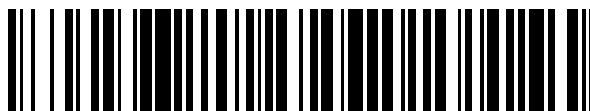


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 642 139**

51 Int. Cl.:

F23C 5/08 (2006.01)

F23C 13/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.09.2012** **E 12184303 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.08.2017** **EP 2708812**

54 Título: **Proceso y aparato para reacciones endotérmicas**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:
15.11.2017

73 Titular/es:
**L'AIR LIQUIDE, SOCIÉTÉ ANONYME POUR
L'ETUDE ET L'EXPLOITATION DES PROCÉDÉS
GEORGES CLAUDE (100.0%)
75, quai d'Orsay
75007 Paris, FR**

72 Inventor/es:
**CANCES, JULIEN y
CAMY-PEYRET, FREDERIC**

74 Agente/Representante:
ELZABURU, S.L.P

ES 2 642 139 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 y aparato para reacciones endotérmicas

La presente invención trata del diseño de hornos de caldeo por arriba ("top-fired") para el Reformado de metano con vapor de agua (SMR) y otras reacciones endotérmicas en reactores caldeados externamente.

5 El proceso SMR está basado principalmente en la reacción de reformado de hidrocarburos ligeros, tales como metano, que produce una mezcla de hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO) en presencia de vapor de agua. La reacción es endotérmica y lenta y requiere, para tener lugar, una entrada de calor adicional, así como un catalizador. El reactor SMR comprende usualmente varios tubos colocados en un horno, estando dichos tubos llenos de gránulos de catalizador y alimentados con la mezcla gaseosa de metano y vapor de agua del proceso.

10 Se encuentran ampliamente en la industria varios tipos de diseños de horno. La tecnología de caldeo por arriba es uno de los diseños a los que más se ha hecho referencia y la proponen varios proveedores de tecnología. Los hornos de caldeo por arriba están hechos típicamente de una caja de fuegos revestida refractaria que contiene varias filas de tubos que contienen catalizador. Los quemadores de bóveda están colocados en filas entre medias de las filas de tubos y los productos de combustión que salen de los quemadores se soplan de modo usualmente
15 vertical hacia abajo, de manera que las filas de tubos miran hacia las llamas en su parte de arriba. Un colector de escape de los gases de combustión está dispuesto usualmente al nivel de la solera.

El objetivo principal del diseño del horno, denominado también a menudo diseño de la caja de fuegos, es maximizar el calor transmitido de las llamas del quemador a los tubos, al tiempo que se respeta la restricción de la temperatura de funcionamiento máxima de los tubos, que es una función de la carga mecánica de los tubos (principalmente la
20 presión del gas de alimentación), las propiedades mecánicas de las aleaciones utilizadas para los tubos y la vida útil deseada de los tubos. En realidad, cualquier intensificación del calor transmitido a los tubos tiene un impacto positivo directo, sobre la productividad del horno o sobre el carácter compacto de la caja de fuegos, que es valioso desde el punto de vista de los gastos de capital. Sin embargo, la intensificación de la acción calorífica implica usualmente niveles más altos de temperatura del forro de los tubos que reducen la vida útil de los tubos o requieren aleaciones
25 más resistentes, que son mucho más caras.

Los perfiles de temperatura de los tubos catalizadores son, por lo tanto, un elemento crítico del diseño y el funcionamiento del horno, en el foco del compromiso entre comportamiento y durabilidad. Los perfiles verticales típicos para flujo calorífico y temperatura de los tubos están trazados gráficamente en la figura 2 en un valor medio
30 circunferencial. El perfil de flujo calorífico resalta claramente que la parte (superior) de entrada de alimentación del tubo es la zona preferida para la transmisión de calor. En realidad, varios factores favorecen la maximización del flujo calorífico:

- La proximidad de los quemadores y el punto de entrada de alimentación, lo que implica una diferencia de temperaturas máxima entre la carga (tubos) y la fuente de liberación de calor (quemadores)
- Las más altas velocidades de reacción y, así, una disipación de calor que tira hacia abajo de las
35 temperaturas de los tubos

Esto subraya la superioridad del diseño de caldeo por arriba, en comparación con otros, respecto al rendimiento de la transmisión de calor.

Cuanto más rígido es el perfil de flujo calorífico y temperatura en la parte superior del tubo, mayor es la acción calorífica para el tubo a la misma temperatura de diseño (resistencia a la fluencia) y, así, mayor es la capacidad de
40 caudal de gas del proceso por tubo a la misma velocidad de conversión. El diseño real de caldeo por arriba para aumentar la transmisión de calor en la parte superior del horno está limitado, sin embargo, a la capacidad de las llamas gaseosas producidas por los quemadores normales utilizados en los hornos para transferir la energía química a los tubos a partir de la radiación de los gases calientes. En realidad, varios fenómenos limitan la capacidad de los quemadores de caldeo por abajo ("down-fired") normales:

- Los niveles de óxido de nitrógeno (NO_x) altos penalizan fuertemente la selección de quemadores de llamas cortas por razones medioambientales, mientras que un medio típico para reducir las emisiones de NO_x térmicas es diluir la llama con gases quemados, o escalonar las inyecciones de combustible de manera que la temperatura máxima de la llama se reduzca por debajo de 1.000 °C. Como consecuencia, se reduce la capacidad de la llama para transmitir calor en la parte superior del horno y, por lo tanto, el calor proporcionado para la reacción. Esta restricción es un compromiso típico entre llamas más largas y más
50 frías y otras más cortas, menos eficientes en NO_x .
- La física de la transmisión de calor por radiación entre medios gaseosos y paredes es intrínsecamente menos eficiente que la que se tiene entre superficies de pared de temperaturas diferentes. El volumen dimensional característico de 1 m de gases calientes tiene una emisión neta típica muy por debajo de la de una superficie sólida de alta emisividad calentada a la misma temperatura.
55

Además, en reformadores de caldeo por arriba el calor necesario para que ocurra la reacción endotérmica lo proporcionan los quemadores situados entre los tubos. Los quemadores adicionales en el lado del horno, a lo largo de las paredes del horno, calientan solamente una fila de tubos en un lado y la pared refractaria en el otro lado. Los quemadores en medio de la caja de fuegos calientan dos filas de tubos por ambos lados de la fila de quemadores. Por lo tanto, la potencia requerida de los quemadores laterales es menor (~52%, incluyendo las pérdidas de calor en la pared lateral) que la del centro del horno. La reducción de la potencia inyectada en las filas de quemadores laterales, mientras se mantiene constante la estequiometría, implica reducir los caudales de aire y combustible.

La teoría de mecanismos y chorros de fluido definirá la disposición del flujo típica dentro de una caja de fuegos de caldeo por arriba, lo que significa que los quemadores laterales calientan la aspiración de chorros de gases quemados hacia el centro intermedio de la caja de fuegos. La llama de chorro arrastra parte del gas de combustión circundante, creando una depresión y, por consiguiente, una recirculación de gases de combustión. Por lo tanto, los quemadores situados a lo largo de las paredes están sometidos a una recirculación menor (es decir, depresión) sobre el lado de la pared que sobre el lado del horno, debido a la presencia de la siguiente fila de quemadores. Si la potencia o caudales más bajos a lo largo de las paredes laterales producen una velocidad más baja, esto reforzará el efecto de curvado de las llamas laterales hacia el centro, debido a la cantidad de movimiento más débil de los chorros laterales, como se ilustra en la figura 3.

