

OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



1 Número de publicación: **2 368 813** 

(2006.01) <b>C10J 3/54</b>
(2006.01)
(2006.01)
(2006.01)
(2006.01)
(2006.01)
(2006.01)
(2006.01)
(2006.01)
(2006.01)

(12)

# TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

Т3

(2006.01)

96) Número de solicitud europea: 08878657 .9

96 Fecha de presentación: 14.11.2008

Número de publicación de la solicitud: 2227324

97 Fecha de publicación de la solicitud: 15.09.2010

PROCEDIMIENTO QUE UTILIZA ENERGIA TERMICA SOLAR ACOPLADA A PLASMAS PARA PRODUCIR UN CARBURANTE LÍQUIDO E HIDRÓGENO A PARTIR DE BIOMASA DE CARBÓN FÓSIL (PROCEDIMIENTO P-SL Y P-SH).					
(30) Prioridad: 16.11.2007 FR 0708031 25.01.2008 FR 0800384	73 Titular/es:UGOLIN, NICOLAS93 RUE REAUMUR75002 PARIS, FR				
<ul> <li>Fecha de publicación de la mención BOPI:</li> <li>22.11.2011</li> </ul>	Inventor/es: Ugolin, Nicolas				
<ul> <li>Fecha de la publicación del folleto de la patente:</li> <li>22.11.2011</li> </ul>	Agente: de Elzaburu Márquez, Alberto				

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 que utiliza energía térmica solar acoplada a plasmas para producir un carburante líquido e hidrógeno a partir de biomasa o de carbón fósil (procedimiento P-SL y P-SH)

- El agotamiento de los recursos petrolíferos y la contaminación por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que genera la combustión de productos petrolíferos (una de las causas principales del calentamiento climático) implican el desarrollo de procedimientos de producción de energías alternativas menos contaminantes, que permitan conservar la comodidad y el confort de la vida en los países industrializados y hacer frente a las demandas de energía siempre crecientes de los países emergentes. En efecto, el consumo energético mundial era de 5500 Mtep en 1971, de 10300 Mtep en 2002 y se evalúa en 16500 Mtep para el año 2030.
- 10 Sin embargo, es necesario distinguir:

- Por un lado, las necesidades energéticas destinadas al desarrollo industrial y urbano, que pueden ser calificadas de estáticas (para las cuales existen numerosas soluciones. Esencialmente, unidades de producción de electricidad solar, nuclear, hidráulica, geotérmica, eólica,...)

 Por otro lado, las necesidades energéticas ligadas a los transportes que necesitan el almacenamiento y el transporte de la energía por el propio vehículo, con la excepción de los vehículos eléctricos en línea, como los trenes y los tranvías...

Para esta última necesidad ligada al transporte, las soluciones resultan mucho menos evidentes, puesto que el o los carburantes utilizados en los diferentes modos de transporte han de responder a varios imperativos.

Deben ser fácilmente transportables y almacenables en condiciones de seguridad equivalentes al menos a las que existen actualmente para los productos petrolíferos, presentar un balance de contaminación (fabricación – utilización) inferior al de los hidrocarburos y, por último, ser viables económicamente cuando se comparan con respecto a los productos petrolíferos. El problema se complica todavía más cuando se tienen en cuenta las limitaciones e imperativos de un carburante compatible con los transportes aéreos.

Se dibujan diferentes vías para la producción de carburantes para vehículos:

- La producción de biocarburantes (alcoholes, ésteres).
  - La utilización de dihidrógeno como carburante en pilas de combustible o en motores térmicos.
  - La utilización de baterías con un rendimiento muy alto en vehículos eléctricos.
  - La utilización de biomasa o carbón para la producción de carburante.
- La producción de biocarburantes, alcoholes o ésteres de ácidos grasos, parece prometedora a primera vista y se ha 30 puesto en marcha ya en diferentes países. Sin embargo, estas soluciones no son perfectas; en efecto, las superficies a cultivar para ofrecer autonomía energética son colosales y representan más que el conjunto de superficies cultivadas actualmente. Por ello, estos cultivos entran en competencia con los cultivos para alimentación. Con frecuencia, las materias primas para la producción de estos biocarburantes son productos alimenticios como maíz, trigo, etc. Una producción intensa de biocarburantes de este tipo, además de desequilibrar la economía 35 agroalimentaria mundial, en particular la de los países emergentes y en vías de desarrollo, sería un vector fuerte de riesgo de hambrunas y de desórdenes ecológicos importantes.

Además, ciertos modos de producción de estos biocarburantes tienen un rendimiento energético muy bajo y un balance de contaminación elevado comparado con el del petróleo. Por ejemplo, se puede citar la producción de alcohol a partir de la remolacha o la producción de ácidos grasos o de ésteres a partir de la colza.

- 40 La utilización de dihidrógeno como carburante parece una solución elegante para un carburante limpio en su uso. Sin embargo, todavía no se ha resuelto el problema de producir dihidrógeno no contaminante por un precio de coste similar al de los productos petrolíferos. Además, antes de usar este carburante, es necesario resolver numerosos problemas relativos a su almacenamiento y distribución, debido a su peligrosidad.
- El almacenamiento de energía eléctrica en baterías que serán utilizadas en vehículos eléctricos o electro-térmicos es una de las soluciones propuestas por numerosos fabricantes de automóviles. Esta solución implica la producción de baterías de muy alto rendimiento a bajo coste que no generen contaminación o lo hagan en una cantidad muy pequeña, ya sea en su proceso de fabricación o en su proceso de reciclado. Además, subsiste el problema de la producción de un carburante alternativo para los vehículos de propulsión mixta electro-térmica.
- Según nuestro conocimiento, hasta la fecha no se ha propuesto ninguna solución de propulsión aeronáutica viable 50 basada en pilas de combustible o baterías eléctricas.

La utilización de biomasa y, en especial, de residuos vegetales, de celulosa o de productos agrícolas no valorizados,

representa un recurso importante de materias primas para la fabricación de carburantes líquidos, así como para las materias plásticas no reciclables en su último uso.

Las reservas de carbón fósil pueden todavía permitir satisfacer las necesidades de carburantes líquidos durante varios decenios.

5 Sin embargo, ya sea con biomasa o con carbón fósil, los procedimientos de gasificación utilizados para la fabricación de carburante líquido a partir de estas materias primas son todavía demasiado contaminantes en CO<sub>2</sub>, el cual puede representar del 20 al 40 % de los gases producidos.

Debido a esta pérdida de carbono en forma de CO<sub>2</sub>, la producción de carburante a partir de la biomasa por gasificación presenta un balance de contaminación que no es más que ligeramente favorable respecto del petróleo, que rápidamente se transforma en desfavorable si no se dominan las dificultades para controlar las emisiones de

- 10 CO2 durante la producción de las biomasas y su transporte a las fábricas de transformación. Minimizando las pérdidas de carbono en forma de CO<sub>2</sub> cuando se produce el carburante a partir de la biomasa, este balance podría conducirse al equilibrio o cerca de él, si se llega a secuestrar el CO<sub>2</sub> producido o a transformarlo en carburante con un rendimiento meior. En efecto, en estas condiciones, las biomasas fijarían una proporción de carbono equivalente 15
- a la liberada cuando se produce la combustión del carburante sintetizado.

Para el carbón fósil, la situación es completamente diferente. Cualquiera que sea el modo de transformación del carbón en carburante, la combustión del carburante lanzará a la atmósfera CO<sub>2</sub> que proviene del carbono fósil, además de subproductos indeseables (azufre, sulfuros,...).

- Un procedimiento de gasificación sin emisión de CO2 mejoraría el balance de contaminación de los carburantes 20 obtenidos, respecto de los productos petrolíferos. Sin embargo, para hacer que la balanza de contaminación de los carburantes de origen fósil sea equivalente a la balanza de los carburantes que provienen de la biomasa, deberán ponerse en práctica soluciones de secuestro o de transformación del CO<sub>2</sub> producido en los lugares de utilización de los biocarburantes, es decir, en los propios vehículos.
- Cada vez se desarrollan más métodos que permiten la transformación del CO<sub>2</sub> en productos valorizables; sin 25 embargo, pocos de dichos métodos describen soluciones adaptadas a la industria de gasificación de la biomasa o del carbón.

Se pueden citar dos grandes tipos de procedimientos de transformación del CO<sub>2</sub>:

50

- Los métodos catalíticos que consisten en reducir el CO2 a compuestos tales como el metanol, el formaldehido o el ácido fórmico, directamente valorizables.
- 30 Los procedimientos electroquímicos en fase gaseosa que consisten en reducir el CO2 a CO (monóxido de carbono) y dihidrógeno (H<sub>2</sub>), mediante la acción de descargas eléctricas.

Se señala que existen métodos electroquímicos en disolución que permiten transformar el CO<sub>2</sub> en ácido fórmico.

Si bien se puede valorizar de manera industrial, el metanol, el metanal o el ácido fórmico no permiten, más que muy difícilmente, la síntesis de hidrocarburos mediante procedimientos como el procedimiento Fischer-Tropsch (TP).

- 35 Los procedimientos electroquímicos en fase gaseosa pueden producir CO y H<sub>2</sub> a partir del CO<sub>2</sub> gas. Los métodos de arco deslizante (GlidArc por su denominación abreviada en inglés) son especialmente prometedores, si bien son todavía muy consumidores de energía (varios kilovoltios por metro cúbico de gas producido). Los procedimientos GlidArc descritos por el instante necesitan a menudo para reducir el CO<sub>2</sub> la utilización de aditivos gaseosos como ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) o metano (CH<sub>4</sub>). Estos métodos no se describen para oxidar partículas de materia
- 40 carbonizada o de carbono. Los aditivos que favorecen las reacciones son siempre gases. Las geometrías descritas para los procedimientos GlidArc hacen muy difícil la optimización de los rendimientos de las diferentes reacciones. en función de los flujos de los distintos gases. Los métodos GlidArc generan plasmas que se denominan "fuera de equilibrio". Ninguna descripción da cuenta de métodos mixtos que hagan intervenir de manera concomitante o alternativa un plasma fuera de equilibrio con un plasma termodinámico. Asimismo, no se ha hecho ningún estudio de 45 procedimientos de orientación de las reacciones que se hacen en un plasma mediante enriquecimientos en metales,
- partículas, o catalizadores, que permitan de este modo favorecer tal o cual reacción en un plasma.

La reducción del CO<sub>2</sub> a CO y H<sub>2</sub> es un punto clave tecnológico importante en la industria de la síntesis de los hidrocarburos. En efecto, una gran parte (del 30 al 40 %) de la materia prima (carbón, materia carbonizada) se pierde en forma de CO<sub>2</sub>, lo que hace esta industria extremadamente contaminante, además de suponer un coste económico.

Proponemos un procedimiento y una serie de dispositivos alternativos, adaptados a la gasificación de biomasas y de carbón, que permite producir un gas de síntesis (CO - H<sub>2</sub>) disminuyendo los costes energéticos cargados sobre la biomasa o el carbón para la síntesis. En efecto, la energía necesaria para las diferentes reacciones es aportada habitualmente por la combustión de una parte de la materia carbonizada o del carbón. En el procedimiento que se describe aquí, una gran parte de la energía es sustituida por energía solar y por la energía de los diferentes plasmas producidos a lo largo del procedimiento. Los diferentes plasmas utilizados son de origen mixto y la energía eléctrica necesaria para su producción proviene de energías renovables (solar, eólica) o de energía que proviene de la recuperación térmica a lo largo del dispositivo. Las pérdidas de carbono, en forma de CO<sub>2</sub>, se minimizan mediante la

5 utilización de plasmas de diferentes naturalezas (eléctrica, microondas, ICP, óptica). Estos plasmas se utilizan a lo largo del procedimiento como medios suplementarios para oxidar el carbono a CO y para reducir el CO<sub>2</sub> a CO. La acción de los plasmas se amplifica mediante su enriquecimiento con diferentes metales o elementos (Mg, Mn, Al, Fe, Si, SiO<sub>2</sub>,...).

#### Principio de funcionamiento

20

35

55

- 10 La invención consiste en un procedimiento que organiza una serie de unidades funcionales que utilizan la energía de microondas completada por energía térmica solar y/o por la energía de plasmas para llevar a cabo las diferentes etapas que intervienen en la gasificación de compuestos ricos en carbono tales como por ejemplo biomasas o carbón con el objetivo de producir un gas de síntesis (CO, H<sub>2</sub>) destinado por ejemplo a la síntesis de carburantes líquidos.
- 15 De forma general, pueden resultar convenientes todos los compuestos que tienen carbono. Además de las biomasas, es posible utilizar la basura producida en los hogares, pasta de papel, lodos que provienen de la depuración o del prensado de aguas residuales, ....

En lo que sigue de este documento, se denominará "sustrato" a las materias utilizadas para la gasificación. Preferentemente, el sustrato estará acondicionado o aglomerado en forma de partículas o gránulos más o menos húmedos, preferentemente con un contenido entre el 10 y el 30 % de humedad.

Preferentemente, la composición de los gránulos será reproducible por ejemplo gracias a una mezcla de materias de distintos orígenes (biomasa, lodos de depuración de aguas residuales, basura, pasta de papel...). La proporción de las diferentes materias necesarias para realizar los gránulos se define preferentemente al voleo, cuando se mezclan estas materias, merced a un análisis elemental de las materias que entran en la composición de los gránulos. Por

- 25 ejemplo, se utilizará un procedimiento LIBS (espectroscopía de plasma inducido por láser, según sus siglas en inglés) para definir la composición elemental de las diferentes materias que se mezclarán a medida que se vayan necesitando según proporciones definidas por el análisis, para proporcionar un gránulo con una composición elemental reproducible.
- Después de una eventual etapa de preparación del sustrato, el procedimiento de gasificación de los compuestos que 30 contienen carbono para la producción de un gas de síntesis que comprende principalmente CO y H<sub>2</sub>, se puede descomponer en dos etapas:
  - A) Una primera etapa de pirolisis con torrefacción de los compuestos, en materia carbonizada y gas de pirolisis, en un reactor solar de microondas, provocada por un calentamiento de los compuestos contenidos en dicho reactor solar de microondas, gracias a una energía térmica sinérgica aportada conjuntamente por una parte por el calentamiento de las paredes del reactor gracias a la concentración por convergencia o reflexión de una radiación solar en la superficie de dichas paredes y, por otra parte, por microondas inyectadas directamente en el interior del reactor y de los compuestos y
- B) Una segunda etapa de transformación de la materia carbonizada y de los gases de pirolisis, que provienen del reactor solar de microondas, principalmente en CO y H<sub>2</sub>, mediante reacciones químicas de oxidoreducción que se producen en un reactor ciclónico, permitiendo dicho reactor ciclónico la formación de vórtices gaseosos que contienen y oxidan las partículas de materia carbonizada, gracias a la combustión de los gases de pirolisis o de gas adicional, a la inyección en el reactor ciclónico de gas o de mezclas de gases calentados y a un calentamiento de los gases presentes directamente en dicho reactor bajo la acción de microondas inyectadas directamente en el reactor ciclónico.
- 45 Los gases utilizados para llevar a cabo las reacciones de oxidoreducción se calientan, se aceleran y se someten a presión bajo la acción sinérgica de la energía térmica que proviene del calentamiento de las paredes de un reactor de calentamiento, de presurización y de aceleración, por convergencia y/o reflexión de una radiación solar en la superficie de las paredes de dicho reactor y por microondas inyectadas en el interior de dicho reactor.
- Los reactores ciclónicos y/o los reactores de calentamiento, de presurización y de aceleración comprenden medios 50 para producir plasmas gaseosos y plasmas o plasmones mixtos de gas y partículas.

Las microondas se pueden utilizar a la vez que una radiación infrarroja preferentemente a frecuencias correspondientes a las frecuencias de absorción de los modos de vibración asimétricos de las moléculas de CO<sub>2</sub>.

El sustrato de gasificación puede contener partículas heterogéneas que tengan partículas de compuestos que contienen carbono y partículas de aditivos que favorezcan la gasificación, eventualmente aglomeradas o fusionadas con las partículas de los compuestos que contienen carbono.

Las partículas de aditivos pueden contener metales reductores que favorecen la gasificación mediante reacciones de oxidoreducción y la producción de elementos cargados y de radicales libres, bajo la acción de arcos eléctricos producidos mediante corrientes inducidas en las partículas, pero también partículas de sílice y/o de silicio que produzcan SiO capaz de fijar una parte del carbono contenido en los compuestos en forma de SiC.

- 5 La puesta en práctica del procedimiento hace intervenir un reactor solar y de microondas de pirolisis y torrefacción y un reactor ciclónico:
  - El reactor solar y de microondas de pirolisis y torrefacción tiene, entre otros elementos:
    - o una tubería, por ejemplo de material refractario;
    - medios para hacer progresar los compuestos en el interior de la tubería del reactor solar y de microondas de pirolisis y torrefacción;
      - medios para concentrar y hacer converger una radiación solar en la superficie de la tubería del reactor;
      - o medios para aislar la tubería del reactor del medio exterior;
      - o medios para mejorar la inercia térmica de la tubería del reactor;
- 15 o medios para producir microondas;
  - medios para guiar las microondas;
  - El reactor ciclónico tiene, entre otros elementos:
    - al menos dos unidades ciclónicas superpuestas o embutidas que se comunican entre ellas;
    - o dispositivos que permiten combustiones que inducen vórtices gaseosos en las unidades;
- 20 o dispositivos laterales o tangenciales de inyección de gas en las unidades, que inducen vórtices gaseosos;
  - o medios para producir y guiar microondas.

La puesta en práctica del procedimiento hace intervenir asimismo, entre otros elementos:

- un reactor de calentamiento, de presurización y de aceleración de los gases de oxidación que tiene:
- 25

30

45

10

- o una tubería, por ejemplo de material refractario;
  - medios para concentrar y hacer converger una radiación solar en la superficie de la tubería del reactor;
  - o medios para aislar la tubería del reactor del medio exterior;
  - o medios para mejorar la inercia térmica de la tubería del reactor;
- medios para hacer progresar los gases y, en su caso, las partículas a lo largo de la tubería del reactor, comprimiéndolas, calentándolas y acelerándolas, tales como los siguientes, sin ser exhaustivos: rotores de álabes, compresores centrífugos, turbinas, al menos una cámara anular, al menos una fuente de microondas eventualmente completada con una fuente de infrarrojos.
- dispositivos de corrientes eléctricas inducidas o no, de óptica y de microondas, para producir plasmas gaseosos y/o plasmones mixtos gas/partículas;
  - al menos un magnetrón y al menos una guía de ondas para producir microondas entre 1 GigaHertz y 300 GigaHertz y guiar dichas microondas.

1.1. En un modo de realización, la unidad funcional que permite la torrefacción y la pirolisis del sustrato es un reactor horno solar/microondas (H\_smo) constituido por una tubería, figura 1.1, cuyo diámetro está comprendido entre 1 centímetro y 5 metros y con una longitud comprendida entre 10 centímetros y 10 metros. La tubería será por ejemplo de material refractario, tal como, sin ser exhaustivo, de carbono recubierto de cerámica, de cerámica, de acero al wolframio, de titanio, de níquel,...

