

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 806 401**

51 Int. Cl.:

F23C 9/00 (2006.01)

F23L 7/00 (2006.01)

F23J 7/00 (2006.01)

C10L 10/00 (2006.01)

F23D 1/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **12.12.2014 PCT/EP2014/077543**

87 Fecha y número de publicación internacional: **02.07.2015 WO15097001**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.12.2014 E 14816205 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.05.2020 EP 3087316**

54 Título: **Proceso de oxidación a presión**

30 Prioridad:

27.12.2013 IT BA20130084

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

17.02.2021

73 Titular/es:

**ITEA S.P.A. (100.0%)
Via Conservatorio 17
20122 Milano (MI), IT**

72 Inventor/es:

**MALAVASI, MASSIMO y
DI SALVIA, GRAZIA**

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 806 401 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

Proceso de oxidación a presión

5 La presente invención se refiere a un proceso de combustión que permite obtener una eliminación sustancial de las partículas orgánicas de los gases de escape combinada con una reducción drástica aún más significativa de la integral de la distribución en número de la partícula inorgánica que tiene un tamaño o diámetro inferior a un micrómetro, hasta alcanzar un valor de la integral de la distribución en número del tamaño de partícula inorgánica casi del mismo orden que la de la integral de la distribución en número del tamaño de partícula inorgánica del fondo natural.

10 Más específicamente, la presente invención se refiere a un proceso de combustión que permite obtener la eliminación sustancial de las partículas orgánicas de los gases de escape combinado con una reducción significativa de la integral de la distribución en número de los tamaños de partículas inorgánicas por debajo de 0,1 micrómetros, siendo muy bajas las concentraciones en peso de la parte de las cenizas inorgánicas con un tamaño de partícula inferior a 1 μm , inferior a 0,01 mg/Nm³ de gas de escape en base seca.

15 Aún más en particular, la presente invención permite obtener valores de la integral de la distribución en número de las partículas inorgánicas que tienen un diámetro inferior a 1 μm inferior a 650.000, preferentemente inferior a 300.000 y aún más preferentemente inferior a 200.000 (1/cm³ o número de partícula/cm³ de gas de escape); de las partículas inorgánicas que tienen un diámetro inferior a 0,1 μm inferior a 400.000, más preferentemente inferior a 200.000, aún más preferentemente inferior a 120.000; el valor de la integral de la distribución en **número** determinada con el impactador ELPI® (Dekati®) mediante el análisis de los gases de escape obtenibles mediante el uso de una cámara de combustión isotérmica y sin llama de 3 MW, descrito más adelante, funcionando a una presión de 13 bares absolutos (12 bares relativos o barg) a la temperatura de 1430 °C, alimentando carbón como combustible y oxígeno al 90 % en volumen como comburente, estando presente oxígeno a una concentración del 3 % en volumen en los humos que salen de la cámara de combustión, alimentándose el carbón como una suspensión al 35 % en peso en agua, alimentándose el oxígeno mezclado con los humos de reciclaje que contienen 55 % en volumen de vapor.

20 Se sabe en la técnica anterior que la combustión de cualquier tipo de combustible produce partículas o polvos, lo que significa partículas sólidas que contienen sustancias orgánicas no quemadas/parcialmente quemadas (carbono negro BC, hollín; o carbono orgánico OC), y sustancias inorgánicas tales como sales y óxidos metálicos, entre los cuales pueden citarse metales pesados, como Ni, V, Se, Cr, etc.).

25 En cuanto al impacto de los polvos en la salud humana, cabe destacar que hasta hace poco no se disponía de datos epidemiológicos claros. Sin embargo, en lo que afecta en particular a las preocupaciones generales derivadas del conocimiento de la fisiología humana y se esperaba un efecto más marcado de las partículas emitidas, de partículas que tienen un diámetro inferior, por ejemplo, inferior a 1 μm hasta 10 nanómetros. De hecho, se mantuvo, cualitativamente, que el peligro específico dado por las partículas submicrométricas era mayor debido a su capacidad inherente de entrar en contacto estricto y permanente con los tejidos humanos (por ejemplo: alvéolos pulmonares) contiguos y permeables al sistema de circulación sanguínea (Figs. 5.18, página 354, Aerosoles Capítulo 5). En otras palabras, se creía que cuanto más pequeña era la partícula sólida, mayor era el peligro, además de la peligrosidad inherente del tipo de sustancia emitida liberada en los gases de escape de la cámara de combustión.

30 En cuanto al aspecto ambiental, los polvos de humo se han tenido en cuenta por su efecto potencial tanto en el calentamiento de la tierra como en la contaminación del aire y la tierra cuando se relacionan con sustancias que se sospecha son peligrosas.

35 Las preocupaciones sobre los posibles efectos sobre la salud humana dieron lugar a varios estudios toxicológicos y ambientales, en crecimiento exponencial en la última década. Sin embargo, los estudios epidemiológicos en curso no han influido en las normativas vigentes sobre emisiones de humo, ya que están relacionadas con el límite del número total permitido de partículas submicrométricas. Del mismo modo, aún no existe ninguna distinción en cuanto a su peligrosidad intrínseca, estando basada la presente normativa en el conocimiento consolidado de los efectos nocivos de las sustancias emitidas. Por ejemplo, la regla aún mantiene los límites de emisión expresados como peso total (indistinto) de las partículas PM 10 emitidas (acrónimo que indica que las partículas tienen un tamaño <10 μm) y, en detalle, para las normativas más estrictas, valores <10 mg/Nm³ de humos emitidos, en base seca. Tanto las metodologías de caracterización como los valores obtenidos a partir de ellas, no parecen tener en cuenta la evaluación del peligro.

40 El uso del indicador PM 2,5 (partículas totales que tienen un diámetro <2,5 micrómetros), representativo de la mayor importancia que se atribuye a la porción de las partículas más pequeñas dentro de las partículas totales, solo ha encontrado una aplicación teórica en varios estudios toxicológicos y no tiene relevancia en las normativas nacionales.

Pero recientemente, datos toxicológicos cada vez más numerosos y fiables, puestos a disposición por la bibliografía del campo, han permitido sacar conclusiones claras sobre la peligrosidad de las partículas y sobre el mayor impacto de las partículas más pequeñas (mayor importancia epidemiológica del indicador PM 2,5) y, sobre todo, sobre la correlación significativa entre el impacto sobre la salud humana y las emisiones de BC y OC, y metales pesados como níquel, vanadio, selenio, plomo en este orden.

En la reciente conferencia PCC de Pittsburgh (Pittsburgh Coal Conference) de 2012, un estudio final del DOE (Departamento de Energía de EE. UU.) perfila claras correlaciones de causa y efecto, con un indicador impactante: 2,5 años de reducción en la esperanza de vida. El estudio tiene un título emblemático: ¿Por qué se tardó tanto en descubrirlo? Este estudio refleja el voluminoso informe presentado por la EPA (Agencia de Protección Ambiental) en el Congreso de Estados Unidos, en marzo de 2012 (ref.: EPA-450/S-12-001; en línea: <http://www.epa.gov/blackcarbon>).

El problema concierne potencialmente a todos los usos de los combustibles, desde la autotracción hasta las centrales eléctricas, a la calefacción del hogar con biomasa, etc. Ciertamente, esto dará lugar a normativas cada vez más específicas en el tiempo, muy desdibujadas en el tiempo, por falta de disponibilidad de soluciones tecnológicas en la actualidad. De hecho, las partículas submicrométricas están fuera del "límite tecnológico" de las tecnologías industriales disponibles, es decir, escapa a las técnicas industriales conocidas de post-tratamiento de gases de escape que son efectivas por encima de un tamaño de partícula de 1 µm. Incluso una serie de más operaciones unitarias con gases de escape, tales como, por ejemplo, filtración con filtros de manga seguida de filtración electrostática y de filtración electrostática húmeda, son eficaces (eficiencia > 80 %) solo por encima de un tamaño de partícula de 1 µm. Por lo tanto, pueden realizarse limpiezas muy estrictas de los humos de combustión con bajas eficiencias unitarias y, en consecuencia, con costes y complejidad muy significativos.

Del mismo modo y en paralelo, las actividades de desarrollo de tecnologías de producción de energía sin liberación de gases de efecto invernadero (es decir, incluyendo la captura de CO₂) entran en conflicto con el problema tecnológico de la influencia de las partículas, residual en gases de escape después de los post-tratamientos, sobre la eficiencia de los sistemas de captura de CO₂. En el caso de captura de CO₂ posterior a la combustión (captura de gases de escape después de la combustión en el aire), las partículas interfieren fuertemente, por ejemplo con moléculas (aminas) que son agentes activos en la captura de CO₂. Esto reduce la eficiencia del proceso y, por lo tanto, aumenta tanto las inversiones solicitadas como el consumo parasitario de la potencia total producida. En el caso de las tecnologías en desarrollo que modifican el proceso de combustión, por ejemplo cambiando de aire a oxígeno para obtener CO₂ concentrado en los humos, la presencia de partículas requiere operaciones de limpieza de humos especiales y costosas, para que luego esté disponible un gas de CO₂ que puede alimentarse a máquinas rotativas de compresión de alta eficiencia, sin acumulación en los sistemas aguas abajo que transportan y reintroducen CO₂ bajo el suelo. La comparación entre CAPEX (gasto de capital) y OPEX (gasto de operación) de una simple compresión de CO₂, con las estimaciones de costes pertinentes de los planes de desarrollo industrial que están en marcha (ej. Futuregen 1 y 2 en EE. UU.) y, por lo tanto, debe incluir la limpieza de humos, es bastante evidente. Por lo tanto, evidencias recientes apuntan a los efectos tanto sobre la salud humana como sobre el medio ambiente de las partículas submicrométricas, producidas por las plantas de combustión con tecnologías convencionales, y sobre los factores de coste de las tecnologías en desarrollo con captura de CO₂ para reducir el efecto invernadero (objetivo: impacto integral reducido sobre el medio ambiente).

Teniendo en cuenta los límites de las tecnologías convencionales de limpieza de humos, por lo tanto, se sintió la necesidad generalizada de intervenir al principio en el proceso de combustión en sí mismo, para evitar la formación y emisión con humos de combustión de partículas ultrafinas (submicrométricas).

Como se ha dicho anteriormente, las partículas están formadas tanto por partículas no quemadas o parcialmente quemadas (partículas orgánicas) como por partículas inorgánicas (en particular metales).

En la técnica anterior sobre la combustión, la concentración de las partículas emitidas se expresa generalmente en peso (integral de la distribución en peso del tamaño de partícula de hasta 10 µm, o hasta 2,5 µm) referida a la unidad de volumen de humos producidos o emitidos. El valor integral en peso de la distribución del tamaño de partícula por unidad de volumen de los humos, no tiene en cuenta un tamaño de partícula inferior a 1 µm. Y, incluso menos, ni siquiera hay una mención indirecta a la distribución en número submicrométrica de las partículas de ceniza en los humos. Se pueden mencionar, por ejemplo, algunas patentes relativas a la combustión.

