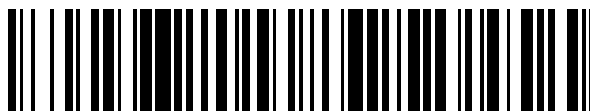


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 555 034**

51 Int. Cl.:

F23C 10/10 (2006.01)

F23C 10/26 (2006.01)

F23C 10/32 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.02.2013** **E 13382033 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.09.2015** **EP 2762781**

54 Título: **Sistema y procedimiento para el almacenamiento de energía usando combustores de lecho fluidizado circulante**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
28.12.2015

73 Titular/es:
**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS (CSIC) (100.0%)
Serrano 117
28006 Madrid, ES**

72 Inventor/es:
**ABANADES GARCÍA, JUAN CARLOS;
ARIAS ROZADA, BORJA y
ÁLVAREZ CRIADO, YOLANDA**

74 Agente/Representante:
PONS ARIÑO, Ángel

ES 2 555 034 T3

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

DESCRIPCIÓN

Sistema y procedimiento para el almacenamiento de energía usando combustores de lecho fluidizado circulante

5 CAMPO DE LA INVENCIÓN

Esta invención se refiere a un sistema y a un procedimiento para el almacenamiento de energía a gran escala en sistemas de generación de potencia eléctrica usando combustores de lecho fluidizado circulante alimentados con aire o alimentados con oxígeno. Este sistema puede interconectarse adicionalmente con otro reactor que captura

10 CO₂ con CaO, potenciando así la densidad de almacenamiento de energía en el sistema al usar la entalpía de la reacción reversible de CO₂ con CaO. El sistema y el procedimiento de esta invención se caracterizan por una gran flexibilidad entre los periodos de máxima producción de potencia eléctrica y los periodos complementarios de baja producción de potencia eléctrica. A máxima producción de potencia eléctrica, se establece una circulación de sólidos desde un silo de alta temperatura a un silo de baja temperatura a través del sistema de la invención. A mínima

15 producción de potencia eléctrica, se usa parte de la energía térmica liberada en el combustor de lecho fluidizado circulante para calentar sólidos del silo de baja temperatura y almacenarlos en el silo de alta temperatura. En sistemas y procedimientos que capturan CO₂ con CaO, parte de la energía térmica liberada durante los periodos de máxima producción de potencia eléctrica procede de la carbonatación de CaO y, en los periodos de baja producción de potencia eléctrica, se usa parte de la energía térmica liberada durante la combustión para calcinar CaCO₃ y

20 almacenar CaO.

DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA ANTERIOR

Según los mejores datos científicos disponibles, como los revisados por el Panel intergubernamental del cambio

25 climático, el cambio climático es una realidad física y los signos de sus consecuencias negativas son cada vez más evidentes en muchas partes del mundo. Son necesarias políticas agresivas de mitigación del cambio climático para poder descarbonizar el sistema de energía global y estabilizar el calentamiento global a menos de 2 °C. Todos los supuestos razonables que investigan las posibles rutas para descarbonizar el sistema de energía con un coste mínimo predicen una penetración sustancial de las energías renovables y las tecnologías de captura y

30 almacenamiento de CO₂. El papel de estas opciones podría ser aún más importante cuando se consideran las dificultades renovadas de implantar centrales nucleares en muchos países.

Las fuentes renovables hacen frente aún a grandes incertidumbres sobre el coste cuando se implantan con una muy alta participación del sistema de energía total, en particular cuando el producto energético es la electricidad. Una de

35 las razones de su alto coste es que son intermitentes, y necesitan redes de transmisión de electricidad, infraestructuras de almacenamiento de energía y/o de apoyo complejas para adaptar sus curvas de suministro a las curvas de demanda. Aunque hay un gran esfuerzo mundial por desarrollar tecnologías para almacenar electricidad a gran escala, no se ha generalizado una solución económica a día de hoy. Por lo tanto, en países con una contribución sustancial de las renovables a la mezcla de electricidad, se usa hoy en día la generación de potencia

40 eléctrica por combustible fósil de apoyo para complementar los periodos de tiempo en que la energía renovable no está disponible. En estas condiciones, la energía fósil tiene una menor prioridad de acceso al mercado de demanda variable de la electricidad y se esperan cambios muy rápidos y drásticos en la producción de potencia eléctrica. Obviamente, este supuesto de factores de baja capacidad de centrales eléctricas por combustible fósil es mucho más caro que la situación óptima en que equipos similares funcionan en modo operativo continuo o de carga base.

45 El problema anterior se agravará cuando se considere el uso de combustibles fósiles para la generación de potencia eléctrica con captura de CO₂ y almacenamiento geológico permanente, CAC, que se reconoce ampliamente como la opción de mitigación principal del cambio climático. Las centrales eléctricas con CAC son sistemas integrados complejos que requieren inherentemente un gran capital, en particular cuando son de generación de potencia

50 eléctrica basada en el carbón. Por lo tanto, por razones económicas y técnicas, las centrales eléctricas con CAC no pueden ser muy flexibles en su producción de potencia eléctrica.

En este contexto, el almacenamiento de energía en centrales eléctricas por combustible fósil, con y sin CAC, es una opción técnica atractiva, ya que permitiría la variabilidad de la producción de potencia eléctrica independientemente

55 del aporte de potencia térmica. La idea de almacenamiento de energía en centrales eléctricas por combustible fósil no es nueva. Es un ejemplo previo en el estado de la técnica de almacenamiento de energía a gran escala en centrales eléctricas de carbón el informe de Drost *et al.* "Thermal energy storage for coal-fired power generation", MK Drost, S Somasundaram *et al.*, Fossil Fuel Plant Cycling Conf., Washington, diciembre de 1990, en que describen el concepto de que una central eléctrica alimentada con carbón calienta una sal fundida de 288 a 566 °C y almacena la

sal en un tanque de alta temperatura durante los periodos de baja demanda de electricidad. Durante los periodos de pico de demanda, se extrae la sal caliente del tanque de alta temperatura y se usa como fuente de calor para un generador de vapor que devuelve la sal fundida fría al tanque de baja temperatura (a 288 °C). Esta tecnología no parece haber penetrado en el mercado, probablemente debido a que el coste asociado al sistema de almacenamiento de energía térmica es mayor que el coste del equipo de la central eléctrica necesario para suministrar la misma potencia térmica variable.

Es una práctica común en las centrales eléctricas ajustar los cambios de carga lo más bajo que el equipo de combustión permita para la producción de máxima potencia eléctrica. Sin embargo, la eficacia energética de la central se reduce drásticamente por debajo de cierto nivel de carga y las emisiones fugitivas de la central empeoran durante estos periodos transitorios, ya que la combustión se lleva a cabo fuera de las condiciones de diseño óptimas. Si la demanda de electricidad está por debajo de este umbral, es necesaria una parada de la central seguida de un arranque en caliente, un arranque en templado o un arranque en frío, dependiendo de la duración del periodo de apagado de la central (de unas pocas horas a varios días o semanas). Por lo tanto, en el mercado de la generación de potencia eléctrica actual, hay una penalización energética y económica sustancial cuando el equipo de generación de potencia eléctrica se fuerza a funcionar con cambios de carga y periodos de apagado. Sin embargo, esta penalización económica parece ser menor que la penalización económica asociada a la inversión en un sistema de almacenamiento de energía a gran escala en la central eléctrica.

En los nuevos sistemas de generación de potencia eléctrica que incorporan CAC, el coste del capital asociado al equipo de potencia térmica es mucho mayor que en los sistemas equivalentes sin CAC. Por lo tanto, resulta obvio que existe una ventana económica más amplia para el diseño de sistemas de almacenamiento de energía a gran escala en centrales eléctricas que incorporan CAC. Esto ya se ha reconocido en el estado de la técnica, y todas las opciones tecnológicas importantes para captura de CO₂ en centrales eléctricas (sistemas postcombustión, sistemas de oxidación o sistemas precombustión) están investigando opciones de proceso que permitan una gran flexibilidad y cambios de carga drásticos (véase, por ejemplo: John Davison, "The need for flexibility in power plants with CCS", IEA Greenhouse Gas R&D Programme. Workshop on Operating Flexibility of Power Plants with CCS, Londres, 11-12 de noviembre de 2009). Sin embargo, no está aún disponible una solución técnica económica y generalmente aceptada para el almacenamiento de energía a gran escala en las diferentes centrales eléctricas por energía fósil con o sin sistema de captura de CO₂.

Un tipo particular de central eléctrica a gran escala hace uso de combustores de lecho fluidizado circulante, CLFC. Estos dispositivos están ampliamente implantados en el sector de la producción de energía del carbón y otras industrias a gran escala. Habitualmente queman en sus cámaras de combustor carbón, biomasa u otro combustible sólido con aire. Son conocidos por trabajar a velocidades superficiales relativamente altas, que permiten un transporte eficaz de sólidos circulantes a través del combustor y un mezclado muy intenso de sólidos que les proporciona altas características de transferencia térmica. Se instalan habitualmente uno o varios ciclones a la salida de estos combustores para separar el gas de escape de combustión de los sólidos circulantes. Los sólidos procedentes del ciclón se reciclan en gran medida al combustor. El calor liberado en la combustión puede recuperarse parcialmente dentro de la cámara de combustión (por ejemplo, transfiriendo calor a las tuberías de agua que son parte de una caldera de un ciclo de vapor). Es también parte del estado de la técnica hacer funcionar el combustor en condiciones adiabáticas y extraer el calor en exceso del combustor usando los sólidos circulantes como portadores de calor. En este caso, se dispone habitualmente un intercambiador de calor de lecho fluidizado externo en la ruta de vuelta de los sólidos circulantes, para transferir parte de su calor a un panel de tubos que es parte del ciclo de vapor y devolver los sólidos enfriados a la cámara de combustión. Los sólidos circulantes son típicamente ceniza fina y materiales ricos en Ca usados típicamente con fines de captura de azufre. El equipo para manejar y controlar los flujos sólidos (sellos de lazo y otras válvulas de sólidos, equipo para desviar flujos descendentes de sólido, etc.) es también parte del estado de la técnica de esta y otras industrias a gran escala (concretamente generación de potencia eléctrica, cemento, tostación de minerales, etc.) que están familiarizadas con el manejo de corrientes de flujo de sólidos a altas temperaturas.

Las centrales eléctricas de combustor de lecho fluidizado circulante que usan O₂ como comburente, en lugar de aire, son también conocidas en el estado de la técnica. Sin embargo, esta es una tecnología aún en etapa de desarrollo, como se refiere por ejemplo en la solicitud de patente US20090293782 (A1).

Es también conocido un sistema de captura de CO₂ postcombustión por ciclo de carbonatación-calcinación, en que se pone en contacto en primer lugar el gas de escape de una central eléctrica con CaO para absorber CO₂ y formar CaCO₃ en un reactor carbonatador, que emite un gas de escape con un contenido reducido de CO₂. Se calcina la corriente de sólidos que contienen CaCO₃ en un combustor de CLF alimentado con oxígeno a una temperatura

alrededor de o superior a 900 °C en atmósfera de CO₂ concentrado. Se ha descrito el concepto básico por T. Shimizu, *et al.* "A twin bed reactor for removal of CO₂ from combustion processes", *Trans. I. Chem. E*, 77A, 1999 y ha experimentado un rápido desarrollo en los últimos años hasta la escala de MW (véase, por ejemplo, Sánchez-Biezma *et al.*, "Testing postcombustión CO₂ capture with CaO in a 1.7 MWt pilot facility", *Energy Procedia* 2013). El almacenamiento de energía en estos sistemas de captura de CO₂ a gran escala para la generación de potencia eléctrica no se ha considerado nunca en el estado de la técnica. Sin embargo, hay antecedentes fundamentales en el estado de la técnica (p.ej. R. Barker, "The reversibility of the reaction $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$ ", *J. Appl. Chem. Biotechnol.* 23 (1973) 733-742) sobre el uso de la reacción reversible CaO/CaCO₃ para almacenar energía de reactores nucleares. Se han propuestos esquemas más nuevos para el almacenamiento de energía solar usando la reacción de carbonatación-calcinación reversible del bucle químico CaO/CaCO₃ (S.E.B. Edwards, V. Materic, "Calcium looping in solar power generation plants", volumen 86, número 9, septiembre de 2012, páginas 2494-2503).

Son también conocidos silos que permiten el almacenamiento de sólidos en polvo fino a baja temperatura y a alta temperatura y equipos para manejar y controlar las corrientes de sólido que entran o salen del silo.

Son de particular interés para esta invención los intercambiadores de calor de lecho fluidizado que extraen calor desde sólidos circulantes a alta temperatura a un fluido de trabajo (por ejemplo, mezcla de agua/vapor de un ciclo de vapor para la generación de potencia eléctrica). Esta clase de intercambiadores de calor forman parte de las centrales eléctricas CLFC. Estos intercambiadores de calor de lecho fluidizado pueden disponerse en serie para una transferencia del flujo de calor a contracorriente más eficaz desde los sólidos al fluido de trabajo. Es un ejemplo reciente de dicha disposición una serie de lechos fluidizados de arena para intercambiar calor eficazmente desde arena circulante a alta temperatura a un ciclo de vapor (K. Schwaiger, M. Haider *et al.*, "sandTES - A novel Thermal Energy Storage System based on Sand", 21st international conference on Fluidized Bed Combustion, Nápoles, 2012).