En el centro de la tubería se dispone un tornillo sinfín, figura 1.2, que permite el avance de la biomasa o del carbón a lo largo de la luz de la tubería. El sustrato se podrá organizar en gránulos o partículas homogéneas o no homogéneas, de tamaño comprendido entre algunos milímetros y algunos centímetros. En lo que sigue de este

documento, gránulos y partículas se denominarán con el nombre común de gránulos. En el exterior de la tubería, a una distancia constante, a lo largo de toda su longitud, se disponen uno varios espejos o concentradores solares, por ejemplo de aluminio, figura 1.3, que permiten hacer converger la luz del sol sobre la superficie de la tubería. Preferentemente, la tubería será de color negro mate, lo que permite un máximo de absorción de la luz y del calor de

- 5 la radiación solar. La pintura de la tubería podrá contener partículas de sílice de algunas micras de diámetro (partícula cuántica o "quantum dot") para optimizar la absorción de las radiaciones UV. De manera general, el revestimiento externo de la tubería podrá estar recubierto o constituido por materiales que permiten una absorción máxima del calor y de la luz, tales como los desarrollados por los sistemas solares para calentamiento de agua. En ciertos modos de realización, los espejos son, por ejemplo, espejos cóncavos o elipsoidales respecto del eje
- 10 principal de la tubería con el tornillo sinfín, de tal forma que el radio de curvatura sea igual a la distancia que separa los espejos de la superficie de la tubería con el tornillo sinfín. En otro modo de realización, los espejos podrán ser espejos de pequeños anchos rectangulares, dispuestos paralelamente al eje de la tubería con el tornillo sinfín, según sus longitudes, a una distancia constante de la superficie de la tubería. La distancia entre los espejos y la superficie de la tubería se definirá de tal forma que la anchura de la imagen o el reflejo del espejo en la superficie de la tubería
- 15 del tornillo sinfín sean inferiores al diámetro de la tubería, a fin de que toda la luz reflejada por un espejo llegue a la superficie de la tubería. Según una sección de la tubería con el tornillo sinfín, se dispondrá una serie de espejos de forma que la anchura de los espejos permita seguir en escalera un semicírculo o una sección elipsoidal cualquiera alrededor de la tubería, figura 1.4. En el caso de espejos perfectamente planos, basta con disponer espejos cuya anchura sea inferior al diámetro de la tubería con el tornillo sinfín. Cada espejo tendrá una inclinación más o menos
- 20 grande respecto de la tangente al soporte circular o elipsoidal a la altura de la fijación del espejo, para permitir reflejar la totalidad de la luz en la superficie de la tubería con el tornillo sinfín.

Se pueden considerar todas las situaciones intermedias que hagan intervenir múltiples espejos rectangulares cóncavos según una sección de la tubería con el tornillo sinfín. La distancia entre los espejos y la superficie del tornillo sinfín está definida por el radio de curvatura de los espejos. Eventualmente, esta distancia se puede disminuir

- 25 para que la anchura de la imagen del espejo sobre la tubería con el tornillo sinfín esté comprendida entre un punto (una línea a lo largo de la tubería) y el tamaño del diámetro de la tubería con el tornillo sinfín. El soporte de los espejos, en la porción de círculo o en la porción elipsoidal, pivotará alrededor de la tubería con el tornillo sinfín a fin de proporcionar la mejor reflexión de la luz sobre la superficie de la tubería. De igual modo, cada espejo poseerá eventualmente un eje propio que le permita pivotar respecto de la tangente del soporte, para ofrecer el mejor ángulo
- 30 de reflexión respecto de la posición del sol. El conjunto de movimientos de los soportes de los espejos o los de los propios espejos podrá eventualmente ser realizado por un sistema motorizado controlado por ordenador. La mejor orientación se determinará mediante células fotorreceptoras dispuestas sobre la tubería con el tornillo sinfín.

Preferentemente, las tuberías con los tornillos sinfín se dirigirán hacia el sur en su sentido longitudinal, con el fin de que reciban el máximo de soleamiento. Una zona de los espejos situada exactamente justo encima en vertical de la tubería con el tornillo sinfín nunca será iluminada. Los espejos en la zona de sombra se suprimirán eventualmente. La posición de la zona de sombra puede variar de una orientación a otra de la tubería con el tornillo sinfín; los ajustes se realizan en función de la orientación. Justo en la vertical de la zona de sombra por encima de la tubería con el tornillo sinfín similar o parecida a su distancia focal. El número de lentes dependerá del tamaño y del diámetro de la tubería con el tornillo sinfín. Las lentes se dispondrán sobre un soporte cuyos movimientos de

rotación son solidarios de las rotaciones del portador de los espejos del otro lado de la tubería con tornillo sinfín. En diferentes puntos de la tubería con tornillo sinfín, se introducen microondas de frecuencia comprendida entre 1

45

GHz y 300 GHz. El número de fuentes de microondas, comprendidas entre una y varias decenas, dependerá de la potencia deseada y del consumo eléctrico previsto para la instalación. En ciertos modos de realización, estas fuentes de microondas estarán constituidas por un solenoide que rodea la tubería con tornillo sinfín ligado a un generador de corriente eléctrica de altas frecuencias. Bajo la acción de corriente alterna, el solenoide genera radiofrecuencias en el seno de la tubería con tornillo sinfín.

- En un modo de realización preferido, la fuente de microondas es un magnetrón, figura 1.6. La parte del tornillo sinfín que está frente a la antena del magnetrón o frente a la guía de ondas está constituida, eventualmente, por un material insensible o transparente a las microondas y eléctricamente neutro, típicamente de cerámica. Preferentemente, la anchura de la tubería será igual a un número entero de longitudes de onda, λ, de las microondas utilizadas. Esta anchura se podrá modular en función del desfaseΦ debido a las reflexiones sobre las paredes. La región de la tubería donde se introducen las ondas producidas por la antena del magnetrón se recubre eventualmente sobre la cara interior con un material que pueda reflejar las microondas, típicamente una hoja de
- aluminio depositada sobre un recubirimiento cerámico (puede servir cualquier otro material reflectante de las microondas). La zona recubierta del reflector se extiende a un lado y a otro de la región donde se introducen las microondas preferentemente a una longitud igual a  $\lambda/4$  a fin de favorecer las interferencias constructivas. En un modo de realización preferido, el material que constituye la tubería con tornillo sinfín reflejará las microondas.
- Las microondas ocasionan el calentamiento muy rápido de las moléculas del sustrato de gasificación, por la agitación de las moléculas de agua contenida en los gránulos o de todas las otras moléculas que tengan un momento dipolar. El calor producido por las microondas junto con el calor de la convergencia de la radiación solar acarrea la torrefacción y la pirolisis del sustrato. Cuando se produce esta pirolisis, se produce un desprendimiento de

materiales volátiles que contienen alquitrán, así como diversos otros gases inflamables. Estos diferentes gases se recuperan mediante chimeneas de desgasificado, figura 2.8, para ser inyectados en un reactor de gasificación. Antes de su inyección en el gasificador, estos gases se pueden sobrecalentar (entre 160 y 2000 °C) por aporte de microondas mediante un magnetrón o con otra fuente de microondas.

5 1.2. En ciertos modos de realización, la tubería del reactor, figura 1.1a, se incluirá en un recinto de confinamiento transparente, figura 1.1c, bajo vacío, que permite limitar las pérdidas de calor hacia el medio exterior.

En ciertos modos de realización, el espacio comprendido entre el recinto de confinamiento y la tubería, figura 1.1b, se llenará con un gas que limite las pérdidas de calor hacia el medio exterior. Podrá tratarse de xenón, kriptón o argón, o de cualquier otro gas o mezcla de gases que permita limitar la pérdida de calor entre la superficie de la tubería del reactor y el medio ambiente exterior. En un modo de realización preferido, el recinto bajo vacío será una tubería de vidrio o de cualquier otro material transparente que contiene la tubería del reactor. La pared o la superficie de la tubería, figura 1.1d, podrán contener partículas cuánticas fluorescentes (partículas de cuarzo) que transformarán la luz solar ultravioleta en luz visible o infrarroja, permitiéndole de este modo franquear con un buen rendimiento la pared del recinto de confinamiento.

10

55

15 En ciertos modos de realización, la cara interior de la pared comprenderá una parte reflectante, figura 1.3a, que permita reflejar la luz hacia la superficie de la tubería del reactor.

1.3. En un modo de realización preferido, un extremo del tubo del reactor H\_smo, figura 11.1a, está abierto en el recinto de confinamiento transparente, figura 11.1c, de forma que el gas que limita las pérdidas de calor pueda penetrar en el interior de la tubería del reactor.

- Sin embargo, el extremo en cuestión de la tubería del reactor H\_smo se obturará mediante un cuerpo poroso, figura 11.85, que obligue a numerosos contactos entre el gas que penetra en la tubería del reactor H\_smo y las mallas del cuerpo poroso. El cuerpo poroso, preferentemente de cerámica, presenta una gran superficie de intercambio y desempeñará el papel de absorbente de la radiación solar mejorando la inercia térmica del reactor H\_smo. El cuerpo poroso será por ejemplo un monolito multicanales de tipo nido de abeja por ejemplo de cordierita o una espuma de
- 25 cerámicas porosas de carburo de silicio SiC. El cuerpo poroso estará recubierto o contendrá, por ejemplo, óxidos del tipo M<sub>x</sub>O<sub>y</sub> donde M se escoge, preferentemente, entre Al, Si, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ti, Zr. Los óxidos presentes en la superficie o en el cuerpo poroso catalizarán eventualmente la reducción del gas que atraviesa el cuerpo poroso, por ejemplo CO<sub>2</sub> a CO o H<sub>2</sub>O a O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>, en el caso de utilización del CO<sub>2</sub> o del H<sub>2</sub>O como gases que limitan las pérdidas de calor. En este modo de realización, se preferirá emplear gases de efecto invernadero como CO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub> o
- 30 H<sub>2</sub>O para desempeñar el papel de gas que limite las pérdidas de calor. El gas que limita las pérdidas de calor se inyecta en la cámara de confinamiento en la zona opuesta a la abertura de la tubería del reactor. El gas circula entonces en el recinto de confinamiento transparente aislando la pared de la tubería del reactor H\_smo de la del recinto de confinamiento transparente. De esta manera, el gas captura la radiación infrarroja que proviene de la pared de la tubería del reactor H smo calentado por la radiación solar y en el interior por las microondas.
- 35 calentándose él mismo durante su encaminamiento hacia la entrada de la tubería del reactor. El gas se mete entonces a través del cuerpo poroso donde se calienta todavía más al contacto con la estructura porosa. Bajo la acción de eventuales óxidos que pueden estar presentes en el cuerpo poroso, el gas se puede reducir. Entonces, el gas o su forma reducida penetran en la parte de la tubería del reactor que contiene el sustrato y el tornillo sin fin, donde contribuye a pirolizar y torrefactar el sustrato.
- 40 1.4. En un modo de realización específico, el reactor "Horno solar y microondas" (H\_smo) puede servir para aportar la energía necesaria a otros tipos de reacciones industriales tales como la fermentación alcohólica a partir de agua azucarada de zumo de caña de azúcar, o de molidos de caña de azúcar, pero también reacciones de digestión enzimática necesarias para la fabricación de azúcar a partir de remolacha, maíz, plátano, ....
- Entonces, se regula el sistema para alcanzar temperaturas más bajas (30 a 40 °C) que permitan las reacciones enzimáticas en el curso de la transición de los sustratos en la tubería del reactor bajo la acción del tornillo sinfín. El calentamiento del sustrato se hace al principio mediante la acción de las microondas y de la convergencia de la luz en la superficie de la tubería de reacción. Las enzimas necesarias para la fermentación, para la digestión y para las isomerizaciones se introducen según el orden deseado de las reacciones, después de la fuente de las microondas, mediante chimeneas de adición de fermentos.
- 50 De manera general, el reactor H\_smo se puede utilizar en todas las reacciones químicas o fisicoquímicas de síntesis, de lisis, de cambio de fase de uno o de varios productos o sustratos que necesitan un aporte calorífico para iniciar y/o mantener las reacciones, en especial reacciones de saponificación o esterificación.

2.1. Después de la pirolisis, la materia carbonizada o el carbono se vierten en un gasificador. Puede resultar conveniente cualquier tipo de gasificador. El modo de realización preferente utilizará un gasificador mixto de tipo lecho fijo / lecho fluido con ciclón (LFLC) o, de manera más general, un reactor ciclónico.

En un modo de realización concreto, el reactor LFLC está compuesto por un núcleo constituido por una tubería con un diámetro medio comprendido entre 10 cm y 5 m, figura 2.9. El núcleo puede ser de acero inoxidable refractario, titanio, zirconio, níquel, cerámica, acero al wolframio o cualquier otro material que soporte temperaturas superiores a

800 °C. El sustrato se vierte mediante un tornillo sinfín, figura 2.2, hacia una cámara de combustión ciclónica, figura 2.10, sobrepuesta sobre el núcleo del reactor, a través de una cámara de recogida, figura 2.98.

La cámara de combustión permite quemar los gases que provienen de la fase de pirólisis eventualmente con la adición de gases de combustión complementarios como metano. Los gases se queman por ejemplo mediante dos quemadores, figura 2.11, colocados de manera tangencial a la cámara de combustión, a fin de que las llamas, figura 2.13, arrastren el remolino de los gases de combustión, figura 2.12, (esencialmente CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) formando un vórtice de gas que desciende en el ciclón y una columna de gas que sube en el ciclón.

La entrada de la cámara de combustión está parcialmente obstruida por una estructura en cono, figura 2.20, tal que la cara inferior del cono esté guarnecida con ranuras (o álabes) que presentan una orientación similar al sentido de rotación del vórtice gaseoso de la cámara de combustión que permita de este modo la reorientación de los gases de la columna que suben hacia el vórtice gaseoso.

La cara superior del cono contiene ranuras que forman con el borde superior de la cámara de combustión conductos de entrada para que el sustrato vertido por el tornillo sinfín pueda penetrar en la cámara de combustión. Los conductos de entrada de la cámara de combustión están orientados en el sentido de rotación del vórtice de la cámara de combustión.

Un eje, figura 2.99, atraviesa la estructura cónica por su cumbre de tal forma que ésta pueda animarse con un movimiento de rotación. El eje estará provisto, por el lado de la cámara ciclónica de combustión, de un escudo térmico, figura 2.97, que le protege del calentamiento debido al gas que sube. En la cámara de combustión, una hélice, figura 2.96, se fija sobre el eje, de forma que la acción de la columna del gas que asciende hace girar el

- 20 conjunto solidario eje-hélice. En el otro extremo del eje, en la cámara que recibe el sustrato hay una lámina solidaria con el eje, figura 2.95, de tal forma que cuando gira éste, la lámina tritura los gránulos de sustrato vertidos por el tronillo sinfín a través de la cámara de recogida. El producto molido se aspira entonces a la cámara de combustión, a través de los conductos de la cara superior de la estructura en forma de cono, gracias a un efecto Bernouilli, provocado por el flujo de la columna de gas que asciende, sobre la cara inferior de la estructura cónica cuando se
- 25 redirigen los gases que suben del ciclón hacia el vórtice descendiente que gira. En ciertos modos de realización, la estructura que cierra la parte superior de la cámara ciclónica es un cono invertido, provisto de álabes, cuyo borde está curvado hacia la cámara ciclónica de combustión, permitiendo de esta manera reorientar mejor la columna de gas que sube hacia la cámara de combustión.
- La mezcla gaseosa quemada en la cámara de combustión (gas de pirolisis, aire, gas adicional) puede eventualmente hacerse directamente en la cámara de combustión gracias a tres tuberías independientes, figuras 2.14, 2.15 y 2.16, que alimentan un quemador de chiclés. Cada tubería difunde uno de los tres gases a la presión y a la velocidad deseadas; el encendido del quemador se dispara mediante una fuente de chispas (o de arcos eléctricos) dispuestos cerca de éste. El rendimiento de la combustión se controla mediante el caudal de gas de cada tubería.
- Sin embargo, se puede utilizar para alimentar los quemadores cualquier tipo de mezclador, descompresor, carburador, eventualmente asociado a caudalímetros de gas. Asimismo, se pueden adaptar diferentes tipos de quemadores. La presurización de los gases inyectados se puede conseguir gracias a turbocompresores asociando una turbina y una bomba; la bomba comprime los gases bajo la acción de la turbina movida mediante vapor de agua o por la expansión de otro gas o por cualquier otro procedimiento de presurización de gases.
- El volumen del núcleo del reactor está segmentado mediante faldillas sucesivas, figuras 2.17, 3.18 y 3.19. Cada faldilla está constituida por un cono agujereado con la parte estrecha dirigida hacia abajo que limita la luz del reactor a partir de la pared del núcleo. Estas faldillas desempeñan dos papeles. Limitan el compactado de la columna de gránulos y crean zonas de vórtice para favorecer bien la reacción:

 $C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$  (reacción 1: r1)

O bien la reacción:

5

10

15

45  $CO_2 + C \leftrightarrow 2CO$  (reacción 2: r2).

La circulación circular de los gases, que arrastran los gránulos torrefactados, permite un secuestro más largo de estos gránulos en los diferentes ciclones creados en el LFLC por la sucesión de faldillas. Con la materia carbonizada inyectada en los ciclones se puede mezclar un cuerpo abrasivo tal como arena, piedra pómez machacada o cualquier otro material abrasivo, con el fin de ejercer una abrasión o una erosión de las partículas de

- 50 materia carbonizada gracias al movimiento de giro de los gases, así como una mayor inercia térmica. Asimismo, la arena o el material abrasivo permitirán adsorber la materia fundida (metales que estén aún presentes en la materia carbonizada), evitando de este modo el colmatado de los poros y cánulas o ranuras del sistema. Se coloca una primera faldilla después de la cámara de combustión 17. A algunos centímetros por debajo de la abertura central de la faldilla, se dispone una estructura cónica 20 a fin de obstruir parcialmente (21) la abertura del embudo que forma
- 55 la faldilla. Se crea una serie de conductos 22 entre el borde de la faldilla 23 y la estructura con forma de cono 20 mediante un juego de álabes 24, de forma que sea obligatorio pasar por uno de estos conductos para atravesar el orificio de la faldilla. El tamaño de este conducto será suficiente para permitir el paso de los gránulos torrefactados.

Los conductos se disponen de manera regular según una rotación de un ángulo constante alrededor de la cumbre del cono que obstruye la faldilla. Eventualmente, los conductos serán curvos u oblicuos y orientados de tal forma que, al tomarlos, los gránulos y los gases sean proyectados tangencialmente a la pared del reactor en un movimiento de rotación que va en el mismo sentido que la rotación que se le ha impreso al gas de combustión por

- 5 los quemadores. La cara inferior del cono 25 está guarnecida de canales (o de álabes) 26 con una orientación similar a la de los conductos. En la cámara de combustión, los gases de combustión, a una temperatura superior a 800 °C y animados con un movimiento de rotación, van a "atacar" los gránulos torrefactados que se vierten desde el tornillo sinfín. Una parte de los gránulos se oxidará según las reacciones r1 y r2 y será arrastrada por los gases en un movimiento circular a través de los conductos del orificio de la faldilla. Por debajo de la primera faldilla, a una
- distancia comprendida entre 10 y 500 cm (preferentemente 50 cm) se dispone una segunda faldilla, figura 3.18, con el mismo dispositivo de conos y de conductos que la previamente descrita y que obstruye parcialmente la abertura de la faldilla. Entonces se inyecta en la parte alta del espacio delimitado por las dos faldillas, tangencialmente a la pared del reactor, figura 3.27, CO<sub>2</sub> o una mezcla H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> bajo presión a una temperatura superior a 800 °C, típicamente a 1500 °C, en el sentido de rotación impulsado por los quemadores. El espacio delimitado por las dos faldillas representa un ciclón de doble entrada axial y tangencial, figura 3.28. En un modo de realización preferido, el
- CO<sub>2</sub> será cinco veces más abundante que el H<sub>2</sub>O en la mezcla de gases inyectada tangencialmente.