El documento EP 1.616.129 en nombre del solicitante se refiere a un proceso de combustión sin llama para tratar materiales de diversos tipos, por ejemplo residuos, en donde se reduce la formación de zonas frías en el reactor, llevándose a cabo el proceso en condiciones isotérmicas o casi isotérmicas, operando a temperaturas superiores a 1.300 K y a presiones superiores a la atmosférica, el oxidante se alimenta mezclado con agua, vapor o gas reciclado. En la patente se afirma que los humos de combustión contienen cantidades muy bajas de TOC (carbono orgánico total), del orden de ppm, así como cantidades del mismo orden de magnitud de cenizas volantes.

Esta patente no da ninguna indicación sobre la distribución en número de las partículas en los humos.

El documento US 8.453.583 describe un proceso de combustión que usa combustibles líquidos, sólidos y gaseosos a temperaturas en el intervalo de 1.300 K y 2.500 K, siendo el comburente oxígeno, la combustión se lleva a cabo bajo radiación "opaca" e infrarroja, preferentemente a presión y diluyendo oxígeno con humos de reciclaje, y añadiendo al combustible de entrada agua/vapor.

5 La combustión es exhaustiva y produce humos que no contienen partículas orgánicas: TOC <1 ppm y hollín no detectable. En el análisis, el carbono está por debajo de los límites de sensibilidad (<0,01 % en peso). También las cenizas residuales en humos, recogidas en un filtro y tamizadas con un ensayo de liberación en agua, dan valores de concentración insignificantes de productos no quemados, cerca del límite de sensibilidad analítica (<0,01 % en peso).

10 Esta patente no da ninguna indicación sobre la distribución del peso submicrométrico de las partículas de ceniza en los humos y tampoco sobre la distribución en número submicrométrica, y aún menos sobre la distribución a diámetros de partícula inferiores a 0,1 micrómetros.

15 De acuerdo con la enseñanza de estas dos patentes, las cenizas entrantes se funden, coalescen en estado fundido y se separan de los humos colapsando en las paredes revestidas con materiales refractarios de la cámara de combustión. Sin embargo, aunque la eficiencia cuantitativa de la separación es alta (> 99 %), la caracterización de los humos que salen de la cámara de combustión se lleva a cabo con un analizador continuo de tipo ELPI, que es un impactador que recopila datos sobre el peso y la distribución en número de la población de partículas (partículas inorgánicas en el caso de esta enseñanza) con respecto a sus diámetros, señala que la distribución de partículas residuales se centra en valores justo por encima del micrómetro (1-3 μm), siendo el límite superior mayor de 7-8 μm , abriéndose la distribución hacia valores inferiores a un micrómetro.

20 Como se ha dicho, en términos de cantidades en peso, la eficiencia de la separación en la cámara de combustión es alta, y la cantidad de partículas residuales en los humos, determinada por las técnicas disponibles para la evaluación del límite de PM 10 en la chimenea, está bastante por debajo de este límite, incluso hasta 1/10 con respecto al límite (Método EPA 201A-Determinación de emisiones de PM10 y PM 2,5 de fuentes estacionarias).

25 El solicitante ha descubierto que la fracción de población submicrométrica en los humos casi no se ve afectada en los procesos descritos en estas dos patentes.

30 El documento EP 2.220.198 describe un proceso de combustión que utiliza una cámara de combustión isotérmica y sin llama a la que se añaden compuestos que tienen una temperatura de fusión inferior o igual a 1.450 K. De esta manera, en los humos, las concentraciones en peso de las partículas que tienen un diámetro inferior a 2,5 μm (PM 2,5) se reducen a valores de aproximadamente 10 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Además, esta patente no da ninguna indicación sobre la distribución en número de las partículas, inferior a 1 μm en los humos.

35 El documento EP 2.227.521 se refiere a un proceso de combustión en una cámara de combustión isotérmica y sin llama en donde los compuestos que tienen una temperatura de fusión inferior o igual a 1.450 K y azufre, o compuestos que contienen azufre, se utilizan como aditivos. En los humos de combustión, al mismo tiempo que PM 2,5, también se reducen las cenizas básicas, transformándose estas últimas en compuestos que ya no son agresivos hacia las paredes de la cámara de combustión y para los equipos de recuperación térmica aguas abajo.

40 Además, esta patente no da ninguna indicación sobre la distribución en número de las partículas en los humos que salen de la cámara de combustión.

45 Sin embargo, la tipología detectada experimentalmente de la distribución en número del tamaño de partícula (más significativa que aquella en peso) obtenida por el analizador ELPI, como se ha dicho anteriormente, no cambia sustancialmente su perfil característico típico.

50 El documento EP 2.227.523 se refiere a un proceso de combustión llevado a cabo en una cámara de combustión isotérmica y sin llama, en donde se usan como aditivos azufre o compuestos que contienen azufre. De esta forma, los humos de combustión de salida ya no son agresivos para aquellas partes de los equipos que entran en contacto con los humos.

55 Además, en esta patente no hay indicación en cuanto a la distribución en número del tamaño de partículas submicrométricas de cenizas en los humos.

60 Por lo tanto, se sintió la necesidad de tener disponible un proceso que, mientras mantiene los rendimientos de los procesos de combustión descritos anteriormente, permita una reducción significativa de la porción de la distribución en número del tamaño de partícula de las cenizas inorgánicas de combustible por debajo de 1 μm durante al menos aproximadamente la mitad, hasta aproximadamente 6-8 veces menos que la inicial, y alcanzando una distribución en número del tamaño de partícula cercana a la del fondo natural, con claras ventajas para la salud humana, para procesos de captura de CO_2 y con una mayor eficiencia de las plantas utilizadas para la limpieza de humos, combinado con una eliminación sustancial de las partículas orgánicas (productos no quemados) en los humos.

- 5 Es un objeto de la presente invención un proceso de oxidación en donde una cámara de combustión se alimenta con un combustible, un comburente y compuestos en forma de agregados coherentes que tienen las siguientes características: valor del módulo de Young $\geq 10^4$ MPa, un tamaño de partícula superior a 75 μm para al menos el 60 % en peso de su distribución granulométrica, los agregados que tienen las características anteriores en la entrada a la cámara de combustión, la cantidad de agregados con respecto a las cenizas de combustible que varían desde ≥ 5 % en peso hasta como máximo 1:1 en peso, siendo la cámara de combustión isotérmica y sin llama.
- 10 La cámara de combustión funciona preferentemente a temperaturas comprendidas entre 1.400 K y 2.200 K, aún más preferentemente 1.500 K - 1.800 K.
- La cámara de combustión funciona preferentemente a presión.
- 15 Las presiones que se pueden usar en la cámara de combustión varían de 103 kPa a aproximadamente 6.000 kPa, preferentemente de 200 kPa a 4.600 kPa, aún más preferentemente de 500 kPa a 3.000 kPa.
- Las cenizas de combustible se determinan después del escape a 600 °C, como se describe por ejemplo en ASTM D3174.
- 20 El comburente es oxígeno, utilizado mezclado con agua, vapor o mezclado con humos de reciclaje, preferentemente con este último, más preferentemente, los humos de reciclaje se toman de los humos que salen de los equipos de recuperación de energía.
- 25 La relación en moles de oxígeno:(agua/vapor) está comprendida preferentemente entre aproximadamente 1:0,4 y aproximadamente 1:3.
- Cuando se utilizan humos de reciclaje mezclados con oxígeno, la cantidad de agua/vapor en los humos es superior al 30 % en volumen. Opcionalmente, se puede añadir agua a los humos de reciclaje. La relación molar de oxígeno: (agua/vapor) en los humos es como se ha definido anteriormente.
- 30 El oxígeno utilizado en el proceso de la invención es oxígeno puro o también oxígeno técnico, es decir, se utiliza un título de oxígeno superior al 80 % en volumen.
- 35 El oxígeno técnico (título > 80 % vol.) se obtiene por destilación criogénica del aire o por absorción diferencial en zeolitas, o por separación con membranas cerámicas a alta temperatura, etc. El oxígeno técnico está disponible en el mercado.
- 40 En el proceso de oxidación de la invención, también se puede usar oxígeno técnico de alta pureza (> 98,5 % en volumen). En general, también se puede usar oxígeno con un título de 92-94 % de VSA (absorción por oscilación al vacío) y 88-92 % de VPSA (absorción por oscilación con presión de vacío). El límite más bajo del título de oxígeno, como se ha dicho, es aproximadamente 80 % en volumen, el complemento hasta 100 está formado por gases inertes y/o nitrógeno. El comburente en el proceso de la invención se usa generalmente en exceso con respecto a la cantidad estequiométrica. Los valores de 1 % a 3 % molar de oxígeno (es decir, oxígeno no convertido), están preferentemente presentes en los humos.
- 45 Por combustibles, se entienden mezclas que contienen al menos una especie oxidable con oxígeno y que producen calor.
- 50 El combustible se alimenta mezclado con agua o vapor, la cantidad de agua/vapor es igual a al menos al 30 % en peso en el combustible.
- 55 En la mezcla con combustible, la cantidad de agua/vapor no es superior al 90 %, preferentemente no más del 80 % en peso con respecto al peso del combustible. Las cantidades de agua añadidas superiores al 90 % en peso pueden reducir significativamente la eficiencia de recuperación térmica.
- Los combustibles que se pueden usar son combustibles líquidos, sólidos, gaseosos.
- 60 Entre los combustibles sólidos, pueden usarse sólidos de hidrocarburos, llevados a fusión/licuefacción por calentamiento, y alimentados como líquidos viscosos.
- 65 Los combustibles sólidos también se pueden gasificar y los gases brutos obtenidos se alimentan a la cámara de combustión de la invención. Como combustibles utilizables en el proceso de la invención, pueden mencionarse, por ejemplo, derivados de azúcares, harinas animales, carbón, desechos industriales de reacciones de neutralización, fracciones de refinería de alto punto de ebullición, betunes y lutitas petrolíferas, desechos de procesamiento de arenas bituminosas, turba, disolventes agotados, brea, en general, residuos y desechos de procesos industriales, incluyendo la fracción residual de residuos urbanos, opcionalmente compuestos por CDR (combustible de residuos).

También se pueden usar emulsiones de combustibles líquidos de origen petrolífero.

Como combustibles gaseosos, también se puede utilizar CH₄, hidrocarburos de bajo peso molecular (por ejemplo, etano, propano, butano), gas de síntesis.

5 La distribución del tamaño de partícula de granulometría de los agregados está determinada, por ejemplo, por ASTM C136-06.

10 El tamaño de partícula del agregado preferentemente no es superior a aproximadamente 900 µm, preferentemente menor o igual a 700 µm, aún más preferentemente menor o igual a 500 µm, lo más preferentemente inferior a 300 µm.

El límite superior del módulo de Young de los agregados puede ser de aproximadamente 10⁶ MPa.

15 Preferentemente, la cantidad alimentada de agregados es ≥10 %, más preferentemente ≥20 % en peso con respecto a las cenizas de combustible.

Los agregados se alimentan a la cámara de combustión por separado del combustible o mezclados con el mismo.

20 Los agregados de acuerdo con la presente invención tienen una alta fuerza de cohesión, como se muestra por los valores del módulo Young. Por lo tanto, los agregados son materiales coherentes. Los agregados de la invención no comprenden polvos o materiales incoherentes que no muestran valores del módulo de Young comprendidos entre los límites indicados anteriormente.