Por último, pero no menos importante, el documento WO 98/28570 da a conocer un sistema que comprende: un combustor de lecho fluidizado circulante con una primera tubería para suministrar un combustible y una segunda tubería para suministrar un comburente a través de un distribuidor de gas, estando conectado el combustor de lecho fluidizado circulante con un primer ciclón para separar el gas de escape caliente resultante y la corriente de sólidos calientes circulante al combustor de lecho fluidizado circulante, en el que el sistema comprende adicionalmente un primer dispositivo para dividir las corrientes de sólido que caen por gravedad del primer ciclón y para dirigir los sólidos del primer ciclón hacia el combustor de lecho fluidizado circulante a través de una tercera tubería y hacia un primer intercambiador de calor de lecho fluidizado.

A pesar de la disponibilidad comercial y la técnica anterior existente de sistemas y componentes específicos de almacenamiento de energía revisados en los párrafos anteriores, no hay hoy en día ningún sistema para almacenar eficaz y económicamente grandes cantidades de energía térmica y química en una gran central eléctrica de combustible sólido, con o sin CAC. En particular, no están disponibles soluciones técnicas para explotar el potencial de almacenamiento de energía de sólidos a muy alta temperatura que abandonan un combustor de lecho fluidizado circulante, un combustor de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno o un sistema de ciclo de carbonatación-calcinación, usando sólidos a alta temperatura procedentes de combustores de lecho fluidizado circulante. El sistema de esta invención proporciona una solución para este desafío y los procedimientos descritos en esta invención permiten nuevos sistemas de generación de potencia eléctrica basada en carbón con o sin captura de CO₂ que incorporan medios altamente eficaces de almacenamiento de energía a gran escala, haciéndolos mucho más económicos y competitivos en los mercados de la electricidad cuando se fuerzan a funcionar con niveles muy altos de flexibilidad y cambios de carga.

SUMARIO DE LA INVENCION

Esta invención hace referencia a un sistema y a un procedimiento para el almacenamiento de energía a gran escala en sistemas de generación de potencia eléctrica que usan combustores de lecho fluidizado circulante alimentados con aire o alimentados con oxígeno, consiguiendo configuraciones de sistema de central eléctrica novedosas con una alta flexibilidad para funcionar a diferentes niveles de producción de potencia térmica. El sistema y el procedimiento de esta invención explotan los beneficios termodinámicos inherentes de un almacenamiento de energía eficaz asociado a las características de temperatura muy alta de los sólidos circulantes en sistemas de combustión de lecho fluidizado circulante, CLFC. Además, el sistema de esta invención hace referencia a sistemas de captura de CO₂ que usan un bucle químico de CaO/CaCO₃ para capturar CO₂ de los gases de escape que usa también reactores de lecho fluidizado circulante a alta temperatura. El uso de la reacción reversible de CaO con CO₂ para dar CaCO₃, que tiene una muy alta entalpía de reacción (-168 kJ/mol en condiciones normales), permite una

flexibilidad adicional en la producción de potencia eléctrica del sistema presentado en esta invención.

El sistema pretende la combustión de un combustible en un combustor de lecho fluidizado circulante, preferiblemente a temperaturas típicas de aproximadamente 800-950 °C (para permitir la captura *in situ* de SO₂ en el combustor), mientras que incorpora un almacenamiento de energía térmica a gran escala que comprende:

- (i) un combustor de lecho fluidizado circulante con una primera tubería para suministrar un combustible y una segunda tubería para suministrar un comburente a través de un distribuidor de gas, estando conectado el combustor de lecho fluidizado circulante con
 - (ii) un primer ciclón para separar el gas de escape caliente resultante y la corriente de sólidos caliente circulante al combustor de lecho fluidizado circulante,
- en el que el sistema comprende adicionalmente;
- (iii) un primer dispositivo para dividir las corrientes de sólido que caen por gravedad del primer ciclón, dirigiendo los sólidos del primer ciclón
 - a) hacia el combustor de lecho fluidizado circulante a través de una tercera tubería,
 - b) hacia un silo de mayor temperatura que recibe los sólidos de mayor temperatura a través de una cuarta tubería, dirigiendo los sólidos del silo de mayor temperatura a un primer intercambiador de calor de lecho fluidizado, y
 - c) hacia un silo de menor temperatura para almacenar los sólidos de menor temperatura de un segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado, estando conectado el silo de menor temperatura con el segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado mediante una quinta tubería y estando conectado con el combustor de lecho fluidizado circulante mediante una sexta tubería, y
 - (iv) un primer dispositivo de control de sólido para controlar la alimentación de los sólidos de mayor temperatura del silo de mayor temperatura;
 - (v) un segundo dispositivo de control para controlar la alimentación de los sólidos de menor temperatura del silo de menor temperatura al combustor de lecho fluidizado circulante.
- El sistema de la presente invención explota el alto contenido de energía térmica del alto flujo en circulación de sólidos a alta temperatura característico de combustores de lecho fluidizado circulante. Las temperaturas de los sólidos en el silo de mayor temperatura se espera que sean muy cercanas a las típicas en la cámara de combustión, entre 800-950 °C, preferiblemente 850 °C cuando el comburente es aire. El silo de mayor temperatura y/o el silo de menor temperatura están localizados entre la altura mínima del ciclón y el punto más bajo de la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante, justo por encima del distribuidor de gas de dicha cámara de combustión, de modo que la circulación de la parte descendente del bucle de circulación de mayor temperatura del sólido se facilita por la gravedad y la parte ascendente (subida) se lleva a cabo simplemente por la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante.
- El procedimiento de almacenamiento de energía usando combustores de lecho fluidizado circulante de la presente invención comprende las siguientes etapas:
- (i) alimentar un flujo de combustible y comburente a una cámara de combustión de lecho fluidizado circulante, separando el gas de escape caliente resultante y las corrientes de sólido de la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante, en el que los aportes de combustible, comburente y circulación sólida a través de la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante permiten una producción de potencia térmica variable al trabajar entre dos modos operativos:
 - a) un primer modo operativo de máxima producción de potencia eléctrica con máximo flujo de combustible y comburente a la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante, en que se obtiene una potencia térmica adicional del ciclo de vapor extrayendo calor de la corriente de sólidos calientes en un segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado que dirige la corriente de sólidos a un silo de menor temperatura, donde se almacenan los sólidos de menor temperatura, disponiendo que los sólidos de mayor temperatura fluyan de un silo de mayor temperatura a través del primer intercambiador de calor de lecho fluidizado, enfriando los sólidos de mayor

temperatura de modo controlado mediante un primer dispositivo de control de sólidos colocado entre el silo de mayor temperatura y el primer intercambiador de calor de lecho fluidizado, y

- b) un segundo modo operativo de mínima producción de potencia eléctrica con mínimo flujo de combustible y comburente a la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante, en que la producción térmica del primer intercambiador de lecho fluidizado es cero y los sólidos de menor temperatura fluyen del silo de menor temperatura hacia la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante de modo controlado mediante un segundo dispositivo de control de sólidos colocado entre el silo de menor temperatura y la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante, de modo que la potencia térmica en exceso liberada en la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante se transfiera a los sólidos de menor temperatura, de modo que los sólidos de mayor temperatura fluyan al silo de mayor temperatura, donde se almacenan los sólidos de mayor temperatura.

El procedimiento anterior puede aplicarse usando combustores de lecho fluidizado circulante que usan aire como comburente. Cuando se integra en un ciclo de vapor del estado de la técnica, el sistema resultante sería una central eléctrica de CLFC altamente flexible en que podría asignarse un valor fijo de carbón (u otro combustible) para entrar en el combustor de lecho fluidizado circulante, y este aporte de potencia eléctrica podría permanecer estable e invariable siguiendo el procedimiento de esta invención, a pesar de grandes cambios en la producción de potencia eléctrica. Como alternativa, en el segundo modo operativo, podría hacerse aún menor la mínima producción de potencia eléctrica reduciendo los flujos de combustible y comburente dentro de los límites normales de funcionamiento del combustor, que pueden ser aproximadamente un 50 % de la producción de potencia eléctrica máxima. El primer modo operativo de máxima producción de potencia eléctrica de la central eléctrica define la escala del ciclo de vapor y del equipo de generación de potencia eléctrica asociado. Este puede elegirse libremente dentro de ciertos límites que están regidos por los balances de masa y calor en el sistema, por el volumen de los silos de almacenamiento, por la densidad aparente y calor específico de los sólidos y por la temperatura de los sólidos almacenados en los silos. En cualquier caso, la fracción de tiempo cada año en que se funciona a máxima producción de potencia eléctrica, o como alternativa, la fracción de energía generada durante un cierto periodo de tiempo dividida entre la energía máxima posible generada durante ese periodo de tiempo (denominada aquí factor de capacidad) puede variar en gran medida en esta central eléctrica sin tener que apagar el combustor de lecho fluidizado circulante y componentes asociados. Cuando las condiciones del mercado eléctrico requieren una máxima potencia eléctrica durante periodos relativamente cortos (bajos factores de capacidad), el sistema y el procedimiento descritos anteriormente son capaces de suministrar con un combustor de lecho fluidizado circulante relativamente pequeño la misma máxima producción de potencia eléctrica que un combustor mucho mayor diseñado para suministrar la misma máxima producción de potencia eléctrica. Esto se consigue gracias al efecto impulsor del sistema de almacenamiento de sólido a mayor temperatura del sistema de la presente invención. Por lo tanto, la aplicación de los procedimientos descritos hasta ahora en esta invención se traducirá en ahorros económicos respecto a los sistemas de CLFC estándares cuando el coste de capital de los elementos adicionales requeridos en el sistema de almacenamiento (principalmente los silos, el segundo intercambiador de calor y el equipo auxiliar asociado) sea menor que la diferencia en el coste de capital entre el CLFC que produce la misma producción de máxima potencia eléctrica y el sistema de la presente invención. Surgen beneficios económicos adicionales a favor del sistema de la presente invención por la respuesta más rápida esperada en el sistema cuando tienen que emprenderse cambios de carga rápidos y/o demandas de pico de electricidad. Esto es debido a que el combustor de lecho fluidizado circulante en la presente invención está siempre funcionando en condiciones de estado estacionario a pesar de los grandes cambios permitidos en la producción de potencia eléctrica. Las condiciones estables en el combustor conducirán también a ganancias de eficacia energética y beneficios ambientales, ya que se evitan condiciones de combustión transitoria.

Los beneficios anteriores del sistema de almacenamiento de energía dado a conocer en esta invención son aún más evidentes cuando se aplican a sistemas de generación de potencia eléctrica que requieren más capital. Uno de dichos sistemas puede ser una central eléctrica de combustor de lecho fluidizado circulante alimentada con oxígeno, diseñada para capturar y almacenar CO₂. Estos sistemas incorporan, entre otros elementos, una costosa unidad de separación de aire para obtener una corriente pura de O₂, un equipo auxiliar para reciclaje de gas de escape y una unidad de compresión y purificación para llevar el CO₂ a condiciones supercríticas y permitir un transporte y almacenamiento geológico permanente. Para estos sistemas complejos, es extremadamente difícil y/o caro funcionar en condiciones diferentes al funcionamiento a carga completa y/o a menores factores de capacidad. En estas condiciones, será una gran ventaja de costes hacer uso del sistema y el procedimiento de esta invención. Dicho sistema es similar al representado en la Figura 1, haciendo del comburente alimentado al combustor de lecho fluidizado circulante una mezcla de O₂ y CO₂ concentrados. Como se discute en los párrafos anteriores para el caso alimentado con aire, este nuevo sistema procurará sustanciales ahorros de capital y beneficios operativos por usar un combustor de CLF impulsado por oxígeno más pequeño y estable que es capaz de suministrar periodos de

máxima producción de potencia eléctrica idénticos a los de un sistema de CLFC alimentado con oxígeno mucho más grande.

Otros de dichos sistemas que requieren capital que pueden beneficiarse de esta invención, porque usa también reactores de lecho fluidizado circulante a alta temperatura, son los sistemas de ciclo de carbonatación-calcinación que usan CaO como sorbente reversible para capturar CO₂.

Las descripciones anteriores y ejemplos asociados no están limitados a modos operativos del sistema de esta invención en modos operativos extremos solo. Pueden obtenerse producciones de energía térmica intermedias a partir de los sistemas representados en la Figura 1 dividiendo el flujo total de sólidos a través del combustor de lecho fluidizado circulante y el ciclón en diferentes corrientes de sólido a través de las tuberías tercera, cuarta y quinta, y permitiendo diferentes flujos de sólidos desde los silos de sólido al combustor de lecho fluidizado circulante. Además, puede considerarse una amplia variabilidad de temperaturas en los silos dependiendo del número y eficacia de los intercambiadores de calor de lecho fluidizado dispuestos en serie. Muchas de estas variantes deberían ser evidentes para un especialista en la materia que intente lograr un cierto perfil de producción de potencia eléctrica (producción de potencia eléctrica en diferentes momentos) entre los extremos de carga máxima de sólidos en el silo de mayor temperatura y el silo de menor temperatura del sistema de la Figura 1.