En ciertos modos de realización, por debajo de la zona de introducción tangencial de la mezcla de gases, al menos un magnetrón, 6, 7, (o cualquier otra fuente de radiofrecuencia) impulsa microondas en el reactor entre las dos faldillas. Las microondas permiten sobrecalentar la mezcla de gases inyectada activando las reacciones r1 y r2 y

- 20 aumentando la velocidad del vórtice de gas y de gránulos. Cuando los gránulos llegan al nivel de la segunda faldilla, son arrastrados con una parte de los gases por los conductos del orificio de la faldilla; el resto de los gases, liberados de la mayoría de las partículas, remontan según el el centro del núcleo del reactor, en un flujo ascendente, hasta la cara inferior del cono superior que obstruye parcialmente el orificio de la primera faldilla. En el centro del reactor se dispone eventualmente un cilindro, figura 3.29, en el primer cuarto del espacio definido por las dos
- 25 faldillas, a fin de guiar los flujos de gases que ascienden hacia la cara inferior del cono de la faldilla superior. Los canales grabados sobre la cara inferior del cono imprimen un movimiento de rotación a los flujos ascendentes y los redirigen hacia los gases que giran descendentes del vórtice con el mismo sentido de rotación.
- En un cierto modo de realización, por encima de la segunda faldilla, se dispone una tercera faldilla parcialmente obstruida con un cono para formar una nueva unidad ciclón / microondas. Se inyecta entonces en la parte alta del espacio delimitado por la segunda y tercera faldilla vapor de agua a presión a una temperatura superior a 800 °C, típicamente a 1500 °C, tangencialmente a la pared del reactor, en el sentido de rotación impulsado por los quemadores y el ciclón precedentes. Por debajo de la región de inyección del vapor de agua, al menos un magnetrón (o cualquier otra fuente de radiofrecuencia) impulsa microondas en el ciclón, que permiten sobrecalentar el H<sub>2</sub>O activando fuertemente la reacción r1 (5 veces más rápida que la reacción r2 a la misma temperatura).
- 35 Eventualmente, las faldillas se pueden conectar a una o varias fuentes de ultrasonidos que permiten así inyectar ultrasonidos en el reactor a fin de romper las cubiertas de gas empobrecido en H<sub>2</sub>O y en CO<sub>2</sub> que se forman alrededor de los gránulos y que ralentizan las reacciones de gasificación. Asimismo, los ultrasonidos permiten fragmentar los gránulos durante la gasificación y hacerlos más accesibles. Eventualmente, las faldillas pueden estar ligadas a una fuente de vibración para facilitar el paso de los gránulos por los conductos.
- 40 En ciertos modos de realización, se introducen ultrasonidos de frecuencias comprendidas entre 1 KHz y 20 MHz en la unión de la faldilla con la tubería del núcleo del reactor, figuras 12.90 y 12.91. Los ultrasonidos permitirán la formación de aerosoles que provienen de la explosión de cavidades en líquidos tales como los alquitranes presentes sobre las paredes del ciclón y ayudarán a la reducción de estos alquitranes.
- Las unidades ciclón / microondas, definidas por dos faldillas, se pueden repetir un gran número de veces en el reactor LFLC con inyecciones de CO<sub>2</sub>, de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O o de H<sub>2</sub>O en no importa que orden. Esta estructura forma una red de ciclones superpuestos.

Se puede inyectar tangencialmente en los ciclones un gas complementario tal como metano. El metano será oxidado por el agua y el CO<sub>2</sub> a CO con producción de H<sub>2</sub>, según las reacciones:

 $CO_2 + CH_4 \rightarrow 2CO + 2H_2 \quad \Delta H_r(600 \text{ K}) = 205 \text{ KJ} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ (reacción 3: r3)}$ 

50  $H_2O + CH_4 \rightarrow 2CO + 3H_2 \quad \Delta H_r(600 \text{ K}) = 205 \text{ KJ} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ (reacción 4: r4)}$ 

55

El desprendimiento de  $H_2$  en el reactor disminuye la velocidad de la reacción r1, lo que favorece la reacción r2 y en consecuencia el consumo de CO<sub>2</sub> y mejora el balance de contaminación del sistema.

La zona del núcleo del reactor de gasificación que recibe las microondas podrá estar recubierta eventualmente con un material reflectante de las microondas, típicamente aluminio sobre un soporte de cerámica. Preferentemente, el núcleo del reactor se fabrica con un material que refleje las microondas y podrá tener un diámetro igual a un número entero de veces la longitud de onda λ de las microondas utilizadas. Esta anchura se podr modular en función del

entero de veces la longitud de onda  $\lambda$  de las microondas utilizadas. Esta anchura se por desfase  $\Phi$  debido a las reflexiones sobre las paredes.

2.2 En otro modo de realización, el núcleo del reactor estará constituido por dos tuberías embutidas para formar un LFLC de doble núcleo (LFLC\_dn). La tubería interna del núcleo comprenderá las unidades ciclón / microondas descritas precedentemente en el parágrafo 2.1. Los ciclones se modifican de tal forma que el cono que obstruye parcialmente la abertura de las faldillas y la tubería de ascenso del flujo al centro del ciclón se fusionan para formar

- 5 una estructura hueca en T, figura 4.30, que permite rechazar los flujos ascendentes del ciclón hacia el exterior del ciclón en la tubería externa del núcleo. El pie de la T está constituido por la tubería de ascenso de los flujos, figura 4.31. La unión entre el pie de la T y la barra horizontal está constituida por el cono. La barra horizontal de la T representa las toberas de salida del gas, figura 4.32, uniendo mediante una tubería hueca el cono al espacio situado entre la tubería interna, figura 4.33, y la tubería externa, figura 4.34 del núcleo del reactor. Denominaremos a la
- 10 estructura hueca horizontal que se identifica como la barra de la T "tobera horizontal", figura 4.32. En consecuencia, la tobera horizontal permite el paso de los flujos que remontan el ciclón por la tubería central hacia el espacio entre las dos tuberías embutidas que denominaremos espacio intertuberías, figura 4.35. La estructura en T se puede hacer más compleja duplicando las toberas horizontales por rotación en un mismo plano, perpendicularmente a la tubería de ascenso de los flujos del ciclón. La parte de las toberas horizontales situada entre el cono y el borde de
- 15 las faldillas se perfila en forma de álabe; el conjunto de los álabes está orientado en el mismo sentido, de forma que se cree un sistema de conductos oblicuos para la entrada de los gases y de las partículas en el ciclón situado por debajo, figura 4.36. La orientación de los álabes se definirá de tal modo que se imprima un movimiento de rotación con el mismo sentido que el movimiento de rotación inducido por los quemadores en la cámara de combustión (preferentemente, se escogerá el sentido inducido por la fuerza de Coriolis).
- 20 Se pueden añadir álabes intercalados a la estructura de "álabes de toberas" con el fin de optimizar el tamaño de los conductos sin tener que aumentar el número de toberas. Las toberas horizontales se curvarán en el sentido de rotación general de los gases en los reactores, o se dispondrán en oblicuo, para permitir una entrada de gas más o menos tangencial a la pared de la tubería externa del núcleo del reactor LFLC\_dn. La salida de las toberas estará dirigida ligeramente hacia abajo y llegará cerca de la pared de la tubería externa. Debido a la orientación de las
- 25 toberas horizontales, la entrada de los gases en el espacio intertuberías inducirá, en este espacio, un movimiento de rotación de los gases dirigido hacia abajo, formando un vórtice descendente que gira en el mismo sentido que el movimiento inducido en la cámara de combustión.

En la parte inferior del núcleo del reactor LFLC\_dn, la tubería externa será más larga que la tubería interna, en una longitud comprendida entre 10 cm y 5 m; preferentemente, será 100 cm más larga. La tubería externa formará en su extremo un cono abierto. Por ejemplo, el cono estará formado sobre una distancia de 50 cm para un extremo de tubería de 100 cm. Estas distancias son simplemente indicativas, siendo posibles múltiples conformaciones. La abertura del cono tendrá un diámetro comprendido entre el diámetro de la tubería interna + 30 % y el diámetro de los orificios delas faldillas de los ciclones de la tubería interna. La tubería externa del núcleo del LFLC\_dn forma de este modo un ciclón en el cual está incluida la tubería interna al nivel del flujo ascendente de la tubería externa. La

- 35 extremidad inferior de la tubería interna del núcleo se terminará con una faldilla que presenta una curvatura en forma de obús, figura 4.37, y un orificio con un obturador parcial que presenta una geometría particular. El obturador estará constituido por dos conos de tamaños diferentes o del mismo tamaño, figura 4.38, frente a frente y unidos por su base (bicono). Si los tamaños son distintos, el cono más pequeño obstruirá parcialmente el orificio de la faldilla mientras que el cono más grande servirá como cubierta protectora en la prolongación de la curvatura en obús de la
- 40 faldilla. La estructura bicónica estará fijada por ejemplo por el extremo puntiagudo del cono pequeño en un soporte dispuesto a través del orificio de la faldilla. Una parte del bicono o todo él podrá girar eventualmente alrededor del eje definido por la recta que pasa por las dos cumbres. Preferentemente, solo el cono más grande (el que está en la prolongación de la curvatura en obús) girará alrededor del eje. La cara cónica del cono en la prolongación de la curvatura eventualmente de motivos (canales y/o álabes) que la obliguen a girar bajo la
- 45 acción de los flujos que ascienden de la tubería externa. El flujo central del ciclón de la tubería externa del núcleo será separado y acelerado por el cono. La depresión creada por la separación y la aceleración aspirará los gránulos torrefactados que salen del último ciclón de la tubería interna del núcleo y los arrastrará más o menos lejos. La parte móvil de la estructura bicónica girará bajo la acción del flujo permitiendo una expulsión más eficaz de los gránulos. La presencia del bicono impedirá la compresión de las partículas en el último ciclón de la tubería interna. La
- 50 gasificación de los gránulos se acabará en la tubería externa del núcleo del reactor, bien en fase dinámica en los diferentes flujos del ciclón de la tubería externa, bien en fase estática en el lecho fijo después de acumulación en el fondo de la tubería externa.

Todos los elementos que atraviesan el espacio intertuberías:

- tuberías que alimentan los ciclones de la tubería interna del núcleo del reactor con CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y otros gases,
- guías de ondas que impulsan las microondas en el interior de los ciclones (en el caso de utilización de magnetrones como fuente de microondas),
  - salidas de las toberas de salida de los ciclones de la tubería interna,

se perfilarán de manera aerodinámica para no entorpecer el flujo de los gases. En un modo de realización específico, los elementos en el espacio intertuberías están recubiertos de estructuras perfiladas fijas, orientadas para no perturbar la orientación de los flujos. Estos perfiles o estructuras perfiladas serán pequeños segmentos móviles

60

alrededor de los diferentes conductos que se orientarán solos al mejor de los flujos de las diferentes regiones del ciclón de la tubería externa del núcleo del reactor. Las estructuras perfiladas serán por ejemplo pequeñas estructuras rectangulares o trapezoidales cuya longitud podrá variar de 0,5 cm a 1 m con una sección en forma de ala de avión o de gota de agua que cae. Cada estructura perfilada tendrá un eje hueco pivotante paralelo a la

- 5 longitud del rectángulo del trapecio, que permite disponerla sobre los diferentes conductos que atraviesan el espacio intertuberías. Preferentemente el pivote estará fuera de eje respecto del centro de gravedad para permitir una orientación rápida y estable en los diferentes flujos. De una manera general, se podrán utilizar para formar las estructuras perfiladas todas las formas perfiladas aerodinámicas que facilitan los flujos de los gases o de los fluidos. El conjunto de los elementos que pasan en el espacio intertuberías podrá ser perfilado mediante elementos móviles 10 aerodinámicos.

35

40

Las toberas horizontales de salida de los gases de los ciclones de la tubería interna penetran en el espacio intertuberías provistas de estructuras perfiladas móviles o fijas. Las toberas desembocan junto a la pared del tubo externo del núcleo del reactor tangencialmente con una orientación eventual hacia abajo. La distancia entre las salidas de las toberas y la pared de la tubería externa está comprendida entre 0 y 95 % de la distancia entre las dos

- 15 tuberías que forman el núcleo del reactor. Por encima de la salida de la tobera, se fija una estructura perfilada a la pared de la tubería externa del núcleo del reactor de tal forma que el borde de ataque de la estructura se dirija hacia arriba a fin de orientar el flujo que sale de la tobera hacia abajo con el ángulo deseado. En consecuencia, los flujos de gases que salen de las toberas horizontales se organizan en vórtice en corrientes que giran descendentes. El vórtice ataca el lecho de gránulos que provienen de la tubería central y que está depositado en el fondo de la tubería
- 20 externa. A este nivel, se realiza una fuerte gasificación por el ataque de los gases que penetrarán profundamente en el lecho para volver a subir en un flujo central que arrastra los gránulos más ligeros.

Sin embargo, cuando el lecho de gránulos es demasiado importante, el vórtice no puede atravesar todo el lecho. Para permitirle atacar los gránulos que llevan depositados más tiempo, se dispone eventualmente un mallado, cuyos poros están calibrados, sobre toda la parte de la pared de la tubería externa delimitada por la región situada entre el

25 último ciclón de la tubería interna y el fondo de la tubería externa, figura 5.39. Puede estar mallada toda la tubería interna, pero a costa de una pérdida de una parte de la energía cinética del vórtice; al contrario, se puede disminuir la superficie mallada para disminuir la pérdida de energía cinética del vórtice.

Para disminuir la pérdida de energía cinética del vórtex, se puede realizar el mallado en una hoja de materia lisa agujereada con orificios regulares o realizarse de tal forma que su trama más interna en el núcleo del reactor (es 30 decir, la primera en contacto con el vórtice) esté orientada en el sentido de rotación del vórtice (o sea, más o menos paralela a la estructura perfilada fijada sobre la tubería externa que sirve para orientar la rotación del vórtice).

A la altura del orificio del cono de la tubería externa, el mallado se organiza en cono ascendiendo hacia la tubería interna, figura 5.40. La trama del mallado del cono más interna al núcleo del reactor (primera en contacto con el vórtice) será paralela a la dirección principal (longitud) de la tubería externa o invertida respecto del mallado de la pared de la tubería externa del núcleo del reactor. El cono del mallado estará cerrado en su extremo, bien por el propio mallado o bien por una pieza bicónica, figura 5.41, (conos del mismo tamaño), esférica, ovoide, o de cualquier otra forma que favorezca el flujo de los fluidos.

Cuando llega a la altura del lecho de gránulos torrefactados, el vórtice penetrará bajo el lecho a través del mallado con las partículas más finas (de tamaño inferior a los poros del mallado) y gasificará las partículas de debajo del lecho, luego el vórtice se formara en columna de flujo ascendente alrededor y en el interior del cono de mallado para volver a subir al medio de la tubería externa del núcleo del reactor. Una parte del gas y de las partículas se escapará por el orificio del cono de la tubería externa del núcleo y será recuperada para tratamientos posteriores.

En ciertos modos de realización, una parte de la tubería externa, delimitada por la región situada entre el último ciclón de la tubería interna y el fondo de la tubería externa, estará ranurada con surcos de una anchura comprendida 45 entre 50 micras y 5 mm y una profundidad comprendida entre 100 micras y 2 cm; en un modo preferido, las ranuras tendrán 500 micras de ancho con una profundidad de 2 mm. En la parte cilíndrica de la tubería externa, las ranuras serán paralelas al sentido de rotación del vórtice (más o menos paralelas a la estructura perfilada fijada sobre la tubería externa para orientar la rotación del vórtice). En la parte cónica de la tubería paralela externa, las ranuras estarán, bien en los dos sentidos (paralelas al sentido de rotación del vórtice y perpendiculares a ese sentido) o bien

- 50 ausentes. Al igual que la rejilla, las ranuras pueden disminuir la energía cinética del vórtice (aunque la energía local en las ranuras sea aumentada por el efecto Venturi). Toda la tubería interna puede estar ranurada, pero, para limitar las pérdidas de energía, es preferible limitar la superficie ranurada. En ciertos modos de realización, la presencia de las ranuras se combina con la de la rejilla. Al igual que el mallado, las ranuras permiten el paso del vórtice bajo el lecho de partículas; sin embargo, las partículas arrastradas son más finas, en promedio.
- 55 2.3. En ciertos modos de realización, un rotor constituido por un cesto podrá acoger los gránulos que salen del último ciclón que compone la tubería interna del gasificador. En un modo de realización preferido, un cesto anular, figura 5.42, hueco en su centro (luz) (figura 5.43) está dispuesto sobre un eje (figura 5.44) que junta el centro de la luz con el cono del último ciclón de la tubería interna y con el fondo del LFLC\_dn. El eje está fijado, por ejemplo, mediante una cruz o una barra, dispuestos a través de la luz de la faldilla que cierra el último ciclón de la tubería interna del
- 60 reactor. El cesto está fijado al eje por una o varias hélices dispuestas (figura 5.45) entre las paredes de la luz del

cesto, lo que le permite girar alrededor del eje. Preferentemente, se diseñará el perfil o contorno de una de las hélices para que el flujo que asciende en la tubería externa del LFLC\_dn haga girar el cesto en el sentido de rotación del vórtice de gas en la tubería externa. Eventualmente, se recubrirá la luz del cesto con una tapa mallada en forma de bicono que permita dirigir los gránulos que salen del ciclón del piso superior en el cesto sin entorpecer el flujo que asciende.

5

10

60

La faldilla de salida del último ciclón, de la tubería interna del LFLC\_dn, estará provista eventualmente de un sistema de álabes, formando conductos hacia el espacio intertuberías por encima del cesto. Estos conductos se organizan alrededor de un corto cilindro enrejado, figura 5.46. El cilindro enrejado, formado por varillas metálicas verticales dispuestas a algunos milímetros unas de otras, figura 5.47, permite, por una parte, la formación del flujo que asciende por el ciclón y, por otra parte, filtrar los gránulos transportados por el vórtice del ciclón y dirigirlos a través de los conductos, figura 5.48-49, hacia el cesto anular. Este sistema de cilindro con reilla vertical se podrá adaptar a

todas las salidas del ciclón. Bajo la acción de las microondas, corrientes inducidas en las varillas provocarán arcos eléctricos que catalizarán en sus proximidades la síntesis de CO y de H<sub>2</sub>. En ciertos modos de realización, una varilla metálica de cada dos se aislará eléctricamente del soporte, estando conectadas las otras a tierra. El cilindro 15 con rejilla puede continuarse en el cilindro de subida de los flujos del ciclón inferior, figura 5.50a. En ciertos modos de realización, el cilindro de ascenso de los flujos se puede sustituir por un cono corto, figura 5.50a.

