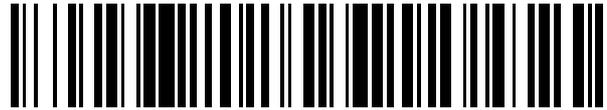


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 540 576**

51 Int. Cl.:

H05H 1/34

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.04.2012** **E 12723249 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.03.2015** **EP 2702839**

54 Título: **Procedimiento de tratamiento de un gas y dispositivo para llevar a cabo dicho procedimiento**

30 Prioridad:

28.04.2011 GB 201107130

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

10.07.2015

73 Titular/es:

**GASPLAS AS (100.0%)
P.O. Box 1001 Hoff
0218 Oslo, NO**

72 Inventor/es:

**RISBY, PHILIP JOHN y
PENNINGTON, DALE**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 540 576 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de tratamiento de un gas y dispositivo para llevar a cabo dicho procedimiento

5 La presente invención versa sobre un procedimiento de tratamiento de un gas y sobre un dispositivo para llevar a cabo dicho procedimiento. De forma más específica, la presente invención versa sobre un procedimiento y un dispositivo para tratar un gas mediante su exposición a plasmas no térmicos de microondas.

Antecedentes

10 Los plasmas, que son gases más o menos ionizados, son fluidos eléctricamente conductores que pueden tener un amplio intervalo de densidades energéticas y de temperaturas de los electrones. Así, los plasmas han encontrado amplios usos en procedimientos industriales que implican el agrietamiento, la disociación y la deposición, así como el pulido por gas. Ejemplos de procesos industriales que emplean plasmas incluyen, concretamente, una deposición en películas delgadas, química plasmática, tareas de pulverización por plasma y materiales a granel, síntesis de materiales, soldadura, fusión, etc.

15 Habitualmente, se miden las propiedades del plasma en términos de densidad (electrones por metro cúbico) y de temperatura de los electrones (que pueden ser medidas en K o electronvoltios), siendo esta una medida directa del grado de ionización; es decir, la proporción de los átomos que han perdido un electrón. La densidad y la temperatura del plasma pueden variar considerablemente; la densidad desde 10^{-3} hasta 10^{+30} partículas por metro cúbico, y la temperatura desde 0 K hasta 10^{+8} K. La vida útil del plasma también es una medida importante y también puede tener un intervalo muy amplio, normalmente entre 10^{-12} y 10^{+17} segundos. Por lo tanto, puede verse que el término "plasma" puede representar una gama sumamente amplia de condiciones y, para cualquier aplicación particular, es importante especificar el tipo de plasma que se usa.

20 Se sabe que existen diversas formas de plasma, catalogadas, en general, por sus características de energía: plasmas térmicos y plasmas no térmicos.

Plasmas térmicos (PT)

25 Los plasmas térmicos tienen electrones y partículas pesadas (iones y neutrales) a la misma temperatura; es decir, se encuentran en equilibrio térmico. Los plasmas térmicos son producidos fácilmente, por ejemplo mediante arco eléctrico, y, por ello, son fácilmente escalables, desde algunas decenas de vatios hasta varios megavatios. Normalmente, requieren una aportación elevada de energía para un resultado dado de reacción, ya que se calienta toda la masa de plasma, con pérdidas térmicas asociadas y problemas de gestión y de contención.

30 El efecto de los plasmas térmicos es simplemente aumentar el contenido de energía total y la temperatura media ponderada de los productos del tratamiento. En consecuencia, se establece una nueva composición de equilibrio de los componentes según la aportación energética del plasma, cuyo efecto en este caso es cuantitativamente idéntico al efecto de una aportación de energía térmica del mismo valor.

Plasmas no térmicos (PNT)

35 Los plasmas no térmicos no se encuentran en equilibrio termodinámico; por lo tanto, el efecto del plasma tiene como resultado una composición termodinámicamente no en equilibrio de los productos del tratamiento. Normalmente, la temperatura de los iones en los PNT es distinta de la temperatura de los electrones, siendo "más calientes" los electrones que las partículas pesadas. Por esta razón, los PNT también son denominados "plasma frío" o "plasma no en equilibrio" en la literatura.

40 Se pueden producir PNT utilizando varias técnicas, incluyendo la descarga eléctrica en plasmas acoplados capacitiva e inductivamente al vacío (descarga de barrera), así como procedimientos electromagnéticos de radiofrecuencia (RF) y microondas.

Aunque los plasmas térmicos pueden operar a cualquier presión, los PNT prefieren operar en condiciones de presión baja o cercana al vacío; algunas formas solo operan a presión reducida, mientras que otras, tales como los plasmas producidos por microondas pueden operar a presión elevada (atmosférica).

45 Los PNT a baja presión son relativamente fáciles de crear a volúmenes mayores y de iniciar, dado que se minimiza el efecto atenuador de las partículas pesadas circundantes; sin embargo, la densidad del plasma también está limitada, limitando así su valor comercial (los tiempos de residencia necesitan ser mayores). Los PNT de alta presión que operan casi a presión atmosférica, o por encima de la misma, son atenuados continuamente por la proximidad de las partículas pesadas (átomos) circundantes y, por lo tanto, requieren mayor energía de formación. Sin embargo, un plasma de alta intensidad tiene como resultado un reactor de plasma más versátil y viable comercialmente, dado que el tiempo de residencia es breve y es posible una operación continua. Así, son deseables plasmas intensos no en equilibrio, de energía elevada y alta presión, que pueden obtenerse por medio de plasmas no térmicos de microondas.

Plasmas no térmicos de microondas

5 Los PNT de microondas son particularmente eficaces para la química plasmática debido a que requieren una aportación de energía relativamente baja para formar plasmas muy reactivos debido a pérdidas térmicas reducidas y a efectos catalíticos intensos de las elevadas temperaturas de los electrones. Además, los PNT no producen ninguna contaminación por el electrodo cuando son creados mediante diseños de tobera sin electrodos.

10 Los PNT de microondas son notablemente difíciles de producir en volúmenes homogéneos, a diferencia de los sistemas de descarga de barrera, que pueden estar diseñados en áreas más grandes; sin embargo, los PNT de microondas son más eficaces en términos de acoplamiento energético, pero están restringidos por el tamaño de la fuente de microondas (magnetrón). Los magnetrones que operan con una potencia que supera 1 kW en el intervalo de frecuencias de GHz pueden mantener las descargas de microondas de estado estacionario a la presión atmosférica. A presiones reducidas e intermedias, el plasma está en fuerte desequilibrio: la temperatura del componente neutral ($T_g = 300$ K) es menor que la temperatura electrónica ($T_e \sim 1-2$ eV).

15 La mayoría de las aplicaciones químicas de plasma a gran escala requiere una potencia elevada y una alta presión para una productividad elevada del reactor. También es importante tener un grado elevado de desequilibrio, con una temperatura y una densidad elevadas de los electrones para soportar procedimientos químicos selectivos. Por lo tanto, es necesario tener una descarga potente que genere plasma no en equilibrio para aplicaciones químicas tanto con una eficacia como una selectividad elevadas.

Técnica anterior

20 Se sabe distribuir la energía de las microondas formadas en un magnetrón u otra fuente de energía de microondas en varios generadores de plasma. Cada generador de plasma emplea la porción de la energía de las microondas que es transferida al generador para generar una corriente de plasma inducida por microondas.

25 El documento EP 0 461 683 A2 da a conocer un aparato para un tratamiento por plasma, capaz de trabajar mediante tratamiento por plasma material de resina irradiando las superficies de las piezas con un plasma de descarga de microondas en el interior de una cámara de reacción al vacío, que comprende varias tuberías tubulares largas de irradiación de plasma, cada una de las cuales está dotada en la longitud de la misma de numerosos agujeros pequeños para inyectar plasma, y al menos una tubería recta de irradiación de plasma dispuesta con la abertura de su extremo libre hacia una sección a la que es difícil que fluya el plasma. Hay al menos una segunda tubería de irradiación de plasma ubicada de forma amovible en una posición opcional dentro de la cámara de reacción.

30 El documento WO 2007/086875 da a conocer un sistema S de tratamiento de piezas que está dotado de una unidad PU de generación de plasma que incluye un generador de microondas para generar microondas de 2,45 GHz, un guíaondas para hacer que se desplacen las microondas y un generador de plasma montado en una superficie del guíaondas orientado hacia una pieza W; y un transportador C de piezas para transportar la pieza W para que pase por el generador de plasma. El generador de plasma incluye desplegadas varias toberas de generación de plasma para recibir las microondas, que generan un gas convertido en plasma basado en la recepción de energía eléctrica y la descarga del gas generado. Se proyecta hacia la pieza W el gas convertido en plasma en el generador de plasma mientras la pieza W es transportada por medio del transportador C de piezas. Es posible tanto el tratamiento sucesivo por plasma de varias piezas como tratar eficientemente mediante plasma piezas de gran superficie.

40 El documento EP 1 936 656 da a conocer un generador de plasma para limpiar un objeto. El generador de plasma comprende una cámara de plasma y una estructura de soporte dispuesta en la cámara de plasma para soportar el objeto que ha de limpiarse. Además, el generador de plasma comprende un blindaje electromagnético que contrarresta un flujo de partículas cargadas de plasma que fluye desde una región de generación de plasma hacia el objeto, y una fuente de plasma. Además, el generador de plasma comprende una fuente adicional de plasma para formar una composición de fuentes de plasma que están dispuestas para generar plasmas en la región de generación de plasma, respectivamente, que interactúan mutuamente durante la operación del generador de plasma, de forma que se obligue a las partículas de plasma a fluir en un recorrido de flujo cerrado difusamente.