En el documento US 2007/0099141 A1, se proponen un método y un horno para generar llamas enderezadas en hornos, en donde se introduce un oxidante en una pluralidad de conductos para oxidante. Cada uno de los conductos para oxidante tiene una salida en comunicación de fluido con el interior del horno, próxima a un primer extremo interior de dicho horno. El primer extremo interior del horno tiene una zona que sobresale horizontalmente. Las salidas de los conductos para oxidante definen una zona combinada de chorro libre turbulento que sobresale horizontalmente en el 30% de la distancia media desde un primer extremo interior del horno hasta un segundo extremo interior del horno, dispuesto enfrente del primer extremo interior.

El documento US 2007/0128091 describe una cámara de horno rodeada por una pared circunferencial de horno, en la que una pluralidad de quemadores están dispuestos esencialmente en un plano, con la dirección de salida de los quemadores dirigida hacia abajo y una pluralidad de tubos de reacción están dispuestos de modo esencialmente vertical y paralelos entre sí, por lo que los tubos de reacción son calentados desde el exterior por quemadores de caldeo. Se pretende mejorar la distribución de calor y toda la transmisión de calor. Esto se consigue disponiendo, al menos, los quemadores exteriores en la zona de la pared de horno con una dirección de salida de los quemadores que está inclinada con relación a la vertical, alejándose del centro del horno.

El documento EP 2 369 229 A2 describe un reformador y un método para hacer funcionar este reformador, que incluye la combustión de combustible en una zona de combustión de un reformador de caldeo por arriba o de caldeo por abajo, en donde al menos uno de los quemadores es un quemador unido a la pared, que forma una inyección no uniforme. Las propiedades de inyección no uniforme generan un perfil calorífico que proporciona una primera densidad calorífica proximal a una pared y una segunda densidad calorífica distal de la pared, en donde la segunda densidad calorífica es mayor que la primera densidad calorífica. Las propiedades de inyección no uniforme se forman seleccionando un ángulo de uno o más inyectores, un caudal de uno o más inyectores, una cantidad y/o situación de los inyectores de oxidante, una cantidad y/o situación de los inyectores de combustible, y combinaciones de los mismos.

El artículo "Fluegas flow patterns in top-fired steam reforming furnaces", de W. Cotton, publicado en 2003 por Johnson Matthey, enseña que los reformadores que comprenden quemadores exteriores caldeando con un régimen del 70%, en comparación con los quemadores interiores y un carril exterior entre los tubos y el lado del horno que tiene el 70% de la anchura de los carriles interiores entre dos filas de tubos, reducen el problema de la recirculación. Según el artículo, es posible también que funcionen con quemadores exteriores con un régimen del 100% caldeando al interior de un carril exterior que tiene la misma anchura que los carriles interiores, sin ningún curvado de las llamas hacia el centro del horno.

El documento US 2012/0126177 A1 describe un método para el reformado primario catalítico de hidrocarburos con vapor de agua a presión elevada mediante un reactor de tubos divididos y una cámara de caldeo. En el sistema de tubos divididos, que puede usar un material catalizador, los hidrocarburos a reformar se convierten, mediante vapor de agua, en gas de síntesis. El sistema de tubos divididos es calentado por una pluralidad de instalaciones de caldeo entre los tubos divididos, que incluyen una pluralidad de quemadores dispuestos en serie, generando los quemadores llamas principalmente dirigidas hacia abajo. Se suministran combustible y aire a las instalaciones de caldeo relevantes, siendo retirado el aire de los alimentadores relevantes. El gas de combustión que se desprende así pasa a través de la cámara de caldeo de la parte de arriba a la de abajo y entra en la zona inferior de la cámara de caldeo, en túneles cerámicos de gas de combustión dispuestos horizontalmente, que se extienden paralelos entre sí y perpendiculares a los tubos divididos verticales y que están atribuidos a una instalación de caldeo cada uno. El gas de combustión entra a través de aberturas en las paredes laterales de los túneles de gas de combustión. El gas de combustión en la salida de la cámara de caldeo se hace entrar en dispositivos de recuperación de calor. En cada túnel de gas de combustión, se alimenta un gas adicional al lado delantero del túnel, en la dirección del flujo del gas de combustión, en donde el gas contiene oxígeno y un gas incombustible, de manera que el gas adicional pasa a los

túneles de gas de combustión por toda la longitud de la cámara de caldeo. Se regula el volumen del gas adicional que entra en los túneles de gas de combustión. Por ello, se consigue un aprovechamiento térmico óptimo del calor.

El documento DE 1 033 854 A1 se refiere a un horno de reformado tubular para reformar catalíticamente hidrocarburos con vapor de agua a una presión elevada. Dicho horno de reformado comprende un sistema de tubos reformadores y una cámara de calentamiento. El sistema de tubos reformadores se usa como cámara de reacción y abarca una pluralidad de tubos verticales. Los tubos están dispuestos en filas, pueden estar llenos de catalizador y están provistos de dispositivos para alimentar a la cámara de reacción vapor de agua e hidrocarburos que se han de reformar. Además, la cámara de reacción proporciona dispositivos para descargar gas sintético reformado de la misma. La zona superior de la cámara de combustión del horno de reformado inventivo comprende una pluralidad de dispositivos de caldeo que producen llamas dirigidas sustancialmente hacia abajo que calientan los tubos. La zona inferior de la cámara de calentamiento comprende una pluralidad de túneles paralelos que están dispuestos en una dirección esencialmente horizontal, se extienden perpendiculares a los tubos verticales y dejan que los gases del horno escapen a través de aberturas en las paredes laterales de los túneles. Las paredes exteriores de los túneles están realizadas de manera esencialmente cónica, estrechándose gradualmente en una dirección hacia arriba. Esta realización debería homogeneizar los perfiles de velocidad y, por lo tanto, también los perfiles de calor en los tubos.

Todas las soluciones propuestas tienen en común que no permiten un diseño de horno que proporcione a los quemadores exteriores solamente la cantidad requerida de potencia. Como se presenta, p. ej., en el artículo citado "Fluegas flow patterns in top-fired steam reforming furnaces", el régimen de potencia de los quemadores no está reducido al valor calculado de aproximadamente el 52%. Por lo tanto, las soluciones conocidas evitan el curvado de la llama hacia el centro del horno, pero no impiden un sobrecalentamiento de los tubos que contienen catalizador situados próximos a las paredes de horno. Tal sobrecalentamiento conduce a reacciones laterales no deseadas y un daño irreversible del catalizador.

Por lo tanto, el objeto de la presente invención es proponer un horno y un método para hacer funcionar este horno que evitarán el efecto de curvado de las llamas laterales hacia el centro, así como el problema de sobrecalentar los tubos próximos a las paredes del horno.