El borde externo del cesto anular se podrá dotar de álabes que tienen la misma pendiente que las estructuras perfiladas dispuestas sobre la pared de la tubería externa, para orientar el vórtice. Los álabes sobre la pared externa del cesto y las hélices de la luz permitirán al cesto girar a una velocidad cercana a la del vórtice. La fuerza centrífuga

- 20 resultante evita el apelmazamiento del lecho de materia carbonizada o de carbón en el fondo del reactor. En ciertos modos de realización, los álabes sobre la pared externa se completarán con álabes de la misma curvatura dispuestos sobre el borde externo del cesto y dirigidos hacia el interior del cesto, figura 5.51, o serán sustituidos por ellos. Estos álabes servirán, por una parte, para hacer girar el cesto bajo la acción del vórtice de la tubería interna y, por otra parte, para redirigir una parte del flujo del vórtice hacia el interior del cesto, para conseguir una gasificación
- 25 más eficaz. Las paredes del cesto se realizarán por ejemplo con una rejilla con poros calibrados o con una hoja de metal o de cualquier otro material agujereado con numerosos orificios calibrados. Las paredes externas del cesto serán rectas o curvadas hacia el exterior o hacia el interior, según las velocidades de rotación alcanzadas por el rotor y la potencia de la redirección de los gases hacia el interior del cesto en los diferentes modos de realización.
- 2.4. En un modo de realización específico del reactor LFLC\_dn descrito en 2.2, con excepción de la estructura en T, figura 6.30, situada a la altura de la faldilla, figura 6.17, que cierra la cámara de combustión, se reemplaza el conjunto de estructuras en T por una tubería hueca pegada al orificio de las faldillas en el ciclón interior a la faldilla, figura 6.46. La tubería se prolonga eventualmente en el ciclón superior mediante un cilindro formado por varillas verticales dispuestas a una distancia de unos milímetros unas de otras, figura 5.47. Un sistema de álabes forma conductos que conducen hacia el ciclón inferior, figuras 5.48 y 5.49. Estos conductos se organizan alrededor de la
- 35 tubería interna del núcleo y del cilindro de varillas verticales. Como consecuencia de ello, los flujos que suben de los diferentes ciclones, de la tubería interna del núcleo, se hacen comunes y se evacúan hacia el espacio entre las tuberías por la estructura en T de la faldilla que cierra la cámara de combustión. En esta última configuración, suprimiendo el bicono que obstruye parcialmente la última faldilla de la tubería interna del núcleo del reactor, o sustituyéndola por un cilindro o un cono huecos (una estructura cilíndrica con rejilla, figura 5.46), todo o parte del
- 40 flujo que asciende del ciclón formado por la tubería externa del núcleo se hace común con el flujo que asciende de los ciclones de la tubería interna del núcleo. En estas configuraciones, a una parte de las partículas que salen de los diferentes ciclones de la tubería interna se le hará retroceder en los ciclones y esto permitirá una gasificación más larga en sus niveles. El flujo que asciende de la tubería externa, que no pasa por la tubería interna, remontará toda la longitud de la tubería interna del núcleo del reactor. Son posibles todas las situaciones intermedias de supresión
- 45 de una parte de las estructuras en para hacer común el flujo que sube de ciclones contiguos. En este tipo de configuración, la alimentación tangencial de ciertos ciclones de la tubería interna de gas se puede hacer a partir de los gases que circulan en la tubería externa del reactor. Por ejemplo, los ciclones cuya estructura en T se sustituye por un cilindro corto pueden poseer al menos una tubería de alimentación de gas tangencial que se abre a la altura de la pared de la tubería externa del reactor, haciendo frente al sentido de rotación de los gases, para que se metan
- 50 en dicha tubería de alimentación. La tubería de alimentación de gases vuelve hacia el ciclón de la tubería interna según una dirección tangencial a la tubería interna, para permitir una inyección de los gases rasante a la pared del ciclón, a fin de imprimir a los gases una rotación en el interior del ciclón en el mismo sentido que el vórtice de la tubería interna.
- De manera general, los ciclones empleados en el gasificador son de carga tangencial para los gases y longitudinal 55 para los gránulos y los gases que provienen del piso superior. En consecuencia, la tubería interna del reactor está compuesta por una serie de ciclones superpuestos y conectados que permiten transmitir los gránulos que sufren una gasificación en los ciclones sucesivos.

2.5. En un modo de realización específico, al menos uno de los ciclones de la tubería interna del núcleo del reactor estará provisto de un electrodo helicoidal en forma de muelle unido a un electrodo en corona que permite el establecimiento de arcos eléctricos deslizándolo a lo largo del electrodo helicoidal (figura 6.52).

En un modo de realización concreto, el ciclón que tiene el electrodo será el último ciclón de la tubería interna del

núcleo del reactor y la faldilla en la que acaba tendrá forma de cono o de obús. Las paredes de este ciclón serán de material eléctricamente aislante. Los conductos de entrada de las partículas y de los gases y el cono invertido o el cilindro situado en lo alto del ciclón serán de metal o de un material conductor de la electricidad. La parte superior del ciclón formará un electrodo que se pone a tierra y/o se conecta a un potencial negativo. El electrodo en forma de

- 5 muelle se dispondrá cerca de la pared del reactor. La base del muelle acaba en una estructura en corona para cerrar la última espira sobre ella misma, figura 6.53. El otro extremo del muelle se curva para volver a pasar por el medio de la espiral del muelle, de manera que se forme un eje central, figura 6.54. El muelle está colocado en la parte cónica del ciclón por su extremo que tiene la estructura en forma de corona. En reposo, el muelle está a una distancia comprendida entre 0,5 m y 2 cm del electrodo de la parte superior del ciclón. La varilla axial del muelle se
- 10 prolonga y sale del ciclón por la luz de la faldilla inferior. Está varilla central se conectará en el exterior del reactor a un sistema manual o automático que permite accionar el muelle comprimiéndolo para acortarlo o estirándolo para alargarlo. Por ejemplo, la varilla se conectará a otra varilla perpendicular hecha de un material eléctricamente aislante. La varilla perpendicular sale del reactor y está conectada por ejemplo a un servomotor o a un gato eléctrico que permite comprimir o estirar el muelle. Por otra parte, el muelle está conectado a un generador de corriente
- 15 alterna, discontinua o continua de alto voltaje que puede proporcionar de 100 V a 100 kV. El muelle se estirará o se comprimirá más o menos según la tensión eléctrica aplicada, pero también según la velocidad y la temperatura de los gases que circulan en el ciclón. Esta compresión o estiramiento del muelle hace variar la distancia entre el muelle y el electrodo de la parte superior del ciclón y la distancia entre las vueltas de la espiral del muelle, lo que permite regular y ajustar la naturaleza del arco deslizante obtenido a los parámetros fisicoguímicos y de flujo de los gases y
- 20 de las partículas en el ciclón. Bajo la acción del potencial eléctrico, se forman arcos entre el electrodo de tierra y el muelle. A continuación estos arcos eléctricos son empujados hacia el electrodo en corona por los flujos que giran en el ciclón. Estos arcos interactúan con las partículas y los gases que atraviesan el ciclón, creando moléculas reactivas (radicales libres y moléculas cargadas) que van a interaccionar entre ellas y con los gránulos para formar CO y H<sub>2</sub>, limitando a la vez la producción de metano. Cuando se forman los arcos eléctricos, la variación de la circulación
- 25 eléctrica en el muelle implica variaciones del campo magnético inducido por el solenoide del muelle. Estas variaciones del campo magnético van a aumentar la energía cinética de las moléculas polares y cargadas, haciéndolas más reactivas.

En ciertos modos de realización, se inyectarán metano y vapor de agua en esta etapa de los ciclones GlidArc para favorecer las reacciones r3 y r4.

- 30 En ciertos modos de realización, se invectan microondas en el interior del ciclón. Bajo la acción de las microondas, por una parte la energía cinética de las moléculas cargadas, bajo el efecto de los arcos (además de las moléculas dipolares) aumenta la temperatura del gas, haciéndolo aún más reactivo y, por otra parte, las corrientes inducidas en el muelle activarán arcos eléctricos entre el electrodo en espiral y el electrodo de la parte superior del ciclón. Bajo la acción de las microondas, el ciclón de electrodo helicoidal puede funcionar en modo GligArc sin que esté puesto bajo 35 tensión eléctrica.

2.6. En ciertos modos de realización, se disponen en roseta, figura 6.57, al menos tres ciclones que tiene cada uno un electrodo helicoidal, figura 6.55, alrededor de la luz de la faldilla del último ciclón en el que termina la tubería interna del LFLC dn, figura 6.58. Los electrodos helicoidales de estos ciclones se construirán sobre la base del mismo principio que el electrodo descrito en (2.5), si bien la escala de realización será reducida. En efecto, las

- 40 tuberías que constituyen los ciclones tendrán un diámetro comprendido entre 20 y 400 mm y acabarán en un cono abierto. O bien los ejes de los electrodos se conectan individualmente en el exterior del reactor de la manera descrita en 2.5 o bien todos los ejes de los electrodos se conectan a una estructura en forma de estrella, figura 6.56, que permite accionarlos a la vez. En ciertos modos de realización, la estructura en estrella estará hueca en su centro, dejando pasar el eje de rotación del cesto descrito en 2.3. Un eje hueco que parte de la estrella está conectado a un
- 45 eje perpendicular que es eléctricamente aislante. Este eje permite comprimir o extender al mismo tiempo todos los muelles de los ciclones. La luz de la roseta definida por los ciclones GlidArc constituye el paso del flujo común que sube al ciclón que representa la tubería externa y a los ciclones superpuestos de la tubería interna. En la parte alta de cada ciclón de arco deslizante, se implanta una tubería de alimentación de gas de manera tangencial a la pared del ciclón; la tubería se abre en el espacio intertuberías frente al vórtice de la tubería externa cerca de su pared,
- 50 figura 6.64. La disposición de la tubería de alimentación permite a una parte de los gases del vórtice de la tubería externa meterse en los ciclones de la roseta, creando un vórtice en cada uno de ellos. La parte alta de cada ciclón se cerrará mediante tapas, figura 6.58, agujereadas en su centro por el paso de un cilindro hueco que forma una tubería en la parte alta del ciclón, figura 6.59. Este cilindro permite recuperar el flujo que asciende al centro del ciclón de arco GlidArc, para conducirlo al espacio intertuberías. La parte del cilindro que se encuentra en el espacio
- 55 intertuberías está curvada y se dirige hacia la pared de la tubería exterior del LFLC n de tal forma que el orificio de abertura esté cerca de la pared de la tubería externa. En un modo de realización, la tubería de subida de los fluios de los ciclones GlidArc está curvada para entregar los gases en el sentido de rotación del vórtice del gas de la tubería externa del reactor. En un modo de realización preferido, la tubería de subida de los flujos de los ciclones GlidArc se curva para entregar los gases perpendicularmente al sentido de rotación del vórtice de gas en la tubería
- 60 externa del reactor. En esta configuración, los gases del flujo que sube son aspirados por la depresión creada por el vórtice según la ley de Bernouilli.

La parte de la tapa de los ciclones GlidArc situada del lado de la faldilla del último ciclón de la tubería interna está perforada con ranuras, figura 6.60, enmarcadas por álabes oblicuos, figura 6.61, que permiten la entrada de los

gases en el ciclón GlidArc imprimiéndoles una rotación del mismo sentido que la del vórtice del ciclón. Las ranuras tendrán un tamaño suficiente para dejar pasar los gránulos que provienen de la etapa superior. Estas ranuras estarán conectadas por una canalización, figura 6.63, a los conductos de salida de los gases y de los gránulos del ciclón de la etapa superior; estos conductos están organizados estos conductos alrededor de un cilindro corto de columnas verticales dispuestas saliendo del orificio de la faldilla del ciclón superior. La tapa de los ciclones GlydArc está realizada en material conductor de corriente, de manera que se formen uno o dos electrodos puestos a tierra y/o a un potencial negativo.

2.7. Los gránulos utilizados para la gasificación pueden contener partículas de aluminio o de óxido de aluminio, de magnesio o de óxido de magnesio, o de cualquier otro metal que puede desempeñar un papel de reductor. Bajo la 10 acción de las microondas, corrientes inducidas en las partículas conductoras generan arcos eléctricos entre partículas, creando de este modo, a su paso, radicales libres y elementos cargados. Los radicales libres y los jones formados reaccionan entre ellos y con el carbono presente en el reactor para producir CO y H<sub>2</sub>. Por otra parte, átomos de aluminio reducidos por los arcos eléctricos y/o átomos de magnesio, descomponen las moléculas de aqua para liberar H<sub>2</sub> o descomponen las moléculas de CO<sub>2</sub> para liberar C. Cascadas de reacciones más o menos 15 complejas conducen a la formación de CO y de H<sub>2</sub>. Los óxidos de aluminio y de magnesio producidos se regeneran

en el curso de la reacción transformándose en aluminio y en magnesio por la acción de los arcos eléctricos y de las radiaciones UV producidas por los arcos eléctricos y las microondas en el reactor.

En otro modo de realización, se añadirán a los gránulos de carga del gasificador partículas de SiO<sub>2</sub> (sílice) o una mezcla de partículas de Si (silicio) y de SiO<sub>2</sub> (sílice) finamente molidas, con tamaño homogéneo o inhomogéneo comprendido entre 1 nm y 2 mm.

Estas partículas a base de sílice producirán bajo la acción del calor monóxido de carbono y carburo de silicio SiC. compuesto inerte capaz de capturar carbono de forma duradera, mejorando el balance de contaminación de la gasificación.

Según la reacción:

5

20

30

25	$SiO_2 + 3C \rightarrow SiC + 2CO$	r5
	$Si + CO_2 \rightarrow SiC + O_2$	r6
		7

$SI + O_2 \rightarrow SIO_2$		17
$Si + 2H_2O \rightarrow SiO_2 + 2H_2$		r8
$Si + SiO_2 \leftrightarrow 2SiO$		r9
$Si + CH_4 \leftrightarrow SIC + 2H_2$	minoritaria	r10
$\text{Si} + \text{C} \rightarrow \text{SIC}$	minoritaria	r11
$SiO_2 + 3CH_4 \rightarrow SIC + 2CO + 6H_2$		r12

O una combinación cualquiera de las reacciones r5 a r19.

Estas partículas, a base de silicio o de sílice, se pueden añadir en forma de partículas finas (de tamaño inferior a 500 35 micrómetros) en los gases inyectados en la gasificación.

El SiC obtenido después de la gasificación podrá servir de catalizador para las síntesis de Fischer-Tropsch.

El SiO<sub>2</sub>, el SiO y el SiC que resultan de estas reacciones son inertes a temperatura ambiente y representan, bajo la forma SiC, un medio de atrapar el carbono que proviene del CO<sub>2</sub> y de almacenarlo.

- 2.8. En la parte superior de la tubería externa del LFLC dn, se encaja una tubería entre la tubería interna y la tubería 40 externa del reactor, figura 4.65. Se trata de una tubería para guiar el flujo que asciende a lo largo de la tubería interna del núcleo al final de su recorrido (guía de flujo). La guía de flujo se dispone un poco retranqueada respecto de las dos tuberías: interna, figura 4.33, y externa, figura 4.34, del núcleo. Se disponen álabes, figura 4.66, entre la tubería externa y la guía de flujo, con una inclinación similar a la de la estructura perfilada dispuesta sobre la pared de la tubería interna, por encima de las toberas de salida de los ciclones. La cámara de combustión que desemboca
- 45 en la tubería interna está colocada por encima del núcleo del reactor; el fondo de esta cámara, figura 4.67, está fijado en lo alto de la tubería externa y de la tubería interna del reactor. El fondo del reactor forma con la tubería interna una galería circular, separada por una cortina de álabes inclinados de una segunda galería formada con la tubería externa. Cuando ascienden entre la tubería interna y la guía de flujo, los gases del flujo ascendente se calientan en la cámara formada con la tubería interna y el fondo de la cámara de combustión. Los gases calentados
- 50 pasan a través de la cortina de álabes donde se les imprime un movimiento giratorio descendente del mismo sentido de rotación que el impulsado a los gases en la cámara de combustión. Los gases entran entonces en la región formada por la tubería externa y la guía de flujo para formar un vórtice descendente a lo largo de la pared de la

tubería externa del depósito.

2.9. En un modo de realización específico, se impulsarán microondas en la tubería externa del núcleo del reactor. Estas microondas se podrán inyectar, por ejemplo, por debajo de la tubería interna, en la región cilíndrica de la tubería externa, a partir de al menos una fuente de microondas, preferentemente un magnetrón.

5 2.10. En ciertos modos de realización, se inyectan tangencialmente a la pared de la tubería externa en el espacio entre tuberías mezclas de gases constituidas por todas las proporciones posibles (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>).

2.11. En un modo de realización específico, se harán converger o reflejar en una imagen en la superficie del núcleo del reactor radiaciones solares. La imagen reflejada tendrá un tamaño inferior o igual al diámetro del núcleo del reactor, con el fin de que toda la energía reflejada sea absorbida por el reactor; la región que recibe la radiación será

- 10 de color negro y el revestimiento contendrá, eventualmente, partículas cuánticas para evitar cualquier reflexión de radiaciones UV. Por ejemplo, se podrá realizar la convergencia o la reflexión con ayuda de espejos planos, esféricos, ovoides o con múltiples espejos planos o esféricos montados sobre una estructura plana, ovoide o esférica. Eventualmente, se podrá utilizar una lente convergente simple o una lente de Fresnel para hacer converger los rayos luminosos. De manera general, la reflexión o la convergencia de la radiación solar sobre el reactor podrá utilizar
- 15 cualquier tipo de horno solar o medio de reflexión de la luz para reflejar la luz solar en la superficie del reactor. Las regiones que reciben la radiación solar se harán con metales o aleaciones metálicas o se recubrirán de metales o de aleaciones metálicas que puedan soportar temperaturas elevadas de más de 1000 °C, preferentemente temperaturas superiores a 2000 °C.
- 2.12. En otro modo de realización, se proveerá la tubería externa del reactor LFLC\_dn de al menos una puerta o ventanilla de cuarzo o de cualquier otro material transparente que resista temperaturas de 1500 °C. Se harán converger o reflejar las radiaciones solares en una imagen en el interior del núcleo del reactor (a través de la ventanilla) mediante uno de los procedimientos descritos en 2.11. Las imágenes tendrán un tamaño inferior o igual al diámetro de la ventanilla con el fin de que toda la energía solar penetre en el interior del reactor. En ciertos modos de realización, la inyección de luz solar se podrá hacer, ya sea para los reactores de núcleo de tubo sencillo o ya sea para los reactores de núcleo de tubo doble, directamente en la cámara de combustión.

En otros modos de realización, la inyección de la radiación solar se realiza en la cámara de combustión utilizando directamente una lente de Fresnel de diámetro grande (comprendido entre 50 cm y 10 m). La lente hará converger los rayos solares en el centro de la cámara de combustión.