Los sólidos circulantes pueden ser una mezcla de ceniza del carbón alimentado al combustor de lecho fluidizado circulante y sólidos derivados de calcio usados rutinariamente en CLFC como sorbentes de SO₂ (se ha omitido en la Figura 1 el sistema de purga de estas cenizas por simplicidad). Sin embargo, para minimizar sustancialmente los volúmenes de los silos, será beneficioso hacer funcionar el sistema de la Figura 1 con una circulación de sólido inerte de bajo coste de altas densidades aparentes de partícula. Podría haber muchos de estos sólidos estables a alta temperatura y con propiedades adecuadas para fluidificación, tales como óxidos de Al, Fe, Mn o Ti u óxidos naturales mixtos como ilmenita u olivina. Las cenizas acumuladas de la combustión de combustible deberían purgarse (no mostrado en la figura por simplicidad) de este lote de sólido denso circulante en el sistema de almacenamiento de energía de la Figura 1.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Se adjunta un conjunto de dibujos, de carácter ilustrativo y no limitante, en el que se representa lo siguiente:

Figura 1: Muestra el esquema general del primer y segundo dispositivos de esta invención (CLFC alimentado con aire y CLFC alimentado con oxígeno, respectivamente) que comprende los silos de mayor y menor temperatura, los intercambiadores de calor de lecho fluidizado y los dispositivos de control y división del sólido dispuestos de la manera característica de esta invención.

Figura 2: Muestra un esquema general del sistema de captura de CO₂ por ciclo de carbonatación-calcinación que incorpora un sistema de almacenamiento de energía que puede hacerse funcionar en modos operativos con diferente producción de potencia térmica sin alterar las condiciones de combustión del calcinador alimentado con oxígeno.

Figura 3: Muestra un esquema general del sistema de captura de CO₂ por ciclo de carbonatación-calcinación que incorpora un sistema de almacenamiento de energía como en la Figura 2, pero con modos operativos adicionales, que incluye un calcinador alimentado con oxígeno que puede hacerse funcionar incluso como el dispositivo de la Figura 1.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS REALIZACIONES PREFERIDAS

Esta invención hace referencia a un sistema y a un procedimiento para el almacenamiento de energía a gran escala en sistemas de generación de potencia eléctrica que usan combustores de lecho fluidizado circulante alimentados con aire, o alimentados con oxígeno, para conseguir configuraciones de sistema de central eléctrica novedosas con una alta flexibilidad para funcionar a diferentes niveles de producción de potencia térmica. El sistema y el procedimiento de esta invención explotan los beneficios termodinámicos inherentes para un almacenamiento de energía eficaz asociado a las muy altas temperaturas características de sólidos circulantes en sistemas de combustión de lecho fluidizado circulante, CLFC. Además, el sistema de esta invención hace referencia a sistemas de captura de CO₂ que usan un bucle químico de CaO/CaCO₃ para la captura de CO₂ de los gases de escape que usa también reactores de lecho fluidizado circulante de alta temperatura. El uso de la reacción reversible de CaO con CO₂ para dar CaCO₃, que tiene una entalpía de reacción muy alta (-168 kJ/mol en condiciones normales)

permite una flexibilidad adicional en la producción de potencia eléctrica del sistema presentado en esta invención.

Se presenta en la Figura 1 un primer sistema dado a conocer en esta invención, y se pretende para la combustión de un combustible en un combustor de lecho fluidizado circulante a temperaturas típicas de aproximadamente 800-950 °C (habitualmente de 850 °C para permitir la captura *in situ* de SO₂ en el combustor por CaO), mientras que incorpora un almacenamiento de energía a gran escala que comprende:

- (i) una cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40) con una primera tubería (1) para suministrar un combustible y una segunda tubería (2) para suministrar un comburente a través de distribuidor de gas, estando la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40) conectada con un primer ciclón (41) y un primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42) para recibir sólidos del primer ciclón (41) y/o de un silo a mayor temperatura (43), en el que el primer ciclón (41) separa el gas de escape (12) caliente resultante y la corriente de sólidos calientes (11) de la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40);
 - (ii) un primer dispositivo (44) para dividir las corrientes de sólido que caen por gravedad del primer ciclón (41), dirigiendo los sólidos hacia el primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42) que recibe los sólidos a alta temperatura a través de una tercera tubería (3), hacia el silo de mayor temperatura (43) que recibe los sólidos de mayor temperatura a través de una cuarta tubería (4) y hacia un segundo intercambiador de lecho fluidizado (45) que recibe los sólidos de mayor temperatura a través de una novena tubería (9).
- Los sólidos del primer ciclón (41) pueden dirigirse al primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42) conectado con la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40) mediante un segundo dispositivo (46) para dividir las corrientes de sólido a través de una séptima tubería (7).
- El sistema comprende adicionalmente una derivación u octava tubería (8) del primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42) para usar durante periodos de baja carga térmica en la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40), usando el segundo dispositivo (46) para dividir las corrientes de sólido (un desviador, un sello de lazo doble o cualquier otro medio mecánico para desviar flujos sólidos).
- El sistema comprende adicionalmente:
- (i) al menos un segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (45) que puede transferir eficazmente calor desde la corriente de sólido de mayor temperatura al ciclo de vapor de la central eléctrica, estando el segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (45) conectado con el primer dispositivo (44) para dividir las corrientes de sólido mediante una novena tubería (9); y
 - (ii) un silo de menor temperatura (47) para almacenar sólidos de menor temperatura del segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (45), estando conectado el silo de menor temperatura (47) con el segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (45) mediante una quinta tubería (5);
 - (iii) un primer dispositivo de control de sólidos (48) para alimentar sólidos calientes del silo de mayor temperatura (43) a la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40) mediante una décima tubería (10) que conecta el primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42) con la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40); y
 - (v) un segundo dispositivo de control de sólidos (49) para alimentar sólidos de menor temperatura del silo de menor temperatura (47) a la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40) mediante una sexta tubería (6).

El sistema de la presente invención explota el alto contenido de energía térmica del gran flujo en circulación de sólido a mayor temperatura característico de los combustores de lecho fluidizado circulante.

La disposición de los elementos en el sistema de la presente invención facilita el manejo y transporte de grandes flujos de materiales sólidos a muy alta temperatura entre silos. Esto es particularmente relevante en el sistema de la Figura 1, en que se espera que las temperaturas de los sólidos en el silo de mayor temperatura sean muy cercanas a las típicas en la cámara de combustión (40), entre 800-950 °C preferiblemente 850 °C, para maximizar la captura *in situ* de SO₂ con CaO en el CLFC (40). El silo de mayor temperatura (43) y/o el silo de menor temperatura (47) están localizados entre la altura mínima del primer ciclón (41) y el punto más bajo de la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante, justo por encima del distribuidor de gas de dicha cámara de combustión (40), de modo que la circulación de la parte descendente del bucle de circulación de mayor temperatura de los sólidos se facilita

por la gravedad y la parte ascendente (subida) se lleva a cabo simplemente por la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40).

El procedimiento de almacenamiento de energía usando combustores de lecho fluidizado circulante del primer sistema de la presente invención comprende las siguientes etapas:

(i) alimentar un flujo máximo de combustible y comburente a una cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40), separar en un primer ciclón (41) el gas de escape caliente resultante y las corrientes de sólido de la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40) y recuperar parte del calor liberado en la combustión de combustible extrayendo calor de la corriente de sólidos calientes en un primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42); o como alternativa, alimentar un flujo mínimo de combustible y comburente a la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40) y disponer que parte o todos los sólidos circulantes se desvíen del primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42), en el que se permite una producción de potencia térmica variable manteniendo condiciones estables en la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40) trabajando entre dos modos operativos:

a) un primer modo operativo de máxima producción de potencia eléctrica con máximo flujo de combustible y comburente a la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40), en que se obtiene una potencia térmica adicional para el ciclo de vapor permitiendo que todos los sólidos que dejan el primer ciclón (41) fluyan a través de un segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (45) que dirige la corriente de sólidos a un silo de menor temperatura (47), donde se almacenan los sólidos de menor temperatura cuyo calor se extrae, manteniendo un flujo de sólidos a través de la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40) al disponer que los sólidos de mayor temperatura fluyan de un silo de mayor temperatura (43) a través del primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42), enfriando los sólidos y alimentándolos a la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40) de modo controlado mediante un primer dispositivo de control de sólidos (48) colocado entre el silo de mayor temperatura (43) y el primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42), y

b) un segundo modo operativo de mínima producción de potencia eléctrica con mínimo flujo de combustible y comburente a la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40), en que la producción térmica del primer intercambiador de lecho fluidizado (42) es cero, desviando los sólidos a través de una desviación u octava tubería (8), y los sólidos de menor temperatura se alimentan de un silo de menor temperatura (47) a la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40) de modo controlado mediante un segundo dispositivo de control de sólidos (49), de modo que la potencia térmica en exceso liberada en la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40) se transfiera a los sólidos de menor temperatura de modo que los sólidos de mayor temperatura resultantes fluyan al silo de mayor temperatura (43), donde se almacenan los sólidos a alta temperatura.

Un segundo sistema dado a conocer en esta invención contiene varios elementos comunes a los descritos anteriormente, pero incluye varios rasgos particulares que pueden hacerlo aún más económicamente atractivo que los descritos anteriormente para la generación de potencia eléctrica a gran escala y flexible a partir de combustibles fósil con captura de CO₂. El sistema referido se representa en la Figura 2, y es un sistema para la captura de CO₂ de un gas de escape por ciclo de carbonatación-calcinación. Como se discute en el estado de la técnica, esta es una tecnología de captura de CO₂ inherentemente más económica que el sistema de CLF alimentado con oxígeno, que comprende:

i) un carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) con una undécima tubería (13) que suministra un gas de escape que contiene CO₂ diluido procedente de una central eléctrica de combustión existente (no mostrada en la Figura 2 por simplicidad), justo antes de enviar este gas de escape a la chimenea. El reactor carbonatador tiene típicamente una duodécima tubería (14) que suministra sólidos ricos en CaO de un combustor de lecho fluidizado circulante (52), que es un calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (para aumentar el tiempo de residencia y las existencias totales de sólidos en el carbonatador). Se conecta típicamente el carbonatador (50) con un segundo ciclón (51) para separar el gas de escape con CO₂ reducido (16) y la corriente de sólido parcialmente carbonatada que contiene CaCO₃ (17), en el que se recircula parte de la corriente de sólido parcialmente carbonatada que contiene CaCO₃ (17) al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) a través de una decimotercera tubería (15) y se envía la corriente restante de sólidos a alta temperatura que contienen CaCO₃ al calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52),

ii) un combustor de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) que funciona como calcinador con una primera tubería (18) que suministra combustible, una segunda tubería (19) que suministra una mezcla de O₂ y CO₂ a través de un distribuidor de gas y una decimocuarta tubería (20) que suministra una corriente de sólidos que

contiene CaCO_3 que procede típicamente del segundo ciclón (51). Hay también una tercera tubería (21) que suministra sólidos recirculados del calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) desde un primer ciclón (53) para aumentar el tiempo de residencia y las existencias de sólidos en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52). El primer ciclón (53) separa el gas rico en CO_2 (22) de la corriente de sólido calcinado que contiene CaO (23). El gas rico en CO_2 (22) que procede del calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) se conectará más adelante con todo el equipo necesario para una generación de potencia eléctrica y acondicionamiento y compresión de CO_2 eficaces. Parte de este CO_2 puede reciclarse para formar parte de la mezcla de O_2 y CO_2 que entra en el distribuidor de gas mediante la segunda tubería (19), junto con el O_2 purificado generado en una unidad de separación de aire (no mostrada en la Figura 2 por simplicidad),

iii) un primer (55) y tercer (54) dispositivos para dividir la corriente de sólido calcinado que contiene CaO (23) y la corriente de sólido parcialmente carbonatado que contiene CaCO_3 (17) respectivamente cada una en varias corrientes de sólido. El tercer dispositivo (54) para dividir corrientes de sólido que caen por gravedad del segundo ciclón (51) dirige los sólidos

a) hacia el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) a través de la decimotercera tubería (15),

b) hacia el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) a través de la decimocuarta tubería (20),

y

c) hacia el silo de menor temperatura (57) para almacenar sólidos de menor temperatura a través de una quinta tubería (30) que conecta un segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (56) con el silo de menor temperatura (57).

El primer dispositivo (55) para dividir la corriente de sólido calcinado que contiene CaO (23) que cae por gravedad del primer ciclón (53) dirige los sólidos

a) hacia el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) a través de la tercera tubería (21),

b) hacia el silo de mayor temperatura (58) que recibe los sólidos de mayor temperatura a través de una cuarta tubería (24), y

c) hacia el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) mediante una decimoquinta tubería (25),

iv) al menos un tercer intercambiador de calor de lecho fluidizado (59) para extraer calor de la corriente a alta temperatura de sólidos que contienen CaO de la decimoquinta tubería (25), antes de alimentarlos al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) a través de la decimosegunda tubería (14). El fluido de trabajo que extrae el calor de este lecho fluidizado será típicamente parte de un ciclo de vapor de una central eléctrica,

v) una decimosexta tubería (26) en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) o en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) para suministrar un flujo constitutivo de CaCO_3 de caliza fresca que mantiene la capacidad portadora de CO_2 de las partículas de CaO y compensa las pérdidas de CaO por desgaste o sulfatación. Se coloca una decimoséptima tubería (27) en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) o en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) para purgar el flujo equivalente de sólidos y evitar la acumulación de cenizas y sólidos derivados del calcio.

