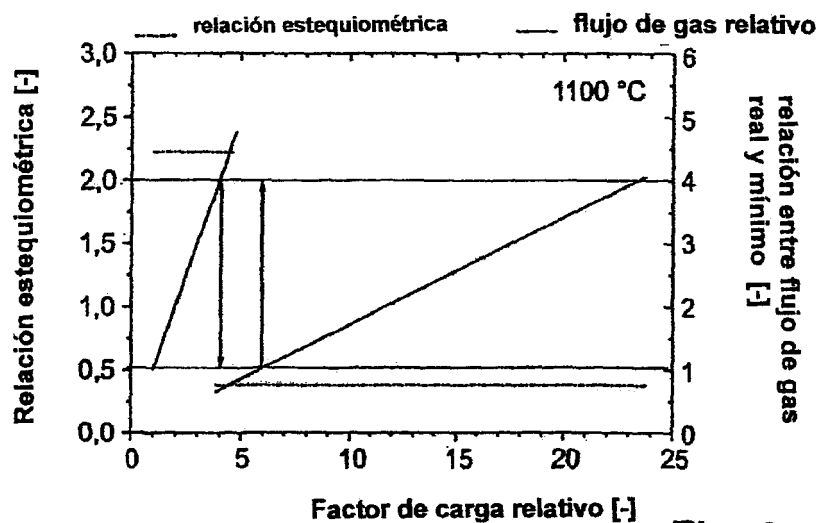
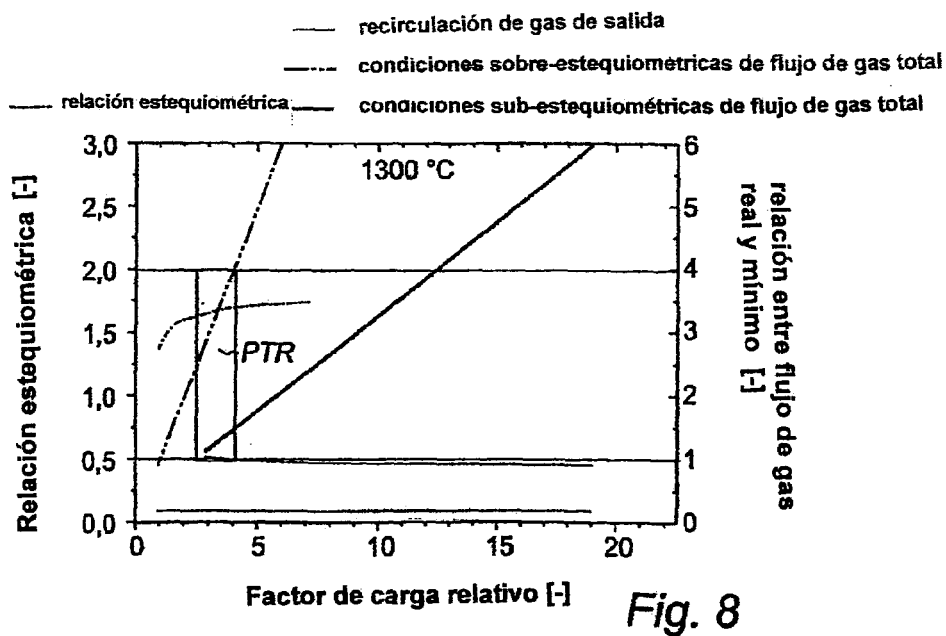
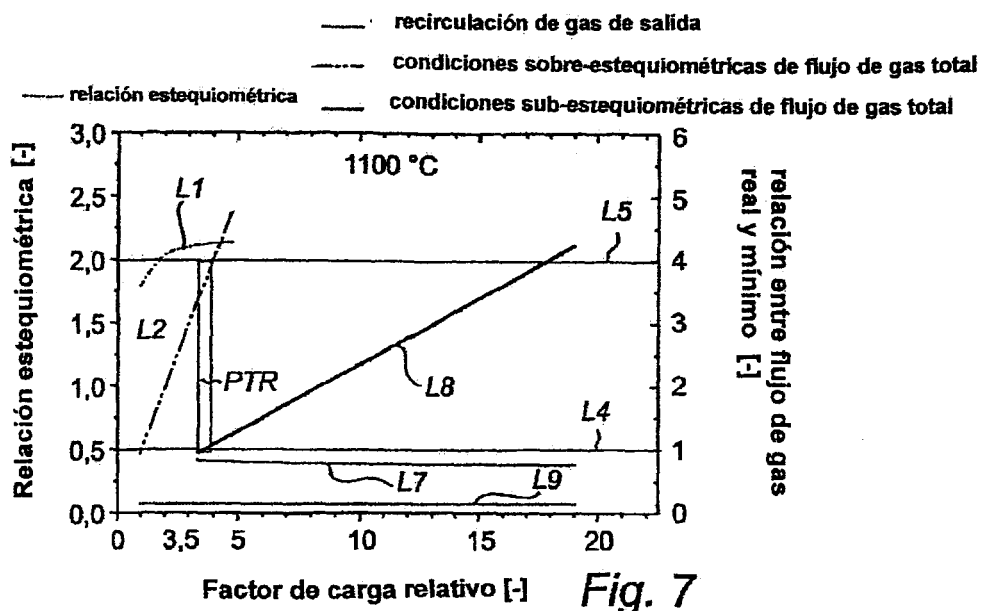