25 El solicitante ha encontrado de manera inesperada y sorprendente que si el combustible ya contiene agregados que tienen un módulo Young dentro de los límites indicados anteriormente, y las cantidades pertinentes en peso con respecto a las cenizas del combustible son iguales o superiores al límite inferior informado anteriormente, no es necesario añadir al combustible los agregados de la invención. Sin embargo, el solicitante ha descubierto que, desde
30 las cantidades indicadas anteriormente, ya que los combustibles alimentados a menudo son intrínsecamente no homogéneos (no reproducibles) con respecto a los agregados contenidos en el combustible.

Los agregados utilizables de acuerdo con la presente invención son minerales que tienen las características mencionadas anteriormente (módulo de Young, distribución granulométrica). Se pueden mencionar sílice, silicatos,
35 silicoaluminatos, óxidos de calcio, óxidos de aluminio, fosfatos alcalinos, etc., por ejemplo.

En el proceso de oxidación de la presente invención, la bentonita se excluye preferentemente entre los agregados utilizables.

40 Los agregados que se usan preferentemente son escorias vítreas procedentes del proceso de combustión de la presente invención, separadas en la parte inferior de la cámara de combustión. Generalmente estas escorias se separan en forma de perlas vítreas que tienen tamaños de algunos milímetros, por ejemplo 2-3 mm, y se someten a una etapa de molienda para obtener la granulometría indicada anteriormente para su uso en el proceso de la
45 presente invención.

Las escorias obtenidas de otros procesos de combustión también pueden usarse siempre que muestren las características mencionadas anteriormente de los agregados de la invención.

50 La cantidad de agregados que ya pueden estar contenidos en las cenizas de combustible se puede determinar mediante difracción de rayos XRF (fluorescencia de rayos X) y los datos obtenidos se procesan con técnicas CQPA (análisis de fase cuantitativa química) para determinar los minerales correspondientes (Pittsburg Coal Conference, Septiembre 2013, Proceedings, Zdenek Klika, I. Kolomaznik "Critical Evaluation of Mineral Contents in Coal using Chemical Quantitative Phase Analysis Method").

55 En el caso de que los valores del módulo de Young de los materiales o de los minerales bajo cribado no estén disponibles de inmediato, se puede usar como indicador cualitativo de las fuerzas cohesivas del agregado, la dureza de la escala de Mohs, bien conocida en mineralogía. Los valores de dureza superiores a 3 en esta escala indican que el módulo de Young está comprendido en los límites informados anteriormente.
60 Por lo tanto, los agregados que tienen una dureza superior a 3 pueden usarse en el proceso de la presente invención.

65 El solicitante ha descubierto de manera sorprendente e inesperada que los materiales, que después de las calcinaciones, muestran un valor de dureza de Mohs superior a 3, pueden usarse como agregados para ser alimentados a la cámara de combustión de la invención, a pesar de que el material de partida tiene una menor dureza de Mohs, por ejemplo comprendido entre 2 y 3 Mohs. La calcinación se lleva a cabo preferentemente a temperaturas superiores a 1.100 K. Los materiales que tienen una dureza comprendida entre 2 y 3 Mohs se someten

a calcinación antes de la adición a la cámara de combustión. Como alternativa, la calcinación también se puede llevar a cabo directamente en la cámara de combustión.

5 En el proceso de la invención, como componentes opcionales, pueden añadirse también compuestos de bajo punto de fusión, preferentemente en forma de sales de bajo punto de fusión y/u óxidos de bajo punto de fusión, y mezclas de los mismos, que tienen una temperatura de fusión inferior a 1.450 K, preferentemente superior a 800 K, en una cantidad expresada como % en peso sobre las cenizas de combustible alimentadas desde cero, preferentemente de aproximadamente 5 % a aproximadamente 10 %. Los ensayos llevados a cabo por el solicitante han demostrado que si estos compuestos de bajo punto de fusión se usan en cantidades superiores al límite anterior, en los humos
10 hay un aumento de la integral de la distribución en número del tamaño de partícula inorgánica submicrométrica.

Como se ha dicho, la cámara de combustión de la invención es isotérmica cuando la temperatura interna del reactor es casi uniforme en todo el volumen del reactor. De acuerdo con la presente invención, dentro del significado de la cámara de combustión isotérmica, está comprendido el reactor casi-isotérmico, de acuerdo con la presente
15 invención, la temperatura en todas las zonas de la cámara de combustión casi-isotérmica varía como máximo $\pm 5\%$ con respecto a la temperatura de combustión base (media). Esto significa que en la cámara de combustión prácticamente no hay zonas significativamente más frías.

Como se ha dicho, la cámara de combustión de la invención es sin llama, es decir, el proceso de combustión tiene lugar en todo el volumen de la cámara de combustión sin formación de un frente de llama.
20

Como ejemplo de reactor isotérmico, véase el documento EP 1.616.129. Como ejemplo de reactor sin llama, véase el documento US 8.453.583 en nombre del solicitante.

25 En el proceso de la invención, el tiempo de residencia del combustible en la cámara de combustión varía preferentemente de 0,5 segundos a 30 minutos, más preferentemente de 2 a 10 segundos. Es posible usar también tiempos más largos, si se desea.

A continuación del fondo de la cámara de combustión, se conecta un recipiente de recogida de las cenizas fundidas que caen en estado líquido en la parte inferior de la cámara de combustión. En el recipiente de recogida se enfrían las cenizas, por ejemplo mediante el uso de un baño de agua, y se transfieren en un estado vitrificado sólido a sedimentadores estáticos.
30

Cuando los humos obtenidos en el proceso de combustión de la invención se utilizan para producir energía por medio de vapor o calor para otras aplicaciones, en la salida de la cámara de combustión, los humos calientes se enfrían mezclándolos con humos de reciclaje fríos (reciclados después de la recuperación térmica), en una relación de humos calientes/humos fríos de modo que la temperatura final de la mezcla gaseosa sea de aproximadamente 1.100 K. La disminución de temperatura así obtenida, por reciclaje estricto de los humos que salen de la recuperación térmica, tiene lugar sin penalizaciones de entalpía del ciclo (operación isoentálpica), y no tiene impacto
35 sobre la energía térmica del vapor producido, puesto que la temperatura de vapor SH (supercalentado) tecnológica máxima aceptable por las turbinas es de 903 K. Por lo tanto, la disminución de la temperatura anterior no implica ninguna penalización de los rendimientos del ciclo de transformación de energía térmica en energía mecánica/eléctrica, y permite en cambio ganar la ventaja neta de utilizar equipos para recuperación térmica mediante intercambio de calor de pared entre humos y agua/vapor, construido con materiales de uso general para la misma operación en plantas de energía convencionales.
40
45

La cámara de combustión está preferentemente revestida con materiales refractarios. Los refractarios utilizados en la cámara de combustión de la invención son, de acuerdo con la técnica anterior, preferentemente aluminios con adición de aproximadamente 10 % de cromo y opcionalmente también aproximadamente 4 % de circonio.
50

Los productos gaseosos netos de los humos de la combustión se pueden eliminar del circuito presurizado pertinente por laminación a presión atmosférica. Cuando se desea recuperar CO₂ de los humos y los humos tienen un contenido de agua/vapor <50 % en volumen, una solución preferida es operar la etapa de neutralización (lavado) a presión.
55

El proceso de la presente invención permite eliminar sustancialmente de los humos las partículas orgánicas (no quemadas) y reducir drásticamente la integral de la distribución en número del tamaño de partícula de los compuestos inorgánicos que tienen un tamaño de partícula inferior a 1 μm . El proceso de la presente invención permite además reducir y simplificar las operaciones unitarias para el humo del postratamiento, como se ha indicado anteriormente.
60

Además, en la cámara de combustión de la presente invención en el intervalo de temperatura preferido, y durante un tiempo de residencia adecuado, preferentemente ≥ 2 segundos, las especies químicas formadas se funden junto con las cenizas incombustibles contenidas en el combustible (mezclas de óxidos) y se someten a coalescencia líquida hasta el punto de colapsar como gotas en las paredes de la cámara de combustión, y se acumulan de manera sustancialmente cuantitativa (> 99 % con respecto a el balance de cenizas) en la parte inferior de la cámara de
65

combustión.

En la presente invención, se ha encontrado que el hollín está ausente como se señala por el análisis de carbono y SEM.

5 Por hollín se entiende un material orgánico combustible en forma de agregados que tienen tamaños desde aproximadamente 10 nm hasta aproximadamente 10 μm , más específicamente de macromoléculas orgánicas que tienen una composición significativamente rica en oxígeno además de carbono e hidrógeno (macromoléculas de hidrocarburos parcialmente degradadas por reacciones de oxidación), residuales en los humos debido a su
10 combustión incompleta.

En el proceso de la invención también se obtiene el efecto de la compresión de la porción de la distribución a la izquierda del pico central de la distribución del peso, establecida alrededor de un valor de 2-4 μm del diámetro de partícula en una representación de la distribución del tamaño de partícula (ponderal) en peso/tamaño de partícula
15 logarítmico.

A nivel cuantitativo, utilizando el analizador ELPI, se encuentra que la fracción de partículas submicrométricas en los humos se reduce de valores de aproximadamente 0,1 mg/Nm^3 , obtenibles de acuerdo con las enseñanzas de la técnica anterior indicadas anteriormente, hasta valores de 0,01 mg/Nm^3 con el proceso de invención.
20

En el proceso de la invención, una porción de partículas opcionalmente presentes que tienen un tamaño de partícula superior a 2-3 μm , al salir de la cámara de combustión, puede eliminarse fácilmente de los humos mediante métodos conocidos y competitivos (ciclones, filtros, filtros electrostáticos secos y húmedos, lavado en húmedo, etc.), mientras que la porción submicrométrica, crítica para los procesos de separación posteriores a la combustión de los humos,
25 no se forma (subproducto), o su formación se reduce en gran medida directamente en la combustión.