El dispositivo comprende adicionalmente:

vi) un primer dispositivo de control de sólidos (60) para alimentar los sólidos de mayor temperatura del silo de mayor temperatura (58) a un primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (61) que descarga los sólidos de menor temperatura ricos en CaO en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) a través de una decimoctava tubería (28), y

vii) un segundo dispositivo de control de sólidos (62) para alimentar sólidos del silo de menor temperatura (57) al calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) a través de una sexta tubería.

Se da a conocer en esta invención un procedimiento de almacenamiento de energía que usa combustores de lecho fluidizado circulante, más preferiblemente un procedimiento para la captura de CO_2 de un gas de escape por ciclo de carbonatación-calcinación que usa el segundo sistema descrito anteriormente como calcinador de CaCO_3 , que comprende las siguientes etapas:

- 5 i) alimentar un flujo de combustible y comburente a un calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) para descomponer el CaCO_3 en una corriente rica en CO_2 (22) y una corriente de sólido calcinado que contiene CaO (23),
- 10 ii) alimentar un flujo de gas de escape que contiene CO_2 y un flujo de sólidos que contienen CaO a un carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) en condiciones que permitan una captura eficaz de CO_2 por CaO , formando una corriente de sólido parcialmente carbonatado que contiene CaCO_3 (17) y un gas de escape con baja concentración de CO_2 (16),
- 15 iii) reciclar los sólidos recirculados del carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) a través de la decimotercera tubería (15) que suministra una parte de la corriente de sólido parcialmente carbonatado que contiene CaCO_3 (17) del carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) para aumentar el tiempo de residencia de los sólidos en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50), y enviar la corriente de sólido restante al calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) para descomponer el CaCO_3 en una corriente rica en CO_2 (22) y
- 20 una corriente de sólido calcinado que contiene CaO (23),
- iv) reciclar los sólidos recirculados del calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) a través de una tercera tubería (21) que suministra parte de la corriente de sólido calcinado que contiene CaO (23) para aumentar el tiempo de residencia de los sólidos en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con
- 25 oxígeno (52), y enviar la corriente restante de sólidos de alta temperatura que contienen CaO mediante una decimoquinta tubería (25) a un tercer intercambiador de calor de lecho fluidizado (59) para enfriar los sólidos calcinados a alta temperatura que contienen CaO , y alimentar estos sólidos al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50), iniciando así de nuevo el ciclo de carbonatación-calcinación de captura de CO_2 .
- 30 Como se discute en los párrafos anteriores para centrales eléctricas de CLFC alimentadas con oxígeno, el sistema de captura de CO_2 completo es un sistema complejo y altamente integrado, y los cambios drásticos en la producción de potencia eléctrica están asociados a ineficacias técnicas y económicas. Es particularmente difícil seguir los cambios de carga con el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52), ya que este está conectado con una unidad de separación de aire que suministra O_2 puro y una batería de purificación y compresión
- 35 de CO_2 de la corriente de gas rica en CO_2 , parte de la cual se recicla a la corriente mezcla de O_2 y CO_2 a como parte del estado de la técnica de los sistemas alimentados con oxígeno. El procedimiento de la invención proporciona una solución para desacoplar la producción de potencia eléctrica del sistema de las condiciones operativas del calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno de la Figura 2 y ser capaz de funcionar con diferentes producciones de energía. El procedimiento se caracteriza por lo tanto porque permite una producción de
- 40 potencia eléctrica térmica variable manteniendo las condiciones estables en el calcinador de lecho fluidizado circulante (52), al trabajar entre los dos modos operativos extremos descritos para el primer sistema y en los que:
- a) el primer modo operativo de máxima producción de potencia eléctrica comprende adicionalmente el máximo flujo de gas de escape al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50), en que se obtiene potencia térmica adicional
- 45 del segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (56) debido a que el segundo intercambiador de lecho fluidizado (56) recibe una corriente de sólidos de mayor temperatura de un tercer dispositivo (54) para dividir la corriente de sólidos parcialmente carbonatados que contienen CaCO_3 (17) y suministra una corriente de sólido de menor temperatura de sólidos carbonatados a través de una quinta tubería (30) al silo de menor temperatura (57); y se obtiene una potencia térmica adicional del primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (61) que descarga
- 50 los sólidos de menor temperatura ricos en CaO en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) a través de una decimoctava tubería (28).
- En esta situación, el sistema de captura de CO_2 genera la potencia térmica de la alimentación de combustible a través de la primera tubería (18), más la potencia térmica generada en la carbonatación del CaO que reacciona con
- 55 CO_2 o gas de escape que entra en la decimotercera tubería (13), más la potencia térmica extraída de los sólidos a alta temperatura que fluyen desde el silo de mayor temperatura (58) al silo de menor temperatura (57). Obviamente, este supuesto de máxima producción de potencia eléctrica beneficioso puede durar solo hasta que se agote el CaO a alta temperatura almacenado en el silo de mayor temperatura (58). Para cargar el silo de mayor temperatura (58) con sólidos calcinados a alta temperatura ricos en CaO , es necesario que durante ciertos periodos de tiempo el

sistema funcione en condiciones tales que esté disponible un excedente de energía térmica en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno para calentar y calcinar un flujo adicional de sólidos respecto a los que proceden de la reacción con CO_2 en el carbonatador de lecho fluidizado circulante.

- 5 b) Por lo tanto, el segundo modo operativo de mínima producción de potencia eléctrica comprende adicionalmente el mínimo flujo de gas de escape al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50), en que el exceso de producción térmica resultante en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) se usa para calentar y calcinar un flujo adicional de sólidos fríos y parcialmente carbonatados del silo de menor temperatura (57), regulado con el segundo dispositivo de control de sólidos (62), y un flujo constituyente de CaCO_3 de caliza fresca a través de
10 una decimosexta tubería (26), de modo que se almacene un flujo de sólidos calientes y ricos en CaO a través de una cuarta tubería (24) en el silo de mayor temperatura (58).

Se da a conocer un nuevo dispositivo (Figura 3) que es similar al descrito para la Figura 2, pero en el que el segundo dispositivo (63) para dividir sólidos recirculados del calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno
15 (52) a través de la tercera tubería (21) conecta también el primer ciclón (53) con un cuarto intercambiador de calor (64) a través de una séptima tubería (32). Este cuarto intercambiador de calor (64) se conecta adicionalmente con el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52).

El sistema comprende adicionalmente un cuarto dispositivo (65) para dividir corrientes de sólido que dirige los
20 sólidos que abandonan el primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (61) al combustor de lecho fluidizado circulante (52) o al carbonatador de lecho fluidizado circulante (51).

Esto permite un nuevo procedimiento para la captura de CO_2 en este dispositivo, que comprende adicionalmente la extracción de calor del calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) a través de un cuarto
25 intercambiador de calor (64), en el que se permiten diferentes producciones de potencia térmica entre los siguientes extremos, manteniendo las condiciones estables en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) al trabajar entre los dos modos operativos extremos descritos para el segundo sistema, y en el que:

a) en el primer modo operativo de máxima producción de potencia eléctrica, el calcinador de lecho fluidizado
30 circulante alimentado con oxígeno (52) funciona como un combustor de lecho fluidizado alimentado con oxígeno recirculando los sólidos de CaO del calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) a través de una séptima tubería (32) para maximizar la producción de potencia eléctrica en un cuarto intercambiador de calor (64), mientras que permite fluir suficientes sólidos ricos en CaO de mayor temperatura del silo de mayor temperatura (58) a través del primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (61) para alimentar sólidos ricos en CaO de
35 menor temperatura al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) a través de la decimosexta tubería (26) y carbonatar parcialmente los sólidos en presencia del gas de escape que procede de la undécima tubería (13), y dirigiendo los sólidos que dejan el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) a través del segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (56) para enfriar y almacenar en el silo de menor temperatura (57).

40 En esta situación, el sistema de captura de CO_2 genera la potencia térmica de la alimentación de combustible a través de la primera tubería (18) del calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52), más la potencia térmica generada en la carbonatación de CaO que reacciona con CO_2 que entra en la undécima tubería (13), más la energía térmica extraída de los sólidos a alta temperatura que fluyen del silo de mayor temperatura (58) al silo de menor temperatura (57). Obviamente, este supuesto de máxima producción de potencia eléctrica adicional
45 y beneficioso es a costa de silos más grandes y calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) más grande que cuando se funciona con el dispositivo de la Figura 2. La máxima producción de potencia puede durar solo hasta que se agota el CaO a alta temperatura almacenado en el silo de mayor temperatura (58). Para cargar el silo de mayor temperatura (58) con sólidos calcinados a alta temperatura ricos en CaO , es necesario funcionar durante ciertos periodos de tiempo en condiciones tales que esté disponible un excedente de energía
50 térmica en el calcinador para calentar y calcinar un flujo adicional de sólidos respecto a los procedentes de la reacción con CO_2 en el carbonatador de lecho fluidizado circulante, y

b) por lo tanto, el segundo modo operativo de mínima producción de potencia eléctrica comprende adicionalmente un flujo reducido de gas de escape que entra en la undécima tubería (13) y una desviación del cuarto intercambiador
55 de calor (64) a través de la octava tubería (33) al calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52), que permite una producción de potencia térmica en exceso en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) que se usa para calentar y calcinar un flujo adicional de sólidos fríos y parcialmente carbonatados del silo de menor temperatura (57), regulado con el segundo dispositivo de control de sólidos (62), de modo que se almacena un flujo de sólidos calientes y ricos en CaO a través de la cuarta tubería (24) en el silo de

mayor temperatura (58).

Es una ventaja adicional de este procedimiento que, debido al mayor tamaño del calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno, puede minimizarse el periodo de tiempo requerido para funcionar al segundo modo operativo de mínima producción de potencia eléctrica.

El Ejemplo 3 ilustra otros beneficios técnicos de este procedimiento, relacionados con la mucho más alta flexibilidad en las producciones de potencia y la más amplia elección de modos operativos cuando el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) puede hacerse funcionar como central eléctrica independiente no ligada al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50), o incluso como central eléctrica independiente capaz de funcionar como se discute anteriormente para el dispositivo de la Figura 1. Esto hace referencia a un supuesto en que los sólidos del calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) se dirigen todos al segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (56) conectado con el silo de menor temperatura (57) mediante la novena tubería (34), y los sólidos que abandonan el primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (61) se dirigen al calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) en lugar de dirigirse al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) mediante un cuarto dispositivo (65) para dividir las corrientes de sólido.

Los procedimientos anteriores funcionan mejor con la máxima diferencia de temperatura entre el silo de mayor temperatura y el de menor temperatura, conduciendo a menores volúmenes de silos para la misma cantidad de energía almacenada. Las temperaturas cercanas a la temperatura en las cámaras de combustión, 850-950 °C, son adecuadas para el silo de mayor temperatura, preferiblemente aproximadamente 850 °C para los combustores alimentados con aire y 900 °C para los combustores alimentados con oxígeno. La temperatura de los sólidos fríos depende del número y eficacia de los intercambiadores de calor de lecho fluidizado dispuestos en serie, y estará típicamente entre 150-400 °C, preferiblemente alrededor de 200 °C.

Los procedimientos anteriores pueden reducir adicionalmente su segundo modo operativo de mínima producción de potencia eléctrica y/o el tiempo requerido para funcionar a este segundo modo operativo de mínima producción de potencia eléctrica transfiriendo adicionalmente calor a los sólidos procedentes del silo de menor temperatura, usando calor de las corrientes de gas de escape a alta temperatura que dejan los reactores de lecho fluidizado circulantes. Esto puede conseguirse con ciclones dispuestos en serie tales como los usados en precalcinadores comerciales de caliza en plantas de cemento.

Habrán otros modos de hacer funcionar los dispositivos de esta invención que resultarán obvios para el especialista en la materia a la vista de los dispositivos y procedimientos dados a conocer en esta invención. Por ejemplo, resultará evidente para un especialista en la materia conectar el dispositivo de la Figura 1 con los dispositivos de la Figura 2 o 3 haciendo que la corriente de gas de escape (12) sea la corriente de gas de escape (13) en la Figura 2 y 3. El sistema resultante abrirá un más amplio intervalo de modos operativos, que añadirían aún más flexibilidad a las centrales eléctricas con captura de CO₂ usando los dispositivos de esta invención. Pueden diseñarse dispositivos y principios similares siguiendo las enseñanzas de esta invención para sistemas de captura de CO₂ precombustión usando CaO como sorbente regenerable, sistemas en que el calor de calcinación procede de una reacción exotérmica que tiene lugar en paralelo a la reacción de calcinación, o sistemas en que el calor de calcinación procede de un portador térmico sólido o una pared metálica que conecta el calcinador con una cámara de combustión a alta temperatura o con otra fuente de calor a alta temperatura. También, siguiendo las enseñanzas de esta invención, es posible adaptar los dispositivos y procedimientos de esta invención a otros sistemas de bucle químico que usen reactores de lecho fluidizado circulante a altas temperaturas y reacciones de gas-sólido altamente exotérmicas como, por ejemplo, la oxidación de un metal con aire. Por lo tanto, la descripción y ejemplos proporcionados en esta invención son ilustrativos y de carácter no limitante.