Esta tarea se consigue por las características de la presente reivindicación 1. El horno para realizar un proceso endotérmico comprende varios tubos que contienen catalizador, que están dispuestos en el interior del horno, típicamente en filas. En el interior de estos tubos catalizadores, una alimentación (educto) gaseosa se convierte en una reacción que absorbe energía del entorno en forma de calor. Este calor lo proporcionan varios quemadores, que están situados en la zona de arriba del horno. Parte de los quemadores son los denominados "quemadores interiores" y están situados entre las filas de tubos, mientras que los denominados "quemadores exteriores" están dispuestos entre los tubos más exteriores y la pared de horno. La dirección de salida de los quemadores está dirigida hacia abajo. Los tubos catalizadores están dispuestos de modo esencialmente vertical y paralelos entre sí, en donde la alimentación fluye a través de los tubos desde la parte de arriba a la de abajo.

Para evitar el curvado de la llama y el sobrecalentamiento de los tubos, se proponen tres modificaciones diferentes del diseño actual:

- Los quemadores exteriores o laterales están situados próximos a la pared de manera que sus llamas se pegan al refractario. Esto evitará que las llamas se curven hacia la parte central del horno debido al efecto denominado "pared de chorro", que permite que la llama fluya lejos de la pared. Próxima a la pared, en el sentido de la presente invención, significa que la corriente que se emite desde la boquilla del quemador está fluyendo directamente a lo largo de la pared. El quemador está colocado tan próximo como sea posible a la pared, incluso tocándola. Según la invención, esto significa que la distancia del eje central del quemador a la pared de horno es menor que el 25%, preferiblemente el 10%, más preferiblemente el 5%, lo más preferiblemente el 2% de la distancia entre los tubos más exteriores y la pared de horno. En la mayoría de los casos, los quemadores laterales no serán circulares, sino de forma rectangular plana.
- La potencia de los quemadores exteriores o laterales está diseñada en un valor entre el 45 y el 60%, preferiblemente del 50 al 55% de la potencia de los quemadores interiores. Esto evitará el sobrecalentamiento de los tubos en la segunda fila de tubos, como se ha explicado anteriormente. La potencia se ajusta por la cantidad del combustible quemado.
- Los quemadores exteriores están dimensionados de manera que su velocidad de entrada del chorro es esencialmente la misma que en los quemadores interiores. Son posibles desviaciones de, como máximo, el 10%, preferiblemente el 5%. Esto permitirá que la disposición del flujo sea más uniforme y las líneas de corriente sean más rectas hacia abajo. La velocidad de entrada de la alimentación del quemador se ajusta por el flujo volumétrico total a través de la boquilla del quemador.

En una realización preferida de la invención, los tubos están dispuestos en filas. Según la invención, una fila es una disposición de al menos dos, preferiblemente al menos tres quemadores en línea recta o una disposición de quemadores que están a la misma distancia al centro del horno (como anillos alrededor del centro de un círculo).

La relación entre la distancia de la pared lateral de horno a la primera fila de tubos y el espacio entre dos filas de tubos posteriores se establece en el mismo valor que la relación entre la potencia de los quemadores exteriores e interiores. Esto permitirá mantener una velocidad media constante a través de la caja de fuegos. Esto debería evitar la perturbación del flujo debida a las velocidades diferenciales desde zonas diferentes del horno.

- 5 Además, la idea de la invención de generar un perfil de temperatura homogéneo para el horno se consigue incluso mejor si se usa la denominada "superficie sólida de alta emisividad". Para este efecto, al menos partes de las paredes están provistas de una superficie sólida de alta emisividad, resistente a la alta temperatura. Las superficies radiantes están dispuestas de manera que extraen mucho calor de las llamas a través del intercambio por radiación y convección para tener una temperatura superficial más alta y de manera que emiten, a cambio, flujo de alta radiación hacia la parte superior de los tubos, estando dichos tubos a temperaturas relativamente bajas en comparación con las superficies radiantes.

- 10 Unos ladrillos refractarios de alta emisividad, o unas láminas delgadas o una capa revestida están dispuestos sobre la superficie de la bóveda de horno y la parte superior de las paredes laterales, siendo la alta emisividad debida a las propiedades intrínsecas del material, por ejemplo usando láminas de carburo de silicio, o al tratamiento superficial o la texturización, por ejemplo usando láminas de espuma cerámica, preferiblemente hechas de óxido de aluminio o de óxido de silicio.

- 15 Se consiguen buenos resultados particulares si al menos una parte de los quemadores son los denominados "quemadores de llama de chorro". Las denominadas "llamas de chorro" están caracterizadas por un perfil de velocidad inicial de una llama que se asemeja al del flujo completamente desarrollado en los tubos. El penacho de llama está principalmente confinado dentro de la capa de mezcla del chorro. Las llamas son muy oblicuas respecto al flujo incidente y parecen más delgadas y altas.

- 20 También el diseño de al menos algunos de los quemadores, como los denominados "quemadores con tecnología de llamas esféricas de alta turbulencia", conduce a un perfil de temperatura muy homogéneo a través del horno. La alta turbulencia favorece la formación de una zona de recirculación y es el mecanismo esencial para la estabilización de la llama. Se pueden producir flujos de turbulencia por inyecciones de chorros tangenciales o por dispositivos de turbulencia con aspas. La llama es anclada por los productos calientes atrapados en el interior de la zona de recirculación. El régimen de turbulencia, expresado en términos de un número de turbulencia, impone el tamaño y la intensidad de la zona de recirculación en la mayoría de las propiedades de la llama.

- 25 La implementación de la llama en el interior de un elemento cerrado con blindaje radiante poroso conduce a un perfil de temperatura más homogéneo de la propia llama. El blindaje radiante está hecho de material resistente a las altas temperaturas, tal como espuma cerámica porosa con alta emisividad (carburo de silicio, óxido de aluminio y óxido de silicio). El uso de quemadores radiantes permite diseñar el horno con sistema optimizado de tubo de quemador a suelo de tubos, lo que minimiza las heterogeneidades del flujo circunferencial. Los suelos más interesantes tienen una configuración cuadrada o una hexaédrica del quemador respecto a los tubos catalizadores.

- 30 El suelo cuadrado es ventajoso para la homogeneidad del flujo calorífico y permite un diseño más sencillo del colector para la distribución de los fluidos (aire de combustión, combustible y alimentación); el mismo requiere, sin embargo, mayor densidad de quemadores por tubo.

- 35 El suelo hexaédrico es óptimo desde el punto de vista de la distribución del flujo calorífico y la limitación del número de quemadores, pero requiere una ligera complejidad adicional en el diseño de los sistemas de distribución y recogida de fluido. Se ha de adaptar la longitud del blindaje radiante basándose en el suelo y el diámetro del tubo, ventajosamente entre el 10 y el 40% de la longitud del tubo, óptimamente entre el 20 y el 33% de la longitud del tubo.

- 40 El diseño preferido de la bóveda de horno es tal que las superficies de alta temperatura y alta emisividad tienen su normal respectiva dirigida hacia los tubos. Las superficies emisoras correspondientes se pueden considerar ventajosamente sobresaliendo de forma convexa hacia dentro de la cámara de combustión o, al contrario, están rebajadas en una configuración cóncava. Se pueden disponer láminas refractarias de alta emisividad en la zona calentada por las llamas. Para la forma convexa, la implementación más simple está basada en quemadores de pared con llamas de chorro de caldeo hacia abajo, alrededor del abultamiento convexo con llamas de caldeo hacia abajo. Una configuración más compleja hace que las llamas caldeen hacia arriba desde el extremo en punta del abultamiento convexo para aumentar la zona radiante cubierta por las llamas y, así, el rendimiento de transmisión a los tubos.

