

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 555 602**

51 Int. Cl.:

F01K 3/12 (2006.01)

F01K 7/40 (2006.01)

F03G 6/06 (2006.01)

F22B 1/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.06.2012 E 12727631 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.09.2015 EP 2718565**

54 Título: **Central de energía térmica solar**

30 Prioridad:

07.06.2011 EP 11168979

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

05.01.2016

73 Titular/es:

ALSTOM TECHNOLOGY LTD (100.0%)
Brown Boveri Strasse 7
5400 Baden, CH

72 Inventor/es:

AGA, VIPLUV y
QUENAUT, JOHANN

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 555 602 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

Central de energía térmica solar

Campo técnico

5 La presente descripción se refiere en general al campo de la energía solar concentrada (CSP). Las realizaciones específicas se refieren a una central de energía térmica solar que utiliza la energía solar concentrada para generar electricidad y/o a un método de funcionamiento de una central de energía térmica solar.

Técnica anterior

10 La energía solar concentrada (CSP) implica el uso de lentes, espejos u otros aparatos ópticos para enfocar radiación solar desde una gran área incidente sobre un área pequeña. La energía procedente de la radiación solar se utiliza entonces para generar energía eléctrica. La energía solar concentrada tiene el potencial de convertirse en una fuente de energía importante en el futuro.

15 Ha habido muchas propuestas para la tecnología de energía solar concentrada. La tecnología que se cree que tiene el mayor potencial para proporcionar generación de energía de alta eficiencia es la central de energía térmica solar concentrada, también conocida comúnmente como la central de energía térmica solar basada en un receptor central, la central de energía de helióstatos y la torre de energía solar. Esta tecnología implica el uso de un receptor de radiación solar, montado encima de una torre, para recibir radiación solar que es reflejada para que incida sobre el mismo mediante un conjunto de reflectores de seguimiento situados en un campo solar alrededor de la torre. Los reflectores de seguimiento son típicamente helióstatos y el conjunto de helióstatos se conoce comúnmente como campo de helióstatos.

20 La figura 1 es una ilustración esquemática de una central de energía térmica solar concentrada de vapor directo convencional en la que la radiación solar es reflejada por un campo de helióstatos 2 para incidir sobre un receptor de radiación solar 4 montado encima de una torre 6. La radiación solar reflejada calienta directamente el agua que circula a través del receptor de radiación solar 4. Esto genera vapor sobrecalentado que es suministrado a un circuito de generación de energía 8 para accionar un grupo electrógeno de turbina de vapor 10, y de ese modo
25 generar energía eléctrica, en un modo bien conocido, utilizando el ciclo de Rankine. Además del grupo electrógeno de turbina de vapor 10, el circuito de generación de energía 8 incluye un condensador de aire enfriado 12 y un calentador de agua de alimentación 14.

30 Las centrales de energía térmica solar concentrada de vapor directo sólo pueden funcionar eficazmente durante las horas diurnas, en los momentos en los que la radiación solar disponible reflejada por el campo de helióstatos 2 que incide sobre el receptor de radiación solar 4 es suficiente para generar vapor sobrecalentado a la presión y a la temperatura requeridas en el circuito de generación de energía 8. Esto se debe a que el vapor a alta presión y a alta temperatura no se puede almacenar fácilmente para su uso posterior.

35 Para superar este inconveniente, se han propuestos centrales de energía térmica solar concentrada de vapor directo con capacidad de almacenamiento de energía. Estas centrales utilizan fluido de almacenamiento de energía térmica con alta capacidad de calor específico, típicamente sal fundida o una mezcla de diferentes sales fundidas, para el almacenamiento de energía. La energía térmica se almacena durante un ciclo de carga mediante el calentamiento de la sal fundida y la energía térmica se recupera posteriormente durante un ciclo de descarga para calentar agua y de ese modo generar vapor. El vapor generado se utiliza después para accionar un grupo electrógeno de turbina de vapor para generar energía eléctrica.