EJEMPLOS

EJEMPLO 1. Ejemplo de diseño del dispositivo de la Figura 1

Se lleva a cabo a continuación un diseño conceptual del dispositivo de la Figura 1 para ilustrar su aplicación práctica y la flexibilidad de obtener una variedad de producciones de potencia. Se supone en primer lugar un aporte de potencia térmica máxima por combustión en la cámara de combustión de lecho fluidizado (40) de 100 MWt y una temperatura típica en la cámara de combustión de lecho fluidizado (40) de 850 °C cuando la combustión se lleva a cabo con aire (2) Se eligen también dimensiones típicas para una cámara de combustión de este orden de producción de potencia térmica en equipo comercial: una sección transversal de 20 m² y una altura de 40 m. Estas cámaras de combustión de lecho fluidizado tienen habitualmente intercambiadores de calor de agua en su interior,

pero es mejor adoptar para el dispositivo de esta invención un diseño adiabático, que es también parte del estado de la técnica. Para simplificar los balances de masa y calor en el ejemplo, se supone aquí que un 75 % del calor producido durante la combustión de combustible en la cámara de combustión de lecho fluidizado (40) se extrae del sistema en el primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42), y que un 25 % abandona el sistema como calor sensible en el gas de escape (12) que deja el primer ciclón (41). Si se supone una capacidad térmica media de los sólidos circulantes en el sistema de $1,3 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ y una velocidad de circulación de sólido típica de los sólidos a través de la cámara de combustión de $10 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$ (kilo por segundo y por metro cuadrado de área transversal de la cámara de combustión de lecho fluidizado (40)), la caída de temperatura de los sólidos en el primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42) requerida para cuadrar el balance de calor es de $288,5^\circ\text{C}$. Esto es concordante con el funcionamiento del estado de la técnica de centrales eléctricas de CLFC comerciales.

Se supone ahora un tamaño razonable para el silo de mayor temperatura (43) y el silo de menor temperatura (47) dispuestos como en la Figura 1. Se supone que tienen una altura de 20 m y una sección transversal de 40 m^2 , que es el doble de la sección transversal de la cámara de combustión de lecho fluidizado (40) y procura un volumen idéntico. Se supone también una temperatura de los sólidos de mayor temperatura en el silo de mayor temperatura (43) de 850°C y de 200°C de los sólidos fríos en el silo de menor temperatura (47), y una densidad aparente de los sólidos en los silos de 1500 kg/m^3 . Esto permite almacenar una cantidad máxima de sólidos de $1,2 \times 10^6 \text{ kg}$, con un almacenamiento térmico total equivalente a 282 MWt. En principio, esta cantidad de calor podría extraerse de estos sólidos a una velocidad muy alta en su paso del silo de mayor temperatura (43) al silo de menor temperatura (47), por ejemplo disponiendo un intercambiador de calor adicional (no mostrado en la Figura 1 por simplicidad) entre el silo de mayor temperatura (43) y el silo de menor temperatura (47). Esto podría procurar una producción de potencia térmica muy grande al reducir el tiempo de transferencia de sólido con un alto flujo de circulación entre los silos. Sin embargo, esto requeriría dispositivos de intercambio de calor y equipos de generación de potencia eléctrica asociados impracticablemente grandes funcionando durante solo periodos de tiempo muy cortos. Por lo tanto, es probable que sean metas del diseño producciones de potencia térmica más modestas y realistas. Estas metas podrían conseguirse permitiendo una circulación directa de sólidos del silo de mayor temperatura (43) al silo de menor temperatura (47). Pero esto seguiría requiriendo un intercambiador de calor adicional (no mostrado en la Figura 1) entre el silo de mayor temperatura (43) y el silo de menor temperatura (47) y requeriría también soluciones prácticas para disponer una circulación de sólidos de alta temperatura entre los dos silos. Esta solución podría terminar siendo también compleja y costosa. Sin embargo, el dispositivo de esta invención hace uso del combustor de lecho fluidizado circulante existente para facilitar la circulación de sólido entre el silo de mayor temperatura (43) y el silo de menor temperatura (47) en modos de máxima producción térmica con velocidades de circulación razonables establecidas entre el silo de mayor temperatura (43) y el silo de menor temperatura (47). Para ilustrar esto, se fija en este ejemplo la velocidad de circulación de sólido a través del combustor en $10 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, permitiendo que una cierta fracción de esta circulación de sólido proceda del flujo de sólidos establecido entre el silo de mayor temperatura (43) y el silo de menor temperatura (47). Por ejemplo, si el aporte de potencia de la combustión de combustible permanece a 100 MWt en la cámara de combustión de lecho fluidizado (40), y todas las temperaturas van a permanecer también constantes, la extracción de calor total en el primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42) debe ser también constante. En estas condiciones, el modo de máxima producción de potencia eléctrica corresponde a un flujo de sólidos del silo de mayor temperatura (43) a la cámara de combustión de lecho fluidizado (40) y al silo de menor temperatura (47) de $2,8 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ($55,6 \text{ kg/s}$ en el ejemplo), y se logra una producción de potencia eléctrica adicional de 47 MWt en el segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (45) enfriando la corriente de sólido de 850 a 200°C . Según el tamaño de los silos elegidos para este ejemplo, puede mantenerse este modo de máxima producción de potencia eléctrica durante 6 horas hasta que todos los sólidos calientes almacenados en el silo de mayor temperatura (43) se transfieren al silo de menor temperatura (47). Pueden conseguirse obviamente periodos más largos para este máximo con silos mayores o diferencias mayores en las temperaturas de sólido entre el silo de mayor temperatura (43) y el silo de menor temperatura (47). Resulta también evidente que pueden conseguirse periodos más largos de funcionamiento a valores más modestos de máxima producción de potencia eléctrica, permitiendo mayores cambios en las velocidades de circulación de sólido (que pueden cambiar típicamente entre 1 y $20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ en CLFC comerciales sin cambios de diseño relevantes en el sistema de circulación de sólido). Un cambio en la velocidad de circulación de sólido de los sólidos a través de la cámara de combustión de lecho fluidizado (40) puede requerir también un cambio de la producción térmica en el primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42), y esto puede hacerse usando un equipo intercambiador de calor comercial disponible para funcionar con cargas térmicas favorables, o usando la división de sólidos que sorte el primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42) disponiendo una cierta recirculación directa de sólidos del primer ciclón (41) a la cámara de combustión de lecho fluidizado (40). Por ejemplo, con la misma circulación de sólido total en el cámara de combustión de lecho fluidizado (40) que anteriormente ($10 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ o 200 kg/s), una división en el primer dispositivo (44) para dividir las corrientes de sólido de los sólidos que caen por gravedad del primer ciclón (41) de 144 kg/s hacia la tercera tubería (3) y el primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42)

permite que el sólido requerido circule del silo de mayor temperatura (43) al silo de menor temperatura (47), mientras que se mantienen las velocidades de circulación de sólido y las condiciones de combustión idénticas con y sin almacenamiento de energía. Por lo tanto, diseñar el sistema anterior para suministrar su máxima producción de potencia eléctrica durante 6 horas continuas da como resultado una producción de potencia eléctrica máxima de 147 MWt (100 MWt de la combustión y 47 MWt del segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (45) en el sistema de almacenamiento de energía novedoso).

El tiempo a máxima potencia eléctrica debe equilibrarse con un cierto tiempo a mínima producción de potencia eléctrica, en que la meta es rellenar el silo de sólidos a alta temperatura. Además, las condiciones de mínima producción de potencia eléctrica es probable que estén asociadas a situaciones en que la cámara de combustión funciona a carga mínima (por ejemplo, por la noche). Para combustores de lecho fluidizado circulante, esto puede ser del orden del 50 %. Por lo tanto, durante el periodo de mínima producción de potencia eléctrica de este ejemplo particular, se suponen 50 MWt como aporte de energía de la combustión en la cámara de combustión de lecho fluidizado (40). Por simplicidad, se supone de nuevo que un 25 % de esta energía abandona el combustor en el gas de escape que deja el primer ciclón (41). Esto deja 37,5 MWt disponibles para calentar a 850 °C los sólidos que circulan del silo de menor temperatura (47) (a 200 °C) a la cámara de combustión de lecho fluidizado (40). Esto requiere un control con el segundo dispositivo de control (49) de un flujo de sólido de 44,4 kg/s que pasa por la sexta tubería (6) (o 2,2 kg/m²·s en la cámara de combustión de lecho fluidizado (40)) y una división del mismo flujo sólido de sólidos del primer ciclón (41) al silo de mayor temperatura (43) a través de la cuarta tubería (4). Si se requiriera una velocidad de circulación de sólido mayor para mantener las condiciones de fluidización y la transferencia de calor en la cámara de combustión de lecho fluidizado (40), este flujo de circulación adicional podría obtenerse permitiendo una división de sólidos en el primer dispositivo (44) para dividir las corrientes de sólido que caen por gravedad del primer ciclón (41) y recircular sólidos del primer ciclón (41) a la cámara de combustión de lecho fluidizado (40) a través de la tercera tubería (3), sin pasar a través del primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42). Por el tamaño de los silos elegido para este ejemplo, el modo operativo mínimo tiene que mantenerse durante 7,5 horas, hasta que todos los sólidos de menor temperatura almacenados en el silo de menor temperatura (47) se transfieran al silo de mayor temperatura (43). Este tiempo podría acortarse disponiendo un procedimiento adicional para precalentar con el gas de escape (12) que deja el primer ciclón (41) los sólidos que proceden del silo de menor temperatura (47) antes de que entren en la cámara de combustión de lecho fluidizado (40). Esto podría llevarse a cabo con un equipo comercial para elevar los sólidos de menor temperatura almacenados en el silo de menor temperatura (47) y ponerlos en contacto con el gas de escape caliente (12) que deja el primer ciclón (41) en ciclones adicionales en serie (no mostrados en la Figura por simplicidad), como es práctica común en precalcinadores y precalentadores de sólidos que se alimentan a plantas de producción de cemento.

El tiempo máximo (6,0 h) a la máxima producción de potencia eléctrica en este ejemplo particular y el tiempo mínimo a la mínima producción de potencia eléctrica (7,5 h) son valores elegidos para este ejemplo particular. Son posibles muchos valores intermedios y resultarán evidentes para los especialistas en la materia. Las horas restantes (10,5 h) para completar un tiempo de funcionamiento de un día entero podrían usarse en este ejemplo particular a las condiciones de referencia de 100 MWt. Esto procuraría un factor de capacidad de la central de 0,57. Este factor de capacidad podría reducirse adicionalmente funcionando mucho más tiempo a una baja producción de potencia eléctrica. Por ejemplo, funcionando 6 h a la máxima producción de potencia eléctrica de 147 MWt y las 18 h restantes a una producción de potencia eléctrica de 34 MWt, el factor de capacidad sería de 0,43. Es posible un factor de capacidad aún menor haciendo funcionar la cámara de combustión de lecho fluidizado (40) con un aporte de potencia mínimo (50 MWt) en ambos periodos de potencia máxima y mínima. Esto podría conseguirse reduciendo el flujo de circulación del silo de menor temperatura (47) al silo de mayor temperatura (43) y aumentando por consiguiente (si es necesario) el reciclaje de sólidos del primer ciclón (41) a la cámara de combustión de lecho fluidizado (40) mediante el gas de escape y el primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42). Puede estimarse con sencillos balances de masa y calor que, para este ejemplo particular, se permite cualquier valor del factor de capacidad entre 0,34 y 0,68 sin cambiar las dimensiones y condiciones operativas elegidas para el ejemplo. Además, resultará evidente para el especialista en la materia definir otros volúmenes de los silos de almacenamiento, densidades de sólido de los sólidos circulantes, temperaturas operativas o velocidades de circulación de sólidos, conduciendo a diferentes intervalos de factor de capacidad.