- 45 La invención cubre también un proceso para hacer funcionar un horno, como se ha descrito anteriormente. Tal proceso incluye las características de la reivindicación 11. Un educto gaseoso se alimenta a través de tubos que contienen catalizador, para realizar un proceso endotérmico. Los tubos catalizadores están situados en el interior del horno y están calentados por quemadores interiores colocados sobre la parte de arriba del horno entre los tubos y por quemadores exteriores colocados sobre la parte de arriba del horno entre los tubos más exteriores y la pared de horno. La colocación de los quemadores exteriores próximos a la pared, haciendo funcionar estos quemadores exteriores del 45 al 60%, preferiblemente del 50 al 55% de la potencia de los quemadores interiores y esencialmente

con la misma velocidad de entrada que los quemadores interiores, es posible generar un perfil de temperatura homogéneo en los tubos catalizadores. La velocidad de entrada de los quemadores exteriores se ajusta para estar entre el 90 y el 110%, preferiblemente del 95 al 105%, de la velocidad de entrada de los quemadores interiores, de manera que existe una desviación máxima del 10%, preferiblemente el 5%, entre las velocidades de entrada.

- 5 Preferiblemente, al menos algunas de las llamas de los quemadores están dirigidas desde la parte de arriba hasta la de abajo del horno para evitar cualquier fenómeno de calentamiento local.

Se consiguen resultados incluso mejores si el educto fluye a través de los tubos catalizadores verticales desde la parte de arriba a la de abajo del horno, en donde la mayoría del educto ya se ha convertido en la zona de entrada de la parte de arriba del horno, ya que allí se encuentra el punto más caliente de las llamas de los quemadores.

- 10 Para conseguir la misma velocidad de entrada en los quemadores interiores que en los quemadores exteriores, se encontró que, ventajosamente, la velocidad de entrada se ajusta por inyección de aire. Usando aire para adaptar el flujo de entrada, la reacción de combustión en el quemador no se ve casi influida. Además, el aire es, por supuesto, el gas más barato.

- 15 El proceso reivindicado conduce a resultados particularmente buenos si el proceso es un proceso de reformado con vapor de agua.

La invención se describirá a continuación con más detalle en base a las realizaciones preferidas y los dibujos. Todas las características descritas o ilustradas forman la materia sustantiva de la invención, con independencia de su combinación en las reivindicaciones o su referencia posterior.

En los dibujos:

- 20 la figura 1 muestra el diseño típico de un horno antes de una reacción endotérmica en tubos que contienen catalizador;
- la figura 2 muestra el perfil de flujo calorífico y temperatura de tubos verticales típicos;
- la figura 3 muestra una ilustración del curvado de la llama;
- 25 la figura 4 muestra la acción calorífica media de los tubos, fila por fila, para un horno reformador (filas de 8 tubos) y una caja de fuegos virtual de filas de 24 tubos;
- la figura 5 muestra esquemáticamente la sección del horno, incluyendo el diseño propuesto;
- la figura 6 muestra la acción calorífica normalizada de los tubos, fila por fila, en valor medio para un diseño de referencia y optimizado del reformador;
- 30 la figura 7 muestra la acción calorífica normalizada para un módulo de tubos estándar (17 tubos) en un reformador de filas de 8 tubos ((a) diseño real, (b) diseño optimizado);
- la figura 8 muestra la implementación de un quemador en combinación con una capa refractaria de alta emisividad;
- la figura 9 muestra el concepto de llama de alta turbulencia;
- la figura 10 muestra el concepto de quemador radiante para llama de difusión y premezcla;
- 35 la figura 11 muestra el quemador radiante para la disposición de tubos;
- la figura 12 muestra la implementación de la bóveda de horno como pared radiante;
- la figura 13 muestra las opciones para configuraciones de una bóveda cóncava;
- la figura 14 muestra las opciones para configuraciones con una bóveda convexa;
- la figura 15 muestra un quemador de bóveda radiante lineal.
- 40 La figura 1 muestra una disposición típica de un horno de caldeo por arriba 1 utilizado para obtener un gas de síntesis a partir de una alimentación (educto) que comprende, p. ej., metano y vapor de agua. Unos tubos catalizadores 2 están dispuestos en varias filas dentro del horno 1. La alimentación se suministra a través de los tubos 2 desde la parte de arriba a la de abajo, desde donde se retira el producto resultante, p. ej., un gas de síntesis que comprende hidrógeno, monóxido de carbono y residuos. Entre las filas de tubos, unos quemadores 3 caldean verticalmente hacia abajo desde la parte de arriba. Los gases de combustión resultantes se retiran a través de unos túneles de escape 4.
- 45

Los perfiles verticales típicos para flujo calorífico y temperatura están trazados gráficamente en la figura 2. Es evidente que el perfil del flujo calorífico y de la temperatura están acoplados entre sí. Cuanto más rígido es el perfil del flujo calorífico y de la temperatura en la parte superior del tubo, mayor es la acción calorífica para el tubo a la misma temperatura y mayor es la capacidad de caudal de gas del proceso por tubo a la misma velocidad de conversión.

La figura 3 es una ilustración del curvado de la llama para filas de 4 y 8 tubos (solamente se ha simulado la mitad de la caja de fuegos por razones de simetría). La teoría de mecanismos y chorros de fluido definirá la disposición del flujo típica dentro de una caja de fuegos de caldeo por arriba, lo que significa que los quemadores laterales calientan la aspiración de chorros de gases quemados hacia el centro intermedio de la caja de fuegos. Si la potencia o los caudales más bajos a lo largo de las paredes laterales producen una velocidad más baja, esto reforzará el efecto de curvado de las llamas laterales hacia el centro, debido a la cantidad de movimiento más débil de los chorros laterales.

La figura 4 muestra la acción calorífica media simulada de los tubos, por fila, para un reformador (horno) que tiene una caja de fuegos con filas de 24 tubos (solamente se ha simulado la mitad de la caja de fuegos por razones de simetría). Para contrarrestar el fenómeno del efecto de curvado, se ha aumentado paso a paso la cantidad de movimiento desde las filas de quemadores laterales, hasta el 78 % de la potencia de los quemadores interiores. El curvado de la llama no se suprime, y el aumento de potencia crea una zona sobrecalentada en el lado del horno, cuyo valor pico está situado sobre la segunda fila de tubos, desde la pared, debido al gas de combustión caliente que fluye a través de la primera fila de tubos y que calienta la siguiente fila.

La figura 5 muestra la modificación del diseño como se ha propuesto con la presente invención, en donde dos canales 5, 6 están definidos por la pared de horno 1a y los tubos catalizadores 2. La distancia d entre dos filas de tubos catalizadores 2₁ y 2₂ define el canal intermedio 5. Unos quemadores interiores 3a están situados en el centro, entre los tubos 2₁ y 2₂, sobre la bóveda 1b del horno 1. En el canal 6 definido entre el tubo catalizador exterior 2₁ y la pared de horno 1a, unos quemadores exteriores o laterales 3b están dispuestos sobre la bóveda 1b del horno. La dimensión d₁ del canal exterior 6 se establece de manera que su relación con la distancia d es la misma que la relación de la potencia de los quemadores exteriores y los interiores, a saber, del 45 al 60%, preferiblemente del 50 al 58%, y con más preferencia aproximadamente el 55% del diámetro d.