45 También es conocido el empleo de más de una fuente de energía de microondas para aumentar la densidad energética del plasma inducido por microondas en el reactor.

50 El documento WO 2010/094969 da a conocer un reactor de plasma que tiene una cámara de reacción y una o más fuentes de plasma en comunicación de fluido con la cámara de reacción. Se suministra a las fuentes de plasma un fluido que incluye un material que ha de ser ionizado, de forma que el material ionizado en forma de un plasma generado por las fuentes de plasma se recoja en una región de reacción de la cámara de reacción. Los productos reactantes son recogidos de la cámara de reacción para permitir la operación continua del reactor de plasma. Además, el reactor de plasma está adaptado para mantener particulados en suspensión en el interior de la cámara de reacción, lo que amplía la gama de procedimientos para los que es adecuado el reactor de plasma y mejora la eficiencia de tales procedimientos.

55

El documento WO 2010/094972 da a conocer un reactor de plasma con varias toberas de plasma de microondas y una cámara común de reacción. Se suministra a las toberas de plasma un fluido que incluye un material que ha de ser ionizado y cada tobera de plasma está conectada a una entrada a la cámara de reacción, de forma que el plasma generado dentro de la tobera sea suministrado a través de la entrada y sea recogido en el interior de la cámara de reacción. Es posible aumentar la escala del reactor de plasma mediante el uso simultáneo de múltiples toberas individuales de plasma y, por lo tanto, es adecuado para ser utilizado en el tratamiento de una amplia variedad de materias primas y a escala comercial.

El uso de dos o más generadores de plasma en un reactor de plasma, teniendo cada generador su fuente separada de energía de microondas, requiere una solución al problema de la interferencia destructiva entre los campos de microondas de las fuentes de energía en el reactor de plasma. Es necesario emplear una tobera de plasma capaz de generar y transferir el plasma inducido por las microondas desde la tobera al interior de reactor de plasma de una forma que evite que la energía de las microondas penetre en el reactor de plasma.

El documento US 5 206 471 da a conocer un generador de gas activado por microondas en el que se suministra energía de microondas a una región de formación de gas activado a través de la cual fluye, en una corriente de velocidad elevada, un gas que ha de ser activado. La corriente es alterada dentro de la región de activación, o en su proximidad, formando una región de estancamiento corriente abajo dentro de la región de formación de gas activado para incentivar la activación de gas por las microondas para acoplar eficientemente energía al gas para formar una corriente de gas activado de velocidad elevada y gran volumen.

El documento US 2004/0149700 da a conocer un procedimiento para la generación de microondas en una fuente de microondas de alta frecuencia, el guiado de las microondas en un guiaondas (1), la introducción de un gas de tratamiento a una presión de $p \geq 100$ kPa en un tubo transparente (2) a las microondas que comprende una abertura (4) de entrada de gas y una abertura (3) de salida de gas, siendo introducido el gas de tratamiento a través de la abertura (4) de entrada de gas en el tubo transparente (2) a las microondas de tal forma que tenga un componente tangencial de flujo, la generación de un plasma (7) en el tubo transparente (2) a las microondas por medio de una ignición sin electrodos del gas de tratamiento, la generación de un chorro (17) de plasma por medio de la introducción del plasma (7) en el espacio (16) de trabajo a través de una tobera metálica (5) de expansión dispuesta en la abertura (3) de salida de gas del tubo (2). En la Figura 1 se presenta un duplicado de la Figura 2 del documento.

Objetivo de la invención

El principal objetivo de la invención es proporcionar un procedimiento y un dispositivo para formar continuamente un plasma inducido por microondas de una fase gaseosa que es suministrada al dispositivo y transferir el plasma y la fase gaseosa a un espacio del reactor mientras se confina la radiación de microondas al interior del dispositivo.

Un objetivo adicional de la invención es proporcionar un procedimiento y un dispositivo de generación de plasma con un procesamiento eficaz de los gases y, por lo tanto, velocidades elevadas de conversión a plasma y una estabilidad mejorada del plasma.

Se pueden conseguir los objetivos de la invención por medio de las características definidas en la siguiente descripción y en las reivindicaciones y las figuras adjuntas.

Descripción de la invención

La invención está basada en la constatación de que se puede obtener una velocidad mejorada de conversión de un gas expuesto a energía de microondas formando un flujo derivado de recirculación del gas que ha de procesarse dándole la forma de un doble flujo turbulento en torno a la zona de generación de plasma, y de que se puede obtener un confinamiento eficaz de la radiación de microondas empleando un canal de salida de gas/plasma del dispositivo con dimensiones características menores que cierta fracción de la longitud de onda de la microonda estacionaria.

Así, en un primer aspecto, la presente invención versa sobre un procedimiento para tratar un gas según la reivindicación 1.

En un segundo aspecto, la presente invención versa sobre un dispositivo para tratar un gas según la reivindicación 5.

El confinamiento de la radiación de microondas al interior del tanque alargado (y de la cámara de microondas) según la invención, obtenido mediante un efecto de obstrucción de la cavidad en el canal de salida definido por las dimensiones características del canal de salida, debería ser empleado para obtener una eliminación eficaz de la fuga de la energía de las microondas a través del canal de salida y, por lo tanto, al interior del espacio del reactor. Se ha hallado que la cavidad de la obstrucción es eficaz cuando el diámetro interno, D, del canal de salida es igual o menor que un factor de $1/16$ de la longitud de onda del campo aplicado de microondas dentro de la cámara de microondas,

y una longitud, E, igual o menor que un factor de $(n + 1/8)$, $n \in \{0, 1, 2, 3\}$ de la longitud de onda del campo aplicado de microondas dentro de la cámara de microondas.

Sin embargo, debido a las mezclas de los modos de la radiación de microondas resultantes de la geometría del tanque alargado, se experimenta que puede emplearse con ventaja una segunda obstrucción de las microondas por las dimensiones características L y W, que son la longitud y la anchura, respectivamente, del tanque alargado, para obtener una eliminación más efectiva de la fuga de energía de las microondas a través del canal de salida y, así, al interior del espacio del reactor. Se ha descubierto que el efecto de la segunda obstrucción es satisfactoriamente efectivo cuando la longitud, L, es igual o menor que 1/4 de la longitud de onda de la microonda estacionaria dentro de la cámara de microondas y la anchura, W, es igual o menor que 1/8 de la longitud de onda de la microonda estacionaria dentro de la cámara de microondas. Con estas dimensiones características, se observa que la radiación de microondas se reflejará de manera efectiva desde las paredes del tanque alargado e impedirá sustancialmente que la radiación de microondas escape (se fugue) a través del canal de salida para el gas de plasma más o menos excitado. La expresión "longitud L", tal como se usa en la presente memoria, significa la distancia más corta en el espacio entre el plano definido por los puntos de la periferia del extremo inferior del canal cilíndrico de salida y el plano definido por los puntos a lo largo de la periferia del extremo más alto de la sección transparente a las microondas de la pared del tanque alargado.

La expresión "longitud de onda", tal como se usa en la presente memoria, significa el periodo espacial de la onda, que es la distancia entre puntos correspondientes consecutivos de la misma fase de la microonda oscilante en la cámara de microondas. La expresión "sustancialmente normal", tal como se usa en la presente memoria, significa que la orientación del tanque alargado está alineada para hacer el eje central del tanque alargado aproximadamente perpendicular a la dirección de propagación del vector de velocidad del campo de microondas dentro de la cámara de microondas. Aproximadamente perpendicular corresponde a un ángulo en el intervalo de 80 - 100°.

La invención según los aspectos primero y segundo está ilustrada esquemáticamente en la Figura 2, que es una vista en sección transversal a lo largo del eje central del tanque alargado. El número de referencia 100 es las paredes opacas del tanque alargado, 102 es el espacio interior con simetría cilíndrica, 103 es el primer extremo del espacio interior, 104 es el segundo extremo del espacio interior, 105 es el canal de salida, 106 son entradas para inyectar el gas que ha de ser tratado y formar el primer flujo turbulento (no se muestran los medios para formar el vórtice), 107 es una ilustración truncada de la cámara de microondas, 108 es el segmento de pared del tanque que es transparente a la radiación de microondas, y 109 es el plasma inducido por microondas. El eje central del tanque alargado aparece ilustrado como la línea discontinua entre A y A'. El plano definido por los puntos a lo largo de la periferia del extremo más elevado de la sección 108 de pared transparente a las microondas está marcado por una línea discontinua marcada P. La longitud, L, de la cavidad de obstrucción definida por las dimensiones interiores del tanque alargado está indicada con dos flechas orientadas verticalmente marcadas L, mientras que la anchura, W, de la cavidad de obstrucción está indicada por medio de dos flechas orientadas horizontalmente marcadas W. El diámetro interior, D, del canal de salida está indicado por dos flechas orientadas horizontalmente marcadas D, y la longitud, E, del canal de salida está indicada por dos flechas orientadas verticalmente marcadas E.