En este punto, es ilustrativo en este ejemplo particular de realización de la invención comparar el dispositivo y procedimientos de la invención frente a una central eléctrica estándar que da la misma máxima producción de potencia eléctrica y con un factor de capacidad idéntico (medido aquí diariamente por simplicidad). Dicha central eléctrica tendría una potencia térmica del carbón de 147 MWt, y es por lo tanto un 47 % mayor en cada elemento del equipo relacionado con la cámara de combustión. Se supone que se requiere también a esta central suministrar

- durante 6 horas una máxima producción de potencia eléctrica de 147 MWt, que se permite bajar también un 50 % en su producción térmica y que se requiere por el mercado funcionar con un factor de capacidad particular de 0,43 como en los párrafos anteriores. En estas condiciones, resultará evidente para un especialista en la materia que esta central eléctrica se verá forzada a apagarse (producción de potencia eléctrica igual a cero) durante al menos 9,6 horas al día para satisfacer los requisitos de potencia máxima durante un cierto tiempo y la baja demanda de potencia durante otros periodos de tiempo. La necesidad de encender y apagar el gran equipo de combustión de la cámara de combustión de lecho fluidizado (40), junto con todos los sistemas auxiliares asociados (los sistemas de alimentación de carbón y sorbente, equipo de purificación del gas de escape, etc. se apagan también) es una clara desventaja de los sistemas del estado de la técnica respecto al dispositivo y procedimientos de esta invención.
- 10 Como se ilustra en este ejemplo, el dispositivo de esta invención suministra la misma potencia máxima y tiene el mismo factor de capacidad que la central eléctrica estándar, pero tiene una cámara de combustión y sistemas auxiliares asociados a la cámara de combustión que son aproximadamente un 50 % menores que en la central estándar. Además, el dispositivo de esta invención hace funcionar la cámara de combustión (40) con flujos continuos de carbón y aire (los mismos a carga total o a cargas intermedias), ya que no requiere cambios en dicha cámara de combustión (40) para adaptarse a bajos factores de capacidad medios. Estas son ambas grandes ventajas que lo más probablemente compensen el coste de capital adicional asociado a los silos (43) y (47) y el segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (45), que son los componentes novedosos más costosos en el dispositivo de esta invención cuando se compara con la central eléctrica estándar.
- 20 Un especialista en la materia se dará cuenta inmediatamente de que el ejemplo anterior es también ilustrativo, con pequeñas modificaciones en las suposiciones, de una central eléctrica cero emisiones de referencia basada en la combustión de combustible con oxígeno en un lecho fluidizado circulante. Sin embargo, los beneficios del dispositivo de esta invención se potenciarán debido a que la central de referencia contiene en este caso componentes más complejos y costosos (unidad de separación de aire, purificación de CO₂, reciclaje y compresión de CO₂ etc.) que tienen dimensiones proporcionales a la potencia de combustión térmica liberada en (40). También, estos componentes complejos e integrados hacen más difíciles y caras las operaciones de encendido y apagado de la central eléctrica.

EJEMPLO 2. Ejemplo de diseño del dispositivo de la Figura 2

- 30 Se lleva a cabo a continuación un diseño conceptual del dispositivo de la Figura 2 para ilustrar su aplicación práctica y la flexibilidad de obtener una variedad de producciones de potencia con el sistema de ciclo de carbonatación-calcinación representado en la figura. Se supone en primer lugar un aporte máximo de potencia térmica por combustión en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) de 100 MWt y una temperatura de 900 °C cuando la combustión se lleva a cabo con una cierta mezcla de O₂ y CO₂. Esta temperatura debería ser suficiente para la calcinación de CaCO₃, ya que se supone que el reactor funciona a presión atmosférica y con un cierto contenido de vapor. Se supone también una velocidad de circulación de sólido total de los sólidos que entran en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) de 200 kg/s como en la cámara de combustión (40) del Ejemplo 1. Es importante que este calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) se diseñe adiabáticamente para maximizar el uso para calcinación del aporte térmico asociado a la combustión de combustible (y minimizar los requisitos de O₂ y sus penalizaciones energética y económica asociadas). Para simplificar los balances de masa y calor en este ejemplo, se supone aquí que se usa un 80 % del calor producido durante la combustión de combustible introducido en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) mediante la primera tubería (18) para calcinación y para calentar a la temperatura de calcinación el sólido que entra en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52).

- Se supone ahora un volumen idéntico del silo de menor temperatura (57) y del silo de mayor temperatura (58) como en el Ejemplo 1 dispuestos como en la Figura 2, idénticas densidades aparentes de los sólidos (1500 kg/m³) y temperaturas de los sólidos calientes en el silo de mayor temperatura (58) de 900 °C y 200 °C de los sólidos fríos en el silo de menor temperatura (57). Se supone también una capacidad térmica de los sólidos de 1 kJ/kg, ya que están compuestos principalmente de CaO. Esto permite un almacenamiento de energía térmica equivalente a 233,3 MWt en el silo de mayor temperatura (58). Los sólidos almacenados en el silo de mayor temperatura (58) se supone que son un 90 % CaO en este ejemplo particular. Este contenido de CaO libre y su actividad máxima asociada o capacidad portadora de CO₂ dependerán de muchos factores que son bien conocidos en el estado de la técnica de los sistemas de ciclo de carbonatación-calcinación. En el silo de menor temperatura (57), se carbonatan los sólidos a un cierto nivel de conversión X, que se define como la conversión de carbonato o fracción molar de CaO convertido en CaCO₃. La entalpía de la reacción de carbonatación es de -168 kJ/mol. En el proceso para rellenar el silo de menor temperatura (57) con sólidos carbonatados originalmente en el silo de mayor temperatura (58), ha habido un

proceso de carbonatación en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) que libera 900X MWt. Con fines de balance de masa y calor en este ejemplo, esta puede considerarse una energía adicional almacenada en el silo de mayor temperatura (58). El valor de X se asigna por un balance de masas en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50). Se supone aquí una velocidad máxima del gas de escape que contiene 0,40 kmol/s de CO₂, que es equivalente al gas de escape emitido por una central eléctrica de 180 MWt. Si se supone una meta de 90 % de eficacia de captura de CO₂, el flujo máximo de CaCO₃ que deja el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) se establece en 0,36 kmol/s.

Como se discute en el Ejemplo 1, podría conseguirse una producción de potencia térmica muy alta en este sistema reduciendo el tiempo de transferencia de sólido (con un alto flujo de circulación de sólidos entre silos) entre el silo de mayor temperatura (58) al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) y a través del ciclón (51) y a través del segundo intercambiador de lecho fluidizado (56) y a través del silo de menor temperatura (57). Esta alta circulación de sólido podría establecerse simultáneamente a la captura del 90 % del CO₂ en el gas de escape en la undécima tubería (13) asignada como meta, ya que la velocidad de circulación de sólido típica asignada en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) y el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) es suficiente para capturar todo el CO₂ necesario en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) con valores de conversión de carbonato X modestos. Sin embargo, esto requeriría intercambiadores de calor (56, 61) y equipos de generación de potencia eléctrica asociados a estos dispositivos de intercambio de calor impracticablemente grandes que funcionarían solo durante muy cortos periodos de tiempo. Por lo tanto, es probable que sean la meta del diseño económico producciones de energía térmica más modestas y realistas. El dispositivo de esta invención hace uso del calcinador de lecho fluidizado circulante (52) y del carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) existentes para facilitar la circulación de sólido entre el silo de mayor temperatura (58) y el silo de menor temperatura (57) en modos de máxima producción térmica con velocidades de circulación razonables establecidas entre el silo de mayor temperatura (58) y el silo de menor temperatura (57) a través del carbonatador de lecho fluidizado circulante (50). Para ilustrar esto, se calcula a partir de los balances de masa y calor, para las condiciones particulares elegidas para este ejemplo, y buscando un periodo de 6 horas a máxima producción de potencia eléctrica, un flujo sólido total que entra en el carbonatador de 192,3 kg/s, procediendo 136,7 kg/s del calcinador (52) y 55,6 kg/s del silo de mayor temperatura (58). En estas condiciones, la máxima producción de potencia eléctrica es de 155,5 MWt y el valor de X es de 0,117 para una eficacia de captura de CO₂ del 90 %. Como se observa anteriormente, para el tamaño de los silos elegidos para este ejemplo, este modo de máxima producción de potencia eléctrica puede mantenerse durante 6,0 horas hasta que se transfieren todos los sólidos ricos en CaO calientes en el silo de mayor temperatura (58) al silo de menor temperatura (57) después de carbonatación con una conversión X. Pueden conseguirse obviamente periodos más largos para este máximo con silos mayores o mayores diferencias en las temperaturas de sólido entre el silo de mayor temperatura (58) y el silo de menor temperatura (57). Resulta también evidente que pueden conseguirse periodos más largos de funcionamiento a valores más modestos de máxima producción de potencia eléctrica permitiendo menores velocidades de circulación de sólido. Sin embargo, la reducción de esta velocidad de circulación de sólido está limitada por la capacidad portadora de CO₂ de los sólidos de CaO en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50). No parece razonable a partir del estado de la técnica de ciclo de carbonatación-calcinación esperar conversiones de carbonatación superiores a X= 0,20. Por lo tanto, se requiere un flujo mínimo de sólidos ricos en CaO de 112 kg/s para entrar en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) en este ejemplo particular. Cuando se funciona a esta velocidad de circulación de sólido y actividad de los sólidos mínimas, la producción de potencia eléctrica es de 118,3 MWt.

El tiempo de 6 horas asignado a la máxima potencia en el párrafo anterior debe equilibrarse con un cierto tiempo a menor producción de potencia eléctrica, en que la meta es rellenar el silo de mayor temperatura (58) de sólidos a alta temperatura, manteniendo la eficacia de captura de CO₂ al 90 % en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50). Se requiere un excedente de potencia térmica en el calcinador (52) con este fin. Cuanto mayor sea el excedente de potencia térmica, menos tiempo se requerirá funcionar a una mínima producción térmica en el sistema de ciclo de carbonatación-calcinación. Estas condiciones de mínima producción de potencia eléctrica es probable que estén asociadas a situaciones en que la cámara de combustión que suministra el gas de escape al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) funciona a carga mínima (por ejemplo, por la noche). Suponiendo de nuevo que esta corriente de gas de escape puede bajar hasta un 50 % en periodos de baja producción de potencia eléctrica, la captura del 90 % de los 0,20 kmol/s de CO₂ que entran en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) requiere una circulación mínima de 96,1 kg/s para una conversión de carbonatación de 0,117. Esto permite un excedente de energía en el calcinador de 43,7 MWt que puede usarse para calentar y calcar un flujo de sólido de 48,8 kg/s del silo de menor temperatura (57). En estas condiciones, es necesario un tiempo de funcionamiento de 7,2 h para rellenar el silo de mayor temperatura (58) con sólidos calcinados calientes. Cuando se funciona en estas condiciones, la producción de potencia eléctrica del dispositivo es de 53,8 MWt. El tiempo máximo (6,0 h) a la máxima producción de potencia eléctrica definido en este ejemplo particular y el tiempo mínimo a la mínima

producción de potencia eléctrica (7,2 g) son valores elegidos para este ejemplo particular. Son posibles muchos valores intermedios y resultarán evidentes para el especialista en la materia. Las horas restantes (10,8) para completar un tiempo de funcionamiento de un día completo podrían usarse en este ejemplo particular en las condiciones de referencia de 100 MWt. Esto procuraría un factor de capacidad de la central de 0,64. Pueden 5 calcularse diferentes factores de capacidad medios para este sistema siguiendo una metodología similar a la explicada en el Ejemplo 1.

En este punto, es ilustrativo en este ejemplo particular de realización de la invención comparar el dispositivo y procedimientos de la invención con un sistema de ciclo de carbonatación-calcinación estándar que da la misma 10 máxima potencia y con un factor de capacidad idéntico de 0,64. Dicho sistema de ciclo de carbonatación-calcinación tendría un calcinador con una potencia térmica del carbón de 155,5 MWt, que es más de un 55 % mayor que en el dispositivo de esta invención. Todo el equipo asociado al calcinador (en particular, la compleja y costosa unidad de separación de aire para suministrar O₂) sería también un 55 % mayor. Además, si se requiriera que esta central funcionara con un factor de capacidad similar de 0,64, por ejemplo suministrando durante al menos 6 horas una 15 máxima producción de potencia eléctrica de 155,5 MWt, esto podría ser posible solo bajando un 50 % su producción térmica durante al menos 15,4 horas. Claramente, el dispositivo de esta invención no requiere cambios en las condiciones de combustión en el calcinador de lecho fluidizado alimentado con oxígeno, incluso cuando el flujo de gas de escape que entra en el carbonatador cambia dentro de ciertos límites. En contraposición, la configuración de ciclo de carbonatación-calcinación estándar requiere complejos cambios de carga en el calcinador alimentado con 20 oxígeno para seguir los cambios globales requeridos en la producción de potencia eléctrica.

Por simplicidad en la descripción de este ejemplo particular, no se han discutido las oportunidades que proporciona el dispositivo de la Figura 2 para establecer reciclajes sólidos internos en ambos reactores y las situaciones intermedias que pueden conseguirse modulando la división de sólidos en el tercer (54) y primer (55) dispositivos 25 para dividir las corrientes de sólido que caen por gravedad del primer o segundo ciclones (53, 51) hacia un silo de menor y mayor temperatura (57, 58) respectivamente. Debería ser obvio para un especialista en la materia, y a partir de la discusión en el Ejemplo 1, cómo beneficiarse de esta posibilidad de dividir los flujos de sólido entre reactores y silos para ganar más flexibilidad en el funcionamiento del sistema sin alterar las condiciones en el calcinador (52) y equipo de generación de O₂ asociado.