Los resultados obtenidos por el solicitante con la presente invención son bastante sorprendentes e inesperados en vista de la técnica anterior sobre cámaras de combustión, puesto que el problema de la reducción de la integral de la distribución en número de las partículas submicrométricas, que son tan perjudiciales para la salud humana como se ha informado anteriormente, nunca se ha tenido en cuenta y/o resuelto. Por lo tanto, en la técnica anterior no había indicaciones sobre cómo resolver este problema.
30

El mismo problema es pertinente también para la recuperación y almacenamiento de CO_2 , puesto que es importante que los humos no contengan una gran cantidad de partículas submicrométricas (véase lo anterior).
35

En la técnica anterior consolidada de cámaras de combustión se sabe que pueden usarse combustibles de diversos tipos, gases, líquidos y sólidos, que pueden contener partículas incombustibles, llamadas cenizas. Estas partículas de ceniza contenidas en el combustible se denominarán en lo sucesivo en el presente documento "cenizas primarias".
40

Las cenizas primarias tienen dos resultados en la cámara de combustión: para una pequeña parte (3-5 % de las cenizas de entrada) se unen a las partículas de combustible parcialmente quemado/no quemado (hollín), para dar cenizas pesadas que se separan de los humos en la cámara de combustión (y también como fallos en las superficies de los equipos de recuperación de energía aguas abajo), mientras que para una parte notable (> 95 %) salen de la cámara de combustión junto con los humos como cenizas volantes. Las cenizas primarias están formadas por partículas que tienen una superficie muy irregular y una forma bastante aleatoria. Sin embargo, pueden representarse dimensionalmente mediante una "esfera equivalente", cuyo diámetro, superficie y volumen se puede definir.
45

Las cenizas primarias tienen una distribución de diámetro muy grande, que varía de 0,01 μm a cientos de micrómetros, determinándose el diámetro con la ayuda de la caracterización por microscopio electrónico de las cenizas contenidas en combustibles comerciales.
50

Las cenizas derivadas/residuales de la combustión del combustible son aquellas sometidas al tratamiento térmico, u opcionalmente al tratamiento químico en la combustión, y es probable que sean diferentes de las de admisión y se denominan "cenizas secundarias".
55

Sin tener en cuenta la pequeña porción que va a las cenizas pesadas, las cenizas secundarias constituyen sustancialmente las cenizas volantes y mantienen la distribución de peso muy grande de sus fracciones en función del diámetro de partícula, de las cenizas primarias.
60

Las operaciones unitarias para la separación de cenizas son muy eficientes (100 %) en partículas que tienen un diámetro > 60-80 μm . La eficiencia disminuye débilmente a medida que disminuye el diámetro, hasta una repentina caída rápida en la eficiencia <5 % en el intervalo de diámetro de partícula entre 1 y 10 μm .
65

Se obtiene así, después del tratamiento posterior del humo con las tecnologías industriales consolidadas, una

distribución de diámetro (representando en las ordenadas la distribución del peso y en las abscisas el logaritmo del diámetro, véanse las Figuras) interrumpida a la derecha para la parte >10 µm, y solo reducida en el intervalo entre unos pocos micrómetros y 10 µm.

- 5 Las separaciones más estrictas por medio de separadores electrostáticos y seguidas por separadores electrostáticos húmedos son efectivas solo en el intervalo de diámetro de partícula de 1 a 10 µm y muy poco por debajo de 1 µm.

10 La distribución en número con un tamaño de partícula inferior a 1 µm, y en particular inferior a 0,1 µm, no se modifica significativamente; en efecto, el valor de peso PM 10 de las cenizas volantes (o el peso de todas las partículas que tienen un diámetro inferior a 10 µm Nm³, (véase el método indicado anteriormente) es diferente del valor de PM 2,5 (partículas que tienen un diámetro inferior a 2,5 µm), ya que este último discrimina el tamaño de partícula en correspondencia con la pérdida de eficiencia de las tecnologías de separación de postratamiento convencionales. En las tecnologías de combustión consolidadas, las partículas de cenizas volantes son tanto orgánicas (hollín, combustible parcialmente quemado) como inorgánicas (óxidos y sales metálicas, no quemados) resultantes de las cenizas volantes que se introducen con el combustible.

15 Los resultados que se pueden obtener con las enseñanzas de las patentes mencionadas anteriormente son descriptivamente diferentes.

20 Hay métodos avanzados disponibles para el muestreo y la caracterización del hollín. El muestreo se lleva a cabo mediante la sonda Andersen, seguido de filtración en paneles de fibra de silicato que tienen un corte de 0,1 µm, seguido por condensación y por la recuperación parcial pero representativa de la fracción que tiene un diámetro en el intervalo de 0,01 - 0,1 µm. La caracterización del hollín se lleva a cabo mediante un microscopio electrónico (SEM) combinado con técnicas de espectroscopia EDX, y utiliza tanto la fuerte diferencia morfológica (cenosferas y plerosferas) de las partículas de hollín con respecto a las cenizas inorgánicas, como los resultados dados por el espectro de carbono X.

25 La caracterización de la partícula de humo llevada a cabo mediante las técnicas descritas anteriormente muestra que la enseñanza del documento USP 8.453.583 da como resultado la desaparición (no detectable) de las cenizas volantes recogidas de las estructuras de partículas típicas del hollín (Carbono negro, Carbono orgánico).

30 Existen métodos de caracterización de polvos que permiten la determinación del carbono total (como una suma de carbono elemental y del carbono de cualquier compuesto orgánico presente), al menos hasta el límite más bajo de la concentración en peso de 0,01 %.

35 Los análisis del carbono residual en cenizas volantes obtenidos de acuerdo con las enseñanzas del documento USP 8.453.583, muestran que es inferior al 0,01 % en peso, confirmando los resultados obtenidos con el microscopio electrónico con el método de caracterización morfológica indicado anteriormente.

40 Para las cenizas inorgánicas, sales y óxidos metálicos, el proceso de combustión de acuerdo con las enseñanzas del documento US 8.453.583 permite retener en la cámara de combustión, mediante coalescencia en estado fundido y separación de los humos, un alto porcentaje de las cenizas que se introducen con el combustible, > 99 % en peso con respecto al total de cenizas entrantes.

45 En cuanto a los metales pesados, los óxidos y sales que coalescen con la masa de cenizas fundidas en las paredes de la cámara de combustión, se obtiene un cambio en la distribución entre los humos y las cenizas fundidas hacia las cenizas fundidas.

50 Sin embargo, aunque el efecto cuantitativo es considerable, el análisis de la distribución en número del tamaño de partícula obtenido por el impactador ELPI muestra que la población de partículas por debajo de 1 µm (la partícula submicrométrica, no extraíble con las técnicas industriales consolidadas) permanece alta.

55 Por ejemplo, a partir de los datos pertinentes para los doce objetivos de impacto ELPI (véase más abajo) en los humos que salen de la cámara de combustión de acuerdo con la presente invención, procesados por ELPI, se dibujan los diagramas mostrados en las figuras adjuntas a la presente invención.

60 Para una mejor comprensión de los resultados de la presente invención, vale la pena comparar los resultados con los ejemplos de referencia llevados a cabo por el solicitante para evidenciar los resultados sorprendentes e inesperados de la presente invención. En la práctica, considerando también los ejemplos que se presentan a continuación, debe tenerse en cuenta que los ejemplos de referencia son ejemplos comparativos (internos) llevados a cabo por el solicitante para mostrar las ventajas obtenidas con la presente invención también con respecto a la técnica anterior en donde de todos modos no se mencionaba el problema técnico de la presente invención.

65 En el ejemplo de referencia 1, llevado a cabo de acuerdo con las enseñanzas del documento US 8.453.583, aunque se obtienen altos rendimientos de cenizas retenidas en la cámara de combustión en forma de escorias fundidas, la parte izquierda de la distribución en número (submicrométrica), del tamaño de partícula muestra una forma curva

(Fig. 1B) que no es diferente de la obtenida en los procesos de combustión convencionales. En particular, la mayor parte de la población de partículas está a la izquierda de 1 μm . Para una comparación debe considerarse que, en el "fondo natural", la integral de la distribución en número de los micropolvos para la población que tiene un diámetro en el intervalo de 0,007-0,1 μm está comprendida entre 3.000 y 20.000 partículas/ cm^3), en la práctica no ha

5 cambiado. Como ya se ha dicho, las enseñanzas de la técnica anterior tienen un efecto sobre la cantidad de peso de las cenizas en los humos, pero no funcionan (no son efectivas) para reducir la parte a la izquierda de la distribución en número del tamaño de partícula, como lo demuestra la distribución en número de las partículas submicrométricas.

10 El ejemplo 2 se lleva a cabo en las mismas condiciones que el ejemplo 1 pero añadiendo a la cámara de combustión la sal sulfato de potasio de bajo punto de fusión.

La reducción de la concentración en peso es significativa. La mayoría de los metales pesados se separan de los humos y preferentemente se acumulan en escorias líquidas recuperadas en el fondo de la cámara de combustión.

15 Sin embargo, la población en número (Fig. 2B) con un tamaño de partícula entre 0,1 y 1 μm sigue siendo muy rica.

De acuerdo con una interpretación no vinculante del solicitante, cuando a una cámara de combustión se añade un compuesto de bajo punto de fusión con el combustible, se obtiene un ensanchamiento de la zona de la cámara de combustión activa para la coalescencia de partículas, y esto lleva a una reducción de la concentración teóricamente

20 activa de cada individuo de la población de partículas, pero solo hasta un límite por encima del cual el compuesto de bajo punto de fusión que tiene una presión de vapor más alta reforma las partículas secundarias, es decir, individuos submicrométricos de la población de partículas, en la salida de la cámara de combustión durante la etapa de enfriamiento de humos.

25 De hecho, existe evidencia experimental sobre la tendencia de los vapores de especies inorgánicas (óxidos y sales) a dar fenómenos de sobresaturación en el estado molecular del vapor. Por lo tanto, estos vapores salen de la cámara de combustión con los humos, en particular en el caso de especies químicas solubles en agua, alimentadas a la cámara de combustión en solución acuosa (es decir, alimentadas a la cámara de combustión en el estado molecular).

30 Los ensayos llevados a cabo en una cámara de combustión piloto de potencia térmica (MWth) de 3 MW muestran la ausencia de coalescencia y de separación/precipitación en la cámara de combustión de escorias líquidas de óxidos y sales solubles en agua que tienen temperaturas de fusión comprendidas entre 600 y 1.200 K alimentados en solución acuosa. Como un ejemplo adicional, algunos ensayos en la misma cámara de combustión de 3 MWth,

35 llevados a cabo con combustible auxiliar y sal de cloruro de sodio (Tf 830 °C) alimentados en solución acuosa junto con sulfitos para generar SO_2 en el entorno de reacción y para transformar cuantitativamente el cloruro en sulfato (Tf 850 °C), han producido, invariablemente, humos con un contenido en polvo del orden de docenas de g/Nm^3 en base seca de humo, esto es, todo el material de entrada está en los humos de salida.

40 Este fenómeno se ilustra en el ejemplo de referencia 3, que muestra en apoyo de la interpretación explicada anteriormente, y dentro de las limitaciones ya mencionadas, el efecto del desplazamiento progresivo de la composición de cenizas residuales de valores muy cercanos a los de las cenizas que se introducen en la cámara de combustión, a composiciones enriquecidas en los compuestos añadidos de bajo punto de fusión además de las estequiométricas (cenizas + compuestos de bajo punto de fusión).

45 Se ha encontrado de manera sorprendente e inesperada que en el proceso de la invención la presión aplicada en la cámara de combustión puede influir en la reducción de la integral de la distribución en número de la población de partículas submicrométricas, aunque la gran sobresaturación de los humos por sales y óxidos metálicos desalentaría seguir este camino.

50 El ejemplo 4 se llevó a cabo en las condiciones del ejemplo de referencia 1 pero usando una presión de 12 barg (13 bares absolutos) añadiendo los agregados de acuerdo con la invención (en este caso, los agregados son los contenidos en las cenizas). La reducción de la concentración de peso de ceniza en los humos es aún más significativa. El diagrama de distribución en número (Fig. 3B) se obtiene sin corrección por las pérdidas de finos.