Los objetivos del procedimiento y del dispositivo según la invención se obtienen inyectando el gas a tratar de modo que forme un primer flujo turbulento a lo largo de las paredes interiores del tanque alargado. El gas en el primer vórtice actuará como un blindaje de la energía térmica que protege a las paredes (100 y 108) de estar directamente expuestas al plasma inducido por microondas al absorber el calor o la energía que escapa de la zona del plasma. Esto tiene el efecto ventajoso de precalentar el gas a tratar, de modo que una porción mayor del gas esté suficientemente excitada cuando entre en la zona generadora 109 de plasma cuando fluye hacia arriba en el segundo vórtice a lo largo del eje central. Esta característica aumenta la eficiencia energética del procedimiento y, así, mejora la viabilidad comercial de los plasmas de microondas. El doble flujo turbulento, orientado coaxialmente de forma opuesta dentro del tanque alargado también es ventajoso, porque el primer flujo turbulento hace de estabilizador que confina el gas en el segundo vórtice para que fluya en el espacio central del tanque, y mejorar así el contacto entre la energía de las microondas y el gas a tratar.

También se puede aplicar un tercer flujo turbulento dentro del tanque alargado para potenciar adicionalmente el efecto de blindaje contra la energía térmica que protege las paredes del tanque de la energía de las microondas, del efecto de precalentamiento en el gas antes de su entrada en la zona de formación de plasma, y del efecto de confinamiento (se impide que se expanda lateralmente el flujo central coaxial turbulento), lo que aumenta adicionalmente la eficiencia energética del procedimiento. Para formar tres flujos turbulentos coaxiales dentro del tanque alargado, es preciso que el gas sea introducido y se le dé un movimiento de remolino en el segundo extremo (frente al primer extremo, en el que está situado el canal de salida) del tanque. Cuando alcanza el primer extremo del tanque, es preciso que el gas arremolinado del primer flujo turbulento sea desviado para que fluya en la dirección opuesta (volviendo hacia el segundo extremo). Esto puede lograrse, por ejemplo, contando con un segmento curvado de pared que forme un semitubo anular, etc., en la sección periférica del tanque en el primer extremo. El gas que es desviado en el primer extremo forma un segundo flujo turbulento que fluye coaxialmente en la dirección opuesta y dentro del primer flujo turbulento hasta que el gas alcanza el segundo extremo. Allí el gas ha de ser desviado una segunda vez para formar un tercer flujo turbulento que fluye coaxialmente en la dirección opuesta y dentro del segundo flujo turbulento. El tercer flujo turbulento fluye a lo largo del eje central del tanque alargado y sale

a través del canal de salida. Debería hacerse que la microonda estacionaria en la cámara de microondas tuviera una cresta en el eje central, de modo que el gas que fluye en el tercer flujo turbulento se excite y se caliente para formar un plasma por la energía de las microondas.

5 Una realización ejemplar que emplea tres flujos turbulentos coaxiales está ilustrada esquemáticamente en la Figura 3, que es una vista en sección transversal a lo largo del eje central del tanque alargado. El número de referencia 200 es las paredes opacas del tanque alargado, 202 es el espacio interior con simetría cilíndrica, 203 es el primer extremo del espacio interior, 204 es el segundo extremo del espacio interior, 205 es el canal de salida, 206 son 10 entradas para inyectar el gas a tratar y formar el primer flujo turbulento (no se muestran los medios para la formación del vórtice), 207 es una ilustración truncada de la cámara de microondas, 208 es el segmento de pared del tanque que es transparente a la radiación de microondas, 209 es el plasma inducido por microondas y 210 es el segmento curvado de pared. El plano definido por los puntos a lo largo de la periferia del extremo más elevado de la sección 208 de pared transparente a las microondas está marcado por una línea discontinua marcada P. La longitud, L, de la cavidad de obstrucción definida por las dimensiones interiores del tanque alargado está indicada con dos flechas orientadas verticalmente marcadas L, mientras que la anchura, W, de la cavidad de obstrucción está indicada por 15 medio de dos flechas orientadas horizontalmente marcadas W. El diámetro interior, D, del canal de salida está indicado por dos flechas orientadas horizontalmente marcadas D, y la longitud, E, del canal de salida está indicada por dos flechas orientadas verticalmente marcadas E. Las especificaciones de las longitudes características D, E, L y W son iguales para la realización con tres flujos turbulentos coaxiales que las especificaciones dadas más arriba para la realización con dos flujos turbulentos coaxiales. Las direcciones de flujo del gas arremolinado en los flujos 20 turbulentos primero, según y tercero están indicadas por flechas gruesas.

La expresión "eje central", tal como se usa en la presente memoria, significa el eje de rotación del espacio interior simétrico cilíndrico del tanque. Debería observarse que solo el espacio interior del tanque alargado y el canal de salida precisan tener simetría cilíndrica en el eje de rotación A - A'. Los demás componentes del dispositivo pueden ser asimétricos o tener otros tipos de simetría.

25 La expresión "en la proximidad del primer extremo del tanque", tal como se usa en la presente memoria, significa una ubicación en el segmento de pared opaco a las microondas del tanque alargado en algún lugar entre el primer extremo y el plano P.

La expresión "primer flujo turbulento", tal como se usa en la presente memoria, significa un flujo del gas a tratar que está dando vueltas por la pared interior del espacio interior del tanque desde la entrada hacia la sección inferior del tanque. La expresión "segundo flujo turbulento", tal como se usa en la presente memoria, significa un flujo de gas y plasma en rotación confinado al espacio alineado con el eje central definido por la zona de baja presión del primer flujo turbulento y que resulta de la reflexión del gas que fluye en el primer flujo turbulento cuando golpea con la sección inferior del tanque. El segundo flujo turbulento estará situado, así, en el centro del primer flujo turbulento, pero discurrirá en la dirección opuesta desde la sección inferior del tanque y saldrá por la abertura de salida en el primer extremo. El flujo turbulento de doble capa de los flujos turbulentos primero y segundo se asemeja, así, al flujo de fluido de los separadores ciclónicos, con la excepción de que no hay ninguna abertura de salida en la sección inferior.

La expresión "pared inferior", tal como se usa en la presente memoria, significa el recinto inferior del espacio interior del tanque en el segundo extremo, y que es capaz de reflejar el gas entrante del primer flujo turbulento y formar el segundo flujo turbulento. La invención puede aplicar cualquier diseño conocido o concebible de la pared inferior que sea capaz de formar la estructura de doble vórtice. Sin embargo, resulta ventajoso emplear una pared inferior diseñada para proporcionar una transición suave de la componente vertical de la velocidad del gas que fluye en el primer flujo turbulento a una componente más o menos horizontal de la velocidad para obtener una zona de convergencia alrededor del punto central de la pared inferior que obliga a al gas a formar el segundo flujo turbulento orientado hacia arriba a lo largo del eje central. Esta característica se obtiene por medio de un elemento inferior del tanque con una pared interior conformada para formar un cierre cónico curvado con simetría cilíndrica del espacio interior. El cierre cónico curvado puede tener cualquier curvatura formada por la intersección de un plano vertical a través del eje central, tal como, por ejemplo, una semicircular, semielíptica o parabólica.

La expresión "cámara de microondas", tal como se usa en la presente memoria, significa cualquier cierre conocido o concebible capaz de contener y crear una onda estacionaria de radiación de microondas en el interior del cierre. Un ejemplo de cámara de microondas adecuada y muy usada es un paralelepípedo rectangular con paredes que es opaco y capaz de reflejar las microondas y que forma una cavidad interior con dimensiones correspondientes a un valor propio de la radiación de microondas. Este ejemplo de cámara de microondas también se denomina 50 guíaondas. Cuando se aplica esta forma de cámara de microondas, el tanque alargado debería penetrar a través de la cámara de microondas en una ubicación en la que la microonda estacionaria dentro de la cámara de microondas tiene una cresta ondulatoria, y estar colocada de modo que la sección central del tanque, transparente a las microondas, esté en el interior de la cámara de microondas. De ahí que se forme una zona de alta intensidad de energía de microondas dentro del tanque alargado para hacer contacto con un gas que discurre por el tanque alargado y excitarlo. La invención puede aplicarse a cualquier cámara de microondas conocida o concebible, tal como, por ejemplo, un cable coaxial, etc.