La configuración descrita anteriormente se ha simulado usando la herramienta de simulación SMR3D (herramienta propietaria de la firma Air Liquide, basada en una herramienta de Dinámica de fluidos computacional (CFD) acoplada a un modelo de tubos de reformado). El resultado de la simulación se presenta en las figuras 6 y 7 y se compara con un diseño de referencia. El diseño optimizado de la presente invención da como resultado una homogeneidad de acción calorífica mucho mejor en la escala del reformador. La desviación estándar de la acción calorífica de los tubos se ha disminuido y optimizado -fila por fila- al 1% frente al 4% en el caso de referencia y, como se muestra en la figura 7 tubo por tubo, al 3,5% frente al 6,5% en el caso de referencia.

La figura 8a muestra la implementación más simple de un quemador 3 en combinación con una capa refractaria 7 de alta emisividad dispuesta en el interior de la bóveda de horno 1b. La capa refractaria 7 de alta emisividad puede estar formada a partir de unos ladrillos, unas láminas delgadas o una capa revestida, en donde la alta emisividad resulta de las propiedades intrínsecas del material, por ejemplo usando láminas de SiC, o del tratamiento superficial o la texturización, por ejemplo usando láminas de espuma cerámica. Una fila de quemadores de chorro 3 separados de potencia reducida forman una llama plana continua. En comparación con la técnica anterior, la implementación innovadora propuesta usa quemadores de llama de chorro dispuestos en una llama continua con un número enorme de inyecciones de aire y combustible escalonadas, p. ej., entre 10 y 30 inyectores de combustible por metro, en comparación con un quemador cada 2 a 6 metros que se ha propuesto en los diseños de la técnica anterior.

Para la implementación más eficiente de transmisión de calor, unos quemadores de pared 8 pueden estar basados en una tecnología de quemadores radiales, como se muestra en la figura 8b, o en una tecnología de quemadores de pared en rampa, como se muestra en la figura 8c, probablemente dispuestos de modo escalonado con tubos.

Como se presenta en la figura 9, es posible también la implementación de tecnología de combustión de llamas esféricas de turbulencia asociada con una capa 7 de alta emisividad sobre la bóveda de horno 1b. En la misma, la propia llama está capturada en una zona de recirculación, cuando el combustible, así como la fuente de oxígeno y/o el vapor de agua, se hace recircular desde un punto más bajo de la llama de vuelta a la dirección de la bóveda de horno.

La figura 10 muestra dos implementaciones de la invención que usan quemadores radiantes cilíndricos unitarios de dos clases posibles: la figura 10a muestra una llama de difusión encerrada en una pantalla radiante 9. Se recomiendan unos pasos 10, que permiten que los gases de combustión entren en la base de la llama por efecto *venturi*, para conseguir bajas cantidades de NO_x. La dilución de las sustancias reaccionantes de combustión con el gas de combustión reducirá la temperatura máxima de la llama. Tanto la dilución como la temperatura hacen caer la cinética de formación de NO_x.

La combustión premezclada con fijación de llama en forma porosa se presenta, a su vez, en la figura 10b. La reacción de combustión ocurre en el interior del medio poroso, que es calentado y emite radiación hacia los tubos que están delante del mismo. La ventaja principal de esta tecnología es que la radiación podría estar situada en el lugar óptimo con relación a la transmisión de calor a los tubos.

- 5 El blindaje radiante está hecho de material resistente a las altas temperaturas, tal como una espuma cerámica porosa con alta emisividad (SiC , Al_2O_3 , ZrO_2).

El uso de quemadores radiantes permite diseñar el horno con sistema optimizado de tubo de quemador a suelo de tubos que minimiza las heterogeneidades del flujo circunferencial que se presentan en la figura 11. Se proponen dos suelos de tubos: la figura 11a muestra un suelo de tubos cuadrado, mientras que la figura 11b muestra un suelo de tubos hexaédrico con un quemador estándar.

- 10

La figura 12 muestra la implementación de quemadores que calientan la propia bóveda de horno 1b y usa esta bóveda como pared radiante. Como se muestra en la figura 12a, es posible diseñar el revestimiento interior refractario de alto aislamiento, de baja conductividad calorífica, con una forma convexa o, como se muestra en la figura 12b, con una cóncava.

- 15 La figura 13 muestra diferentes configuraciones de quemador que se pueden implementar en una bóveda de quemadores con forma cóncava. La vista, en corte transversal, para dos paredes oblicuas 1c radiantes se ilustra en la figura 13a, en donde el ángulo óptimo Ca está por debajo o es aproximadamente 50° , y la anchura horizontal Cw de la bóveda en forma de cueva está diseñada basándose en la anchura W del pasillo de tubos y el ángulo Ca , de manera que se mantiene espacio suficiente para disponer los quemadores debidamente.

- 20 En la figura 13b, unos quemadores de chorro 3 típicos, tales como se muestran en la figura 8, están dispuestos en líneas para caldear hacia abajo a lo largo de las paredes radiantes oblicuas 1c en cada lado de la bóveda en forma de cueva.

La figura 13c presenta la misma clase de diseño con un quemador de pared lineal continuo.

- 25 En la figura 13d, unos quemadores de pared radiales típicos están dispuestos en la bóveda en forma de cueva con una separación L , de manera que se encuentra el mejor compromiso entre la homogeneidad de los flujos caloríficos y la reducción del número de quemadores. Esto puede corresponder típicamente a un quemador cada 2 a 8 tubos.

Finalmente, la figura 13e presenta una configuración, donde unos quemadores de alta turbulencia clásicos están instalados en la bóveda en forma de cueva.

- 30 La figura 14 muestra un diseño de bóveda convexa ("bóveda en punta"). En la figura 14a, los quemadores de pared 3 están dispuestos alrededor de la forma convexa caldeando hacia abajo; en la figura 14b, los quemadores 3 están dispuestos en el interior de la bóveda convexa de manera que las llamas caldean hacia arriba desde el extremo en punta para aumentar la zona radiante cubierta por dichas llamas y, así, el rendimiento de transmisión a los tubos 2.