55 Después de la corrección, en el diagrama en número las fracciones de partículas entre 0,01 y 0,1 micrómetros (aproximadamente 100.000 y 150.000 $1/\text{cm}^3$, respectivamente), subirán de nuevo, sin embargo, sin mostrar la tendencia descrita en el ejemplo de referencia 1. De hecho, una tendencia con un máximo no está excluida, ya que esta está constantemente presente con la variación de la composición de cenizas en el combustible alimentado.

60 En el diagrama de distribución de peso/tamaño de partícula logarítmico se observa que la cantidad de población de partículas que tiene un diámetro comprendido entre 0,1 y 1 μm disminuye significativamente, pero sigue siendo notable.

65 Como ya se ha dicho, el solicitante ha encontrado de manera sorprendente e inesperada que al añadir o "sembrar" el combustible, por separado o mezclado, con los agregados de acuerdo con la presente invención, es decir, módulo de Young $>10^4$ MPa, se obtiene una reducción de las partículas submicrométricas de tal manera que el valor máximo

de la integral de la distribución en número no excede 100.000 - 150.000 partículas/cm³ en base seca de humos.

5 En el ejemplo 5, aplicando una presión de 12 barg y añadiendo al combustible como % en peso con respecto a las cenizas producidas por la cámara de combustión de la invención, con un 0,6 % de escorias vitrificadas molidas en forma gruesa con un molino de rodillos (diámetro de partícula >75 µm para 60 % de partículas, diámetro máximo <600 µm), se obtienen el diagrama de distribución de peso (Fig. 4A) y diagrama de distribución en número (Fig. 4B). El diagrama de la Fig. 4B muestra que la integral de la distribución en número de las partículas en los humos obtenidos en este ejemplo casi no está muy lejos de la del fondo natural y, además, las partículas están formadas predominantemente por metales alcalinotérreos y aluminatos de silicio, por lo tanto, también la composición de partículas está cerca de los polvos del fondo natural.

De acuerdo con una interpretación del solicitante, incluso si no es vinculante y no limita la invención, se supone que en la cámara de combustión la fase lenta de la coalescencia de líquidos/vapores será la fase browniana.

15 Se sabe que el parámetro D de difusión browniana tiene dos intervalos con dos tendencias diferentes, dichos dos intervalos se distinguen por:

$$D_p \gg \lambda$$

$$D_p \ll \lambda$$

20 D_p es el diámetro de partícula hipotético bajo examen y λ la trayectoria media libre de la partícula de acuerdo con la ecuación de Knudsen,

$$Kn = \lambda/D_p.$$

25 Cuando D_p >> λ, el parámetro de difusión browniano D es una función de 1/D_p, es decir, como el número de núcleos es una función f(D), la masa implicada en los fenómenos de coalescencia es una función f(D²). Cuando D_p << λ, D es una función 1/D_p², y la masa es una función f(D_p).

30 En otras palabras, cuando D_p >> λ, los fenómenos son rápidos, con captura a través de la superficie, es decir, las partículas relativamente más grandes actúan como carroñeros de las moléculas pequeñas.

Cuando D_p << λ, los fenómenos de crecimiento del tamaño de partícula son lentos.

35 Esto explicaría también los notables fenómenos de sobresaturación, dependiendo de los tiempos de residencia de los humos en la cámara de combustión (unos segundos).

De la teoría de Knudsen, el parámetro λ de Stokes disminuye a medida que aumenta la presión.

40 Por lo tanto, la presión no actúa sobre los fenómenos de coalescencia para D_p << λ, pero en realidad amplía la región de partículas que tienen un tamaño D_p en donde los fenómenos de coalescencia son rápidos.

La siembra con cenizas que tienen un módulo de Young en los límites informados anteriormente introduce núcleos (los agregados de la invención) que ya tienen D_p >> λ, y actúa de la misma manera.

45 Como se ha dicho, los agregados de la invención pueden obtenerse a partir de óxidos y sales estructuralmente frágiles, que tienen un módulo Young en los límites mencionados anteriormente, triturados con las técnicas habituales para obtener la granulometría indicada anteriormente, dichos agregados en las condiciones de la cámara de combustión de la invención se fracturan (rompen) por expansión térmica, de forma muy intensa y repetida, debido al efecto combinado de la temperatura y de su fragilidad intrínseca como lo muestran los valores del módulo elástico.

50 Se prefiere la adición de escorias vítreas producidas en el fondo de la cámara de combustión, ya que esto es muy eficiente (bajas concentraciones de adición), y como no aumentan (cierran el equilibrio en las cenizas de entrada) la cantidad de escorias vítreas producidas que hay que eliminar.

55 De esta manera, es posible obtener los efectos de los aditivos de bajo punto de fusión, que es un aumento del volumen de la cámara de combustión que implica partículas en estado líquido que pueden coalescer sin los efectos negativos del aumento de vapor/partículas pequeñas de líquido.

Como ya se ha dicho, pueden estar ya presentes óxidos/sales/gránulos intrínsecamente frágiles en el combustible.

60 En el caso de los combustibles fósiles, biomasas, residuos que contienen una carga inerte apreciable, una caracterización exhaustiva para determinar las propiedades mineralógicas de las cenizas presentes en el

combustible permite establecer la cantidad de agregados a añadir.

Los resultados obtenidos en la reducción de la integral de la distribución en número del tamaño de partícula inorgánica son independientes de la composición química de las cenizas de los combustibles alimentados a la cámara de combustión (como, por ejemplo, las cenizas de biomasa basadas en fosfato), y a partir de la composición (sal u óxido metálico) de los agregados, siempre que el agregado tenga las características definidas de acuerdo con la presente invención.

El proceso de la invención permite pilotar el fenómeno de coalescencia en estado fundido, sobre la variación de la composición química de las cenizas de entrada, y favorecer la retención de cenizas en la cámara de combustión en varios casos de composiciones de cenizas, con el fin de mantener una alta eficiencia de la retención de cenizas en la cámara de combustión, y para transportar en las cenizas fundidas separadas en la parte inferior de la cámara de combustión la mayor cantidad posible de metales pesados que se introducen con el combustible.

Otro objeto de la presente invención son los gases de escape que se pueden obtener con el proceso de la invención.

Más específicamente, los humos de la invención se caracterizan por tener una ausencia sustancial de partículas orgánicas de humo (TOC, carbono orgánico total), siendo su concentración en peso residual, determinadas como carbono, inferior a 0,01 mg/Nm³ en base seca de humo, y el valor de la integral de la distribución en número de las partículas que tienen un diámetro inferior a 1 µm, inferior a 650.000, preferentemente inferior a 300.000 y aún más preferentemente inferior a 200.000 (1/cm³ es decir, número de partículas/cm³); de las partículas que tienen tamaños inferiores a 0,1 µm que son inferiores a 400.000, más preferentemente inferiores a 200.000, aún más preferentemente inferiores a 120.000;

cuando se usa el siguiente ensayo: en una cámara de combustión térmica isotérmica y sin llama de 3 MW, que opera a una presión de 13 bares absolutos (12 bares relativos) a la temperatura de 1430 °C alimentando carbón como combustible y oxígeno al 90 % en volumen como comburente, en los humos que salen de la cámara de combustión, estando el oxígeno presente a una concentración del 3 % en volumen, alimentándose el carbón como una suspensión al 35 % en peso en agua, alimentándose el oxígeno mezclado con los humos de reciclaje que contienen 55 % en volumen de vapor, y que son la parte integral de la distribución en número determinada con el impactador ELPI.

Los humos obtenibles con el proceso de la invención muestran un valor de la integral de la distribución en número de las partículas inorgánicas que tienen un diámetro inferior a 0,1 micrómetros de 120.000 en un diagrama que tiene en las ordenadas las partículas/cm³ y en las abscisas, el logaritmo del diámetro de partícula en µm, no se pueden obtener por ningún proceso conocido de la técnica anterior.

Como se ha dicho, con el proceso de combustión de la presente invención, una eliminación sustancial:

- de las partículas orgánicas de los humos se obtiene combinado con la reducción a concentraciones en peso muy bajas, inferior a 0,01 mg/Nm³ en base seca de humo (determinadas como carbono),
- de la fracción de cenizas inorgánicas que tienen tamaños de partícula inferiores a 1 µm o, más correctamente, con la reducción de la integral de la distribución en número del tamaño de partícula inorgánica (diámetro) siendo posible alcanzar una distribución en número que se aproxima a la distribución en número del tamaño de partícula inorgánica del fondo natural.

Más preferentemente, la presente invención permite obtener la reducción de la integral de la distribución en número de la fracción de las partículas inorgánicas que tienen tamaños de partícula por debajo de 1 µm a aproximadamente la mitad con respecto a la distribución en número por debajo de 1 µm obtenible con los ejemplos de referencia, que son ensayos comparativos internos llevados a cabo por el solicitante, siendo posible alcanzar también valores aproximadamente 6-8 veces más bajos, es decir, obtener una distribución en número casi acercándose a la distribución en número del tamaño de partícula inorgánica del fondo natural, y con respecto a la distribución en número de partículas que tienen un diámetro inferior a 0,1 micrómetros, y una reducción de 5-6 veces menor, con respecto a los ejemplos de referencia adjuntos al presente documento.

Ejemplos

Caracterización

Determinación de las cenizas de combustible

La determinación de las cenizas se llevó a cabo de acuerdo con el ensayo ASTM D3174, o con cualquier método de pirólisis conocido para esta determinación llevado a cabo a la temperatura de aproximadamente 600 °C.

Determinación de metales pesados

La determinación de los metales pesados presentes en los combustibles se llevó a cabo sobre las cenizas obtenidas

de los combustibles, mediante técnicas de plasma, por ejemplo ICP-OES.

Determinación de la temperatura de fusión

5 La temperatura de fusión se determinó de acuerdo con el ensayo ASTM D 1857-87.

Determinación de la granulometría del agregado

10 La determinación de la granulometría de los agregados se llevó a cabo mediante el método ASTM C136-06.

Determinación de la cantidad de agregados en las cenizas de combustible

15 La determinación se llevó a cabo mediante difracción de rayos XRF (fluorescencia de rayos X) y los datos obtenidos se procesaron con técnicas CQPA (Análisis de fase cuantitativa química) para reconstruir el componente mineral.

Análisis de hollín

20 El análisis se llevó a cabo muestreando los humos con la sonda Andersen, seguido de filtración en paneles de fibra de silicato que tienen un tamaño de corte de 0,1 µm, después por un etapa de condensación y recuperación final de la fracción de partículas que tienen un diámetro de 0,01 – 0,1 µm. La caracterización se llevó a cabo mediante microscopio electrónico (SEM), combinado con técnicas espectroscópicas EDX, y se basa en la diferencia morfológica neta (cenosferas y plerosferas) (diámetro mínimo de partículas detectable por medio del microscopio electrónico: 10-50 nm) de las partículas de hollín con respecto a las de las cenizas inorgánicas, y en el espectro de carbono X (límite de sensibilidad 0,01 % en peso).