- La cámara de microondas está conectada a un generador de microondas que suministra radiación de microondas al interior de la cámara. La invención puede aplicarse a cualquier cámara de microondas y a cualquier fuente de microondas conocidas o concebibles, tal como, por ejemplo, un magnetrón. Ventajosamente, el generador de plasma de microondas puede ser un magnetrón coaxial alimentado con una energía entre 0,1 kW y 500 kW, más preferentemente entre 0,5 kW y 120 kW, y lo más preferible es que esté entre 1 kW y 75 kW. Las frecuencias de la radiación de microondas pueden estar ventajosamente en el intervalo de 0,6 GHz a 10 GHz, preferentemente de 0,9 GHz a 2,5 GHz. Este corresponde a una longitud de onda de 33 a 12 cm, respectivamente.
- El material de las paredes opacas del tanque alargado puede ser cualquier material conocido o concebible capaz de soportar el calor, las presiones y el entorno químico asociados con la formación de plasmas no térmicos de un gas. Ejemplos de materiales adecuados incluyen, sin limitación, metales o aleaciones tales como latón, cobre, acero, aluminio, cerámica tales como alúmina. Puede emplearse una refrigeración activa de las paredes, por ejemplo contando con canales en el volumen aparente de las paredes con refrigerantes en circulación o cualquier otra forma de refrigeración conocida o concebible de materiales sólidos.
- Los materiales de las paredes de la sección central del tanque alargado pueden ser de cualquier material concebible capaz de soportar el calor, las presiones y el entorno químico asociados con la formación de plasmas no térmicos de un gas. Ejemplos de materiales adecuados incluyen, sin limitación, politetrafluoroetileno, una cerámica de baja dielectricidad (que tenga una permitividad de menos de 10), tal como nitruro de boro, cuarzo, sílice, alúmina, etc.
- La invención puede aplicarse a cualquier procedimiento conocido o concebible para formar el primer flujo turbulento, tal como contar con un inductor de vórtices en la sección de entrada del espacio interior del tanque alargado, emplear inyección tangencial del gas al espacio interior del tanque alargado, poniendo al gas en un flujo helicoidal orientado descendientemente a lo largo de la pared interior, etc. Un ejemplo de inductor de flujo es dos, cuatro, seis, etc., chorros de aire situados en un canal anular en la pared del tanque alargado. El canal anular está situado a una distancia proximal del primer extremo y alineado de forma simétrica alrededor del eje central, mientras que los chorros de aire se forman insertando un número igual a m , siendo $m \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ piezas de un cuerpo consistente, cada uno dimensionado para formar un recinto hermético al gas con las paredes del canal anular y crear el mismo número de hendiduras entre los cuerpos consistentes que el número de cuerpos que se aplican en el canal anular. Cada hendidura formará un canal de flujo orientado tangencialmente para el gas que se inyecta. La presión aplicada al gas puede proporcionar ventajosamente una velocidad de gas en los chorros de aire en un intervalo de 1-100 l/min (corresponde a 2 - 320 m/s), mientras que el área de la sección transversal de la hendidura puede estar, ventajosamente, entre $1 \times 0,001 \text{ mm}^2$ y $30 \times 0,5 \text{ mm}^2$, preferentemente entre $5 \times 0,005 \text{ mm}^2$ y $25 \times 0,25 \text{ mm}^2$ y, más preferentemente, entre $10 \times 0,01 \text{ mm}^2$ y $20 \times 0,15 \text{ mm}^2$. La correspondiente presión del gas está en el intervalo de 0,10 a 0,45 megapascales (MPa).
- La característica de aplicar la luminiscencia residual del plasma para tratar los componentes del gas proporciona una ventaja, porque la fuente de energía externa (el campo de microondas) está ausente, de modo que las especies generadas por el plasma pierden su excitación y participan en reacciones químicas secundarias que tienden a formar especies estables. Dependiendo de la composición del gas, las colisiones superelásticas pueden seguir sosteniendo el plasma en la luminiscencia residual durante un tiempo liberando la energía almacenada en los átomos y las moléculas del plasma. Especialmente en gases moleculares, la química plasmática en la luminiscencia residual es significativamente diferente de la del plasma. Aunque la química del penacho de plasma está relacionada con la ruptura de los enlaces moleculares, la de la zona de luminiscencia residual está relacionada con la formación de nuevos enlaces. La química de la luminiscencia residual y el control de condiciones tales como la cantidad de energía, el gradiente energético, la solubilidad de los productos/reactantes, los sustratos, los catalizadores, etc., en la región de luminiscencia residual pueden ser ventajosos, al mejorar el control de la formación, la calidad y la selectividad de los productos de reacción deseados.
- Una luminiscencia residual del plasma puede ser o bien temporal, debida a una fuente de plasma interrumpida (a impulsos), o bien espacial, debida a la distancia de la fuente de plasma. En la presente invención se emplea una luminiscencia residual de plasma formada por una separación espacial obtenida por el diseño del dispositivo con la sección central del tanque alargado situada dentro de la cámara de microondas y el canal de salida con un efecto de obstrucción sobre la energía de las microondas.
- Además, se puede variar el diseño o, más precisamente, la geometría del canal de salida para regular la anchura y la longitud de la luminiscencia residual del plasma que sale por el canal de salida. Esto produce la capacidad de extender el plasma fuera de la cámara de microondas y al interior del espacio del reactor. Por ejemplo, disminuir el diámetro del canal de salida disminuye el diámetro del flujo turbulento de plasma/gas y, así, aumenta, la longitud de la zona del plasma. Esto permite alejar más el plasma de las paredes del tanque alargado y, así, reducir la degradación térmica y, a la vez, extender el plasma y, por lo tanto, la región de luminiscencia residual más lejos del campo de microondas. Esto hace posible aplicar más de un dispositivo, cada uno equipado con su propio generador de microondas (magnetron, etc.), para suministrar luminiscencia residual de plasma al interior de un único espacio reactor sin la preocupación por el problema de la interferencia destructiva entre los campos de microondas de los generadores de microondas. Esta característica hace del dispositivo según el segundo aspecto de la invención muy

apto para su uso en los reactores de plasma dados a conocer en los documentos WO 2010/094969 y WO 2010/094972.

5 El efecto de obstrucción de la tobera será satisfactorio con cualquier diámetro del canal de salida mayor que cero pero menor que $1/16$ de la longitud de onda de la microonda estacionaria dentro de la cámara de microondas. Sin embargo, en la práctica, será ventajoso hallar un equilibrio entre la necesidad de formación de una cavidad de obstrucción efectiva y la necesidad de tener una capacidad de flujo eficiencia de la salida para la luminiscencia residual de gas/plasma del segundo flujo turbulento, de modo que el diámetro, D , del canal de salida pueda ventajosamente estar en uno de los intervalos siguientes: desde un factor de $1/64$ hasta $1/16$, desde un factor de $1/32$ hasta $1/16$, o desde un factor de $1/24$ hasta $1/16$ de la longitud de onda de la microonda estacionaria dentro de la cámara de microondas. La longitud, E , del canal de salida puede, en correspondencia, tener uno de los intervalos siguientes: desde un factor de $(n+1/32)$ hasta $(n+1/8)$, desde un factor de $(n+1/16)$ hasta $(n+1/8)$, o desde un factor de $(n+1/12)$ hasta $(n+1/8)$, $n \in \{0, 1, 2, 3\}$, de la longitud de onda de la microonda estacionaria dentro de la cámara de microondas.

15 Además, el efecto de obstrucción de la segunda microonda obtenido por las dimensiones características L y W del tanque alargado pueden ventajosamente ser equilibradas entre la necesidad de formación de una cavidad de obstrucción efectiva y la necesidad de tener espacio para formar volúmenes eficientes de flujo de los flujos turbulentos primero y segundo, de modo que la anchura, W , de la cavidad de obstrucción en el espacio interior del tanque alargado pueda ventajosamente estar en uno de los intervalos siguientes: desde un factor de $(n+1/32)$ hasta $(n+1/8)$, desde un factor de $(n+1/16)$ hasta $(n+1/8)$, o desde un factor de $(n+1/12)$ hasta $(n+1/8)$, $n \in \{0, 1, 2, 3\}$, de la longitud de onda de la microonda estacionaria dentro de la cámara de microondas. La longitud, L , de la cavidad de obstrucción en el espacio interior del tanque alargado puede, en correspondencia, tener uno de los intervalos siguientes: desde un factor de $(n+1/16)$ hasta $(n+1/4)$, desde un factor de $(n+1/8)$ hasta $(n+1/4)$, o desde un factor de $(n+1/6)$ hasta $(n+1/4)$, $n \in \{0, 1, 2, 3\}$, de la longitud de onda de la microonda estacionaria dentro de la cámara de microondas.

25 La invención es apta para descomponer hidrocarburos y dar carbono particulado y gas hidrógeno. Ejemplos de gases aptos incluyen, sin limitación, gas natural, metano, etano, propano, butano, etc.

Lista de las figuras

La Figura 1 es una copia de la Fig. 2 del documento US 2004/0149700, que muestra una tobera de plasma de la técnica anterior.

30 La Figura 2 es un dibujo esquemático en sección transversal que ilustra el principio de los aspectos primero y segundo de la presente invención.

La Figura 3 es un dibujo esquemático en sección transversal que ilustra la solución del principio de una segunda realización ejemplar de la presente invención que emplea tres flujos turbulentos coaxiales.

35 La Figura 4a) es un dibujo esquemático en sección transversal de una realización ejemplar de la presente invención.

Las Figuras 4b) y c) son dibujos esquemáticos en sección transversal que muestran diseños alternativos del canal de salida que pueden implementarse en la realización ejemplar de la Figura 4a).

La Figura 5 es un dibujo esquemático de una tobera de plasma de la técnica anterior empleada en ensayos comparativos.

Descripción detallada de la invención

La invención será descrita con mayor detalle por medio de una realización ejemplar y un ensayo comparativo que verifica el efecto de una de las realizaciones ejemplares. No se debería interpretar en modo alguno la realización ejemplar como una limitación del alcance de la presente invención del empleo de dos o tres flujos turbulentos coaxiales para formar y estabilizar el plasma y usar la luminosidad residual del plasma para tratar el gas.

Realización ejemplar

La realización ejemplar de la invención está ilustrada en la Figura 4a), que muestra un tanque alargado 4 fabricado de latón. La longitud de la cavidad de obstrucción del espacio interior del tanque alargado 4 es de 50 mm, la anchura es de 25 mm, y la longitud del canal de salida es de 29 mm, y el diámetro del canal de salida es de 12 mm.