- 2.13. Después del paso por el último ciclón, los gránulos se depositan en el fondo del reactor o del cesto para acabar su gasificación. El fondo del reactor corresponde a la última parte de la tubería que forma el núcleo del reactor de tipo LFLC o de la tubería externa de los reactores de tipo LFLC\_dc. La abertura del fondo del reactor de obstruirá con una rejilla, figura 7.68, cuyos agujeros serán lo suficientemente grandes como para dejar pasar las cenizas y las partículas de carbono de dimensiones muy pequeñas (del orden de algunos milímetros). El tamaño de los poros estará comprendido entre 500 micrómetros y 0,5 mm. La rejilla será móvil, podrá bajar o subir y girar, bien mediante
- 35 un sistema de tornillo accionado manualmente o motorizado, bien mediante un sistema de gato hidráulico o neumático, bien mediante un sistema de tornillo y de muelle o mediante cualquier otro sistema que permite asegurar una combinación de los tres movimientos. En ciertos modos de realización, el sistema que permite desplazar la rejilla le comunicará al mismo tiempo movimientos rápidos de vibración de abajo a arriba, para eliminar las cenizas y evitar el apelmazamiento del lecho de gránulos. Asimismo, la rejilla del fondo podrá estar conectada a una fuente de
- 40 ultrasonidos para desincrustar las cenizas y favorecer la gasificación, por las razones previamente citadas. De manera general, todo el reactor puede estar conectado a fuentes de ultrasonidos continuas o alternas (por pulsos) para facilitar el pase de los flujos en las ranuras, las rejillas o el lecho de gránulos y favorecer la gasificación. Después de la rejilla, una estructura semicónica, figura 7.69, permite dirigir las cenizas a un depósito de cenizas, figura 7.70. El depósito y la estructura semicónica están separados mediante un sistema de aislamiento, por ejemplo
- 45 una válvula neumática o cualquier otro sistema que permite aislar el depósito de cenizas de la estructura cónica. Una tubería conecta la estructura semicónica con la entrada de un ciclón de separación gas / partículas, figura 7.71. Eventualmente, se puede intercalar una bomba o turbobomba entre la estructura semicónica y el ciclón de separación; permite regular la salida del gas del reactor. En ciertos modos de realización, el ciclón de separación será un ciclón de carga tangencial y descarga axial; cualquier otro sistema de ciclón puede ser conveniente, lo
- 50 mismo que los sistemas basados en centrifugaciones o filtros.

La salida de las cenizas del ciclón de separación desemboca en un segundo depósito de cenizas. Los dos depósitos están conectados por un tornillo sinfín que permite evacuar y recuperar las cenizas. En cierto modo de realización, la salida de las cenizas del ciclón de separación desemboca en el mismo depósito de cenizas que el gasificador, figura 7.70.

55 En el caso de utilización de biomasa para fabricar materia carbonizada, las cenizas obtenidas son ricas en potasa, que se utilizará para saponificas aceites vegetales, con el objetivo de fabricar ésteres y glicerol (principio de fabricación del jabón). Estas reacciones se pueden llevar a cabo en el reactor horno solar / microondas (H\_smo) descrito en 1.3. La reacción de esterificación se descompone, por ejemplo, en cuatro etapas:

- 1) Saponificación de las grasas y aceites.
- 2) Separación de los ácidos grasos saponificados y del glicerol.
- Activación de los ácidos grasos saponificados, por ejemplo mediante una reacción con un halogenuro de fósforo (X<sub>3</sub>P) (X = I, Br, Cl, F,...) para formar RCOOPX<sub>2</sub> o RCOX (fosfodiéster o halogenuro de alcaloide).
- 4) Reacción entre el alcohol y el éster activado para formar un éster de alcohol.

Eventualmente, la reacción de activación se puede obtener con un ácido fuerte tal como HX formando halogenuros de alcohol.

- 2.14. En un modo de realización específico, el último ciclón del núcleo interior (tubería interna) del reactor ciclónico se terminará mediante un cono invertido cerrado, figura 12.89. De la pared del cono parten tubos en dirección perpendicular al eje principal del ciclón, figura 12.88, que denominaremos "pozos de aspiración" en lo que sigue de este documento. Preferentemente, se disponen tres pozos de aspiración dispuestos a 120 ° entre sí. Frente a cada pozo de aspiración y perpendicularmente a la dirección del pozo, se dispone un quemador, figura 12.87, que permite quemar los gases de pirolisis o gases adicionales de tal forma que los gases de combustión tengan una dirección
- 15 perpendicular a la apertura de los pozos, aspirando así las partículas que llegan al fondo del último ciclón hacia la llama del quemador por efecto Bernouilli. Además, la dirección de las llamas de los quemadores, más o menos paralelos a la dirección del vórtice, mantiene el vórtice de gas creado en la tubería externa del reactor de doble núcleo. El sistema pozos de aspiración / quemadores permite extraer así las cenizas que caen al fondo del último ciclón de la tubería interna y gasificar las últimas partículas de carbono que aún no han reaccionado.
- 20 2.15. En un modo de realización específico, los procedimientos de arco eléctrico deslizante (GlidArc) utilizados para reducir diferentes formas químicas indeseables que pueden formarse a lo largo de la gasificación, tales como H<sub>2</sub>S o NO<sub>3</sub>, etc, comprenderán un sistema de electrodos, compuesto por una hélice, figura 13.93, o por un rotor de álabes que giran y una rejilla fija en cruz, figura 13.92, o en estrella con múltiples ramas, introducidos en diferentes sitios en los reactores ciclónicos o Tb smo. Cada brazo de la rejilla se llevará a un potencial eléctrico, continuo o alterno,
- 25 entre 100 V y 1000 kV, mientras que la hélice o el rotor de álabes estará conectado a tierra. Al girar bajo la acción del gas que circula en los reactores, cada pala de la hélice o del rotor pasa frente a una barra de la cruz o de la estrella. La distancia entre el rotor o la hélice y la cruz o la estrella será tal que podrán formarse uno o varios arcos eléctricos entre dicha pala y una barra de la cruz o de la estrella. Alejándose de la barra, la pala estira el arco eléctrico, proporcionándole así las propiedades de un arco deslizante que genera plasmas fuera de equilibrio. El
- 30 escenario de la formación y el estiramiento de los arcos eléctricos se reproducen en cada paso de una pala de la hélice o del rotor frente a una barra de la estrella o de la cruz. En ciertos modos de realización, se puede invertir la conexión a tierra y al potencial eléctrico entre el rotor y la hélice y la estrella o la cruz.

En ciertos modos de realización, discos dispuestos a nivel del rotor o de la hélice, figura 13.94, y/o de la cruz y de la estrella permiten mejorar el rendimiento de las reacciones catalizadas.

- 35 El dispositivo GlidArc hélice/rotor y cruz/estrella se puede disponer en diferentes lugares del proceso, en especial en la zona de los conductos en T de la expulsión de los gases que ascienden de los ciclones de la tubería inferior del reactor ciclónico o incluso después del reactor de gasificación a la salida del ciclón de separación entre el gas y las cenizas.
- 3.1. Los gases (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>) que alimentan el reactor ciclónico de gasificación pueden ser comprimidos, acelerados y calentados por diferentes procedimientos que emplean bombas y hornos convencionales. Sin embargo, en un procedimiento concreto, todos los gases que alimentan el reactor ciclónico de gasificación se calientan y se presurizan mediante turbobombas horno solar / microondas.

Una turbobomba solar / microondas (Tb\_smo) está constituida por una tubería (figura 8.72) cuyo diámetro está comprendido entre 1 cm y 5 m y cuya longitud está comprendida entre 10 cm y 5 m. Las dimensiones de las Tb\_smo dependerán de la naturaleza y de la utilización de los gases comprimidos y calentados. Preferentemente, las Tb\_smo tendrán un diámetro del orden de 20 cm y una longitud del orden de 1,5 m para comprimir y calentar los gases destinados a los ciclones. Tendrán un diámetro del orden de 10 cm y una longitud del orden de 70 cm para calentar y comprimir los gases destinados a los quemadores de la cámara de combustión. Se podrá confinar la tubería que constituye la Tb\_smo en un recinto transparente bajo vacío o que contiene gases que presentan las mismas características que las del recinto de confinamiento de un H smo.

En un modo de realización preferido, la entrada de la tubería de la Tb\_smo se abre en el recinto de confinamiento transparente de forma que el gas que limita las pérdidas de calor pueda penetrar en el interior de la tubería del reactor Tb\_smo.

La entrada de la tubería del reactor Tb\_smo estará, sin embargo, obturada con un cuerpo poroso que obliga a numerosos contactos entre los gases que penetran en la tubería del reactor Tb\_smo y las mallas del cuerpo poroso.

El cuerpo poroso, preferentemente de cerámica, presenta una gran superficie de intercambio y desempeñará el papel de absorbedor de la radiación solar, mejorando la inercia térmica del reactor Tb\_smo. El cuerpo poroso será por ejemplo un monolito multicanales de tipo nido de abeja, realizado por ejemplo en cordierita o en una espuma de cerámicas porosas de carburo de silicio SiC. En este modo de realización, se preferirán gases de efecto invernadero tales como CO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub> o H<sub>2</sub>O para desempeñar el papel de gas limitador de las pérdidas de calor. El gas limitador de las pérdidas de calor se inyecta en la cámara de confinamiento en la parte opuesta de la abertura de la tubería del reactor. El gas circula entonces en el recinto de confinamiento transparente aislando la pared de la tubería del reactor Tb\_smo de la del recinto de confinamiento transparente. De este modo, debido a ello, el gas captura la

5

- radiación infrarroja que proviene de la pared de la tubería del reactor Tb\_smo calentado por la radiación solar y las microondas, calentándose el mismo durante su trayectoria hasta la entrada de la tubería del reactor. El gas se mete entonces en la tubería del reactor Tb\_smo a través del cuerpo poroso, donde se calienta todavía más al contacto con la estructura porosa. El gas penetra entonces en la parte de la tubería del reactor hasta los rotores donde es acelerado, comprimido y calentado.
- En el centro de la tubería se dispone al menos un eje. Este eje está guarnecido en dos zonas con rotores, situados en el primer tercio, figura 8.73, y en el tercer tercio del eje, figura 8.74. Cada zona de rotores está constituida, por ejemplo, por tres rotores que tienen sesenta álabes dispuestos cada 6º según el giro alrededor del eje. Los álabes están más o menos inclinados; sin embargo, la inclinación de los álabes de los rotores del último tercio del eje correspondiente a la etapa de las turbinas puede ser más importante que la de los álabes del primer tercio correspondiente a la etapa del compresor. El número de hileras de rotores no es más que indicativo; se puede
- 20 disminuir o aumentar según la potencia o el tamaño de la bomba. El tamaño y la inclinación de los álabes dependerán de la presión que sufra la turbina. El número de álabes por rotor es solamente indicativo; variará según el tamaño y la potencia de la Tb\_smo. Eventualmente, el eje del rotor tiene una forma ovoidal, figura 8.75, que permite disminuir progresivamente el volumen en el interior del reactor al nivel de la primera zona de rotores. En esta misma zona, un abultamiento de la pared de la tubería o un anillado de ésta disminuye progresivamente la sección
- 25 de la tubería en toda la parte de la primera zona de rotores. En la parte situada detrás de la primera zona de rotores, a nivel del segundo tercio del eje, una cámara anular de microondas, figura 8.76, rodea el eje de rotación de los rotores. En ciertos modos de realización, la cámara anular es solidaria con el eje y gira con él. La pared de la cámara anular que rodea el eje es más larga que la pared opuesta al eje. La pared de la cámara anular opuesta al eje forma con la pared de la tubería de la Tb smo un paso por el cual pueden penetrar los gases en la zona posterior a la
- 30 cámara anular. Las paredes de la cámara anular se realizan con un material que permite la reflexión de las microondas y que es capaz de soportar temperaturas elevadas, del orden de 2000 °C, típicamente aleaciones de titanio y aluminio, aleaciones de wolframio y níquel, aceros inoxidables, carbonos vítreos recubiertos de cerámica, cerámicas o cualquier otro compuesto suficientemente refractario.... Se inyectan microondas en la cámara anular de manera que se les haga reflejarse sobre la pared que rodea el eje de rotación con un ángulo adecuado para
- 35 hacerlas rebotar hacia el interior de la cámara anular. Las microondas se inyectan justo después de la pared de la cámara anular opuesta al eje. Las microondas se producirán al menos por un magnetrón. Preferentemente, cuatro magnetrones, figura 8.6, inyectarán en cruz microondas en la cámara anular de microondas. Las ondas se inyectan en la cámara anular mediante guías de ondas, figura 8.7; de manera general, se puede utilizar cualquier fuente de radiofrecuencias energéticas que puedan dirigirse a través de guías de ondas. Bajo la acción de las microondas, los
- 40 gases contenidos en la cámara anular sufren un calentamiento importante que los dilata y los expulsa a través de los rotores del último tercio del eje. Por la acción del paso de los gases en el rotor del último tercio, el eje se pone a girar, los álabes del rotor del primer tercio del eje impulsan gases hacia la cámara anular comprimiéndolos, debido al estrechamiento de la sección. Los gases comprimidos y calentados por las microondas en la cámara anular mantienen el movimiento por su expulsión a través de los álabes de los rotores del último tercio del eje. En la
- 45 configuración en la que los espejos y las lentes se reparten regularmente a lo largo de la tubería de la Tb\_smo, la energía solar térmica no interviene en la compresión de los gases más que por la dilatación uniforme causada por la acumulación de calor (PV = nRT). Sin embargo, para que el calor térmico solar se transforme asimismo en energía cinética de compresión, se pueden aumentar localmente la superficie de los espejos y el tamaño de las lentes, a la altura de la zona de los rotores del tercer tercio del eje. La energía solar suplementaria aportada a ese nivel calentará todavía más los gases acelerando la velocidad del eje y, por tanto, la compresión.
  - En ciertos modos de realización, los rotores del primer tercio del eje se pueden reemplazar por un compresor

centrífugo. En esta configuración, lel diámetro de la tubería de la Tb\_smo se aumentará a la altura de la etapa de compresión para poder acogerlo.

- La Tb\_smo puede servir de base para concebir nuevas generaciones de turborreactores utilizados para la propulsión de vehículos (aéreos, terrestres, marinos...). Es posible aumentar la potencia de un reactor añadiendo, entre la etapa o etapas de compresión y las etapas de turbina de un reactor, una cámara anular de microondas que contiene guías de onda que inyectan microondas que provienen de magnetrones que conducen de este modo así una expansión aún más importante de los gases. Esta expansión se podría aumentar añadiendo agua que sería vaporizada por las microondas y participaría en la propulsión. Este procedimiento permitiría limitar las consecuencias de la presencia de agua en el carburante; el agua presente en los carburantes sería vaporizada por las microondas y serviría para la propulsión.
  - Se puede compensar el consumo eléctrico de los magnetrones introduciendo perpendicularmente al eje de rotación uno o varios imanes de barras "teslas" (por ejemplo una barra de 2,5 Teslas con una imantación orientada

longitudinalmente). Las barras imantadas podrían ser directamente álabes de los rotores de la etapa de compresión, por ejemplo. Perpendicularmente al plano de rotación de los imanes, se disponen una o varias bobinas, hechas de hilo de cobre o de cualquier otro metal o de hilos de superconductor (por ejemplo una trenza de nanotubo de carbono, etc), en la tubería de la Tb\_smo o del turborreactor o sobre ellos. La rotación del eje implicará la producción de un campo magnético que gira perpendicularmente al plano de la bobina; ello permite producir una gran cantidad de corriente eléctrica.

Puesto que el H<sub>2</sub>O posee un momento dipolar elevado (1,85), el calentamiento y la compresión de este gas por la Tb\_smo será muy eficaz. A la salida de las Tb\_smo, los gases calentados se podrán inyectar directamente en los diferentes ciclones del reactor ciclónico de gasificación. En cambio, puesto que el metano, el CO<sub>2</sub> y el aire presentan con presentan valorse do momentos dipolarces más baios, preferentemento se deberán mozetar con vapor de agua

10 en promedio valores de momentos dipolares más bajos, preferentemente se deberán mezclar con vapor de agua para ser calentados y presurizados por una Tb\_smo antes de ser inyectados en los quemadores de la cámara de combustión.

5

20

45

50

Los gases de pirolisis naturalmente ricos en agua se podrán calentar y presurizar de manera eficaz mediante una Tb\_smo antes de ser inyectados en la cámara de combustión.

15 Una alternativa para evitar añadir agua al gas consiste en ionizarlo mediante descargas eléctricas durante su contacto con las microondas.

Una parte del vapor de agua utilizado en los reactores ciclónicos de gasificación se producirá a partir de agua líquida evaporada en un horno solar y de microondas (H\_smo). El resto del vapor de agua proviene del agua contenida en la biomasa o producida en las combustiones en la cámara de combustión. La presión de los gases inyectados varía entre 1 y 2000 atmósferas.

3.2. En ciertos modos de realización, la Tb\_smo permite proyectar en la entrada tangencial de los ciclones arena u otro cuerpo abrasivo como piedra pómez molida, carburo de silicio o cualquier otro cuerpo abrasivo, figura 3.27a. Esta proyección de cuerpos abrasivos permite erosionar muy rápidamente las partículas de materia carbonizada, aumentando la eficacia de la gasificación.

25 En ciertos modos de realización, el cuerpo abrasivo se calentará previamente entre 200 y 600 °C mediante un H\_smo, antes de ser proyectado tangencialmente en los ciclones o, eventualmente, mezclado con la materia prima en la fase de torrefacción o de pirólisis, a fin de acelerar ésta.

3.3. En ciertos modos de realización, el H\_smo estará sectorizado en una parte solar y una parte de microondas. La parte solar se organizará en peine, figura 8.83, a fin de aumentar la eficacia del calentamiento. Todos los dientes del peine están conectados a una sola tubería que contiene las fuentes de microondas. En un modo de realización incluso más preferido, los dientes del peine se llenan de cuerpos porosos que se abren en el recinto de confinamiento.

En ciertos modos de realización los extremos del peine se abrirán al aire libre, permitiendo asía aspirar aire y calentarlo. El aire caliente se podrá utilizar para secar la materia prima antes de la torrefacción o la pirolisis.

- 35 En ciertos modos de realización, las fuentes de microondas pueden estar acopladas a fuentes de radiación infrarroja. Esta segunda fuente de radiofrecuencias induce movimientos asimétricos en las moléculas. En efecto, la energía infrarroja es esencialmente absorbida por las vibraciones de los enlaces químicos de las moléculas. Esto crea, además de un aumento de temperatura de la molécula, modos de vibración asimétrica puntuales que generan un momento dipolar transitorio. Las moléculas apolares se hacen así sensibles transitoriamente a las microondas.
- 40 En ciertos modos de realización, la asociación de microondas y de frecuencias infrarrojas se utilizará para calentar gases tales como el CO2 para las diferentes configuraciones previstas.

4.1. En ciertos modos de realización, el reactor ciclónico de gasificación estará calorifugado por completo, incluyendo el ciclón de separación de los gases y de las cenizas después de la salida del reactor ciclónico. Este aislamiento térmico se podrá obtener, por ejemplo, recubriendo todas las partes en contacto con el aire ambiente con un producto calorífugo (lana de roca, cerámica,...).

En una realización concreta, todo el reactor ciclónico será encerrado en un recinto calorimétrico o termo, que mantendrá un vacío sostenido entre las paredes del reactor ciclónico y el recinto de confinamiento. El vacío será, bien estático por sellado del recinto calorimétrico, bien dinámico mediante bombeo del aire contenido en el recinto calorimétrico. Este bombeo se podrá hacer por ejemplo con ayuda de una Tb\_smo o Tb\_smo que puede ionizar los gases.