Determinación del módulo de Young en los agregados

30 El módulo de Young se determinó con el método ASTM E1876-09.

35 El análisis de las distribuciones de partículas en peso y en número en los humos se llevó a cabo mediante el analizador continuo de polvos (impactador) ELPi® (Dekati®). El analizador tiene 12 canales para clasificar los polvos en función de su diámetro de partícula Dp. El método permite obtener gráficos que informan sobre las curvas de las distribuciones típicas ponderales y en número al variar el diámetro de partícula en el intervalo de 0,007 µm hasta 10 µm. Las fracciones superiores a 10 µm son "cortadas" por un ciclón que opera en los humos muestreados, situado en la entrada del analizador ELPi. El analizador cuenta con 12 canales para el análisis del tamaño de partícula. Se muestra a continuación en el presente documento el punto central de cada uno de los 12 canales.

Can1	Can2	Can3	Can4	Can5	Can6	Can7	Can8	Can9	Can10	Can11	Can12
0,01	0,03	0,06	0,09	0,15	0,26	0,38	0,61	0,95	1,60	2,39	3,99

40 Por ejemplo, el primer canal, Can1, tiene un punto central de 0,01 µm, y tiene un corte de partículas de 0,007 a 0,015 µm; El canal Can12 tiene un valor central de 3,99 y recoge partículas hasta el límite superior de 10 µm.

45 El peso y la distribución en número del diámetro de partícula se obtuvo mediante un software especializado (software ELPi).

50 Después del analizador ELPi, para tener un escaneo fino de las partículas más pequeñas, de 0,06 a 0,007 µm (0,007 es el límite de sensibilidad más bajo del tamaño de partícula del impactador ELPi) se puso el instrumento DMA (ISAIE).

55 En los gráficos mostrados en lo sucesivo en el presente documento se representa gráficamente la distribución en peso/número (ordenadas) se frente al logaritmo del diámetro de partícula en µm (abscisas). Más en detalle, en los diagramas, las ordenadas muestran las concentraciones de cenizas [mg/Nm³] en el caso de la distribución en peso, el número de partícula/cm³, [1/cm³] en el caso de la distribución en número.

Ejemplo de referencia A

En este ejemplo, se da una representación práctica del significado de "fondo natural".

60 La atmósfera del aire de la tierra contiene partículas submicrométricas como condición natural. Esta población de partículas submicrométricas se conoce comúnmente como "fondo natural". Tanto la distribución en número como el valor de la integral de la distribución en número submicrométrica se ve afectada por las condiciones climáticas y por

las actividades humanas.

La Fig. 0-A muestra un diagrama típico de la distribución en número del tamaño de partícula del fondo natural, determinada usando el impactador ELPI. El diagrama no se ha corregido para la cantidad de partículas más pequeñas presentes (finos).

Ejemplo de referencia 1

El proceso de combustión se llevó a cabo de acuerdo con el documento US 8.453.583 en una planta piloto que operaba a una potencia térmica de 3 MWth. Los humos de reciclaje después de la recuperación de energía, mezclados con comburente de oxígeno, se alimentaron a la cámara de combustión. Los humos contenían una cantidad de agua en estado de vapor igual al 55 % en volumen. La relación en volumen de oxígeno/humos de reciclaje fue 1/2. El oxígeno se alimentó en una cantidad en exceso tal como para tener un porcentaje de oxígeno en los humos de salida de aproximadamente el 3 % en volumen. La cámara de combustión funcionaba a una presión de 3 barg y a una temperatura de 1430 °C.

Se tomaron muestras de humos aguas abajo de la cámara de combustión, después de templar con los humos de reciclaje fríos.

Como combustible se utilizó un carbón de antracita ucraniano (análisis mostrado en el Ejemplo 4), molido en húmedo en un molino de barras, y bombeado con una bomba helicoidal como una suspensión que contiene 30-31 % en peso de agua a la presión de las boquillas de inyección de combustible de la cámara de combustión. El caudal de carbón pulverizado seco fue de 400 kg/h.

El muestreo de los polvos residuales en los humos que salían de la cámara de combustión mostró un contenido de carbono por debajo del límite analítico (<0,01 % en peso), y que las partículas de hollín estaban ausentes, como lo demuestra la microscopía electrónica.

En la muestra de los humos de combustión, el valor medio de la concentración en peso total de sólidos en un periodo de muestreo de 20 min fue de 304 mg/Nm³ en base seca de humo, determinada por el impactador ELPI en la salida de la cámara de combustión en el mismo periodo de muestreo. El valor de la concentración total de sólidos se ha analizado en paralelo a través del método de filtración por lotes de los humos, sonda Andersen y filtración en filtros de recogida de fibra cerámica, usando el mismo tiempo de muestreo.

Las figuras 1A y 1B representan, respectivamente, la distribución en peso (concentración mg/Nm³) y la distribución en número (número de partículas/cm³) de las partículas en los humos de combustión.

En el postratamiento de los humos, la filtración en un filtro de mangas y luego en un filtro electrostático, seguido de condensación de vapor, conduce a un valor final de la concentración total de partículas <10 mg/Nm³ en base seca de humo, que está dentro de los límites de emisión, debido a la eliminación de las partículas que tienen un diámetro superior a 2,39 µm (correspondiente a los canales 11 y 12 de ELPI) y a la notable disminución de la población de partículas que tiene un diámetro entre 0,95 y 1,6 µm (canales 9 y 10 de ELPI).

El diagrama de la Fig. 1B (distribución en número) muestra que la población de partículas que tienen un diámetro comprendido entre 1 y 0,01 µm permaneció sustancialmente inalterada.

Ejemplo de referencia 2

Este ejemplo se llevó a cabo de acuerdo con las enseñanzas del documento EP 2.220.198.

Se repitió el ejemplo de referencia 1, pero añadiendo la sal de sulfato de potasio de bajo punto de fusión (punto de fusión 1.340 K) en una cantidad igual al 3 % en peso calculada con respecto a las cenizas de combustible. La cantidad de cenizas de combustible fue de aproximadamente 0,5 % con respecto al peso del carbón seco.

El periodo de muestreo de humos fue de 25 min. En paralelo, se llevó a cabo un muestreo de humos también en un filtro de fibra cerámica. El carbono encontrado en los polvos de los humos muestreados estaba por debajo del límite analítico (<0,01 % peso) y el hollín estaba ausente.

El valor promedio de la concentración en peso total de las partículas en los humos fue de 8,3 mg/Nm³ en base seca de humo, promedio entre valores puntuales que varían de 2,3 a 20,8 mg/Nm³ en base seca de humos.

El diagrama de distribución en peso de partículas de la Fig. 2A muestra una reducción significativa de las partículas con respecto a la Fig. 1A (hágase referencia a la escala de ordenadas). La mayoría de los metales pesados se separaron de los humos y preferentemente se acumularon en las escorias líquidas recogidas en el fondo de la cámara de combustión.

El diagrama se obtuvo sin corrección por pérdida de partículas. Después de la corrección, en el diagrama las fracciones en número entre 0,01 y 0,1 subieron nuevamente, sin embargo, sin mostrar la tendencia descrita en el ejemplo 1.

- 5 El diagrama de la distribución en número de la población de partículas de la Fig. 2B muestra que la población de partículas que tienen un diámetro comprendido entre 0,1 y 1 μm todavía era muy abundante.

10 El análisis EDX de las cenizas de humo recogidas en el filtro cerámico evidenció un enriquecimiento constante de sodio, potasio, y magnesio en las cenizas que salen de la cámara de combustión con respecto a la composición de entrada de las cenizas de carbón + aditivo.

Ejemplo de referencia 3

15 El ejemplo se llevó a cabo utilizando la misma planta piloto de oxicomustión del ejemplo 1. La presión se mantuvo a 3 barg pero la temperatura se redujo a 1.350 °C. El combustible utilizado fue gasóleo alimentado a un caudal de 245 kg/h. A la cámara de combustión, se alimentó una solución acuosa de NaCl de 23 g/l en donde el azufre en forma de polvo humectable a una concentración de 12 g/l se había dispersado también anteriormente, a un caudal de 378 l/h.

20 Se observó que el analizador ELPI rápidamente se saturaba/obstruía. Los valores obtenidos no parecen ser, por lo tanto, significativos.

25 De manera análoga, el muestreo por lotes en el filtro cerámico se vio influenciado negativamente por la obstrucción del filtro cerámico que tuvo lugar después de unos minutos desde el inicio del flujo de humos muestreados. Se obtuvo un valor de la concentración total de polvo de aproximadamente 30 g/Nm³ en base seca de humo. El intercambio térmico en la planta de recuperación térmica empeoró rápidamente hasta el punto de que el ensayo tuvo que ser interrumpido.

30 Una inspección visual de la cámara de combustión, después del ensayo, no mostró ninguna evidencia de depósitos de escorias líquidas (fácilmente reconocibles como depósitos blancos) en las paredes revestidas con materiales refractarios.

35 Sobre la base del equilibrio de sodio, fue posible establecer que la cantidad de cenizas que salía de la cámara de combustión era sustancialmente igual a la entrada de la cámara de combustión, es decir, la fracción retenida dentro de la cámara de combustión fue insignificante.

40 Considerando que la presión de vapor de Na₂SO₄ a 1350 °C es equivalente a una cantidad del compuesto del orden de docenas de miligramos/Nm³ en base seca de humo, se concluyó que tuvo lugar un notable fenómeno de sobresaturación de vapores de sulfato de sodio en los humos que salían de la cámara de combustión.

Ejemplo 4

45 Se repitió el ejemplo de referencia 1 pero, para atemperar la cámara de combustión, los humos de reciclaje se sustituyeron con vapor y la presión del proceso se incrementó a 12 barg.

El combustible utilizado fue carbón que contenía una cantidad en peso de cenizas (obtenida por calcinación) igual al 18 %. La composición de cenizas (% en peso) obtenida por análisis XRF (fluorescencia X) fue la siguiente:

SiO ₂	58,9
Al ₂ O ₃	22,5
Fe ₂ O ₃	5,4
S (como SO ₃)	3,3
CaO	3,0
K ₂ O	2,8
MgO	2,0
TiO ₂	0,7
P ₂ O ₅	0,5
Na ₂ O	0,5

50 El alto contenido de sílice permite concluir, incluso sin realizar la reconstrucción CQPA de los minerales originales, que las cenizas contienen agregados que tienen una dureza de Mohs superior a 3 en una cantidad superior al 20 % en peso sobre la cantidad total de cenizas.

5 A partir de la caracterización ELPI, mediada en un periodo de muestreo de 68 min, se obtuvo que el valor medio de la concentración total de los polvos era de $1,06 \text{ mg/Nm}^3$ en base seca de humo, como promedio entre valores de punto temporal que varían de $0,8$ a $1,4 \text{ mg/Nm}^3$ en base seca de humos. Esta figura estaba de acuerdo con el valor obtenido de la filtración por lotes en un filtro cerámico (en una recogida de muestras de 68 minutos; con muestreo prolongado para permitir en paralelo recoger suficiente material en el filtro de fibra cerámica).

10 Al comparar las curvas de distribución obtenidas en el ejemplo de referencia 2 con las del ejemplo 4, se deduce que, con respecto a la curva de distribución de peso de la Fig. 2A, la de la Fig. 3A se reduce significativamente en el intervalo de $0,1 \mu\text{m}$ y la escala completa ($10 \mu\text{m}$).