40 Durante el ciclo de carga, una parte de vapor sobrecalentado generado por el receptor de radiación solar es suministrado directamente al grupo electrógeno de turbina de vapor para la generación de energía eléctrica. En este sentido, la central de energía térmica solar funciona de manera muy similar a la central de energía térmica solar de vapor directo convencional descrita anteriormente con referencia a la figura 1. La parte restante de vapor sobrecalentado es suministrado a un primer intercambiador de calor que extrae la energía térmica del vapor
45 sobrecalentado y la transfiere a la sal fundida. La sal fundida caliente es almacenada en un recipiente de almacenamiento aislado. Durante el ciclo de descarga, cuando el vapor sobrecalentado no puede ser suministrado directamente por el receptor de radiación solar al grupo electrógeno de turbina de vapor para la generación de energía eléctrica debido a la falta de radiación solar reflejada que incide sobre el receptor de radiación solar, la energía térmica es recuperada de la sal fundida caliente mediante un segundo intercambiador de calor y la energía
50 térmica recuperada es utilizada para calentar agua, y de ese modo generar vapor sobrecalentado. Como ya se ha indicado anteriormente, este vapor sobrecalentado es suministrado al grupo electrógeno de turbina de vapor para la generación de energía eléctrica.

55 A fin de que las centrales de energía térmica solar de este tipo funcionen con la máxima eficacia, la temperatura y la presión del vapor que se genera durante el ciclo de descarga deberían ser de preferencia sustancialmente las mismas que la temperatura y la presión del vapor que es generado por el receptor de radiación solar durante las

horas diurnas y suministrado directamente al grupo electrógeno de turbina de vapor para la generación de energía eléctrica. Sin embargo, debido al modo en el que el fluido de almacenamiento de energía térmica es calentado mediante la recuperación de energía térmica del vapor en un intercambiador de calor, la temperatura máxima que puede ser alcanzada por el fluido de almacenamiento de energía térmica es significativamente menor que la temperatura máxima del vapor a partir del cual se recupera energía. Esto da como resultado lo que se conoce como una 'pérdida de punto de estricción' y se produce porque a medida que el vapor sobrecalentado se enfría en el intercambiador de calor, cambia de estado a un vapor saturado. Durante este cambio de estado, cuando se libera calor latente, la temperatura del vapor no disminuye, sino que la temperatura del fluido de almacenamiento de energía térmica, sal fundida, aumenta monótonicamente. Debido a esta falta de coincidencia de comportamiento térmico entre los dos fluidos en el intercambiador de calor, la temperatura más alta que puede alcanzar la sal fundida es mucho menor que la temperatura del vapor sobrecalentado de entrada, dando esto lugar a una recuperación de temperatura reducida. El efecto de esta 'pérdida de punto de estricción' se ilustra mediante el diagrama de temperatura - entalpía (T- h) mostrado en la figura 2 en la que las flechas son indicativas de la transferencia de energía térmica desde el vapor (curva A) al fluido de almacenamiento de energía térmica. El fluido de almacenamiento de energía térmica se calentaría idealmente de acuerdo con la línea B a medida que el vapor se enfría. Sin embargo, debido a la fase de calor latente durante el enfriamiento de vapor (la parte relativamente plana de la curva A), el fluido de almacenamiento de energía térmica se calienta de acuerdo con la línea C y, por tanto, alcanza una temperatura máxima significativamente menor que la temperatura máxima ideal indicada con la línea B.

En consecuencia, cuando posteriormente se recupera energía térmica del fluido de almacenamiento de energía térmica durante el ciclo de descarga para generar vapor para el grupo electrógeno de turbina de vapor, el vapor generado alcanza una temperatura y una presión significativamente más bajas que el vapor sobrecalentado que se utilizó para calentar la sal fundida. Esto reduce la eficacia de este tipo de central de energía térmica solar. En algunas circunstancias, la presión de vapor más baja en el circuito de generación de energía puede ser insuficiente para el funcionamiento del grupo electrógeno de turbina de vapor a plena carga, lo que significa que el requisito de generación de energía no se puede cumplir.

El documento CN 101 413 719 A describe un sistema de generación de energía solar con almacenamiento térmico en dos etapas. El sistema comprende un subsistema de conversión fototérmica, un subsistema de almacenamiento térmico en dos etapas y un subsistema de energía. El subsistema de conversión fototérmica se utiliza para recibir y combinar energía de radiación solar, convirtiendo la radiación solar recibida en energía térmica y transmitiendo la energía térmica al subsistema de energía o al subsistema de almacenamiento térmico en dos etapas.