50 En la sección central del tanque 4 se practica un rebaje en la pared de latón y se inserta un guíaondas 1. El espacio interior del tanque 4 está cerrado hacia el guíaondas 1 por medio de un segmento 2 de pared tubular de 2 mm de grosor fabricado de nitruro de boro. El guíaondas 1 está conectado a un magnetrón que produce microondas con una longitud de onda de 174 mm y que es alimentado con una energía de 6 kW.

55 En el primer extremo, se proporciona un segmento 8 de pared que sobresale hacia abajo que forma un estrechamiento cónico truncado del espacio interior hacia el canal de salida. El segmento 8 de pared tiene simetría cilíndrica, de modo que forma un guiado con forma de embudo para la luminosidad residual del gas y/o el plasma en el segundo flujo turbulento en la sección superior del espacio interior. El segmento 8 de pared también formará un

intersticio anular hacia la pared del tanque alargado 4. Así, colocando la entrada 5 de gas aproximadamente al nivel superior del segmento 8 de pared, el segmento 8 de pared formará un canal de flujo anular orientado hacia abajo para el gas que se inyecta. Esto contribuye a estabilizar y dirigir el gas para formar el primer flujo turbulento.

5 La entrada 5 de gas conduce a un primer canal 6 de flujo anular formado en la pared gruesa del tanque alargado, que funciona como un colector que distribuye el gas alrededor de la periferia del primer extremo del espacio interior. El primer canal 6 de flujo anular está abierto hacia un canal anular 7, que está abierto hacia el canal de flujo anular orientado hacia abajo entre la pared del tanque y el segmento 8 de pared. Insertando un número de cuatro segmentos anulares 9 de un cilindro circular recto con un agujero coaxial pasante dimensionado para encajar exactamente en el canal anular 7 y formar un cierre hermético al gas hacia la pared gruesa del tanque alargado 4 pero que no llena completamente todo el espacio del canal anular 7, se forman hendiduras pasantes que conectan los canales de flujo entre el colector 6 y el canal de flujo anular orientado hacia abajo entre la pared del tanque y el segmento 8 de pared. Cada hendidura tiene un área en sección transversal de $15 \times 0,01 \text{ mm}^2$ y la cantidad de gas suministrada a la entrada 5 es de 50 litros normales por minuto.

15 El diseño del canal de salida puede ser empleado para proporcionar control sobre el flujo turbulento y, por lo tanto, sobre la geometría del plasma y la capacidad de tratamiento de gas del dispositivo. Empleando un canal de salida que tiene una abertura (hacia el espacio interior del tanque alargado) conformada como un embudo truncado seguido por una sección cilíndrica con área en sección transversal constante, como se muestra en la Figura 4a), se obtiene un vórtice estabilizado maximizado adecuado para su uso en casos en los que el gas a tratar produce plasmas inherentemente inestables, tales como, por ejemplo, metano, CH_4 .

20 Un diseño alternativo, mostrado en la Figura 4b), tiene un canal de salida cilíndrico con área en sección transversal constante, pero en el que la pared terminal del canal de salida está dotada de un rebaje 8b que refleja el gas que fluye alrededor del perímetro del segundo flujo turbulento y hace que el gas entre en el primer flujo turbulento y, subsiguientemente, realice una segunda pasada por la zona de formación del plasma. Este diseño es ventajoso en casos en los que el gas a tratar requiere una exposición más intensa al plasma.

25 En la Figura 4c) se muestra un segundo diseño alternativo. En este diseño, el canal de salida es un canal cilíndrico con área en sección transversal constante, pero la pared exterior del canal de salida está ahusada, de modo que el grosor de la pared del canal de salida disminuye hacia el extremo inferior. Esta característica hace que el canal de flujo para el primer flujo turbulento aumente gradualmente, lo que tiene el efecto de estrechar el espacio disponible para el segundo flujo turbulento. Así, este diseño es ventajoso en casos en los que es deseable producir un segundo vórtice de diámetro pequeño y, en consecuencia, alta velocidad de flujo para que tenga una región larga de luminosidad residual hacia el interior de la cámara del reactor. Este diseño es preferible para reactantes que producen una zona de luminosidad residual de menor duración.

Tobera comparativa

35 Se fabricó una tobera comparativa basada en la enseñanza de Jasinski et al [1] para comparar el efecto de la presente invención con toberas de la técnica anterior para tratar gases por medio de plasma inducido por microondas.

40 El dispositivo de comparación está ilustrado esquemáticamente en la Figura 5, y comprende un cuerpo (tubo) alargado de cuarzo 220 y está cerrado en el primer extremo por un cuerpo 270 de latón. El gas a tratar es inyectado por el primer extremo a través de la entrada 250 y enviado a un flujo arremolinado que discurre por el tubo de cuarzo. El tubo 220 de cuarzo está abierto por el segundo extremo, de modo que el gas fluya sin impedimentos al exterior del tubo. Hay un guíaondas 210 situado alrededor de la sección central del tubo 220 de cuarzo, de modo que el gas que fluye por el tubo se excite y se caliente, formando un plasma. El guíaondas 210 se conectó a un magnetrón que producía microondas con una longitud de onda de 174 mm y estaba alimentado con una energía de 3 kW.

45 La entrada 250 de gas conduce a un primer canal 260 de flujo anular formado en la pared gruesa del cuerpo 270 de latón, que funciona como un colector que distribuye el gas alrededor de la periferia del primer extremo del espacio interior. El primer canal 260 de flujo anular está abierto hacia un canal anular, que está abierto hacia el canal de flujo anular orientado hacia abajo entre la pared del tanque y la pared exterior del canal 230 de salida. El espacio del canal anular está completamente ocupado un miembro anular metálico 280 que tiene, homogéneamente separados alrededor de su periferia, cuatro canales cilíndricos pasantes 290 que forman una conexión de flujo entre el espacio interior del tanque alargado y el canal 260 de flujo. Los canales pasantes 290 de flujo están orientados de modo que el gas que se suministra a través de la entrada 250 sea inyectado tangencialmente en cuatro puntos equidistantes a lo largo del perímetro interior del espacio interior a la altura de la entrada 250 de gas y, así, forman un primer flujo turbulento que se arremolina a lo largo de la pared interior del tanque alargado bajando hasta la sección inferior.

Ensayo comparativo

Se llevó a cabo una serie de ensayos de comprobación con la realización ejemplar presentada más arriba (Figura 4) y la tobera de plasma de la técnica anterior descrita más arriba (Figura 5) para verificar el efecto de la invención.

5 Metodología de ensayo para ambas toberas: Se inició el plasma usando una barra metálica colocada en la zona del plasma en un flujo de 20 l normales/min de gas N₂ con aproximadamente 1500 W de energía de las microondas. Tras la iniciación, se retiró la barra y se aumentó la potencia continuamente a medida que se introducía lentamente un flujo de CH₄. Se aumentaron la potencia y el caudal de CH₄ hasta que se logró el nivel deseado y, posteriormente, se disminuyó el caudal de N₂ hasta que se logró el caudal deseado. Entonces se efectuó la reacción hasta que el sistema se equilibró y se tomaron muestras de la mezcla de gases de salida para analizar la concentración de H₂ y CH₄. La Tabla 1 da los resultados.

10 Según la Tabla 1, tenemos que la tasa media de conversión del CH₄ en estos siete ensayos comparativos es del 47,2% cuando se aplica la tobera de la técnica anterior y del 71,7% con la de la primera realización ejemplar. Esto es un incremento medio del 52% del efecto de la tobera. Las cifras correspondientes para la producción de H₂ son 30,6% para la tobera de la técnica anterior y 55,4% para la de la primera realización ejemplar de la invención. Esto es un incremento medio del 81,8%.

Tabla 1 Datos comparativos para la tobera de la técnica anterior y de la primera realización ejemplar de la invención

Caudal [l n/min]		Potencia de las microondas [W]	Conversión de CH ₄ [%]		Eficiencia en la formación de H ₂ [%]	
N ₂	CH ₄		P*	E*	P*	E*
12,3	2,7	1700	65,3	76,5	33,9	46,4
15,3	2,7	2100	52,4	77	34	65,5
17	3	1500	39,4	66,7	26,3	48,3
17	3	1700	48,1	71,8	31,1	55,2
17	3	1900	53,9	76,1	36,6	58,8
21,5	3,5	1700	38,5	69,2	26,3	59,2
26,1	3,5	1500	32,7	64,9	25,7	55,4

P* Tobera de la técnica anterior (Figura 5)

E* Realización ejemplar de la presente invención (Figura 4)

Referencia

15 1. Jasinski et al. (2008), "Hydrogen Production via Methane Reforming using various Microwave Plasma Sources", Chem. Listy., 102, pp. 1332-1337.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de tratamiento de un gas, comprendiendo el procedimiento:

- emplear un tanque alargado con un espacio interior de simetría cilíndrica, en el que el tanque alargado:
 - i) sobresale a través de una cámara de microondas,
 - 5 ii) la pared de la parte del tanque alargado que no está en contacto con la cámara de microondas es opaca a la radiación de microondas,
 - iii) la pared de la parte del tanque alargado que penetra en la cámara de microondas es transparente a la radiación de microondas,
 - 10 iv) el tanque alargado tiene en un primer extremo del tanque un canal cilíndrico alargado coaxial de salida con un diámetro interior, D , igual o menor que un factor de $1/16$ de la longitud de onda de un campo aplicado de microondas dentro de la cámara de microondas, y una longitud, E , igual o menor que un factor de $(n + 1/8)$, $n \in \{0, 1, 2, 3\}$, de la longitud de onda de un campo aplicado de microondas dentro de la cámara de microondas, y
 - 15 v) el tanque alargado está cerrado en un segundo extremo frente al primer extremo por medio de una pared inferior,
- inyectar el gas a tratar, de modo que forme un primer flujo turbulento que discurre por la pared interior del espacio interior del tanque y luego se refleje desde la pared inferior en el segundo extremo para formar un segundo flujo turbulento del gas a tratar que discurre a lo largo del eje central del tanque desde la pared inferior del tanque y que sale por el canal de salida en el primer extremo, y
- 20 - formar una microonda estacionaria en la cámara de microondas alineada para formar una cresta ondulatoria en el eje central del tanque en el área del tanque en la que es transparente a la energía de las microondas capaz de excitar al menos una porción del gas en el segundo vórtice para formar un plasma no térmico de microondas.