4.2. A la salida del reactor ciclónico de gasificación, tras el paso por el ciclón de separación de los polvos y de los gases, la mezcla gaseosa compuesta mayoritariamente por CO y  $H_2$  puede contener más o menos CO<sub>2</sub> no reducido. Según las regulaciones realizadas en la gasificación, la composición del gas de salida será, en porcentajes (sin incluir el vapor de agua): 37 % de CO, 27 % de  $H_2$ , 7 % de CO<sub>2</sub>, 6 % de O<sub>2</sub> y 1,5 % de CH<sub>4</sub>. Estas proporciones no con més que indicativos y pueden variar mueden será del aparato. No obstanto estanto esta valores indicativos del aparato estanto e

son más que indicativas y pueden variar mucho según el ajuste del aparato. No obstante, estos valores indican que

las proporciones de CO y  $H_2$  pueden no corresponder a las necesarias para las síntesis de Fischer-Tropsch. Para rectificar los desequilibrios, conviene separar el CO<sub>2</sub> de los otros gases. Se pueden utilizar todos los métodos de separación de CO<sub>2</sub> de otros gases, en especial métodos criogénicos.

Sin embargo, estos procedimientos consumen mucha energía.

5 En un modo de realización específico, se utilizará el hecho de que el CO<sub>2</sub> tiene un coeficiente de solubilización en agua (76,6·10<sup>-3</sup> moles/litro a 0 °C y 1013 bar) muy superior al del CO (1,5·10<sup>-3</sup> moles/litro a 0 °C y 1013 bar), al del CH<sub>4</sub> (2,4·10<sup>-3</sup> moles/litro a 0 °C y 1013 bar) y al del H<sub>2</sub> (0,9·10<sup>-3</sup> moles/litro a 0 °C y 1013 bar).

A la salida del ciclón de separación de los gases y de las cenizas, los gases atraviesan uno o varios intercambiadores térmicos, en los cuales ceden su calor a:

10 • Agua

20

- Vapor de agua
- CO<sub>2</sub>
- La mezcla de gas de síntesis destinada a reaccionar en un reactor Fischer-Tropsch
- Los productos destinados a ser refinados
- De manera general, a cualquier producto que necesite calor en el transcurso de su ciclo de transformación

Tras haber sido llevada a temperatura ambiente, la mezcla gaseosa se pone a burbujear en un depósito de separación que contiene agua. El volumen de agua del depósito podrá estar comprendido, a título indicativo, entre 10 y 1000 litros. Para volúmenes muy grandes de gas a tratar, el volumen del depósito puede sobrepasar los 1000 litros. El depósito está herméticamente cerrado; una válvula en posición alta (por encima del agua) permite la salida de los gases no disueltos. Eventualmente, el depósito de separación está termostatizado a una temperatura comprendida entre 0 y 35 °C. La inyección de los gases en el depósito se hace a una presión comprendida entre 1 y 100 bar. La temperatura del depósito puede estar por debajo de 0 °C si el agua contiene anticomprendida entre 1 y

- 100 bar. La temperatura del depósito puede estar por debajo de 0 °C si el agua contiene anticongelantes o productos salinos que permiten una mejor disolución (la temperatura puede variar de -20 °C a +35 °C).
   Se bombea agua del depósito, antes de ser allí reinyectada tras desgasificarla. El bombeo tiene lugar a una distancia grande del punto de burbuieo de los gases, en una zona donde no gueden burbuias en suspensión. El
- distancia grande del punto de burbujeo de los gases, en una zona donde no queden burbujas en suspensión. El caudal de agua bombeada puede ser proporcional al caudal del burbujeo de los gases en el depósito. Se puede regular en función de la proporción de CO<sub>2</sub> en la mezcla gaseosa y de la velocidad de solubilización de CO<sub>2</sub> de forma que se optimice la disolución del CO<sub>2</sub> y que se limite la de los otros gases. La proporción de CO<sub>2</sub> disuelto en el agua va a depender de las características físicoquímicas del agua, en especial del pH y de la concentración salina.
  Preferentemente, el pH será básico para aumentar la tasa de disolución del CO<sub>2</sub>. En especial, este pH se podrá ajustar mediante las cenizas que provienen de la gasificación de la materia carbonizada generalmente rica en potasa. El CO<sub>2</sub> se disuelve rápidamente en el agua mientras que los otros gases pasan en su mayoría a la parte
- reactor ciclónico de gasificación estarán más o menos contaminados con NO<sub>x</sub>, HS<sub>x</sub>, metales pesados, etc.
  35 Estos compuestos tienen generalmente valores de coeficientes de solubilización en agua (o en ciertas mezclas de disolventes) muy altos y, en consecuencia, se disolverán cuando se burbujeen (los gases) en un disolvente apropiado. En ciertos modos de realización, el agua bombeada (o cualquier otro disolvente) desde el depósito será tratada mediante un procedimiento de ósmosis inversa o de filtración para concentrar en una salmuera los diferentes solutos disueltos en el burbujeo, incluido el CO<sub>2</sub>, disuelto en forma de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Existen ya numerosos tratamientos

aérea de la cuba. Según el origen de la materia prima utilizada para realizar la pirolisis, los gases que salen del

40 para el agua, que pueden ser utilizados (desalado, depuración del agua, destilación,...).

El agua bombeada en flujo laminar, directamente o, eventualmente, después de ser filtrada, se desgasifica sometiéndola a ultrasonidos, o sometiéndola a vació sostenido, o a un calentamiento rápido. Se puede aplicar una combinación de estos tres tratamientos simultánea o secuencialmente. Preferentemente, el agua se desgasificará mediante vacío y ultrasonidos. Los gases que provienen del desgasificado están constituidos mayoritariamente por

45 CO<sub>2</sub> y, eventualmente, NO<sub>x</sub> y HS<sub>x</sub>. El CO<sub>2</sub> se podrá reintroducir en un ciclo de gasificación, reintroduciéndolo en el reactor ciclónico de gasificación después de calentarlo, si es suficientemente puro. Eventualmente, la mezcla de gases obtenida podrá experimentar una reducción en fase líquido/gas en la interfase de un plasma creado por un arco eléctrico entre dos electrodos huecos o porosos de carbono. Durante esta fase de reducción, los compuestos NO<sub>x</sub> y HS<sub>x</sub> se reducirán a N<sub>2</sub> o azufre o a compuestos con un número de oxidación intermedio (esta reducción se 50 podrá completar mediante tratamiento eléctrico del tipo GlidArc).

Los electrodos de carbono utilizados para estas reducciones podrán contener aditivos tales como aluminio o magnesio, o cualquier otro metal reductor, por ejemplo en forma de polvo fuertemente aglomerado con partículas de carbono. Estos metales favorecen la producción de CO y de H<sub>2</sub>, reaccionando con el agua, el CO<sub>2</sub> o el carbono de los electrodos. Los óxidos de metal generados por las reacciones de oxidoreducción se regeneran bajo la acción de

corrientes eléctricas y de la luz intensa del plasma, en especial el MgO se reduce a Mg y oxígeno (el oxígeno reaccionará con el carbono) bajo la acción del plasma. Eventualmente, los electrodos de carbono pueden contener aditivos de Si y/o de SiO<sub>2</sub> que reaccionarán con el agua, el CO<sub>2</sub> y el carbono para producir CO y dihidrógeno y SiC. Asimismo, los aditivos pueden estar presentes en el agua de los reactores de plasma. El reparto de los polvos de

- 5 aditivo en los electrodos será homogéneo o inhomogéneo, por ejemplo en capas sucesivas separadas por capas que no contienen más que carbono. El carbono de los electrodos provendrá por ejemplo de las cenizas recuperadas por el tornillo sinfín que pasa a los depósitos de cenizas del reactor ciclónico de gasificación y del ciclón de separación de los gases y las cenizas.
- Tras enfriarse, uno o varios intercambiadores térmicos recuperan en el tornillo sinfín su calor para calentar productos que necesitan calor en el curso de su ciclo de transformación; las cenizas frías se lavan en un ciclón hidráulico. Luego se muelen en partículas muy finas, homogéneas o inhomogéneas, con un tamaño comprendido entre 1 micrómetro y 1 milímetro. Eventualmente, las partículas se mezclan con diferentes compuestos (partículas de metales, fósforo, Si, SiO<sub>2</sub>, etc) que favorecen la reducción del CO<sub>2</sub> y la oxidación del carbono. Se obtiene una pasta a partir de las partículas, que será moldeada o hilada y comprimida en electrodo, después de añadirle eventualmente
- 15 un agente de cohesión como una cola o una resina resistente al agua hecha a base de un compuesto carbonado o de un cemento cualquiera.

Tras su reducción en el plasma del arco eléctrico, los gases recuperados experimentarán una nueva etapa de separación.

- El agua de lavado de las cenizas muy básicas debido a la potasa que contienen se utilizará para aumentar el pH del depósito de agua de separación de los gases o como salmuera de saponificación de grasas y de aceites en un H\_smo destinado a este efecto (capítulos 1.3 y 2.13). De manera general, todas las aguas de burbujeo y de lavado se volverán a tratar mediante ósmosis inversa, se filtrarán y sufrirán una reducción eléctrica con electrodos huecos de carbono. También se puede pensar en usar métodos de destilación.
- 4.4. Los gases recuperados de la parte aérea de la cuba de separación forman un gas de síntesis compuesto
   mayoritariamente por CO y H<sub>2</sub>. Los gases se recuperan a través de válvulas calibradas para abrirse a una presión redefinida. Sin embargo, quedan débiles porcentajes de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y O<sub>2</sub>, del orden de 1 a 3 % para cada compuesto.
  - Para que la reacción (FT):

30

(FT general) n CO + 2n I	$H_2 \rightarrow -(CH_2)- + n H_2O$	$\Delta H_{298}$ = -165 KJ/mol
Formación de alcanos:	$n \text{ CO} + 2(n+1) \text{ H}_2 \rightarrow \text{CH}_{2n+2} + n \text{ H}_2\text{O}$	
	$2n \ CO + n \ H_2 \rightarrow CH_{2n+2} +$	n CO <sub>2</sub>
Formación de alquenos:	$n \ CO + 2n \ H_2 \rightarrow CH_{2n} + n$	H <sub>2</sub> O
	$2n \ CO + n \ H_2 \rightarrow CH_{2n} + n$	CO <sub>2</sub>
Formación de alcoholes:	$n \text{ CO} + 2n \text{ H}_2 \rightarrow \text{CH}_{2n+1}\text{O}$	H + (n-1) H <sub>2</sub> O
	2(n-1) CO + (n+1) $H_2 \rightarrow C$	CH <sub>2n+1</sub> OH + (n-1) CO <sub>2</sub>

- 35 tenga un buen rendimiento, es necesario que la estequiometria de la ecuación se respete en la mezcla de gas de síntesis utilizada. En efecto, la proporción o relación CO/H<sub>2</sub> orienta las reacciones mayoritarias en la síntesis FT. Además, debido a las diferencias de difusión del CO y del H<sub>2</sub> en los diferentes reactores existentes, la composición del gas de síntesis debe ser ajustada a menudo según el reactor FT utilizado. Por último, es importante disminuir al máximo los gases secundarios CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> producidos durante la gasificación.
- 40 En un primer tiempo, el agua contenida en el gas de síntesis se eliminará por condensación del vapor de agua, por ejemplo en una torre de refrigeración o mediante cualquier medio que permita llevar el gas de síntesis a una temperatura cercana a 0 °C. La compresión del gas de refrigeración podrá realizarse eventualmente mediante una Tb\_smo. El agua líquida producida arrastrará una parte del CO<sub>2</sub> presente en el gas de síntesis. El CO<sub>2</sub> del agua de condensación se recuperará mediante desgasificación y se reintroducirá en el circuito de síntesis.
- 45 El gas de síntesis seco se humidificará con vapor de agua con un porcentaje definido por la proporción CO/H2 final deseada.

Después, el gas de síntesis humidificado se calentará de nuevo a una temperatura comprendida entre 200 y 1200 °C, por ejemplo en una Tb\_smo o en un simple horno solar y de microondas hueco (sin turbina ni tornillo sinfín) o mediante cualquier otro medio.

50 Ello permite producir H<sub>2</sub> a partir del CO frente a una producción indeseable de CO<sub>2</sub>, según la reacción:

 $CO \textbf{+} H_2O \rightarrow H_2 \textbf{+} CO_2$ 

 $\Delta H_R(600 \text{ K}) = -39 \text{ KJ/mol}$ 

El CO<sub>2</sub> producido se puede eliminar según uno de los procedimientos descritos precedentemente, pero estos corren el riesgo de desequilibrar la fórmula del gas de síntesis.

Se preferirá un método de reducción del CO<sub>2</sub> electroquímico que haga intervenir plasmas.

- 5.1. En un modo de realización particular, el reactor electroquímico se hará sobre la base de una turbobomba solar y de microondas donde la parte "solar" (espejos y lentes) se suprime o se reduce a solo la parte situada en la segunda región de rotores y de la cámara anular, para obtener un reactor solar y de microondas o un reactor de microondas (R\_smo). La tubería que forma el R\_smo tendrá preferentemente un diámetro comprendido entre 10 y 20 cm y estará realizada por ejemplo en un material eléctricamente aislante, como pírex, cuarzo, etc. Pueden resultar convenientes los materiales conductores siempre y cuando se controle el recorrido de las corrientes inducidas. En el
- 10 caso de utilización de materiales que sean transparentes para las microondas, se empotrará el R\_smo en una estructura que refleje las microondas, por ejemplo, un tubo de aluminio o de cualquier otro material que refleje las microondas, al menos para la región del R\_smo sometida a las microondas (que corresponde a la región posterior a la primera zona de los rotores). Al menos un rotor de la primera zona de rotores estará constituido por álabes, bien de materiales eléctricamente aislantes, bien aislados del eje de los rotores. Dichos rotores tendrán al menos un
- 15 álabe eléctricamente conductor en contacto con el eje de los rotores que será el mismo eléctricamente conductor y estará conectado a tierra. Sobre la pared del R\_smo, en el plano de rotación del rotor, se dispone al menos un electrodo sometido a una corriente comprendida entre 100 V y 1000 KV.

En un modo de realización concreto, un rotor estará constituido por cuatro álabes eléctricamente conductores en contacto con el eje de los rotores, estando el resto de los álabes aislado eléctricamente del rotor o bien siendo de 20 materiales aislantes (por ejemplo cerámica aislante), figura 9.77. Los álabes conductores se disponen en cruz respecto de su eje. La longitud de los álabes se define de tal manera que estén dispuestos a una distancia comprendida entre 1 µm y 5 mm de la pared del tubo del R\_smo. En el plano de rotación del rotor se disponen cuatro electrodos a 90° entre sí (de tamaño comprendido por ejemplo entre 50 µm y 1 cm). En ciertos modos de

- realización, los electrodos pueden ser segmentos de hélice, figura 9.78. Los extremos de los álabes conductores son, preferentemente, prominentes, para favorecer la formación de un arco eléctrico entre el electrodo y el álabe. Cada electrodo se conecta a la fase de un generador de alto voltaje eléctrico mientras que el eje de rotación se conecta a tierra (se puede utilizar también corriente continua; en ese caso, se conectan el eje de los rotores y los electrodos a los terminales del generador).
- Durante la rotación del rotor, los álabes conductores se llevan cerca de los electrodos (a una distancia entre 50 µm y 1 cm); se forma un arco eléctrico entre los álabes y los electrodos. Después, se alejan los álabes de los electrodos y entonces se estira el arco entre los electrodos y los álabes conductores, según el camino más corto cruzando o atravesando los álabes aislados eléctricamente o neutros. En el caso del uso del electrodo helicoidal, los arcos eléctricos podrán deslizarse a lo largo del electrodo. En ciertos modos de realización, se pueden añadir al sistema varias etapas de rotores y de electrodos, disponiendo al tresbolillo los electrodos conductores de cada rotor, con el 35 fin de cubrir la mayor sección posible de la tubería del R smo.

El gas de síntesis equilibrado que contiene el CO<sub>2</sub> no deseado junto con una proporción deseada de metano (CH<sub>4</sub>) se introduce entonces en el R\_smo, donde es aspirado por la primera etapa de compresión del R\_smo; bajo la acción de los arcos eléctricos y del metano, una gran parte del CO<sub>2</sub> presente en el gas de síntesis se reduce según la reacción:

40  $CO_2 + CH_4 \rightarrow 2CO + 2H_2$   $\Delta H_R (600 \text{ K}) = 205 \text{ KJ-mol}^{-1}$ 

Del mismo modo, una gran parte del H<sub>2</sub>O todavía presente en el gas de síntesis se reduce según la reacción:

$$H_2O + CH_4 \rightarrow CO + 3H_2$$
  $\Delta H_R (600 \text{ K}) = 205 \text{ KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 

5.2.1. Se puede disminuir el consume eléctrico del R\_smo introduciendo en la primera zona de rotores al menos una etapa de rotores que contienen al menos un imán fijo y una bobina de hilo conductor o superconductor, a la altura de
la pared de la tubería del reactor. Los imanes fijos pueden ser álabes aislados eléctricamente de los rotores que contienen los álabes conductores. En un modo de realización preferido, los imanes se integran en rotores diferentes de los rotores que contienen los álabes conductores. Los dos tipos de rotores se pueden, bien intercalar, bien segregar en dos partes diferentes de la primera zona de rotores. El número de álabes magnéticos puede ser cualquiera; sin embargo, será necesario adaptar el número y la disposición de los álabes conductores a la geometría y a la disposición de las bobinas eléctricas.

En un modo de realización concreto, el número de álabes magnéticos será igual a 2n, siendo n un número par.

En un modo de realización concreto, en el que n = 2, los álabes magnéticos se disponen en cruz, figura 10.79. En esta orientación, los álabes son simétricos, de tal forma que dos álabes simétricos presentan una polaridad opuesta "N/S". En consecuencia, los alabes magnéticos tendrán entre ellos una distancia angular de 90°. Se podrán disponer

55 solenoides, por ejemplo en número de cuatro, figura 10.80, perpendicularmente al plano de rotación del rotor que contiene los álabes magnéticos. Al girar, el rotor hace variar el campo magnético en los solenoides, generando de este modo una corriente eléctrica alterna de la misma frecuencia de rotación que la del rotor. Al conectar un terminal

del solenoide a uno de los electrodos de la tubería del R\_smo, y el otro al rotor eléctricamente conductor, que gira en el plano de los electrodos, la rotación del rotor magnético engendra la corriente eléctrica necesaria para la producción de arcos eléctricos entre el rotor conductor eléctrico y los electrodos de la tubería. En un modo de realización específico, los cuatro solenoides estarán conectados a través de uno de sus terminales a un solo rotor.

- 5 Dicho rotor estará aislado eléctricamente del eje, pero los álabes conductores del rotor estarán conectados entre ellos. El segundo terminal de cada solenoide se conectará a uno de los electrodos en el plano de rotación del rotor conductor. La orientación de los solenoides, respecto del plano de rotación del rotor que contiene los álabes magnéticos se definirá de tal forma que las corrientes eléctricas inducidas en los solenoides tengan siempre el mismo sentido en los solenoides respecto del rotor conductor eléctrico. Las corrientes eléctricas de todos los solenoides conectados a un mismo rotor irán a la vez, ya sea de las bobinas hacia el rotor, ya sea del rotor hacia las
- bobinas.

15

55

5.2.2. En un modo de realización concreto, en una de las configuraciones de álabes magnéticos simétricos descrita en 5.2.1, los solenoides se conectan a los terminales de un generador de corriente alterna. Los dos solenoides opuestos se conectan de manera inversa al generador, a fin de que los campos magnéticos inducidos sean simétricos respecto del eje (de sentido opuesto entre ellos). Entonces, el sistema solenoide-rotor, se comporta como un motor eléctrico en estrella que acciona la etapa de compresión. De este modo, se podrá suprimir la etapa de turbina, ya que el motor eléctrico asegura la compresión de los gases. En ciertos modos de realización, la etapa de compresión puede ser iniciada por un motor eléctrico exterior.