30

EJEMPLO 3. Ejemplo de diseño del dispositivo de la Figura 3

Se lleva a cabo a continuación un diseño conceptual del dispositivo de la Figura 3 para ilustrar su aplicación práctica y la flexibilidad de obtener una variedad de producciones de potencia eléctrica por el sistema de ciclo de 35 carbonatación-calcinación representado en la figura. Puesto que hay una clara similitud de este dispositivo respecto al descrito en el ejemplo 2, este ejemplo se centra solo en la diferencia clave entre dispositivos, asociadas a la posibilidad de hacer funcionar el dispositivo de la Figura 3 en un modo de máxima producción de potencia eléctrica cuando se hace funcionar el calcinador alimentado con oxígeno como una central eléctrica de CFLC alimentada con oxígeno independientemente del carbonatador de lecho fluidizado circulante (50), se extrae el calor de combustión 40 del cuarto intercambiador de calor (64) usando el segundo dispositivo (63) para dividir los sólidos recirculados del calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52), mientras se alimenta el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) con CaO almacenado en el silo de mayor temperatura (58). Se supone un aporte máximo de potencia térmica por combustión en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) de 100 MWt y una producción de potencia eléctrica idéntica que es la suma de la potencia de calor sensible en el gas 45 rico en CO₂ (22) que deja el primer ciclón (53) y la potencia térmica extraída en el cuarto intercambiador de calor (64) desviando todos los sólidos circulantes que dejan el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno. Se suponen ahora flujos de sólido y gas de escape a través del carbonatador de lecho fluidizado circulante (50), una conversión X de CaO en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) y eficacias de captura de CO₂ idénticos a los del Ejemplo 2. Sin embargo, en este caso, todos los sólidos que llegan al carbonatador proceden del 50 silo de mayor temperatura (58) y se almacenan en el silo de menor temperatura (57) a idénticas temperatura y conversión de carbonato que en el Ejemplo 2. En estas condiciones, se obtiene una producción de potencia eléctrica total de 292 MWt, que es la suma de la potencia térmica obtenida de la combustión del carbón (100 MWt) en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52), y los 192 MWt restantes son la producción de potencia térmica del primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (61), del segundo intercambiador de calor de 55 lecho fluidizado (56) y del gas de escape que deja el carbonatador de lecho fluidizado circulante (16). Este alto nivel de producción de potencia eléctrica podría mantenerse solo durante 1,7 horas para la dimensión y propiedades de sólido dadas en el Ejemplo 2. Pueden elegirse tiempos más largos a una menor máxima producción de potencia eléctrica para el diseño siguiendo la metodología del Ejemplo 1. Claramente, un especialista en la materia se dará cuenta al realizar estos diseños preliminares que el dispositivo de la Figura 3 ofrece más flexibilidad y variaciones de

funcionamiento y producción de potencia eléctrica gracias al cuarto intercambiador de calor (64), que conecta el primer ciclón (53) con el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52), y la posibilidad de hacer funcionar el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) en modo de calcinación con oxígeno o en modo de combustión con oxígeno. Sin embargo, estos modos operativos favorables requieren un

5 calcinador (52) mayor para tratar la misma cantidad de gas de escape en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) durante periodos de máxima producción de potencia eléctrica. El dispositivo de la Figura 3 ofrece también una mayor flexibilidad cuando se requiere suministrar una mínima producción de potencia eléctrica. Por ejemplo, en un supuesto extremo pero realista, podrían apagarse el reactor carbonatador y la central eléctrica asociada que alimenta el gas de escape al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50), mientras que el

10 calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) podría seguir funcionando en modo de combustión con oxígeno mínima y sorteando el y alimentando sólidos del silo de menor temperatura (57) al calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52), y almacenando la corriente de sólido de mayor temperatura calcinado resultante en el silo de mayor temperatura (58). La metodología del diseño descrito en los ejemplos anteriores podría usarse para estimar estos modos de mínima producción de potencia que aumentan en

15 gran medida la flexibilidad del sistema de captura de CO₂ de la Figura 3 en términos de producción de potencia eléctrica, mientras que permiten condiciones de combustión estables en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52).

REIVINDICACIONES

1. Sistema para el almacenamiento de energía a gran escala en un sistema de generación de potencia eléctrica que comprende:
- 5 i) un combustor de lecho fluidizado circulante (40, 52) con una primera tubería (1,18) para suministrar un combustible y una segunda tubería (2, 19) para suministrar un comburente a través de un distribuidor de gas, estando conectado el combustor de lecho fluidizado circulante (40, 52) a
- 10 ii) un primer ciclón (41, 53) para separar el gas de escape caliente (12, 22) resultante y la corriente de sólidos caliente circulante (11, 23) al combustor de lecho fluidizado circulante (40, 52),
- 15 iii) un primer dispositivo (44, 55) para dividir las corrientes de sólido descendentes por gravedad del primer ciclón (41, 53), dirigiendo los sólidos desde el primer ciclón (41, 53)
- 20 a) hacia el combustor de lecho fluidizado circulante (40, 52) a través de una tercera tubería (3, 21),
- b) hacia un silo de mayor temperatura (43, 58) que recibe los sólidos de mayor temperatura a través de una cuarta tubería (4,24), dirigiendo los sólidos del silo de mayor temperatura (43, 58) a un primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42, 61), y
- 25 c) hacia un silo de menor temperatura (47, 57) para almacenar los sólidos de menor temperatura de un segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (45, 56), estando conectado el silo de menor temperatura (47, 57) con el segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (45, 56) mediante una quinta tubería (5, 30) y estando conectado con el combustor de lecho fluidizado circulante (40, 52) mediante una sexta tubería (6, 31), y
- 30 iv) un primer dispositivo de control de sólido (48, 60) para controlar la alimentación de los sólidos de mayor temperatura desde el silo de mayor temperatura (43, 58), y
- v) un segundo dispositivo de control (49, 62) para controlar la alimentación de los sólidos de menor temperatura desde el silo de menor temperatura (47, 57) al combustor de lecho fluidizado circulante (40, 52).
- 35 2. Sistema para el almacenamiento de energía a gran escala en un sistema de generación de potencia eléctrica según la reivindicación 1, que comprende adicionalmente un segundo dispositivo (46) para dividir la corriente de sólidos calientes del primer ciclón (41) al primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42) a través de una séptima tubería (7) o por una desviación u octava tubería (8) a la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40) durante periodos de baja carga térmica en la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40).
- 40 3. Sistema para el almacenamiento de energía a gran escala en un sistema de generación de potencia eléctrica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el primer dispositivo (44) para dividir las corrientes de sólido que caen por gravedad del primer ciclón (41) dirige los sólidos hacia el segundo intercambiador de lecho fluidizado (45) a través de una novena tubería (9).
- 45 4. Sistema para el almacenamiento de energía a gran escala en un sistema de generación de potencia eléctrica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el primer dispositivo de control de sólido (48) controla la alimentación de sólidos calientes del silo de mayor temperatura (43) a la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40) a través del primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42) mediante una décima tubería (10) que conecta el primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42) con la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40).
- 50 5. Sistema para el almacenamiento de energía a gran escala en un sistema de generación de potencia eléctrica según la reivindicación 1, en el que el sistema es un sistema para la captura de CO₂ de un gas de escape por ciclo de carbonatación-calcinación, en el que el sistema para el almacenamiento de energía a gran escala comprende adicionalmente
- i) un carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) con una undécima tubería (13) que suministra un gas de escape que contiene CO₂ diluido y una duodécima tubería (14) que suministra sólidos ricos en CaO del combustor

de lecho fluidizado circulante (52), que es un combustor de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno que funciona como calcinador, que está conectado con

ii) un segundo ciclón (51) para separar el gas de escape con CO_2 reducido (16) y la corriente de sólidos parcialmente carbonatados que contienen CaCO_3 (17), en el que parte de la corriente de sólidos parcialmente carbonatados que contienen CaCO_3 (17) se recircula al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) a través de una decimotercera tubería (15), y la corriente restante de sólidos a alta temperatura que contienen CaCO_3 se envía al calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52).

6. Sistema para el almacenamiento de energía a gran escala en un sistema de generación de potencia eléctrica según la reivindicación 5, en el que la primera tubería (18) del calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) suministra combustible, la segunda tubería (19) suministra una mezcla de comburentes O_2 y CO_2 a través del distribuidor de gas y una decimocuarta tubería (20) suministra la corriente de sólido parcialmente carbonatada que contiene CaCO_3 (17) procedente del segundo ciclón (51).

7. Sistema para el almacenamiento de energía a gran escala en un sistema de generación de potencia eléctrica según la reivindicación 6, en el que comprende adicionalmente un tercer dispositivo (54) para dividir la corriente de sólidos parcialmente carbonatados que contienen CaCO_3 (17) que cae por gravedad del segundo ciclón (51), dirigiendo los sólidos del segundo ciclón (51)

a) hacia el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) a través de la decimotercera tubería (15),

b) hacia el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) a través de la decimocuarta tubería (20), y

c) hacia el silo de menor temperatura (57) para almacenar sólidos de menor temperatura a través de la quinta tubería (30), que conecta el segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (56) con el silo de menor temperatura (57).

8. Sistema para el almacenamiento de energía a gran escala en un sistema de generación de potencia eléctrica según cualquiera de las reivindicaciones 5-7, en el que el primer dispositivo (55) para dividir la corriente de sólidos calientes (23), que se calcina y contiene CaO , hacia el silo de menor temperatura (57), lo hace a través del carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) mediante una decimoquinta tubería (25).

9. Sistema para el almacenamiento de energía a gran escala en un sistema de generación de potencia eléctrica según la reivindicación 8, que comprende adicionalmente al menos un tercer intercambiador de calor de lecho fluidizado (59) para extraer el calor de la corriente de sólidos calcinados que contienen CaO de la decimoquinta tubería (25) antes de alimentarlos al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) a través de la duodécima tubería (14).

10. Sistema para el almacenamiento de energía a gran escala en un sistema de generación de potencia eléctrica según cualquiera de las reivindicaciones 5-9, que comprende adicionalmente una decimosexta tubería (26) en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) o en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) para suministrar un flujo constituyente de CaCO_3 de caliza fresca.

11. Sistema para el almacenamiento de energía a gran escala en un sistema de generación de potencia eléctrica según cualquiera de las reivindicaciones 5-10, que comprende adicionalmente una decimoséptima tubería (27) colocada en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) o en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) para purgar un flujo equivalente de sólidos y evitar la acumulación de cenizas y sólidos derivados del calcio.

12. Sistema para el almacenamiento de energía a gran escala en un sistema de generación de potencia eléctrica según cualquiera de las reivindicaciones 5-11, en el que el primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (61) descarga sólidos de menor temperatura ricos en CaO en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) a través de una decimoctava tubería (28).

13. Sistema para el almacenamiento de energía a gran escala en un sistema de generación de potencia eléctrica según cualquiera de las reivindicaciones 5-12, que comprende adicionalmente un segundo dispositivo (63) para dividir los sólidos recirculados del calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) a través

de la tercera tubería (21), que conecta el primer ciclón (53) con el cuarto intercambiador de calor (64) a través de una séptima tubería (32), estando el cuarto intercambiador de calor (64) conectado adicionalmente con el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52).

- 5 **14.** Sistema para el almacenamiento de energía a gran escala en un sistema de generación de potencia eléctrica según cualquiera de las reivindicaciones 5-13, que comprende adicionalmente un cuarto dispositivo (65) para dividir corriente solidas que dirige los sólidos que abandonan el primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (61) al combustor de lecho fluidizado circulante (52) o al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50).
- 10 **15.** Sistema para el almacenamiento de energía a gran escala en un sistema de generación de potencia eléctrica según cualquier de las reivindicaciones 5-14, en el que el comburente (19) es una mezcla de O_2 y CO_2 reciclado.
- 16.** Procedimiento de almacenamiento de energía que usa combustores de lecho fluidizado circulante que
15 comprende las siguientes etapas:
 - i) alimentar un flujo de combustible y comburente a una cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40, 52), separando el gas de escape caliente (12, 22) resultante y las corrientes de sólidos (11, 23) de la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40, 52), en el que los aportes de combustible, comburente y circulación de
20 sólido a través de la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40, 52) permiten una producción de potencia térmica variable al trabajar entre dos modos operativos:
 - a) un primer modo operativo de máxima producción de potencia eléctrica con máximo flujo de combustible y comburente a la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40, 52), en que se obtiene una potencia
25 térmica adicional del ciclo de vapor extrayendo calor de la corriente de sólidos calientes en un segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (45, 56) que dirige la corriente de sólidos a un silo de menor temperatura (47, 57), donde se almacenan los sólidos de menor temperatura, disponiendo que los sólidos de mayor temperatura fluyan de un silo de mayor temperatura (43, 58) a través del primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42, 61) enfriando los sólidos de mayor temperatura de modo controlado mediante un primer dispositivo de control de
30 sólido (48, 60) colocado entre el silo de mayor temperatura (43, 58) y el primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (42, 61), y
 - b) un segundo modo operativo de mínima producción de potencia eléctrica con mínimo flujo de combustible y comburente a la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40, 52), en que la producción térmica del
35 primer intercambiador de lecho fluidizado (42, 61) es cero y los sólidos de menor temperatura fluyen del silo de menor temperatura (47, 57) hacia la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40, 52) de modo controlado mediante un segundo dispositivo de control de sólido (49, 62) colocado entre el silo de menor temperatura (47, 57) y la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40, 52), de modo que la potencia térmica en exceso liberada en la cámara de combustión de lecho fluidizado circulante (40, 52) se transfiera a los
40 sólidos de menor temperatura, de modo que los sólidos de mayor temperatura fluyan al silo de mayor temperatura (43, 58), donde se almacenan los sólidos de mayor temperatura.
 - 17.** Procedimiento de almacenamiento de energía usando combustores de lecho fluidizado circulante según la reivindicación 16, en el que el procedimiento es un procedimiento para la captura de CO_2 de un gas de
45 escape por ciclo de carbonatación-calcinación, que comprende adicionalmente las siguientes etapas:
 - i) alimentar un flujo de gas de escape que contiene CO_2 y un flujo de sólidos que contienen CaO a un carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) en condiciones que permitan una captura eficaz de CO_2 por CaO, formando una corriente de sólido parcialmente carbonatado que contiene $CaCO_3$ (17) y un gas de escape con baja concentración
50 de CO_2 (16),
 - ii) reciclar los sólidos recirculados del carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) a través de la decimotercera tubería (15), suministrando una parte de la corriente de sólido parcialmente carbonatado que contiene $CaCO_3$ (17) del carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) para aumentar el tiempo de residencia de los sólidos en el
55 carbonatador de lecho fluidizado circulante (50), y enviando la corriente de sólido restante al calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) para descomponer el $CaCO_3$ en una corriente rica en CO_2 (22) y una corriente de sólido calcinado que contiene CaO (23),
 - iii) reciclar los sólidos recirculados del calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) a través