Sería, pues, deseable proporcionar una central de energía térmica solar que tenga una eficiencia de funcionamiento mejorada.

Resumen de la descripción

De acuerdo con un aspecto, se proporciona una central de energía térmica solar que comprende:

una torre;

una pluralidad de helióstatos que rodean la torre y forman un campo de helióstatos;

un receptor de radiación solar montado en la torre para recibir la radiación solar reflejada por el campo de helióstatos;

un circuito de generación de energía que incluye una turbina de vapor para accionar un generador eléctrico para producir energía eléctrica, pudiendo ser calentada el agua que circula a través del receptor de radiación solar directamente mediante radiación solar reflejada sobre el receptor de radiación solar por el campo de helióstatos para generar vapor sobrecalentado para accionar la turbina de vapor;

un circuito de almacenamiento de energía que incluye un fluido de almacenamiento de energía térmica y un intercambiador de calor para recibir una parte de vapor sobrecalentado desviado del circuito de generación de energía y para transferir calor desde el vapor sobrecalentado desviado al fluido de almacenamiento de energía térmica;

en el que el intercambiador de calor puede funcionar para enfriar el vapor sobrecalentado desviado a una temperatura por encima de su temperatura de saturación para que el vapor salga del intercambiador de calor en su estado sobrecalentado.

De acuerdo con un segundo aspecto, se proporciona un método de funcionamiento de una central de energía térmica solar que comprende:

una torre;

una pluralidad de helióstatos que rodean la torre y forman un campo de helióstatos;

un receptor de radiación solar montado en la torre para recibir la radiación solar reflejada por el campo de helióstatos;

5 un circuito de generación de energía que incluye una turbina de vapor para accionar un generador eléctrico para producir energía eléctrica; y

un circuito de almacenamiento de energía que incluye un fluido de almacenamiento de energía térmica y un intercambiador de calor para recibir vapor sobrecalentado desviado del circuito de generación de energía y para transferir calor desde el vapor sobrecalentado hasta el fluido de almacenamiento de energía térmica;

en el que el método de funcionamiento comprende:

10 hacer circular agua a través del receptor de radiación solar de manera que el agua sea calentada directamente mediante la radiación solar reflejada sobre el receptor de radiación solar por el campo de helióstatos para generar vapor sobrecalentado;

suministrar una primera parte del vapor sobrecalentado a la turbina de vapor en el circuito de generación de energía; y

15 desviar una segunda parte del vapor sobrecalentado al intercambiador de calor en el circuito de almacenamiento de energía;

enfriar el vapor sobrecalentado desviado en el intercambiador de calor hasta una temperatura superior a su temperatura de saturación para que el vapor salga del intercambiador de calor en su estado sobrecalentado.

20 Debido a que el vapor sobrecalentado desviado al intercambiador de calor es enfriado a una temperatura por encima de su temperatura de saturación (para una presión de vapor dada), no cambia de estado a un vapor saturado y la energía térmica es transferida desde el vapor hasta el fluido de almacenamiento de energía térmica solamente mientras que el vapor está en su estado sobrecalentado. La 'pérdida de punto de estricción' descrita anteriormente, que surge en centrales de energía térmica solar convencionales cuando el vapor sobrecalentado es enfriado a una temperatura de o por debajo de su temperatura de saturación y cambia de estado a un vapor saturado, es así eliminada maximizando de ese modo la transferencia de calor desde el vapor hasta el fluido de almacenamiento de energía térmica. La eficacia de funcionamiento de la central de energía térmica solar es así mejorada significativamente.

30 La cantidad de vapor sobrecalentado desviado del circuito de generación de energía al circuito de almacenamiento de energía se puede variar dependiendo de la cantidad de radiación solar disponible reflejada por el campo de helióstatos sobre el receptor de radiación solar. En particular, en condiciones soleadas, cuando la cantidad de radiación solar reflejada sobrepasa la cantidad necesaria para calentar el agua que circula a través del receptor de radiación solar para generar vapor sobrecalentado a fin de hacer funcionar la turbina de vapor a plena carga, el exceso de vapor sobrecalentado que se produce a partir del exceso de radiación solar es desviado durante un ciclo de carga al intercambiador de calor en el circuito de almacenamiento de energía.