2. El procedimiento según la reivindicación 1 en el que se emplea un tanque alargado en el que

- 25 - la anchura, W , del espacio interior del tanque alargado está en uno de los intervalos siguientes: desde un factor de $(n+1/32)$ hasta $(n+1/8)$, desde un factor de $(n+1/16)$ hasta $(n+1/8)$, o desde un factor de $(n+1/12)$ hasta $(n+1/8)$, $n \in \{0, 1, 2, 3\}$, de la longitud de onda de la microonda estacionaria dentro de la cámara de microondas, y
- 30 - la longitud, L , del espacio interior del tanque alargado está en uno de los intervalos siguientes: desde un factor de $(n+1/16)$ hasta $(n+1/4)$, desde un factor de $(n+1/8)$ hasta $(n+1/4)$, o desde un factor de $(n+1/6)$ hasta $(n+1/4)$, $n \in \{0, 1, 2, 3\}$, de la longitud de onda de la microonda estacionaria dentro de la cámara de microondas.

3. El procedimiento según las reivindicaciones 1 o 2 en el que, en lugar de inyectar en el primer extremo del tanque alargado el gas a tratar, se inyecta en una posición en la proximidad del segundo extremo del tanque alargado, de modo que forme un primer flujo turbulento que discurre por la pared interior del espacio interior del tanque y luego se refleje desde la parte distal del primer extremo del tanque para formar un segundo flujo turbulento que discurre coaxialmente dentro del primer flujo turbulento y luego se refleja desde la pared inferior en el segundo extremo para formar un tercer flujo turbulento coaxial que discurre a lo largo del eje central del tanque desde la pared inferior del tanque y que sale por el canal de salida en el primer extremo.

4. El procedimiento según las reivindicaciones 1, 2 o 3 en el que el gas a tratar es uno de: gas natural, metano, etano, propano o butano.

5. Un dispositivo para tratar un gas según el procedimiento de las reivindicaciones 1 y 2, comprendiendo el dispositivo:

- 45 - una cámara (107, 207) de microondas que permite formar una microonda estacionaria dentro de la cámara y una fuente de radiación de microondas que es un magnetrón coaxial alimentado con una energía entre 0,1 kW y 500 kW, y que genera radiación de microondas con una frecuencia en el intervalo de 0,6 GHz a 10 GHz, estando acoplada la cámara a la fuente, y
- un tanque alargado (100, 200) con un espacio interior (102, 202) de simetría cilíndrica, en el que
- 50 - el tanque alargado sobresale a través de la cámara de microondas, de modo que el eje central longitudinal del tanque esté orientado de forma sustancialmente normal a la dirección de propagación de una microonda estacionaria en la cámara de microondas,
- la pared (108, 208) de la parte del tanque alargado que penetra en la cámara de microondas es transparente a la radiación de microondas, y
- 55 - el tanque alargado está cerrado en un segundo extremo (104, 204) en un segundo extremo frente a un primer extremo (103, 203) por medio de una pared inferior,

- 5
 - el tanque alargado tiene en el primer extremo un canal cilíndrico alargado coaxial (105, 205) de salida con un diámetro interior, D , igual o menor que un factor de $1/16$ de la longitud de onda de un campo aplicado de microondas dentro de la cámara de microondas, y una longitud, E , igual o menor que un factor de $(n + 1/8)$, $n \in \{0, 1, 2, 3\}$, de la longitud de onda de un campo aplicado de microondas dentro de la cámara de microondas, y
 - el tanque alargado penetra a través de la cámara de microondas en una posición tal que la microonda estacionaria dentro de la cámara de microondas tenga una cresta ondulatoria en el eje central longitudinal del tanque alargado,
- 10

caracterizado porque

 - la pared de la parte del tanque alargado que no está en contacto con la cámara de microondas es opaca a la radiación de microondas, y
 - el tanque alargado tiene una entrada (106) para la inyección del gas a tratar situada en una posición en la proximidad del primer extremo del tanque, y que inyecta el gas de modo que forme un primer flujo turbulento que discurre por la pared interior del espacio interior del tanque hasta la pared inferior del segundo extremo, y luego se refleja desde la pared inferior para formar un segundo flujo turbulento del gas que discurre a lo largo del eje central longitudinal del tanque desde la pared inferior del tanque y que sale por el canal de salida en el primer extremo.
- 15

6. El dispositivo según la reivindicación 5 para tratar un gas según el procedimiento de la reivindicación 3 en el que el tanque alargado tiene:

 - 20
 - una entrada (206) para la inyección del gas a tratar situada en una posición en la proximidad del segundo extremo (204) en lugar del primer extremo (203) del tanque, y
 - un segmento curvado (210) de pared que forma un semitubo anular orientado hacia el segundo extremo (204) situado en la sección periférica del tanque alargado en el primer extremo (203), de modo que el gas inyectado forme un primer flujo turbulento que discurre por la pared interior del espacio interior del tanque hasta el segmento curvado de pared que forma un segundo flujo turbulento del gas que discurre hacia el
 - 25
 - segundo extremo (204) del tanque alargado, en el que se refleja una vez más, formando un tercer flujo turbulento que discurre a lo largo del eje central longitudinal del tanque desde la pared inferior (204) del tanque y que sale por el canal (205) de salida en el primer extremo (203).
- 30

7. El dispositivo según las reivindicaciones 5 o 6 en el que

 - la anchura, W , del espacio interior del tanque alargado está en uno de los intervalos siguientes: desde un factor de $(n+1/32)$ hasta $(n+1/8)$, desde un factor de $(n+1/16)$ hasta $(n+1/8)$, o desde un factor de $(n+1/12)$ hasta $(n+1/8)$, $n \in \{0, 1, 2, 3\}$, de la longitud de onda de la microonda estacionaria dentro de la cámara de microondas, y
 - la longitud, L , del espacio interior del tanque alargado está en uno de los intervalos siguientes: desde un
 - 35
 - factor de $(n+1/16)$ hasta $(n+1/4)$, desde un factor de $(n+1/8)$ hasta $(n+1/4)$, o desde un factor de $(n+1/6)$ hasta $(n+1/4)$, $n \in \{0, 1, 2, 3\}$, de la longitud de onda de la microonda estacionaria dentro de la cámara de microondas.
- 40

8. El dispositivo según las reivindicaciones 5, 6 o 7 en el que la fuente de plasma de microondas

 - es un magnetrón coaxial alimentado con una energía entre 0,5 kW y 120 kW, preferentemente entre 1 kW y 75 kW, y que
 - genera radiación de microondas con una frecuencia en el intervalo de 0,9 GHz a 2,5 GHz.
- 45

9. El dispositivo según las reivindicaciones 5, 6 o 7 en el que el material de las paredes opacas del tanque alargado es uno de: latón, cobre, acero, aluminio o alúmina.

10. El dispositivo según las reivindicaciones 5, 6 o 7 en el que el material de las paredes transparentes de la sección central del tanque alargado es uno de: politetrafluoroetileno, nitruro de boro, cuarzo, sílice y alúmina.

11. El dispositivo según las reivindicaciones 5, 6 o 7 en el que la entrada está diseñada para proporcionar una inyección tangencial del gas a tratar al espacio interior del tanque.

12. El dispositivo según las reivindicaciones 5, 6 o 7 en el que el diseño del canal de salida está conformado como un túnel truncado seguido por una sección cilíndrica con área de sección transversal constante, o está conformado para que tenga un área de sección transversal constante y un rebaje (8b) en la pared terminal del canal de salida.

50

13. El dispositivo según las reivindicaciones 5, 6 o 7 en el que el diseño del canal de salida está conformado como un canal cilíndrico con área de sección transversal constante con una pared exterior ahusada del canal de salida, de modo que el grosor de la pared del canal de salida disminuya hacia el extremo inferior.