- 35 Como se muestra en la figura 15, es posible también disponer una cámara de combustión porosa en la que está caldeando, al menos, un quemador de gran potencia. Se pueden añadir aberturas próximas a la base de la llama (paredes laterales 1a del horno) para permitir que los gases de combustión recirculen desde la atmósfera del horno hacia dentro de la cámara generadora de gas por presión en secciones de efecto *venturi*. La configuración presentada en la figura 15a muestra una disposición de quemador único con caldeo escalonado desde un pasillo de tubo a tubo hasta otro. Esta configuración ahorra los costes de capital de varios quemadores unitarios en comparación con la técnica anterior, donde se usan hasta 15 o 20 por fila en un gran reformador de caldeo por arriba, y que se puede reemplazar por uno o dos en la realización presentada. Una configuración más fiable es tener dos quemadores por canal radiante, como se muestra en la figura 15b, de manera que el comportamiento del horno estaría afectado menos críticamente en caso de un descenso inaceptable del quemador.
- 40

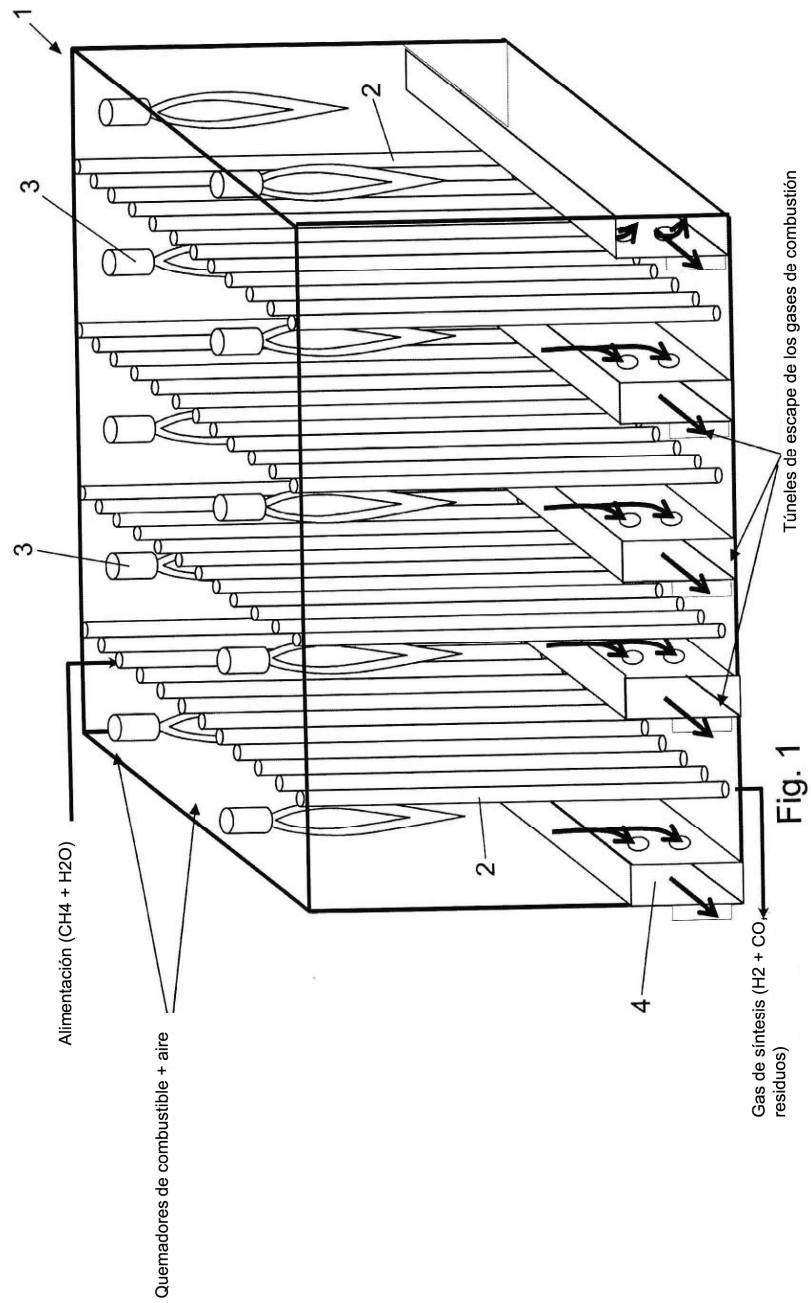
Lista de números de referencia:

- | | |
|----|---------------------------|
| 1 | horno |
| 45 | 1a pared de horno |
| | 1b bóveda de horno |
| | 1c pared de horno oblicua |
| | 2 tubo |
| | 3 quemador |
| 50 | 3a quemador interior |

- 3b quemador exterior
- 4 túnel de escape
- 5 canal intermedio
- 6 canal exterior
- 5 7 capa refractaria de alta emisividad
- 8 quemador de pared
- 9 pantalla radiante
- 10 paso

REIVINDICACIONES

1. Un horno para realizar un proceso endotérmico, que comprende unos tubos (2) que contienen un catalizador para convertir una alimentación gaseosa, en donde dichos tubos (2) están situados en el interior del horno (1), unos quemadores interiores (3a) montados en una bóveda de horno (1b) entre los tubos (2), y unos quemadores exteriores (3b) montados en la bóveda de horno (1b) entre los tubos (2) y una pared de horno (1a), **caracterizado por** que los quemadores exteriores (3b) están situados de manera que la distancia del eje central de los quemadores exteriores (3b) a la pared de horno (1a) es menor que el 25% de la distancia entre los tubos más exteriores y la pared de horno (1a), y que los quemadores exteriores (3b) están configurados para funcionar con el 45 - 60% de la potencia de los quemadores interiores (3a) y con una velocidad de entrada entre el 90 y el 110% de la velocidad de entrada de los quemadores interiores (3a).
2. El horno según la reivindicación 1, **caracterizado por** que los tubos (2) están situados en filas y que la relación entre la distancia de la pared de horno (1a) a la primera fila de tubos y el espacio entre dos filas de tubos adyacentes corresponde a la relación entre la potencia de los quemadores exteriores y la potencia de los interiores (3a, 3b).
3. El horno según la reivindicación 1 o 2, **caracterizado por** que al menos una parte de la bóveda de horno (1b) está provista de una superficie sólida (7) de alta emisividad, resistente a la temperatura.
4. El horno según la reivindicación 3, **caracterizado por** que la superficie sólida (7) de alta emisividad contiene carburo de silicio o espumas cerámicas porosas.
5. El horno según cualquiera de las reivindicaciones previas, **caracterizado por** que al menos algunos de los quemadores (3a, 3b) son quemadores de llama de chorro.
6. El horno según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado por** que al menos algunos de los quemadores (3a, 3b) son quemadores con tecnología de llamas esféricas de alta turbulencia.
7. El horno según cualquiera de las reivindicaciones previas, **caracterizado por** que al menos algunos de los quemadores (3a, 3b) están dispuestos de manera que la llama se forma sobre una pantalla radiante porosa.
8. El horno según la reivindicación 7, **caracterizado por** que al menos algunos de los quemadores (3a, 3b) están dispuestos en una configuración cuadrada o una hexaédrica respecto a los tubos catalizadores (2).
9. El horno según la reivindicación 7 u 8, **caracterizado por** que la longitud de la pantalla radiante está entre el 10 y el 40% de la longitud de los tubos que contienen catalizador.
10. El horno según cualquiera de las reivindicaciones previas, **caracterizado por** que al menos una parte de la bóveda de horno (1a) está diseñada para tener una forma cóncava o convexa.
11. Un proceso para hacer funcionar un horno a fin de realizar un proceso endotérmico con unos tubos que contienen catalizador, situados en el interior del horno, para convertir una alimentación gaseosa y que son calentados por unos quemadores interiores montados en una bóveda de horno entre los tubos y por unos quemadores exteriores montados en la bóveda de horno entre los tubos y una pared de horno, **caracterizado por** que los quemadores exteriores están situados de manera que la distancia del eje central de los quemadores exteriores a la pared de horno es menor que el 25% de la distancia entre los tubos más exteriores y la pared de horno, que los quemadores exteriores se hacen funcionar con el 45 - 60% de la potencia de los quemadores interiores y que una velocidad de entrada de los quemadores exteriores se ajusta para estar entre el 90 y el 110% de la velocidad de entrada de los quemadores interiores.
12. El proceso según la reivindicación 11, **caracterizado por** que al menos algunas de las llamas de los quemadores están dirigidas desde la parte de arriba a la de abajo del horno.
13. El proceso según la reivindicación 11 o 12, **caracterizado por** que la alimentación fluye a través de los tubos catalizadores dispuestos verticalmente desde la parte de arriba a la de abajo del horno.
14. El proceso según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 13, **caracterizado por** que la velocidad de entrada se ajusta por inyección de aire.
15. El proceso según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 14, **caracterizado por** que el proceso endotérmico es un proceso de reformado con vapor de agua.