35 La central de energía térmica solar puede incluir un dispositivo de precalentamiento para suministrar agua de alimentación precalentada al receptor de radiación solar. El uso de agua de alimentación precalentada en el receptor de radiación solar reduce el choque térmico y por lo general aumenta la eficiencia de funcionamiento de la central de energía térmica solar.

40 El dispositivo de precalentamiento puede comprender un calentador de agua de alimentación. El calentador de agua de alimentación puede funcionar para mezclar el vapor sobrecalentado procedente del intercambiador de calor con agua para proporcionar el agua de alimentación precalentada. Mediante la mezcla de vapor sobrecalentado con agua a una temperatura relativamente baja, el vapor sobrecalentado puede ser enfriado a una temperatura por debajo de su temperatura de saturación para que el calor pueda ser transferido del vapor al agua. El vapor sobrecalentado normalmente cambia de estado a agua saturada a medida que se enfría. El agua de alimentación precalentada resultante puede ser bombeada al receptor de radiación solar que está encima de la torre de un modo simple usando una bomba de agua de alimentación.

45 El dispositivo de precalentamiento puede comprender, alternativamente, un eyector de vapor que puede funcionar para mezclar el vapor sobrecalentado procedente del intercambiador de calor con agua a temperatura relativamente baja. La corriente de fluido resultante del eyector de vapor puede ser inyectada al receptor de radiación solar que está encima de la torre. Un eyector de vapor es un dispositivo bien conocido que mezcla el vapor sobrecalentado con el agua y produce el agua mezclada a una alta presión suficiente que puede ser inyectada en el receptor de radiación solar que está encima de la torre. Para vapor a alta presión, un eyector de vapor puede ser en ciertos casos más eficiente, para mezclar, que únicamente un simple calentador de agua de alimentación.

El dispositivo de precalentamiento puede funcionar para mezclar el vapor sobrecalentado procedente del intercambiador de calor con agua condensada procedente de la turbina de vapor para proporcionar el agua de alimentación precalentada. El agua condensada resultante de la posterior condensación del vapor expandido en la turbina de vapor es, por tanto, reutilizada de manera ventajosa en un ciclo cerrado. Normalmente, el agua condensada es suministrada directamente desde un condensador aguas abajo de la turbina de vapor al dispositivo de precalentamiento durante el ciclo de carga, cuando una parte del vapor sobrecalentado es desviado desde el circuito de generación de energía al circuito de almacenamiento de energía.

En circunstancias en las que la presión del vapor es de aproximadamente 140 bares, el intercambiador de calor puede funcionar para enfriar el vapor sobrecalentado desviado hasta una temperatura de entre aproximadamente 330 °C y 350 °C en la salida del intercambiador de calor. El vapor que sale del intercambiador de calor permanece en un estado sobrecalentado a la presión y en la gama de temperaturas antes mencionadas.

La temperatura del agua suministrada al dispositivo de precalentamiento, por ejemplo agua condensada desde el condensador aguas abajo de la turbina de vapor, puede oscilar entre aproximadamente 50 °C y 80 °C.

Cuando el vapor sobrecalentado en la gama de temperaturas antes mencionada de entre aproximadamente 330 °C y 350 °C, se mezcla en el dispositivo de precalentamiento con agua relativamente fría a una temperatura de entre aproximadamente 50 °C y 80 °C, la temperatura del agua de alimentación precalentada resultante puede ser de entre aproximadamente 240 °C y 320 °C. Las temperaturas reales pueden variar de acuerdo con la cantidad de vapor sobrecalentado que es desviado del circuito de generación de energía al circuito de almacenamiento de energía (es decir, la relación entre el caudal másico de vapor sobrecalentado utilizado en el circuito de generación de energía para la generación de energía eléctrica y el caudal másico de vapor sobrecalentado desviado al circuito de almacenamiento de energía).