de una tercera tubería (21), suministrando parte de la corriente de sólido calcinado que contiene CaO (23) para aumentar el tiempo de residencia de los sólidos en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52), y enviando la corriente restante de sólidos de alta temperatura que contienen CaO mediante una decimoquinta tubería (25) a un tercer intercambiador de calor de lecho fluidizado (59) para enfriar los sólidos
 5 calcinados de alta temperatura que contienen CaO y alimentar estos sólidos al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50), iniciando así de nuevo el ciclo de carbonatación-calcinación de captura de CO₂;

en el que el combustor fluidizado circulante (52) es un calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno y en el que

10

a) el primer modo operativo de máxima producción de potencia eléctrica comprende adicionalmente el máximo flujo de gas de escape al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50), en que se obtiene una potencia térmica adicional del segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (56) debido a que el segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (56) recibe una corriente de sólidos de mayor temperatura de un tercer dispositivo (54) para
 15 dividir la corriente de sólidos parcialmente carbonatados que contiene CaCO₃ (17), y suministra una corriente de sólido de menor temperatura de sólidos carbonatados a través de una quinta tubería (30) al silo de menor temperatura (57), y se obtiene una potencia térmica adicional a partir del primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (61) que descarga los sólidos de menor temperatura ricos en CaO en el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) a través de una decimoctava tubería (28) y

20

b) el segundo modo operativo de mínima producción de potencia eléctrica comprende adicionalmente el mínimo flujo de gas de escape al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50), en que se usa el exceso de producción térmica resultante en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) para calentar y calcinar un flujo adicional de sólidos fríos y parcialmente carbonatados del silo de menor temperatura (57), regulado con el segundo
 25 dispositivo de control de sólido (62), y un flujo constituyente de CaCO₃ de caliza fresca a través de una decimosexta tubería (26), de modo que se almacene un flujo de sólidos calientes y ricos en CaO a través de una cuarta tubería (24) en el silo de mayor temperatura (58).

18. Procedimiento de almacenamiento de energía usando combustores de lecho fluidizado circulante según la reivindicación 17, que comprende adicionalmente la etapa de extracción de calor del calcinador de lecho
 30 fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) a través de un cuarto intercambiador de calor (64), y en el que

a) en el primer modo operativo de máxima producción de potencia eléctrica, el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) funciona como un combustor de lecho fluidizado alimentado con oxígeno
 35 recirculando los sólidos de CaO del calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) a través de una séptima tubería (32) para maximizar la producción de potencia eléctrica en un cuarto intercambiador de calor (64), mientras que permite que suficientes sólidos ricos en CaO del silo de mayor temperatura (58) fluyan a través del primer intercambiador de calor de lecho fluidizado (61) para alimentar sólidos ricos en CaO de menor temperatura al carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) a través de la decimoctava tubería (28) y carbonatar
 40 parcialmente los sólidos en presencia del gas de escape que procede de la undécima tubería (13), y dirigiendo los sólidos que dejan el carbonatador de lecho fluidizado circulante (50) a través del segundo intercambiador de calor de lecho fluidizado (56) para enfriar y almacenar en el silo de menor temperatura (57), y

b) el segundo modo operativo de mínima producción de potencia eléctrica comprende adicionalmente un flujo
 45 reducido de gas de escape procedente de la undécima tubería (13) y una desviación del cuarto intercambiador de calor (64) a través de la octava tubería (33) al calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52), que permite una producción térmica en exceso en el calcinador de lecho fluidizado circulante alimentado con oxígeno (52) que se usa para calentar y calcinar un flujo adicional de sólidos fríos y parcialmente carbonatados del silo de menor temperatura (57) regulado con el segundo dispositivo de control de sólido (62), de modo que se
 50 almacena un flujo de sólidos calientes y ricos en CaO a través de la cuarta tubería (24) en el silo de mayor temperatura (58).

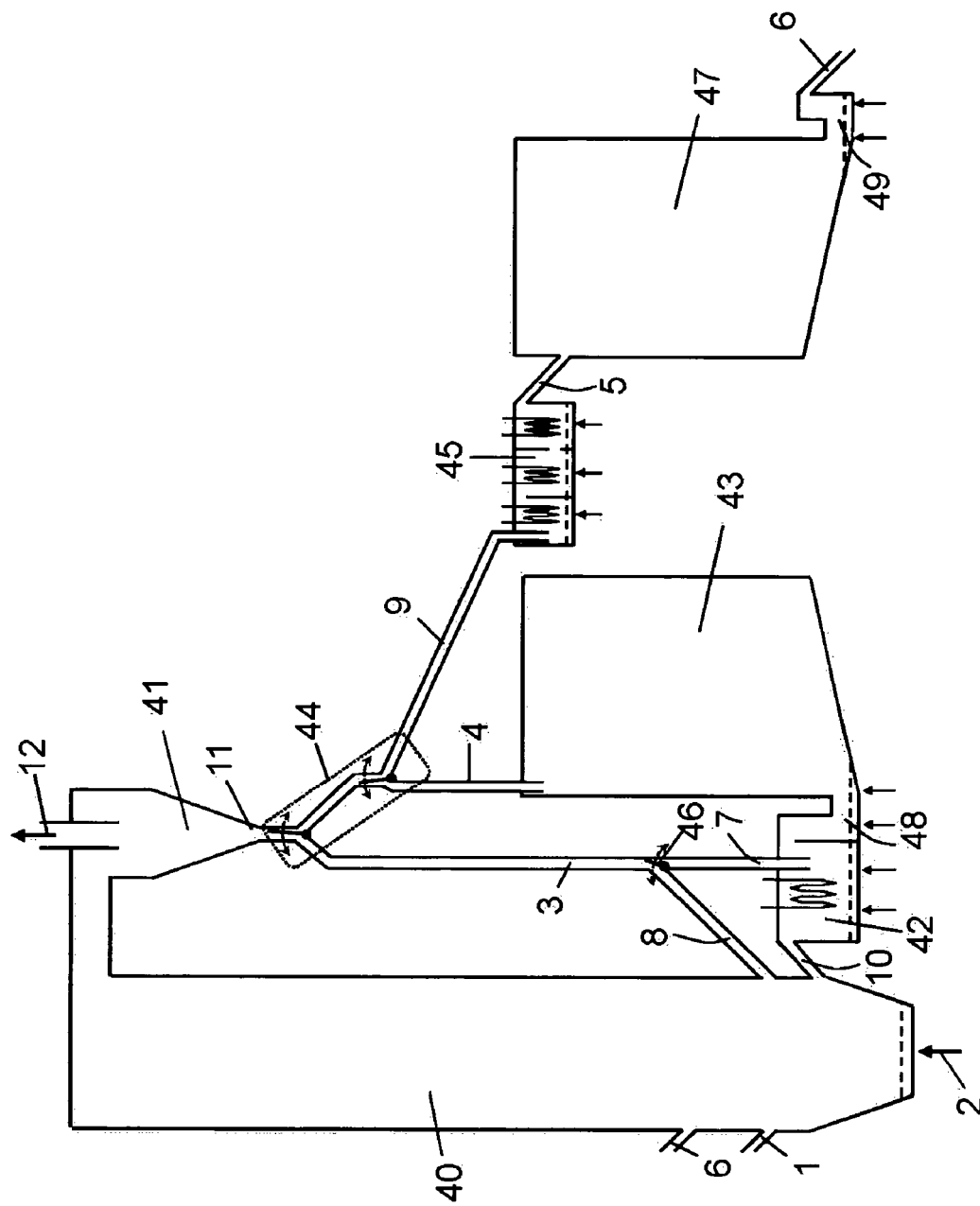


FIG. 2

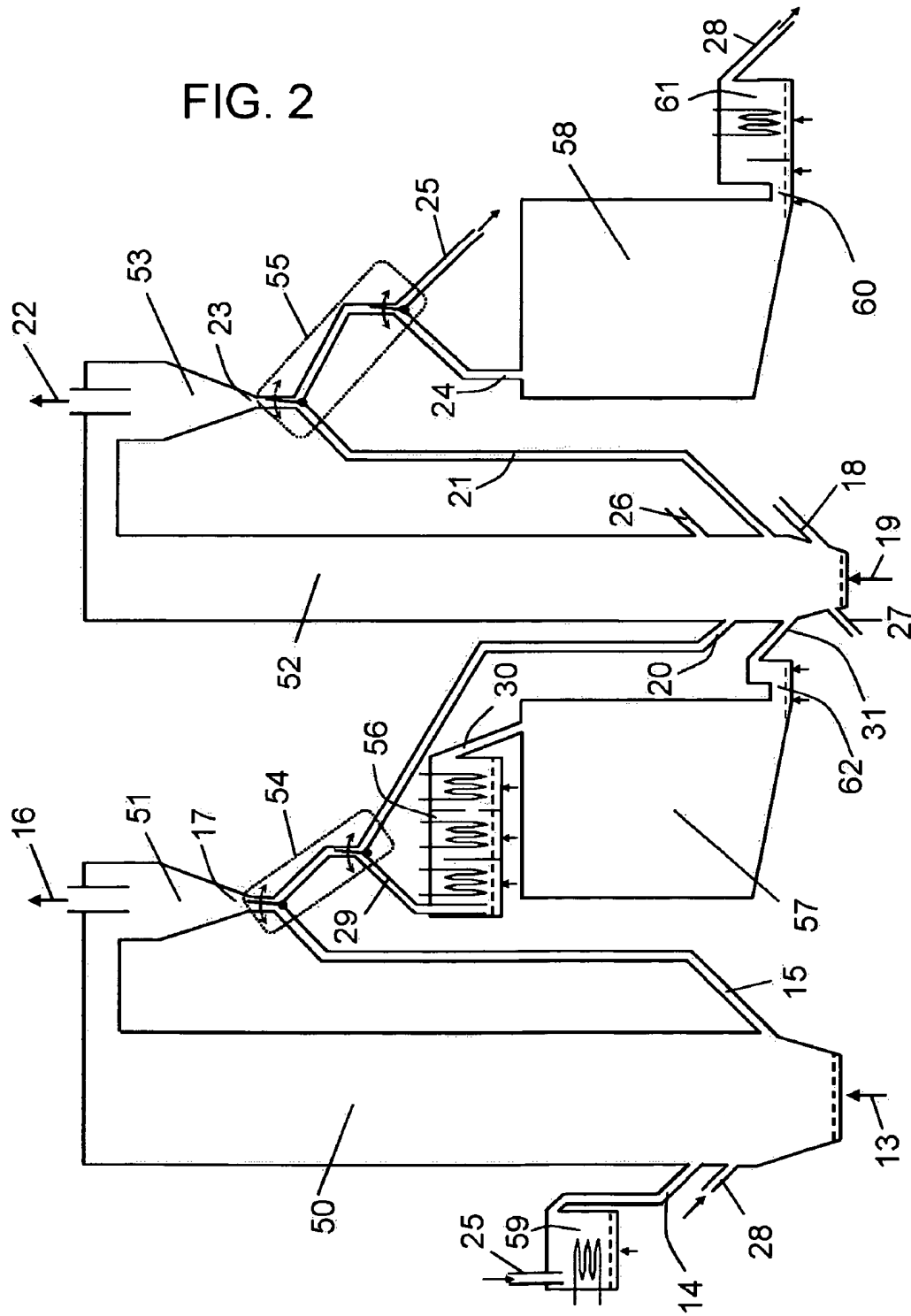


FIG. 3