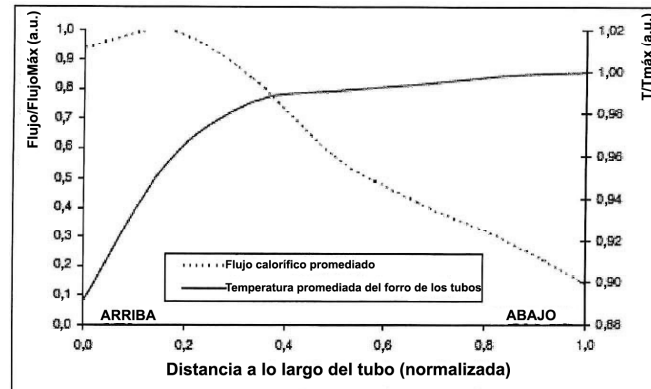


Fig. 2

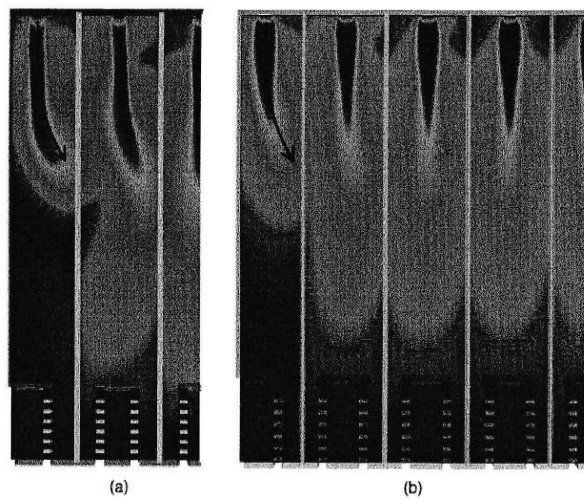


Fig. 3

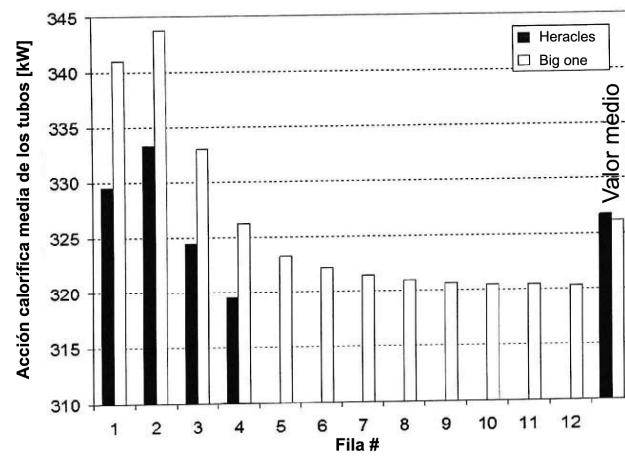


Fig. 4

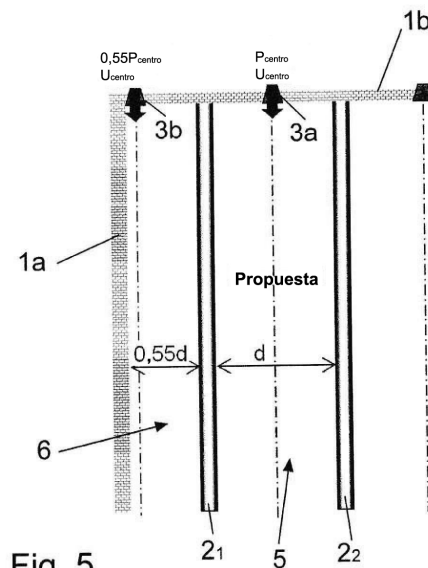


Fig. 5

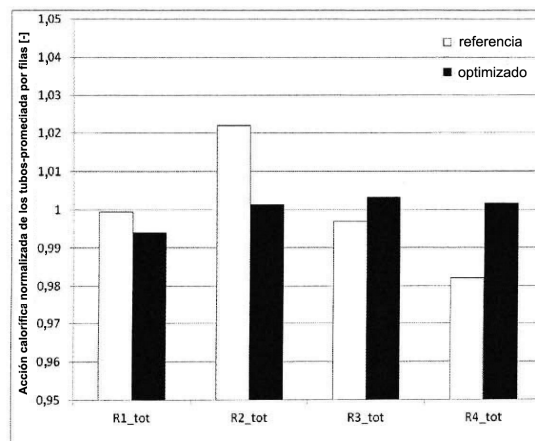


Fig. 6

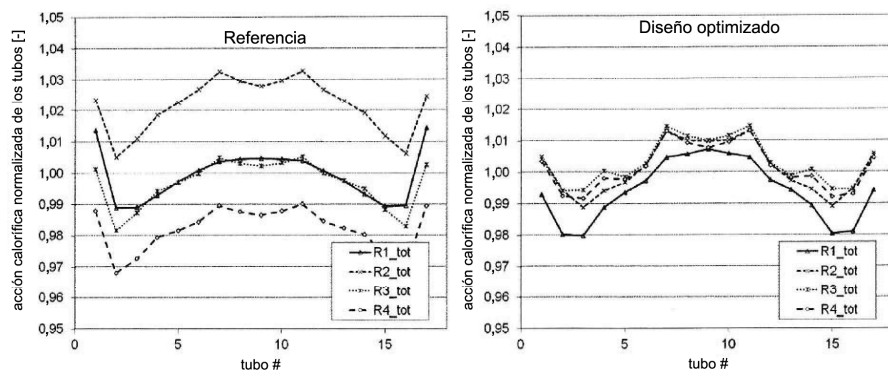


Fig. 7

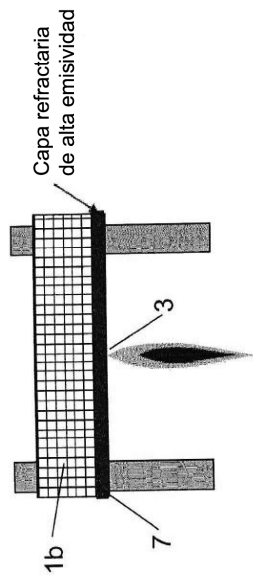


Fig. 8a

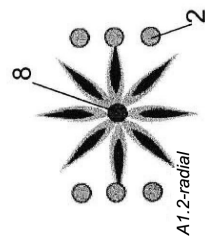