Como alternativa al uso del vapor sobrecalentado que sale del intercambiador de calor para precalentar agua de alimentación, por ejemplo, en un calentador de agua de alimentación o eyector de vapor, la central de energía térmica solar podría estar dispuesta de manera que el vapor sobrecalentado que sale del intercambiador de calor sea suministrado directamente a la turbina de vapor para su expansión en la turbina de vapor. En estas circunstancias, el vapor sobrecalentado podría ser inyectado directamente en una de las etapas de la turbina de vapor para su expansión en la etapa de turbina de vapor. Dado que el vapor sobrecalentado que sale del intercambiador de calor ya no se utiliza para precalentar agua de alimentación, la central de energía térmica solar puede incluir un calentador de agua de alimentación adicional para proporcionar agua de alimentación precalentada al receptor de radiación solar y el calentador de agua de alimentación adicional puede estar dispuesto para mezclar agua condensada procedente de la turbina de vapor con vapor extraído entre una o más etapas de la turbina de vapor.

Una realización del método de funcionamiento de acuerdo con el segundo aspecto puede comprender la mezcla del vapor sobrecalentado que sale del intercambiador de calor con agua para proporcionar agua de alimentación precalentada al receptor de radiación solar. Normalmente, el agua de alimentación precalentada es calentada en el receptor de radiación solar durante dicha etapa de circulación para generar el vapor sobrecalentado. El choque térmico en el receptor de radiación solar es, de ese modo, minimizado y la eficiencia de funcionamiento de la central de energía térmica solar es aumentada como se ha mencionado anteriormente.

El método de funcionamiento puede comprender la mezcla del vapor sobrecalentado que sale del intercambiador de calor con agua condensada producida por la condensación de vapor expandido en la turbina de vapor, para proporcionar con ello el agua de alimentación precalentada. Como se ha indicado anteriormente, el agua condensada puede ser suministrada directamente desde el condensador sin ningún tipo de precalentamiento intermedio.

El vapor sobrecalentado y el agua normalmente se mezclan en un calentador de agua de alimentación. El calentador de agua de alimentación podría ser un calentador de agua de alimentación abierto o un calentador de agua de alimentación cerrado, aunque puede ser preferible un calentador de agua de alimentación abierto.

El vapor sobrecalentado y el agua podrían, alternativamente, ser mezclados utilizando un eyector de vapor. Esto proporcionaría una corriente de presión mayor de fluido mezclado resultante. En ciertas condiciones de funcionamiento de vapor y de tamaños de central, podría ser preferible la mezcla usando un eyector de vapor en lugar de un calentador de agua de alimentación.

Una realización alternativa del método de funcionamiento de acuerdo con el segundo aspecto puede comprender el suministro de vapor sobrecalentado que sale del intercambiador de calor a la turbina de vapor para su expansión en la turbina de vapor. La expansión del vapor sobrecalentado en la turbina de vapor favorece la generación de energía eléctrica y aumenta la eficacia de funcionamiento de la central de energía térmica solar.

En esta realización alternativa, el agua condensada procedente del condensador situado aguas abajo de la turbina de vapor se puede mezclar con vapor extraído de entre una o más etapas de la turbina de vapor para proporcionar agua de alimentación precalentada al receptor de radiación solar.

5 El fluido de almacenamiento de energía térmica es típicamente un líquido. El líquido de almacenamiento de energía térmica puede ser una sal fundida, que puede, por ejemplo, ser calentada a una temperatura máxima de funcionamiento de aproximadamente 580 °C para el almacenamiento eficaz de energía térmica. La sal fundida puede ser una sal de nitrato o una sal de carbonato, aunque otras formas de sal fundida, tales como mezclas de sales, están enteramente dentro del ámbito de aplicación de la presente descripción.