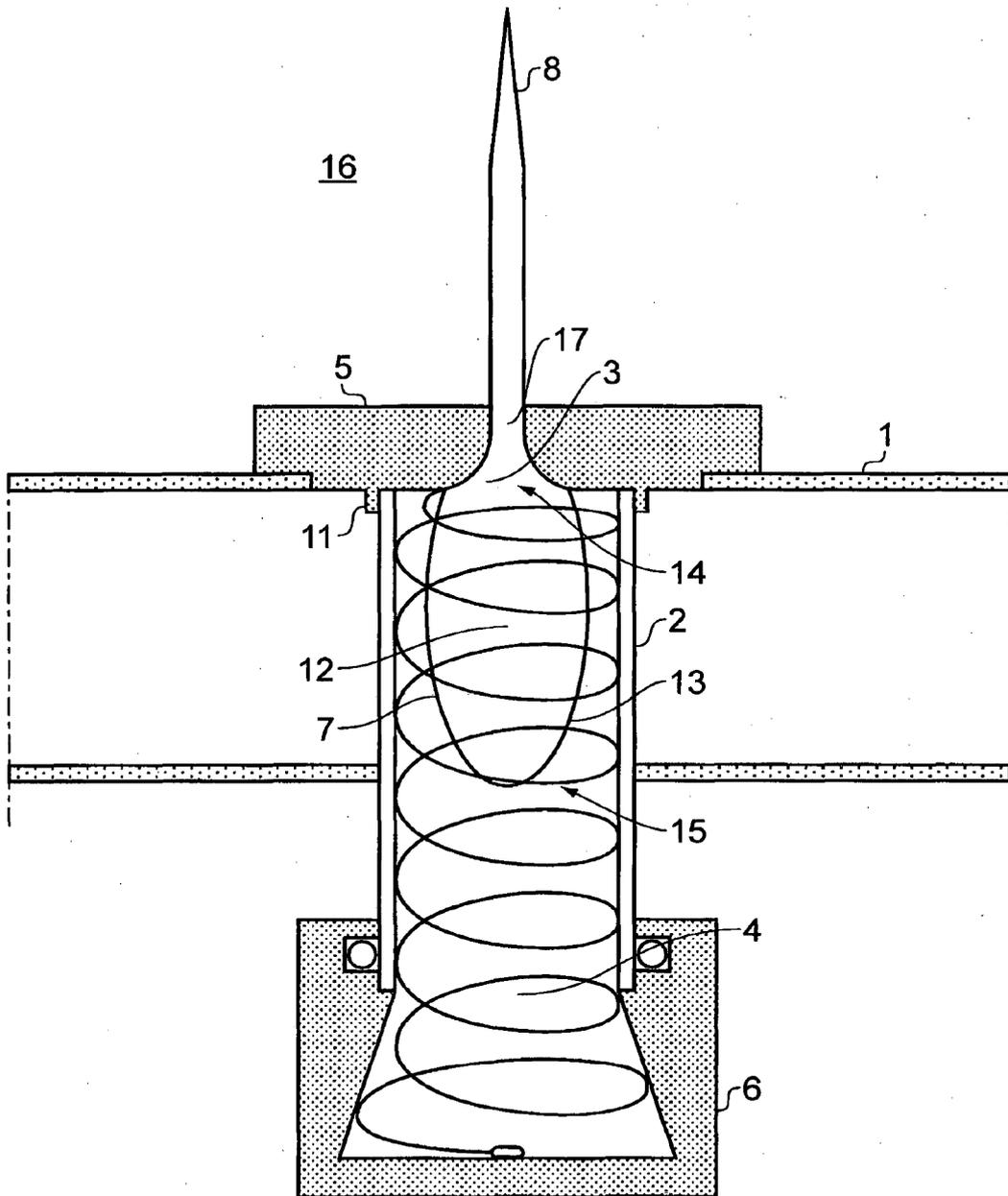


FIG. 1 (Técnica anterior)