Fig. 6



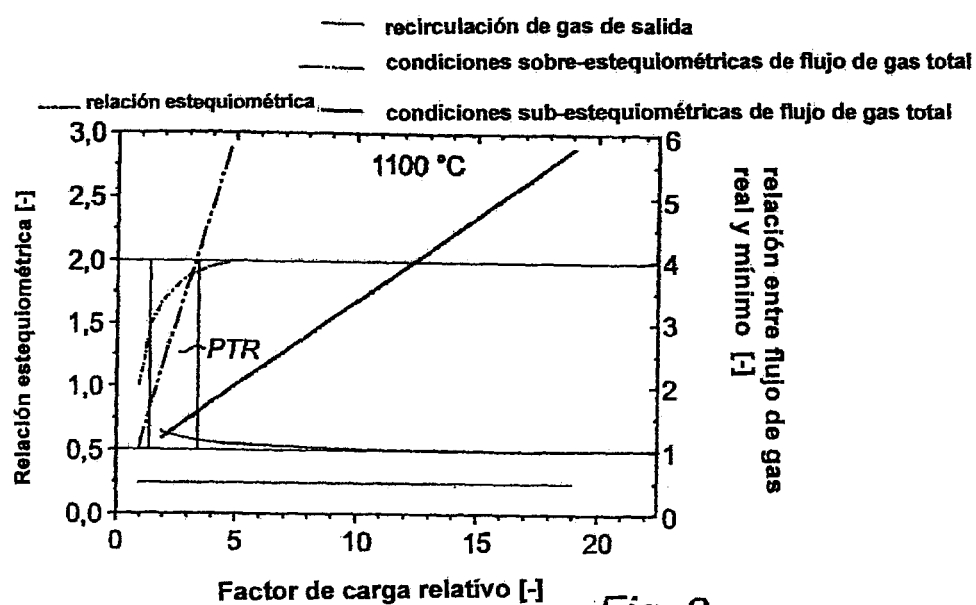


Fig. 9

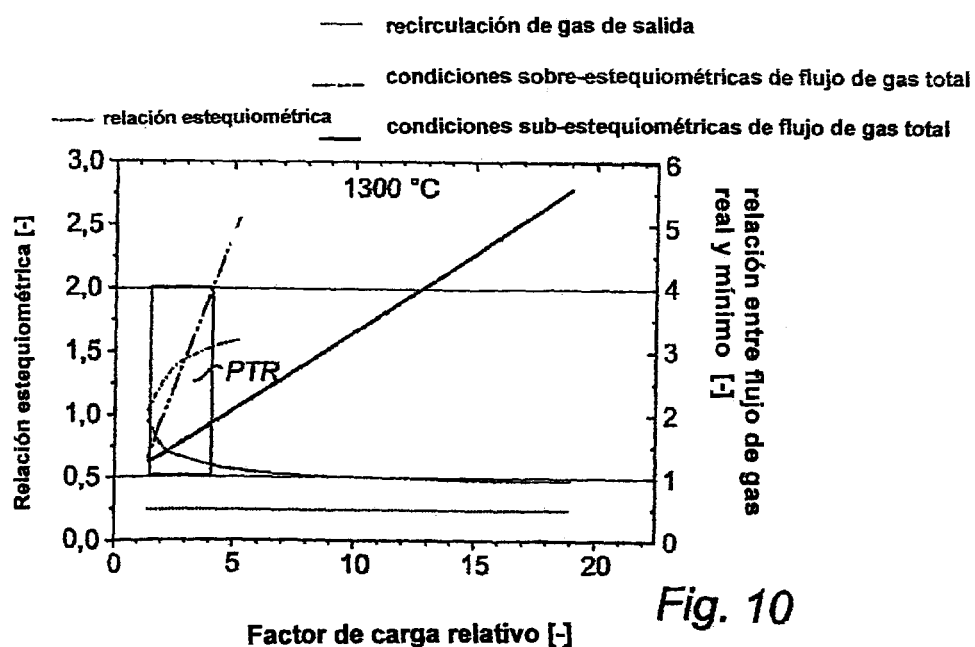


Fig. 10

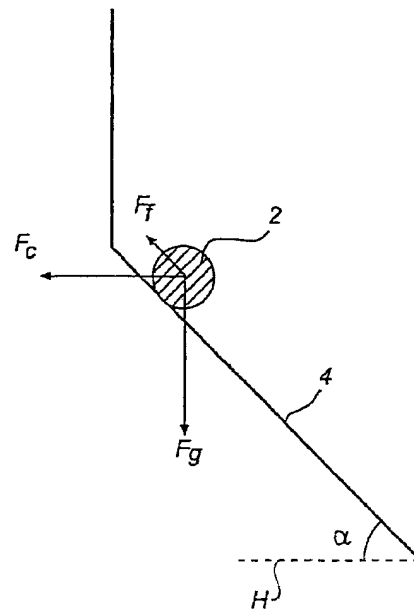


Fig. 11