- 5.3. En un modo de realización concreto, el número de álabes magnéticos del rotor será de 2n unidades, siendo n impar. Los álabes magnéticos se disponen regularmente sobre el rotor, según un paso angular de 360/(2n). Los álabes magnéticos son dos a dos simétricos según el eje de rotación y dos álabes simétricos presentan una polaridad opuesta "N/S". Recorriendo la "rueda" formada según el reparto de los álabes magnéticos sobre el rotor, se obtiene una alternancia regular de polaridad magnética norte y sur que respeta una simetría axial. Esta simetría hace corresponder un polo norte y un polo sur respecto del eje de rotación. Se pueden intercalar álabes magnéticamente
- 25 neutros entre los álabes magnéticos, para obtener el número de álabes deseados en el rotor. Estos álabes neutros podrán servir de pantalla entre los campos magnéticos de los álabes magnéticos. La rotación del rotor genera variaciones de campo muy rápidas del orden de 2n veces la velocidad de rotación del rotor. Estos campos magnéticos que varían muy rápidamente además de producir una corriente de alta frecuencia (2n veces la velocidad de rotación), pueden calentar muy rápidamente las moléculas que tienen un momento dipolar, como las de H<sub>2</sub>O, SiO,... o ciertos gases como el helio según el mismo principio que el ICP.

Sin embargo, en una configuración de solenoides perpendiculares al plano de rotación del rotor de álabes magnéticos, los campos magnéticos inducidos en los solenoides serán opuestos al campo magnético fijo. La intensidad de los campos magnéticos que varían perpendicularmente al plano de rotación de los rotores, experimentada por los gases que atraviesan el R\_smo, es muy débil.

- 5.4. En un proceso específico, los solenoides del R\_smo tendrán una geometría en forma de Z. El solenoide estará constituido por un hilo que forma un semicírculo en un plano superior y luego desciende en un plano inferior según una proyección perpendicular. En el plano inferior, el hilo forma otro semicírculo complementario y luego vuelve a subir al plano superior según una proyección ortogonal. En consecuencia, una vuelta de solenoide está constituida por dos semicírculos en dos planos paralelos superpuestos conectados por dos verticales. Vista desde arriba, una 40
- 40 vuelta de solenoide aparece como un circulo. La operación se repite un gran numero de veces para obtener un solenoide. La forma de círculo se puede reemplazar por cualquier otra forma geométrica, cuadrada, oval, rectangular,...

El solenoide en Z se coloca alrededor de la tubería del R\_smo, de tal suerte que los dos semicírculos sean perpendiculares (por encima y por debajo) al plano de rotación del rotor de álabes imantados y que los dos montantes que unen los semicírculos sean paralelos al plano de rotación del rotor. Los dos montantes pueden estar en el plano de rotación del rotor o desplazados respecto del mismo. Al girar en su plano de rotación el rotor de álabes imantados va a producir un campo variable a través de los dos semicírculos perpendiculares del solenoide. Este campo variable va a inducir una corriente eléctrica y un contracampo magnético inducido opuesto a los campos fijos de los álabes. La corriente que recorre el circuito del solenoide al pasar a la parte vertical creará un campo 50 magnético inducido perpendicular a los otros campos magnéticos y al plano de los rotores. Este campo no se compensará y se aplicará a los gases que atraviesan el R smo.

Utilizando un rotor con n impar y de polaridad alternada, es posible hacer variar el campo magnético a una frecuencia de varios millares de Hz (2n veces la velocidad del rotor). Esta variación rápida de los campos magnéticos induce un campo magnético paralelo al eje de los rotores que permite calentar muy fuertemente los gases para hacerlos reaccionar. A frecuencias elevadas (superiores a 2 MHz), el campo magnético inducido puede generar plasmas térmicos en gases polares como NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, SiO,...

Sin embargo, en un campo que varía acoplado con un sistema de arcos eléctricos, moléculas neutras y no polares como la de  $CO_2$  se convierten en dipolos y pueden ser calentadas bajo la acción de campos magnéticos que varían o de microondas. Este tipo de dispositivo se utilizará para calentar el  $CO_2$  seco.

5.6. En un modo de realización concreto, el rotor estará constituido por 2n álabes magnéticos. Se pueden intercalar álabes neutros entre los álabes magnéticos para obtener el número de álabes deseados en el rotor. Los álabes magnéticos se disponen regularmente sobre el rotor, según un paso angular de 360 /(2n). Los álabes magnéticos son dos a dos simétricos según el eje de rotación. Los dos álabes simétricos presentan una misma polaridad en los

- 5 extremos "N/N" o "S/S", figura 10.81. Las partes centrales de los álabes pueden estar recubiertas de un material que hace pantalla a los campos magnéticos. Una alternativa consiste en hacer álabes de materiales compuestos en los que solamente los extremos estén imantados. Alrededor del rotor así formado, se dispone un número par de solenoides según una simetría central alrededor del eje del rotor. Preferentemente, el número de solenoides será 4, figura 10.80. Otro solenoide se dispone alrededor de la tubería del R\_smo, en un plano paralelo al plano de rotación
- 10 del rotor magnético, preferentemente entre la primera zona de rotores y la cámara anular (figura 10.82). Uno de los terminales de cada solenoide perpendicular al rotor está conectado a un mismo terminal del solenoide paralelo al plano del rotor. El segundo terminal del solenoide paralelo está conectado a uno de los electrodos de la pared situada en el plano de rotación del rotor conductor de corriente. En ciertos modos de realización, la tubería que forma el R smo es
- 15 conductora y sustituye al electrodo y desempeña directamente su papel. El circuito eléctrico se hace de tal forma que todas las corrientes que provienen de las bobinas perpendiculares vayan hacia la bobina paralela a la vez y en el mismo sentido. Al girar, el rotor magnético hace variar los campos magnéticos de las bobinas opuestas de manera simétrica. Los campos magnéticos inducidos por las bobinas perpendiculares se oponen dos a dos, lo que limita los esfuerzos de torsión sobre la bobina. La corriente inducida en los cuatro solenoides perpendiculares pasa a la
- 20 bobina paralela y genera un campo magnético que varía con una frecuencia 2n veces la velocidad de rotación del rotor magnético. El hecho de que la bobina paralela está colocada entre la primera zona de rotores y la cámara anular evita un calentamiento excesivo de los rotores. El eje de los rotores se protegerá mediante un deflector, evitando así un excesivo calentamiento.
- 5.7. En un modo de realización concreto, el R\_smo se utilizará para reducir el CO<sub>2</sub> y oxidar el CH<sub>4</sub> excedentario
  producido durante la fase de gasificación y de síntesis FT a CO y H<sub>2</sub>. Se aspirará una mezcla de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> o eventualmente de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>O, en la primera zona de rotores del R\_smo. La mezcla se podrá enriquecer con partículas de carbono (materia carbonizada, carbón) de 1 a 500 µm. A la mezcla se podrán añadir partículas metálicas, como partículas de manganeso, de óxido de manganeso, de magnesio, de aluminio, de indio, de titanio, de hierro, de cobre,...o de cualquier otro metal capaz de aumentar la tasa de CO y H<sub>2</sub> producida a partir de la
  mezcla de gases.
  - Bajo la acción de los arcos eléctricos de la primera etapa, las moléculas de los gases se ionizarán transformándose en agentes reactivos que reaccionarán entre ellos y con las partículas de carbono según las reacciones precitadas y las reacciones r13 a r19.
- Los metales inyectados en forma de partículas se oxidarán por el distinto agente reactivo formado; podrán ser reducidos por la acción de plasmas (luz y corriente) y de corrientes inducidas por las microondas en la cámara anular.

Como ejemplo, se puede citar la acción del magnesio:

 $Mg + H_2O \rightarrow MgO + H_2$ r13  $Mg + CO_2 \rightarrow MgO + CO$ r14 40  $2Ma + CO_2 \rightarrow 2MaO + C$ r15  $2MgO \leftrightarrow 2Mg + O_2$  $2C + O_2 \rightarrow 2CO$ r16 O la del aluminio:  $3H_2O + 2AI^+ \rightarrow AI_2O_3^- + 3H_2$ r17  $3CO_2 + Al^+ \rightarrow Al_2O_3^- + 3CO$ 45 r18  $3CO_2 + 2AI^+ \rightarrow 2AI_2O_3^- + 2C$ r19  $2AI_2O_3^-$ - (e-)  $\rightarrow 4 AI_3O_2$ 

El carbono producido se puede oxidar a CO por el CO2 o el agua, o por radicales oxígeno producidos en el reactor.

5.8. Los polvos de aluminio son muy inflamables y los polvos de magnesio lo son todavía más, lo que los hace muydifíciles de manejar.

Para poder enriquecer los gases y los plasmas con metales sin tener que manejar polvos, se introduce corriente arriba o corriente debajo de la primera zona de rotores un pequeño bloque de metal o de la aleación de metales

deseados o, de forma general, de cualquier material deseado. El bloque se coloca, ya sea contra la pared de la tubería del R\_smo, ya sea sobre el reflector térmico a la altura del eje de los rotores. Frente al bloque se dispone una puerta o ventana de cuarzo o de cualquier material transparente para las longitudes de onda utilizadas. Se focaliza un haz láser a través de la ventanilla sobre el bloque, con una lente o un objetivo de microscopio. El haz

- 5 produce la ablación de la superficie del bloque. La frecuencia del láser estará comprendida entre 1 y 10<sup>6</sup> Hz, con impulsos del orden de 1 femtosegundo a 100 ns. La ablación por el láser del bloque metálico pulverizará a la entrada del reactor de los gases materia expulsada del bloque que atravesará el R\_smo y podrá reaccionar con las moléculas de gas tal como se describe en 5.7. Se formarán plasmas ópticos, para potencias de láser suficientes (a partir de 8 microjulios/micrómetro cuadrado) y con impulsos suficientemente cortos, de menos de 10 ns. Estos
- plasmas ionizarán todavía más los gases y los átomos de materia expulsados (del bloque) haciendo a todos los elementos muy reactivos, mediante la creación de entidades cargadas y/o de radicales libres. Para las ablaciones, pueden resultar convenientes todas las longitudes de onda; sin embargo, se preferirán longitudes de onda en la región de los UV, por ejemplo de 266 nm. La energía cinética del gas se mantiene alta gracias a las variaciones rápidas de los campos magnéticos en el espacio situado entre la primera zona de rotores y la cámara anular. El gas comprimido por la acción de la primera zona de rotores y de la elevación de temperatura entra en la cámara anular.
- 15 comprimido por la acción de la primera zona de rotores y de la elevación de temperatura entra en la cámara anular donde las microondas que provienen de magnetrones aumentan la temperatura.

5.9. En un modo de realización concreto, los metales y las partículas utilizadas para enriquecer los gases son conductores de corriente. Bajo la acción de microondas en la cámara anular, se inducen corrientes eléctricas en las partículas en suspensión en el gas. Estas corrientes inducidas provocarán arcos eléctricos entre partículas o con las paredes del reactor R\_smo, lo que produce plasmas de origen eléctrico en el gas. Estos plasmas generarán los

- 20 paredes del reactor R\_smo, lo que produce plasmas de origen eléctrico en el gas. Estos plasmas generarán los elementos activados que, al reaccionar entre ellos, con los gases y con las partículas de carbono o de metal, producirán CO y H<sub>2</sub> mediante las reacciones descritas previamente. Los plasmas generados por los arcos eléctricos de corrientes inducidas son del tipo de "plasmas fuera de equilibrio".
- 5.10. En un modo de realización concreto, la distancia entre el fondo de la cámara anular y el primer rotor de la segunda zona de rotores (zona de las turbinas) será igual a n \* λ + Φ, donde n es un entero natural, λ es la longitud de onda de las microondas y Φ es la diferencia de fase inducida por las reflexiones sobre la pared o el rotor. Este primer rotor se hará con un material que conduce la corriente eléctrica y que refleja las microondas. El diámetro del rotor será igual por ejemplo a 0,5 λ. El eje que pasa por los rotores se hará de un material compuesto; la mayor parte se hará de un material aislante eléctrico. Por el contrario, la segunda parte del eje se hace de un material conductor eléctrico o recubierto de un conductor eléctrico, en una longitud de λ/4 a partir del primer rotor dirigido hacia la cámara anular. Las guías de ondas del o de los magnetrones dirigirán las microondas a la cámara anular, que serán reflejadas en parte hacia el primer rotor de la segunda zona de rotores. En ciertos modos de realización, las ondas, a la salida de las guías de ondas, son dirigidas hacia el primer rotor. El rotor y la parte conductora del eje se
- comportarán como una antena de microondas. Ello tendrá como efecto la producción de corrientes inducidas en el
   rotor y en la parte del eje conductora de corriente. Estas corrientes inducidas provocarán arcos eléctricos entre la antena y:
  - \* los electrodos dispuestos cerca del rotor antena;
  - \* las partículas contenidas en el gas y el mismo gas;
  - \* los otros rotores eventualmente puestos a tierra;
- 40 \* las paredes del R smo.

45

Por otra parte, debido a la distancia entre la cámara anular y la antena, las microondas podrán excitar suficientemente las partículas de carbono y eventualmente de metal introducidas en el gas para formar un plasmoide (o un plasma). Se producirá entonces una reducción del  $CO_2$  y una oxidación del carbono y del  $CH_4$  para producir CO y  $H_2$ . Cuando el reactor R\_smo está funcionando, los gases eventualmente enriquecidos en partículas de carbono (y, eventualmente, en otros elementos) son aspirados por la primera etapa del rotor. A esta altura comienza una activación de los gases bajo el efecto de los arcos eléctricos producidos entre los álabes conductores y los

electrodos implantados en la pared del reactor. Después los gases son comprimidos antes de llegar a la cámara anular y, eventualmente, calentados por un campo magnético que varía paralelamente al eje de los rotores y que proviene de la rotación de los álabes magnéticos y de los solenoides. Entonces, los gases pasan a la cámara anular donde se caliente fuertemente por acción de las microondas para formar un plasma termodinámico que contiene plasmas fuera de equilibrio debidos a los arcos eléctricos de corrientes inducidas. Los gases calentados e ionizados

accionan los rotores que arrastrarán el eje de los rotores, lo cual mantiene el funcionamiento del reactor R smo.

5.11. En un modo de realización, el R\_smo está constituido por un sistema de turbinas y de compresores de dos etapas. Un sistema de rotores que forman una etapa de baja presión de compresión está conectado mediante un eje de rotación a un sistema de rotores que forma una etapa de turbinas. Estas dos regiones de rotores forman el sistema de rotores más externo del reactor. Entre las etapas de rotores externos, viene a intercalarse una etapa de compresión de alta presión conectada, mediante un eje hueco, a una segunda etapa de turbinas. Estas dos últimas etapas forman el sistema de rotores más interno del reactor. El eje de rotación del sistema externo está embutido en el eje del sistema interno. El eje de rotación hueco está ensanchado y replegado, en el centro del reactor, para

formar una cámara anular de microondas solidaria con el eje. El eje interno, así como los rotores, se fabrican en un material que es conductor eléctrico y se aíslan del sistema de rotores más externo que está conectado a tierra. Bajo la acción de las microondas inyectadas en la cámara anular, se producirán corrientes eléctricas inducidas en el sistema de rotores más interno. Estas corrientes generan arcos eléctricos entre los dos sistemas de rotores y entre

- 5 el sistema de rotores más interno y la tubería del reactor puesta a tierra. Estos arcos eléctricos activarán los gases y las partículas que atraviesan el reactor de la manera descrita en los capítulos precedentes. Los diversos modos de realización descritos para el R\_smo se pueden combinar en numerosas variantes. En ciertos modos de realización, el espacio situado entre los dos rotores se llenará de aceite o de un líquido que permita un acoplamiento hiperboloide entre los dos sistemas. Por ejemplo, los ejes estarán provistos de álabes (en el interior del eje hueco del
- 10 sistema más interno y de la superficie del eje del sistema más externo) para amplificar este acoplamiento. En ciertos modos de realización, se suprime la etapa de turbina del sistema más externo. El sistema de compresión de baja presión se acopla con el resto del sistema de rotores (correspondiente al sistema de rotor interno) mediante el encaje de los ejes.
- En ciertos modos de realización, el compresor del sistema más interno está constituido por un compresor centrífugo en el que la parte dorsal de la parte acanalada (cono provisto de álabes o de surcos) está fusionada con la cámara anular.

5.12. De manera general, un R\_smo se utiliza como reactor complementario o principal de gasificación del carbono para oxidarlo a CO y producir H<sub>2</sub>. En estas condiciones, se pueden llevar a cabo etapas de filtrado, de burbujeo, de difusión diferencial a través de membranas, de separación mediante ciclones, de separación por criogenia, o cualquier otro procedimiento de separación y de purificación, a fin de purificar el gas de síntesis obtenido y de eliminar las partículas y los metales contenidos en el gas de síntesis.

5.13-1. En un modo de realización concreto, la gasificación realizada en un R\_smo (eventualmente una Tb\_smo) se hace a partir de vapor de SiO.

Por ejemplo, se calienta gas CO<sub>2</sub> en un reactor R\_smo a una temperatura comprendida entre 500 °C y 2000 °C.
 Puesto que el CO<sub>2</sub> no es polar, eventualmente se añade H<sub>2</sub>O al CO<sub>2</sub> para obtener una mezcla de gas de calentamiento más eficiente.

El gas o la mezcla de gases se pone en contacto con una mezcla de partículas de Si (silicio) y de SiO<sub>2</sub> (sílice). Las partículas de Si y de SiO<sub>2</sub> tendrán un tamaño comprendido entre 1 nm y 5 mm. El tamaño de las partículas será bien homogéneo o bien heterogéneo, según el modo de realización del proceso.

30 Bajo la acción del calor y del gas, se producen las siguientes reacciones en proporciones variadas:

Si + SiO<sub>2</sub>  $\leftrightarrow$  2SiO gas

 $CO_2 \texttt{+} Si \leftrightarrow SiO \text{ gas } \texttt{+} CO$ 

 $CO_2$  + Si  $\leftrightarrow$  SiC +  $O_2$  minoritaria

 $Si + O_2 \leftrightarrow SiO_2$ 

20

35 Eventualmente, la mezcla de gases obtenida se sobrecalienta en un segundo R\_smo, a una temperatura comprendida entre 500 °C y 2000 °C. Dado que el SiO tiene un momento dipolar cercano a 1,54, se calentará fuertemente por las microondas.

Después la mezcla gaseosa se pone en contacto con partículas de carbono, de tamaño homogéneo o inhomogéneo, comprendido entre 1 nm y 2 cm, según el modo de realización del proceso.

40 Bajo la acción de la mezcla de gases, se produce la reacción:

 $2C + SiO gas \leftrightarrow SiC sólido + CO gas$  r20

Esta última reacción se puede llevar a cabo en una Tb\_smo o en un R\_smo acoplados a un ciclón que permita aislar las partículas de la mezcla de gases CO<sub>2</sub>/CO obtenida.

5.13-2. En un procedimiento alternativo, el gas de calentamiento utilizado será metano CH<sub>4</sub> en lugar de CO<sub>2</sub>. El gas se calentará, por ejemplo, en un R\_smo (eventualmente en una Tb\_smo) a una temperatura comprendida entre 500 °C y 2000 °C. Puesto que el metano es muy poco polar, eventualmente se mezclará con una proporción baja de H<sub>2</sub>O.