El diagrama se obtuvo sin corrección por pérdida de finos. Después de la corrección, las fracciones entre $0,01$ y $0,1$ aumentaron nuevamente sin mostrar la tendencia descrita en el ejemplo 1.

15 En la Fig. 3B, que representa la distribución en número, se observa que la integral de la distribución en número de las partículas que tienen un diámetro comprendido entre $0,1$ y $1 \mu\text{m}$ disminuye más de la mitad con respecto a la Fig. 2B, pero sigue siendo bastante alta.

Ejemplo 5

20 Se repitió el ejemplo de referencia 4 pero a la suspensión de carbón, se le añadieron los siguientes aditivos:

- escorias vitrificadas, recogidas en el fondo de la cámara de combustión en un ensayo de combustión previa. La cantidad correspondiente fue igual a $14,8\%$ en peso con respecto a la de las cenizas de carbón (aproximadamente $2,7\%$; en peso con respecto al carbón seco),
- 25 - el compuesto de bajo punto de fusión del ejemplo 2, en la misma cantidad mostrada en el Ejemplo 2 con respecto a las cenizas de combustible.

El módulo de Young de las escorias vitrificadas fue de aproximadamente $6 \times 10^4 \text{ MPa}$.

30 Las escorias vítreas se trituraron previamente para obtener una granulometría comprendida entre 100 y $500 \mu\text{m}$ para al menos el 70% en peso de la distribución granulométrica.

35 La adición de escoria a la suspensión de carbón se llevó a cabo en el mezclador-homogeneizador, aguas arriba de la bomba de alimentación de suspensión a las boquillas de la cámara de combustión, a razón de $10,5 \text{ kg/h}$ (como se ha dicho anteriormente, $14,8\%$ en peso con respecto a las cenizas de carbón).

40 Se evaluaron los valores en la chimenea de las distribuciones de partículas integrales y de peso (después del tratamiento posterior de los humos). La curva de distribución de peso se representa en la Fig. 4A y la curva de distribución en número en la Fig. 4B.

Una comparación entre las curvas de distribución de peso de las Figs. 3A y 4A muestran una fuerte reducción de la concentración total de las partículas en esta última.

45 A partir del diagrama de distribución en número 4B la integral se obtuvo de la integral en número hasta $1 \mu\text{m}$ y hasta $0,1 \mu\text{m}$. Se calculó que este valor era aproximadamente $1/3$ con respecto al correspondiente del diagrama de la Fig. 3B.

Se observó que el valor de la integral de la distribución en número de partículas no estaba muy lejos del fondo natural de la Fig. 0-A.

REIVINDICACIONES

1. Proceso de oxidación en donde una cámara de combustión se alimenta con un combustible que produce cenizas cuando se quema, un comburente y compuestos en forma de agregados coherentes que tienen las siguientes características: módulo de Young $\geq 10^4$ MPa, tamaños de partícula que tienen una distribución granulométrica en donde los tamaños de partícula son superiores a 75 μm para al menos el 60 % en peso de la distribución granulométrica, teniendo los agregados las características anteriores cuando se introducen en la cámara de combustión, variando la cantidad de agregados en las cenizas de combustible desde ≥ 5 % en peso hasta como máximo 1:1 en peso, siendo la cámara de combustión isotérmica y sin llama, siendo el comburente oxígeno con un título superior al 80 % en volumen, siendo el complemento hasta el 100 % gases inertes y/o nitrógeno.
2. Proceso de oxidación de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la cámara de combustión funciona a temperaturas comprendidas entre 1.400 K y 2.200 K.
3. Proceso de oxidación de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en donde la cámara de combustión funciona a una presión que varía de 103 kPa a 6.000 kPa.
4. Proceso de oxidación de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1-3, en donde el oxígeno está mezclado con agua o vapor o mezclado con humos de reciclaje.
5. Proceso de oxidación de acuerdo con la reivindicación 4, en donde la mezcla de oxígeno con agua o vapor tiene una relación en moles de oxígeno:(agua/vapor) comprendida entre 1:0,4 y 1:3.
6. Proceso de oxidación de acuerdo con la reivindicación 4 o 5, en donde en los humos de reciclaje utilizados mezclados con oxígeno la cantidad de agua/vapor es superior al 30 % en volumen y la relación molar de oxígeno:(agua/vapor) está comprendida entre 1:0,4 y 1:3.
7. Proceso de oxidación de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1-6, en donde el combustible está mezclado con agua/vapor, siendo la cantidad de agua/vapor en la mezcla, en porcentaje con respecto al peso del combustible, de al menos 30 % y no mayor de 90 %.
8. Proceso de oxidación de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1-7, en donde el combustible es un combustible líquido, sólido o gaseoso y se selecciona entre sólidos de hidrocarburos, llevados a fusión/licuefacción por calentamiento, y se alimenta como líquidos viscosos, biomasas, harinas animales, carbón, desechos industriales de reacciones de neutralización, fracciones de refinería de alto punto de ebullición, betunes y lutitas petrolíferas, residuos de procesamiento de arenas alquitranadas, turbas, disolventes agotados, breas, residuos y desechos de procesos industriales, emulsiones de combustibles líquidos de origen petrolero, hidrocarburos líquidos, metano, hidrocarburos de bajo peso molecular, gas de síntesis.
9. Proceso de oxidación de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1-8, en donde los agregados tienen tamaños de partícula no superiores a 900 μm .
10. Proceso de oxidación de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1-9, en donde el módulo de Young de los agregados no es superior a 10^6 MPa.
11. Proceso de oxidación de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1-10, en donde los agregados se alimentan a la cámara de combustión por separado del combustible o mezclados con el mismo.
12. Proceso de oxidación de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1-11, en donde los agregados están contenidos en el combustible.
13. Proceso de oxidación de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1-12, en donde los agregados son minerales.
14. Proceso de oxidación de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1-13, en donde los agregados son escorias vítreas procedentes de procesos de combustión separadas en el fondo de la cámara de combustión.
15. Proceso de oxidación de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1-14 en donde, como agregados, se usan materiales con una dureza superior a 3 de acuerdo con la escala de Mohs.
16. Proceso de oxidación de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1-15, en donde el combustible tiene un tiempo de residencia en la cámara de combustión que varía de 0,5 segundos a 30 minutos.
17. Proceso de oxidación de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1-16, en donde la cámara de combustión está revestida con material refractario.

18. Gases de escape obtenidos con el proceso de las reivindicaciones 1-17, en donde la cámara de combustión es una cámara de combustión térmica de 3 MW que funciona a una presión de 13 bares absolutos a la temperatura de 1430 °C y se alimenta con carbón como combustible y oxígeno al 90 % en volumen como comburente, en donde en los humos que salen de la cámara de combustión, el oxígeno está presente en una concentración del 3 % en volumen, alimentándose el carbón como una suspensión con agua al 35 % en peso, alimentándose el oxígeno mezclado con los humos de reciclaje que contienen 55 % en volumen de vapor, estando los gases de escape caracterizados por tener un contenido total de carbono orgánico (TOC) determinado como carbono, inferior a 0,01 mg/Nm³ en base seca de humo y tener cenizas inorgánicas con tamaños de partícula <1 µm, teniendo las partículas con tamaños <1 µm una integral de la distribución en número que es inferior a 650.000/cm³, y tamaños de partícula <0,1 µm, teniendo las partículas con tamaños <0,1 µm una integral de la distribución en número que es inferior a 400.000/cm³; determinándose la integral de la distribución en número con un analizador que recopila datos sobre el peso y la distribución en número de la población de partículas con respecto a su diámetro, como un impactador eléctrico de baja presión ELPI® (Dekati®).