Fig. 8b

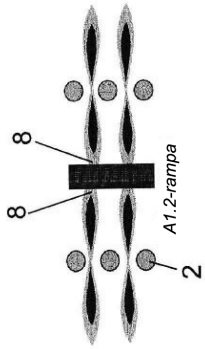


Fig. 8c

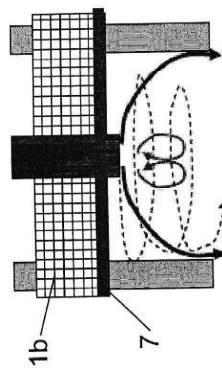


Fig. 9

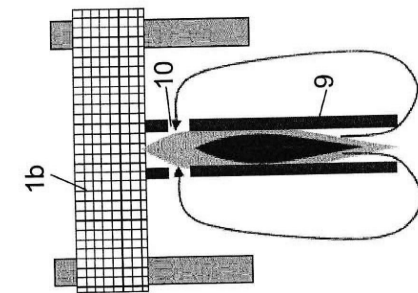


Fig. 10a

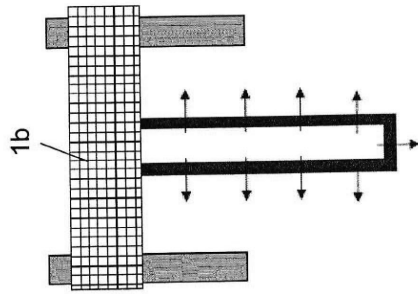
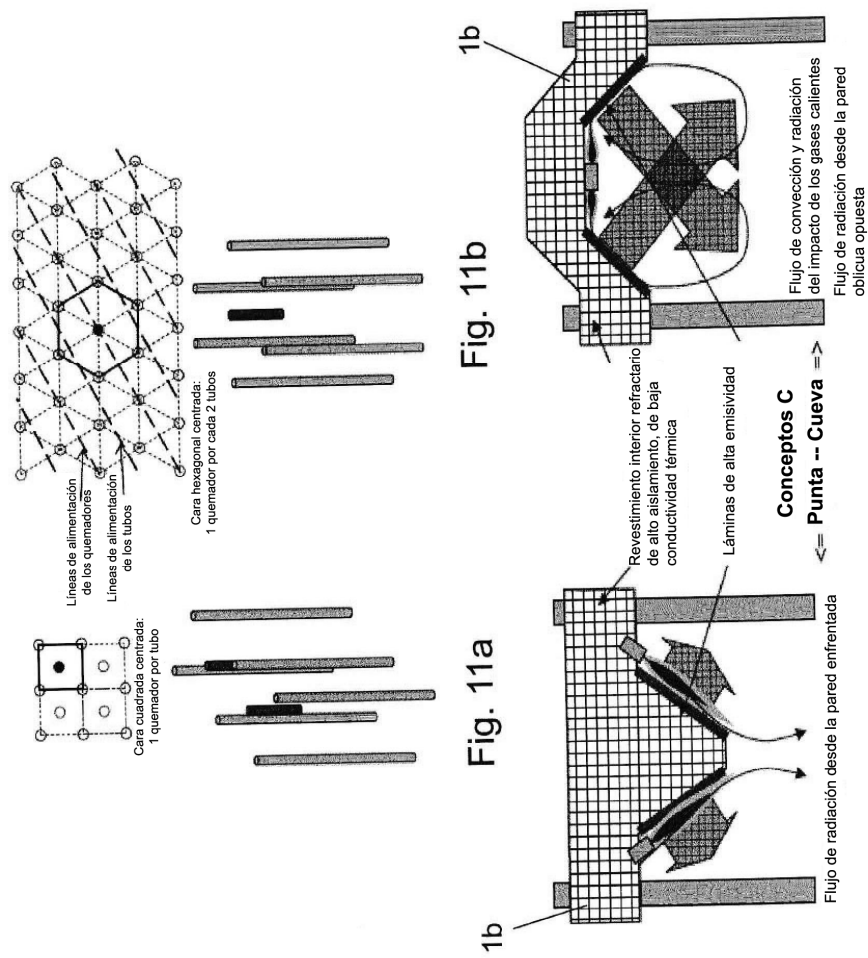
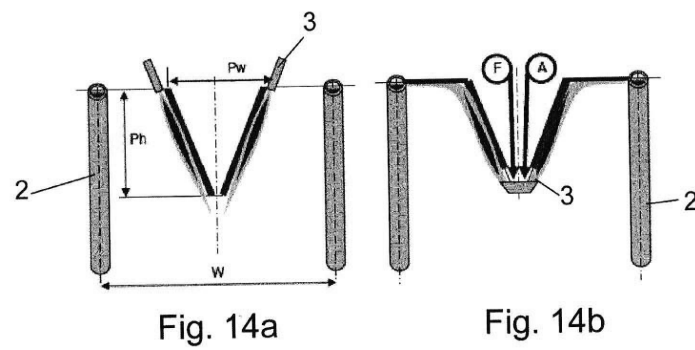
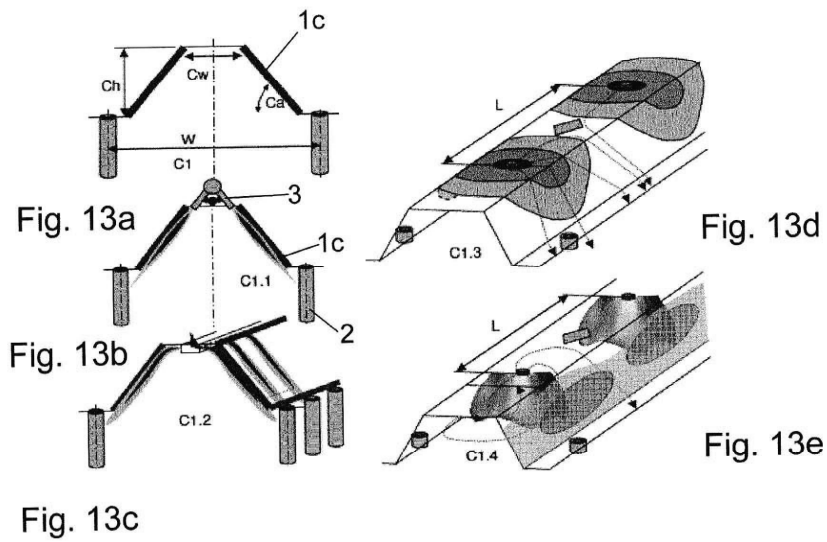


Fig. 10b





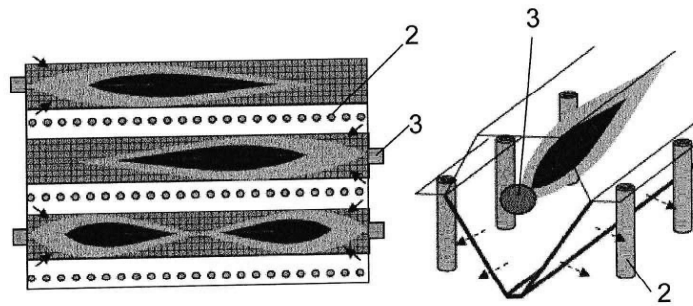


Fig. 15a

Fig. 15b