Se producirán las reacciones siguientes en proporciones variadas:

 $CH_4 \rightarrow C \text{ solido + } 2H_2$ 

 $50 \qquad \text{2CH}_4 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2$ 

 $H_2O + CH_4 \rightarrow CO + 3H_2$ 

La mezcla de gases a la salida del R\_smo se pone en contacto con una mezcla de partículas de Si (silicio) y de  $SiO_2$  (sílice), según el procedimiento descrito en 5.13-1. Se producen las reacciones siguientes:

Si + SiO<sub>2</sub>  $\leftrightarrow$  2 SiO gas

 $5 \qquad 2H_2O + 2Si \rightarrow 2 SiO_2 + 2H_2$ 

 $Si + CH_4 \leftrightarrow SiC + 2H_2 \qquad \qquad \text{minoritaria}$ 

 $\text{Si} + \text{C} \rightarrow \text{SiC}$ 

minoritaria

 $SiO_2$  + 3 C  $\rightarrow$  SiC + 2CO

 $SiO_2 + 3 CH_4 \rightarrow SiC + 2CO + 6H_2$ 

10 Luego la mezcla gaseosa se pone en contacto con partículas de carbono según el procedimiento descrito en 5.13-1; se produce entonces la reacción r20.

5.13-3. En un procedimiento alternativo, el gas de calentamiento utilizado será H<sub>2</sub>O, que se calentará en un R\_smo (eventualmente en una Tb\_smo) a una temperatura comprendida entre 500 °C y 2000 °C. Entonces, se pone en contacto la mezcla gaseosa con una mezcla de partículas de Si y de SiO<sub>2</sub> según el procedimiento descrito en 5.13-1.

15 Bajo la acción del calor y del gas, se producen las reacciones:

Si + SiO<sub>2</sub>  $\leftrightarrow$  2 SiO gas

45

 $2H_2O + 2Si \rightarrow 2 \; SiO_2 + 2H_2$ 

En ciertas condiciones, el SiO<sub>2</sub> será producido en el curso de la reacción solamente a partir del silicio Si.

Luego, se pone en contacto la mezcla gaseosa con partículas de carbono, según el procedimiento descrito en 5.13-20 1; se produce la reacción r20.

Los gases de síntesis obtenidos (H<sub>2</sub>, CO, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) o (CO, CO<sub>2</sub>) se podrán purificar y equilibrar mediante la adición de vapor de agua.

El C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> tiene un coeficiente de solubilización en agua (76,7 $\cdot$ 10<sup>-3</sup> mol/litro a 0 °C y 1013 bar) parecido al del CO<sub>2</sub>. En consecuencia, se podrá separar del resto de las moléculas según el procedimiento descrito en 4.2.

25 El SiC producido durante las diferentes reacciones de gasificación se utilizará como catalizador de la reacción FT.

6.1. A la salida de los R\_smo, los gases se enfrían en los intercambiadores térmicos y se purifican para eliminar las partículas y el  $CO_2$  residual. El gas de síntesis se equilibra y se lleva a la temperatura deseada mediante una Tb smo o con cualquier otro medio, antes de ser inyectado en un reactor de FT.

A la salida del reactor FT, la mezcla de hidrocarburos y de alcoholes se calienta en un F\_smo.

- 30 En un modo de realización concreto, para obtener una acción mejor de las microondas, se introduce una cierta cantidad de vapor de agua en la mezcla de hidrocarburos y de alcoholes que sale del reactor FT. Asimismo, la mezcla se puede calentar mediante el calor que proviene de los intercambiadores térmicos. La mezcla de hidrocarburos y de alcoholes que sale del F\_smo alcanza una temperatura comprendida entre 200 °C y 600 °C (preferentemente 370 °C), suficiente para una destilación en una columna de destilación.
- 35 En ciertos modos de realización, espejos planos, esféricos o con una organización Fresnel reflejarán la radiación solar sobre la columna de destilación.

En ciertos modos de realización, lentes ópticas hacen converger la radiación solar sobre la superficie de la tubería del F\_smo o en la F\_smo misma a través de una ventanilla transparente, para calentar la mezcla de hidrocarburos y de alcoholes.

40 6.2. El metano obtenido al final de la destilación será utilizable como combustible en el reactor ciclónico de gasificación y en los diferentes reactores y reacciones descritos precedentemente.

Sin embargo, una parte del metano producido por la síntesis FT podrá servir de carburante a motores de combustión interna que accionan un alternador a fin de producir una parte de la corriente utilizada. El CO<sub>2</sub> producido por los motores se inyectará en el circuito de CO<sub>2</sub> del sistema de producción de gas de síntesis. Asimismo, se recuperará el calor producido por los motores para provecho del sistema de producción.

6.3. En ciertos modos de realización, el  $CO_2$  bajo presión será producido por la combustión del metano en una turbina de gas acoplada a un generador de corriente o a un turbogenerador. A la salida de la turbina, después de un paso eventual por una Tb\_smo para ser sobrecalentado, el  $CO_2$  irá a alimentar los ciclones del gasificador, el reactor de plasma, los R\_smo o cualquier otro reactor del sistema de producción.

- 5 6.4. Una parte de la energía eléctrica será aportada por paneles solares. Los paneles solares presentarán en su superficie partículas de cuarzo, partículas cuánticas (Qdot). Estas partículas tienen la capacidad de emitir fluorescencia en el infrarrojo y en el visible bajo la acción de la radiación UV. Esta transformación de la luz UV en espectro visible e IR la hace utilizable por paneles clásicos.
- De manera general, los Qdot podrán integrarse en el revestimiento negro de las tuberías de los reactores para aumentar su capacidad de absorber la luz.

Otra parte de la energía eléctrica necesaria para hacer funcionar la instalación provendrá de energía eólica.

15

De manera general, puede convenir cualquier tipo de producción de corriente eléctrica para asegurar las necesidades de energía eléctrica del proceso, figura 14. Sin embargo, se preferirá una producción de corriente eléctrica no contaminante, incluyendo el sistema de pilas de combustible, para no hacer más pesado el balance de contaminación del sistema.

#### LEYENDAS DE LAS FIGURAS

- 1) Tubería del horno solar y de microondas
- 1a) Pared del horno solar
- 1b) Vacío o gas aislante (por ejemplo, argón)
- 5 1c) Pared transparente del recinto de confinamiento

1d) Partículas cuánticas sobre la pared del recinto de confinamiento que transforman la radiación solar UV en una radiación visible e infrarroja capaz de atravesar la pared

- 2) Tornillo sinfín
- 3) Sistema de espejos
- 10 3a) Espejo en el interior del recinto de confinamiento
  - 4) Espejos que siguen en escalera una sección de elipsoide
  - 5) Lentes convergentes o de Fresnel
  - 6) Magnetrón.
  - 7) Guía de ondas
- 15 8) Chimeneas de desgasificado
  - 9) Núcleo del reactor (LFLC)
  - 10) Cámara de combustión
  - 11) Quemadores, tangentes a la pared de la cámara de combustión
  - 12) Gas de combustión que gira bajo la acción de las llamas de la combustión
- 20 13) Llamas de la combustión
  - 14) Llegada de aire
  - 15) Llegada de los gases de pirolisis de los gránulos
  - 16) Llegada de gases adicionales, como CH4
  - 17) Faldilla que forma un cono agujereado dirigido hacia abajo: salida axial de la cámara de combustión de los gránulos y de los gases y entrada axial en el primer ciclón
  - 18) Faldilla que forma un cono agujereado dirigido hacia abajo: salida axial de los gránulos y de los gases del primer ciclón y entrada axial en el segundo ciclón
  - 19) Faldilla que forma un cono agujereado dirigido hacia abajo: salida axial de los gránulos del segundo ciclón
  - 20) Cono de obturación de las aberturas en embudo de las faldillas. El cono está provisto de álabes para crear pasajes oblicuos hacia el ciclón inferior a fin de hacer girar los gases en el sentido de rotación del vórtice del ciclón.
    - 21) Obstrucción parcial de la abertura en embudo de las faldillas. Una serie de conductos dispuestos entre el borde de la faldilla y la estructura en cono forma los pasos entre los dos compartimentos.
    - 22) Conducto oblicuo entre el borde de la faldilla y el cono de obturación parcial de la abertura en forma de embudo de la faldilla.
  - 23) Borde de la abertura en forma de embudo de la faldilla.
  - 24) Álabes que crean pasos oblicuos hacia el ciclón inferior.
  - 25) Vistas de un cono de obturación de las aberturas de las faldillas: sección y vista desde abajo.
  - 26) Álabes de la cara inferior de un cono de obturación de las aberturas de las faldillas.
- 40 27) Tubería de inyección tangencial de los gases en los ciclones
  - 28

- 25
- ~ -

30

- 27a) Llegada de producto abrasivo a la tubería de inyección tangencial de los gases en los ciclones.
- 28) Ciclón de doble entrada axial y tangencial
- 29) Guía de flujo de los gases ascendentes
- 30) Estructura hueca en T
- 31) Pie de la estructura hueca en T: tubería de remontada de los flujos
  - 32) Tobera de salida de los gases (tobera horizontal): salida de los flujos que ascienden al espacio intertuberías
  - 33) Tubería interna del núcleo del reactor
  - 34) Tubería externa del núcleo del reactor
  - 35) Espacio entre tuberías
- 10 36) Conducto oblicuo de la entrada axial en el ciclón
  - 37) Extremo inferior de la tubería interna del núcleo: faldilla que presenta curvatura en forma de obús
  - 38) Obturador parcial del extremo inferior de la tubería interna: bicono
  - 39) Rejilla con poros calibrados
  - 40) Rejilla organizada en cono ascendiendo hasta la tubería interna
  - 41) Bicono que cierra el cono con rejilla
    - Cesto anular hueco en su centro (luz)
    - 43) Luz del cesto anular
    - 44) Eje de rotación del cesto anular
    - 45) Hélice de fijación del cesto al eje de rotación
- 20 46) Conductos organizados alrededor de un cilindro corto en rejilla formado por varillas metálicas verticales
  - 47) Varillas metálicas verticales que permiten la formación del flujo ascendente en el ciclón, la filtración de los gránulos, la generación de arcos eléctricos de corrientes inducidas
  - 48) Álabe estructurante de los conductos oblicuos
  - 49) Conducto oblicuo que imprime un movimiento de rotación a los gases cargados de partículas
  - 50) A: Cilindro de subida de los flujos y B: cono agujereado de subida de los flujos
    - 51) Álabe dispuesto sobre el borde externo del cesto anular y dirigido hacia el interior del cesto
    - 52) Electrodo helicoidal con forma de muelle conectado a un electrodo en corona
    - 53) Base del electrodo con forma de muelle que acaba en un estructura en corona que cierra la última espira sobre ella misma
  - 54) Extremo del electrodo en forma de muelle curvado para volver a pasar por el medio de la espiral del muelle, de manera que forme un eje central
    - 55) Ciclón con electrodo helicoidal: GlidArc
    - 56) Estructura en estrella que conecta los ejes de los ciclones GlidArc permitiendo así accionar los muelles al mismo tiempo
    - 57) Ciclón GlidArc dispuesto en roseta alrededor de la luz de la faldilla del último ciclón que acaba la tubería interna del reactor LFLC\_dn
      - 58) Tapa de cierre de los ciclones. A: vista lateral; B: vista desde abajo
      - 59) Cilindro de salida de los flujos que ascienden en el ciclón GlidArc
      - 60) Ranura oblicua de alimentación axial del ciclón GlidArc

35

15

5

-0

25

- 61) Álabe oblicuo que enmarca las ranuras de alimentación axial de los ciclones.
- 62) No existe

5

- 63) Conducto de alimentación axial de los ciclones GlidArc a partir de los conductos de salida del ciclón de la etapa superior
- 64) Tubería de alimentación tangencial del ciclón GlidArc; la tubería se abre en el espacio intertuberías enfrentándose al vórtice de la tubería externa cerca de su pared
  - 65) Tubería de guía de los flujos ascendentes
  - 66) Álabes dispuestos entre la tubería externa y la guía de flujos
  - 67) Fondo de la cámara de combustión
- 10 68) Rejilla de obstrucción del fondo del reactor de gasificación
  - 69) Estructura semicónica
  - 70) Depósito de cenizas del gasificador
  - 71) Ciclón de separación gas / partículas
  - 72) Paredes de la Tb\_smo
- 15 73) Zona o región de rotores situada en el primer tercio del eje compresor
  - 74) Zona o región de rotores situada en el tercer tercio del eje
  - 75) Eje de rotor ovoidal
  - 76) Cámara anular para el confinamiento de las microondas
  - 77) Rotor constituido por cuatro álabes eléctricamente conductores en contacto con el eje: los álabes restantes están eléctricamente aislados del eje
    - 78) 4 electrodos a 90º entre sí, perpendiculares al plano de rotación del rotor
    - 79) Los álabes magnéticos se disponen en cruz; dos álabes simétricos presentan una polaridad opuesta "N/S"
    - 80) 4 solenoides dispuestos perpendicularmente al plano de rotación del rotor que contiene los álabes magnéticos
- 25 81) Rotor con álabes magnéticos que presenta una simetría central; dos álabes simétricos presentan la misma polaridad en los extremos "N/N" o "S/S"
  - 82) Solenoide dispuesto paralelamente al plano de rotación del rotor que contiene los álabes magnéticos
  - 83) Horno solar en peine
  - 84) Unidad de microondas que conecta varios hornos solares
- 30 85) Cuerpo poroso
  - 86) Carga del sustrato
  - 87) Quemadores tangentes a la pared de la cámara de combustión
  - 88) Pozos de aspiración
  - 89) Cono invertido que cierra el último ciclón de la tubería interior
- 35 90) Fuente de ultrasonidos
  - 91) Guía de ultrasonidos
  - 92) Hélice conectada a tierra
  - 93) Juego de cuatro electrodos conectados a un generador eléctrico
  - 94) Aislante eléctrico que aísla las palas de la hélice de los electrodos 93

- 95) Cuchillas
- 96) Hélice
- 97) Escudo térmico
- 98) Cámara de recogida
- 99) Eje de cuchillas de hélice

#### REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de gasificación de compuestos que contienen carbono para la producción de un gas de síntesis, compuesto principalmente por CO y H<sub>2</sub>, caracterizado porque comprende:

- A) Una primera etapa de pirolisis y torrefacción de los compuestos, para producir materia carbonizada
   5 y gas de pirolisis, en un reactor solar y de microondas, provocada por un calentamiento de los compuestos contenidos en dicho reactor solar y de microondas gracias a la energía térmica sinérgica aportada conjuntamente, por una parte por el calentamiento de las paredes del reactor gracias a la concentración por convergencia o reflexión de la radiación solar en la superficie de dichas paredes y, por otra parte, por microondas inyectadas directamente en el interior del reactor y de los compuestos y
- B) Una segunda etapa de transformación de la materia carbonizada y de los gases de pirolisis, que provienen del reactor solar y de microondas, principalmente en CO y H<sub>2</sub>, mediante reacciones químicas de oxidoreducción que se producen en un reactor ciclónico, permitiendo dicho reactor ciclónico la formación de vórtices gaseosos que arrastran y oxidan las partículas de materia carbonizada, gracias a la combustión de los gases de pirolisis o de gas adicional, a la inyección en el reactor ciclónico de gases o de mezclas de gases calentados y a un calentamiento de los gases presentes directamente en dicho reactor bajo la acción de las microondas inyectadas directamente en el reactor ciclónico.

Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque los gases utilizados para realizar las reacciones de oxidoreducción son calentados, acelerados y presurizados bajo la acción sinérgica de la energía térmica que proviene del calentamiento de las paredes de un reactor de calentamiento, de presurización y de aceleración, por convergencia y/o reflexión de la radiación solar en la superficie de las paredes de dicho reactor y por microondas inyectadas en el interior de dicho reactor.

3. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 2, caracterizado porque el reactor ciclónico y/o los reactores de calentamiento, de presurización y de aceleración comprenden medios para producir plasmas gaseosos y/o plasmas o plasmones mixtos de gases y partículas.

4. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado porque las microondas se utilizan a la vez que una radiación infrarroja, preferentemente a frecuencias correspondientes a las frecuencias de absorción de los modos de vibración simétricos de las moléculas de CO<sub>2</sub>.

Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque un sustrato de gasificación comprende partículas heterogéneas que tienen partículas de compuestos que contienen carbono y partículas de aditivos que favorecen la gasificación, eventualmente aglomeradas o fusionadas con las partículas de los compuestos que contienen carbono.

6. Procedimiento según la reivindicación 5, caracterizado porque las partículas de aditivos comprenden, por una parte, metales reductores que favorecen la gasificación mediante reacciones de oxidoreducción y la producción de elementos cargados y de radicales libres bajo la acción de arcos eléctricos producidos por corrientes inducidas en las partículas y, por otra parte, partículas de sílice o de silicio que producen SiO capaz de fijar una parte del carbono contenido en los compuestos, en forma de SiC.

35

40

50

7. Dispositivo para poner en práctica el procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque comprende un reactor solar y de microondas de pirolisis y torrefacción y un reactor ciclónico, el cual tiene: una tubería (1), por ejemplo de material refractario; medios para hacer progresar los compuestos en el interior de la tubería del reactor solar y de microondas de pirolisis y torrefacción (2); medios para concentrar y hacer converger la radiación solar en la superficie de la tubería del reactor (3-3a-4-5); medios para aislar la tubería del

converger la radiación solar en la superficie de la tuberia del reactor (3-3a-4-5); medios para aisiar la tuberia del reactor (del medio exterior (figura 1.1.c); medios para mejorar la inercia térmica de la tubería del reactor; medios para producir microondas; medios para guiar las microondas; y el reactor ciclónico comprende al menos dos unidades ciclónicas superpuestas o embutidas que se comunican entre ellas; dispositivos que permiten combustiones que inducen vórtices gaseosos en las unidades y/o dispositivos de inyección laterales o tangenciales de gas en las unidades, que inducen vórtices gaseosos; medios para producir microondas y medios para guiar las microondas.

8. Dispositivo según la reivindicación 7, caracterizado porque comprende, entre otros elementos, un reactor de calentamiento, de presurización y de aceleración de los gases de oxidación que tiene una tubería, por ejemplo de material refractario, medios para concentrar y hacer converger la radiación solar en la superficie de la tubería del reactor, medios para aislar la tubería del medio exterior; medios para mejorar la inercia térmica de la tubería del reactor; medios para hacer progresar los gases y eventualmente las partículas a lo largo de la tubería del reactor comprimiéndolos, calentándolos y acelerándolos.

Dispositivo según la reivindicación 8, caracterizado porque el reactor de calentamiento, de presurización y de aceleración de los gases de oxidación comprende, entre otros elementos, rotores de álabes, compresores centrífugos y/o de álabes, turbinas, al menos una cámara anular, al menos una fuente de microondas eventualmente completada por una fuente de infrarrojos para hacer progresar y para comprimir, calentar y acelerar gases.

10. Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 6 a 9, caracterizado porque comprende dispositivos de corrientes eléctricas inducidas o no, de óptica y de microondas para producir plasmas gaseosos y/o plasmones mixtos de gases y partículas.

11. Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 6 a 10, caracterizado porque comprende al menos 5 un magnetrón y al menos una guía de ondas para producir microondas de frecuencia comprendida entre 1 GHz y 300 GHz y para guiar dichas microondas.















Fig5





Fig7





Fig9



Fig10



Fig11



Fig12



Fig13



Fig 14