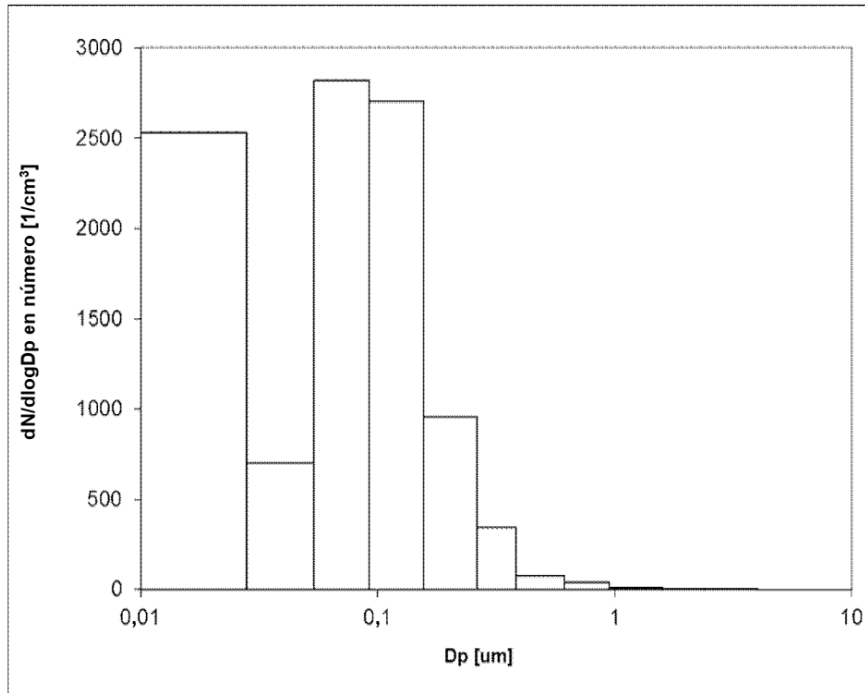


FIG. 0-A

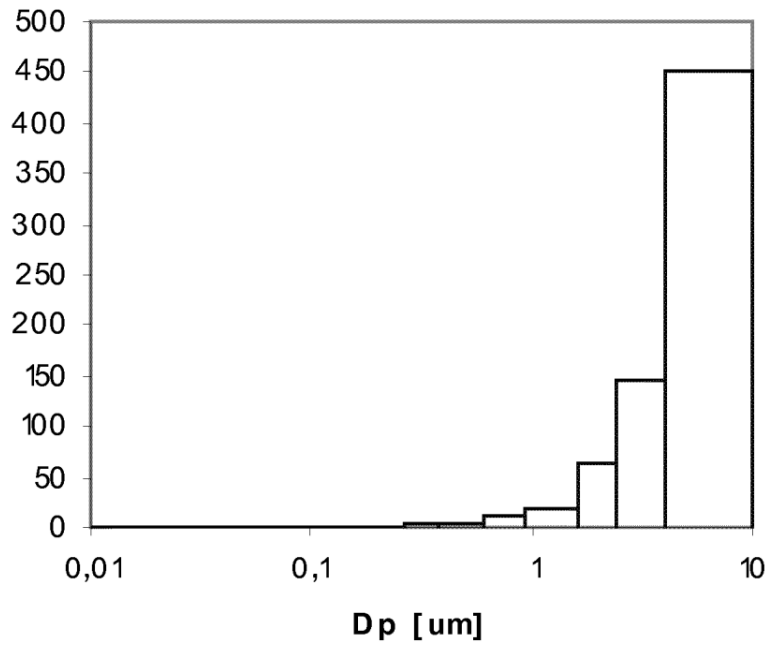


FIG. 1A

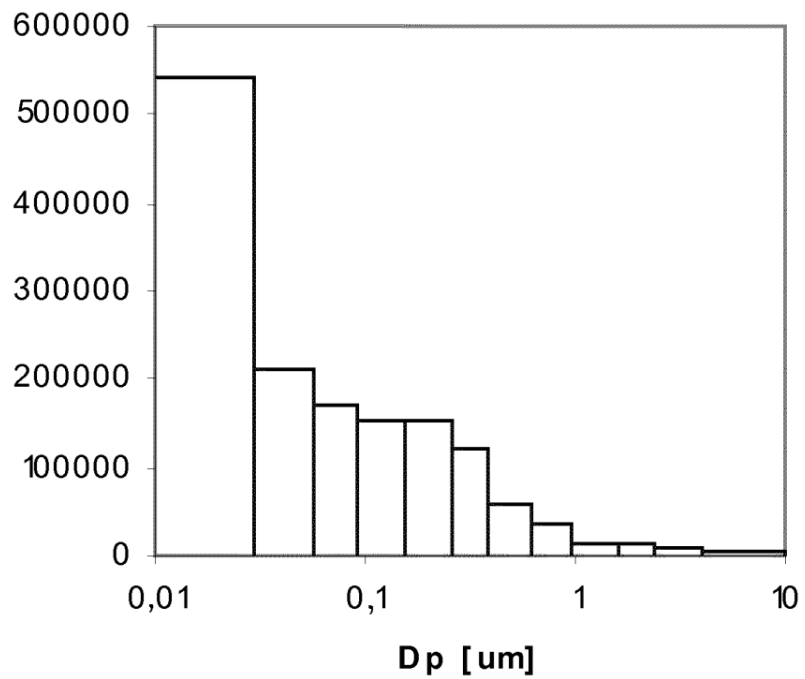


FIG. 1B

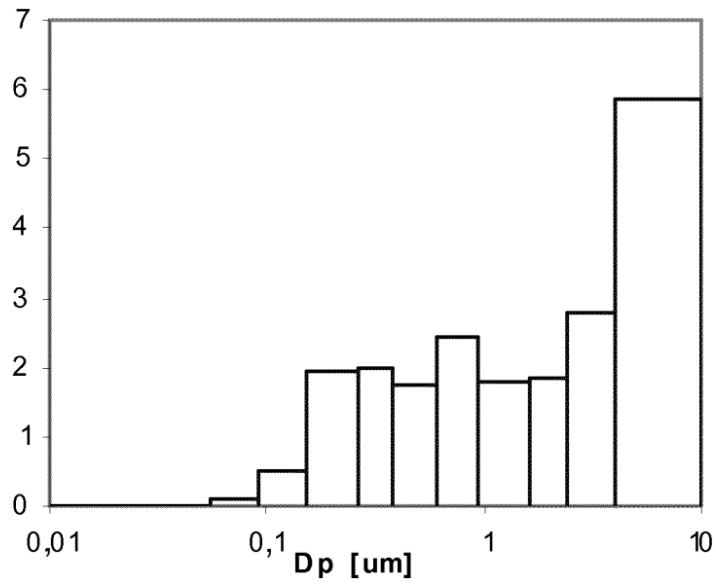


FIG. 2A

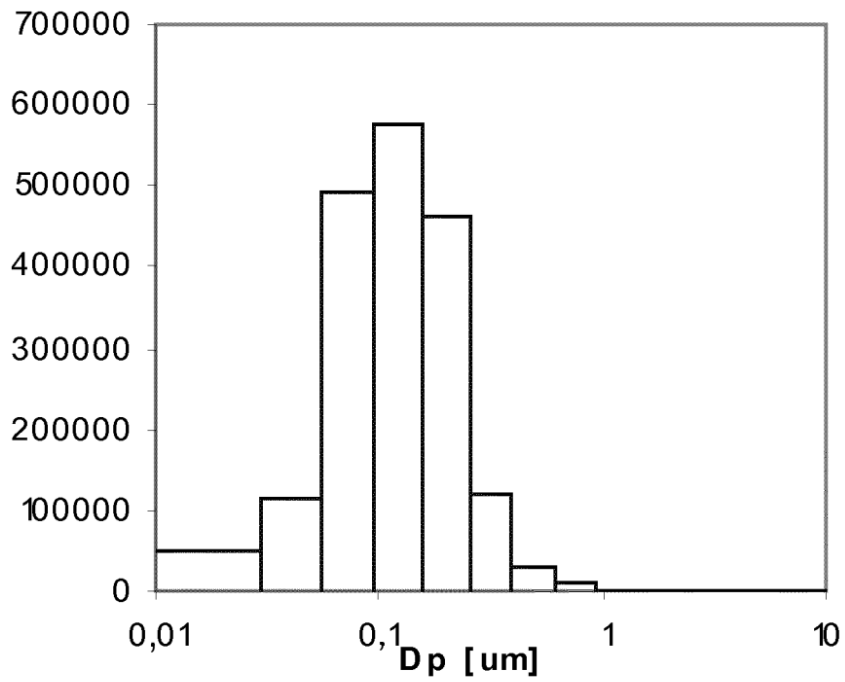


FIG. 2B

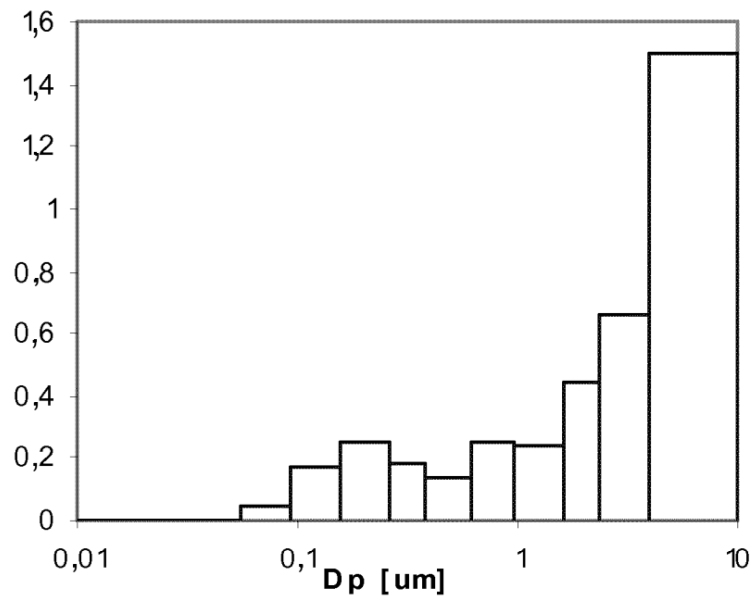


FIG. 3A

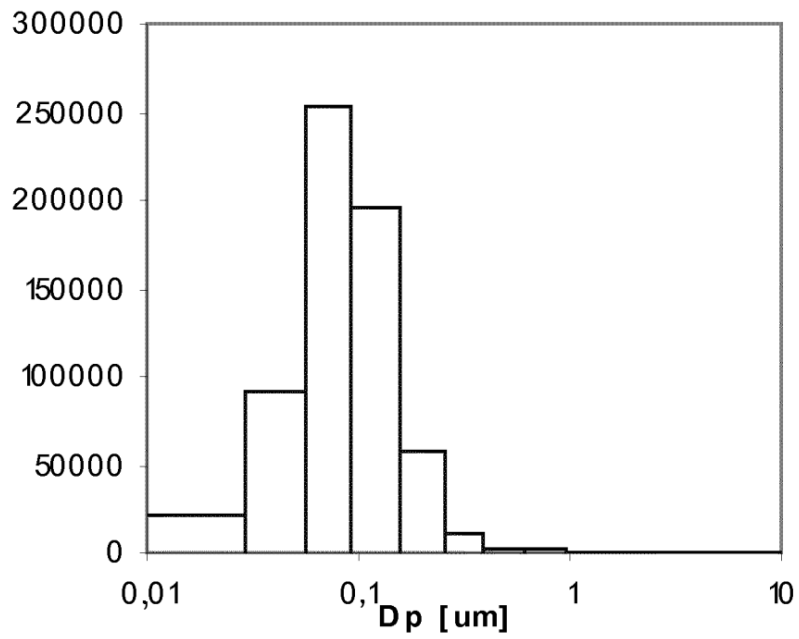


FIG. 3B

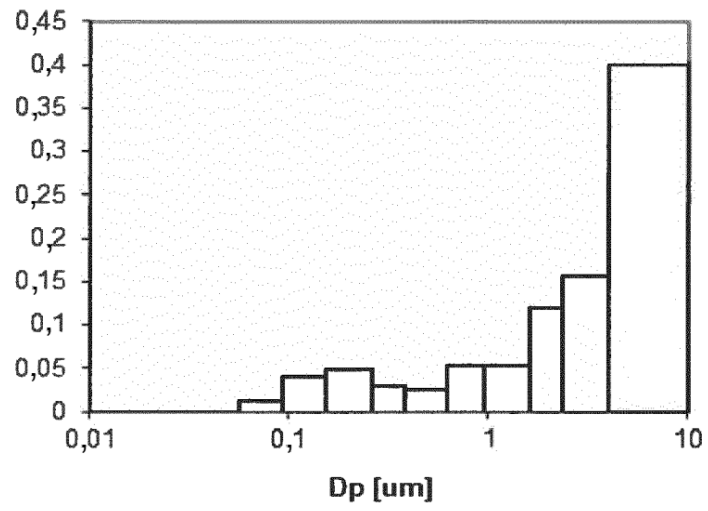


FIG. 4A

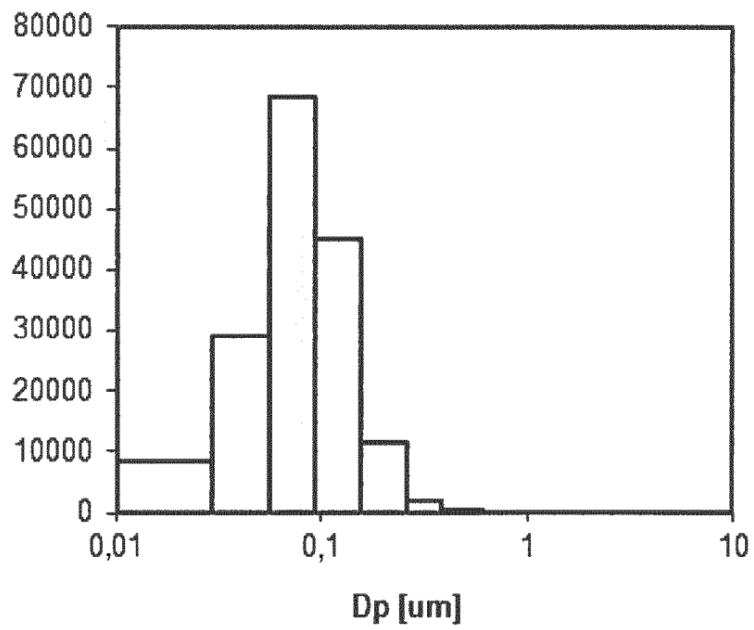


Fig. 4B