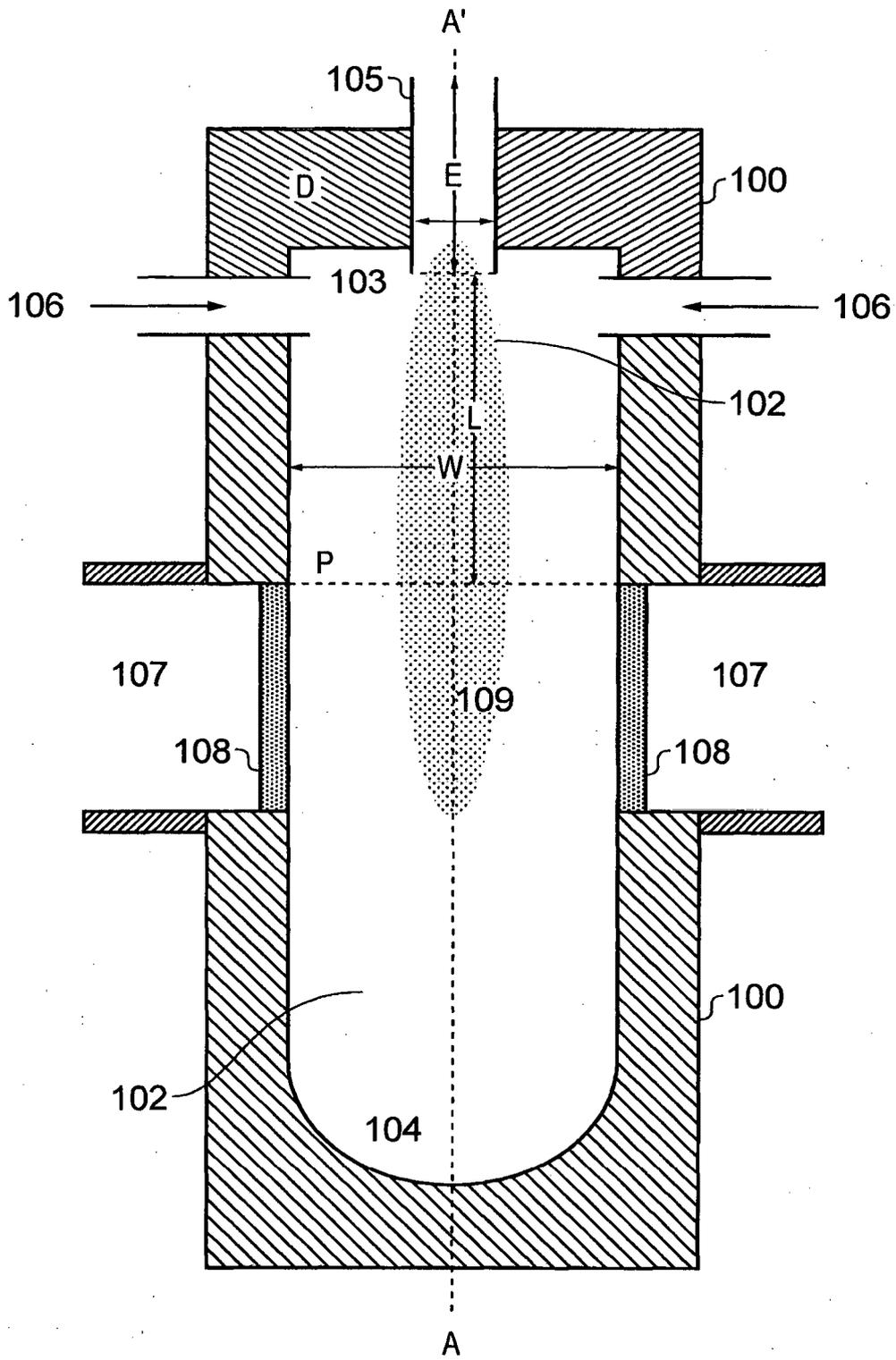


FIG. 2

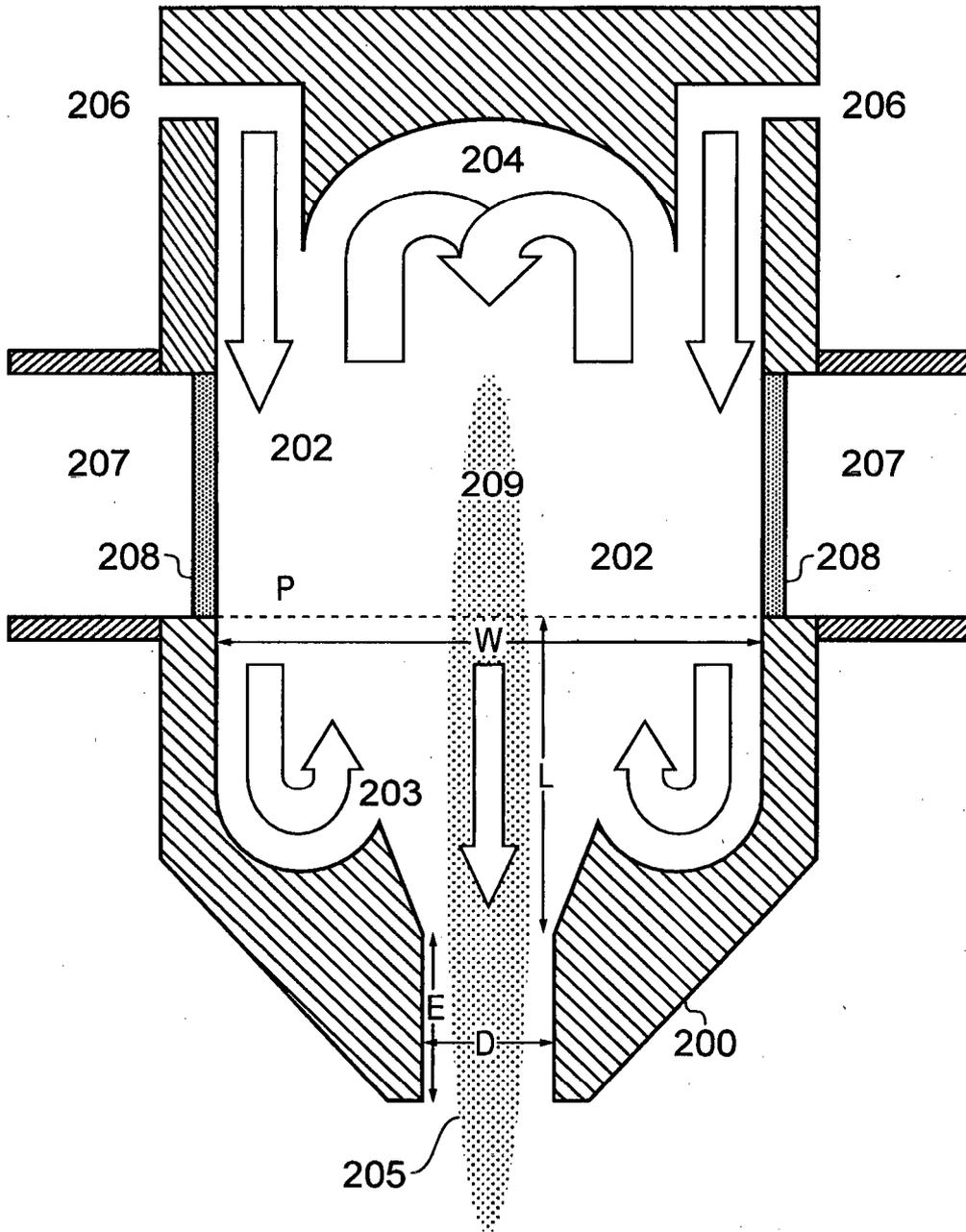


FIG. 3

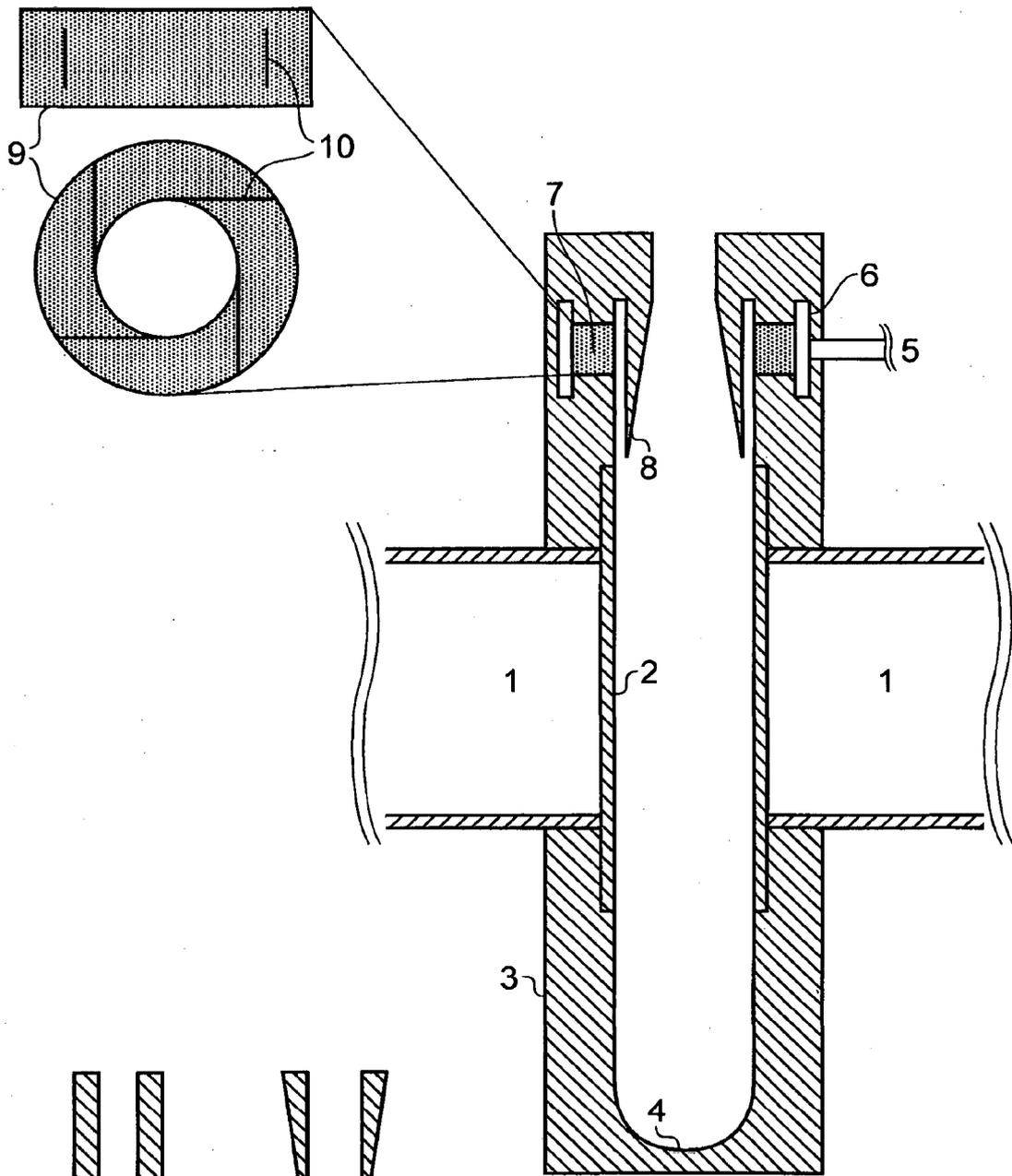


FIG. 4a

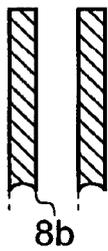


FIG. 4b

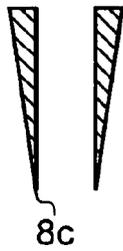


FIG. 4c

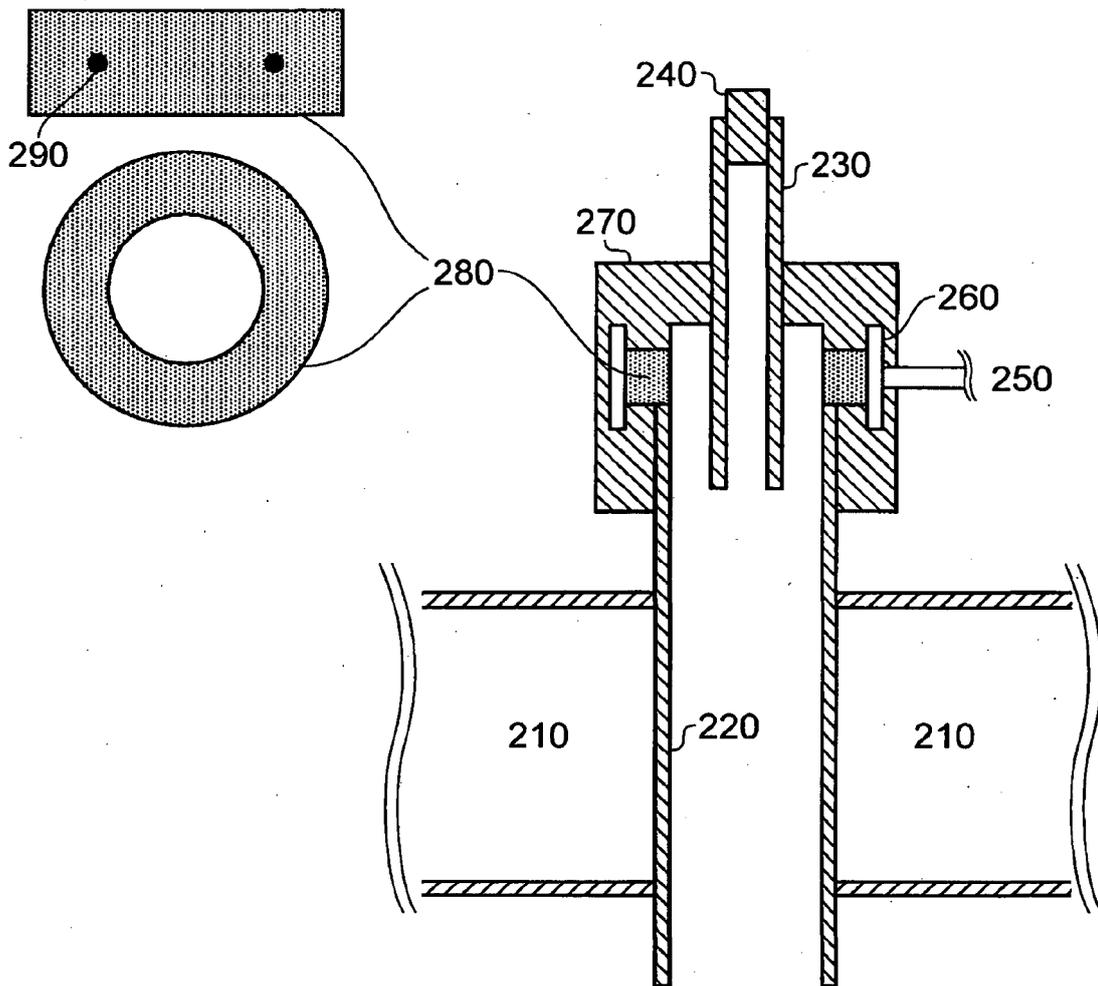


FIG. 5 (Técnica anterior)