10 El circuito de almacenamiento de energía puede incluir dos lugares de almacenamiento de fluido para el fluido de almacenamiento de energía térmica, uno de los cuales puede ser un depósito de almacenamiento de fluido a alta temperatura y otro de los cuales puede ser un depósito de almacenamiento de fluido a temperatura relativamente inferior. El circuito de almacenamiento de energía puede incluir alternativamente ambos lugares de almacenamiento de fluido en un solo depósito de almacenamiento de fluido termoclina, por ejemplo con fluido a alta temperatura en la parte superior y fluido a baja temperatura en la parte inferior, aunque estas soluciones de almacenamiento de
15 depósito único están todavía en desarrollo. El intercambiador de calor puede estar previsto en el circuito de almacenamiento de energía entre los lugares de almacenamiento de fluido a alta temperatura y a baja temperatura, permitiendo que la energía térmica sea transferida desde el vapor sobrecalentado hasta el fluido de almacenamiento de energía térmica a medida que circula por el circuito de almacenamiento de energía desde el lugar de almacenamiento de fluido a baja temperatura al lugar de almacenamiento de fluido a alta temperatura. El circuito de
20 almacenamiento de energía puede incluir un intercambiador de calor adicional que puede funcionar para recuperar energía térmica procedente del fluido de almacenamiento de energía térmica a medida que circula en el circuito de almacenamiento de energía desde el lugar de almacenamiento de fluido de alta temperatura hasta el lugar de almacenamiento de fluido a baja temperatura.

25 La energía térmica recuperada por el intercambiador de calor adicional puede ser utilizada para cualquier propósito deseado, aunque de manera conveniente es más utilizada para generar vapor para el circuito de generación de energía de la central de energía térmica solar, durante el ciclo de descarga, en momentos en los que la radiación solar insuficiente es reflejada en el receptor de radiación solar para generar vapor sobrecalentado a la temperatura y presión requeridas para el circuito de generación de energía, por ejemplo, durante las horas nocturnas o en días nublados. En consecuencia, el intercambiador de calor adicional puede estar dispuesto para generar vapor
30 sobrecalentado para el circuito de generación de energía y puede estar dispuesto para suministrar el vapor sobrecalentado al circuito de generación de energía para su expansión en la turbina de vapor.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 es una ilustración esquemática de una central de energía térmica solar concentrada de vapor directo convencional;

35 La figura 2 es un diagrama de temperatura - entalpía (T- h) para una central de energía térmica solar concentrada de vapor directo convencional que ilustra la transferencia de energía térmica desde vapor a un fluido de almacenamiento de energía térmica durante un ciclo de carga;

La figura 3 es una ilustración esquemática de una central de energía térmica solar de acuerdo con la presente descripción;

40 La figura 4 es un diagrama de temperatura - entalpía (T- h) para la central de energía térmica solar mostrada en la figura 3 que ilustra la transferencia de energía térmica desde vapor sobrecalentado a un fluido de almacenamiento de energía térmica durante un ciclo de carga; y

45 La figura 5 es un diagrama de temperatura - entalpía (T- h) para la central de energía térmica solar mostrada en la figura 3 que ilustra la transferencia de energía térmica desde el fluido de almacenamiento de energía térmica al agua para producir vapor sobrecalentado durante un ciclo de descarga.

Descripción detallada de realizaciones preferidas

A continuación, se describirán realizaciones preferidas solo a modo de ejemplo y con referencia a los dibujos que se acompañan.

50 Con referencia a la figura 3, se muestra una central de energía térmica solar 20 que comprende una torre 22 y un campo de helióstatos 24 que rodea la torre 22. El campo de helióstatos 24 comprende una pluralidad de helióstatos de seguimiento individuales 26 y la posición de cada helióstato 26 se ajusta mediante un sistema de seguimiento controlado por ordenador programado de manera adecuada para seguir el movimiento del sol. Un receptor de radiación solar 28 está montado en la parte superior de la torre 22 y la radiación solar es reflejada por el campo de helióstatos 24 para incidir sobre el receptor de radiación solar 28.

La central de energía 20 incluye un circuito de vapor de generación de energía 30 para generar energía eléctrica. El circuito de vapor de generación de energía 30 incluye un sistema de generación de energía 32 a través del cual se hace circular vapor sobrecalentado para generar con ello energía eléctrica, y el sistema de generación de energía 32 comprende típicamente una turbina de vapor 34 que tiene unas etapas de presión alta (HP) y de presión intermedia y baja (IP / LP) a través de las cuales se expande el vapor sobrecalentado, y un generador eléctrico 36 accionado por la turbina de vapor 34. El circuito de vapor de generación de energía 30 también incluye un condensador de aire enfriado 38 y un calentador de agua de alimentación 40.

La central de energía 20 incluye un circuito de almacenamiento de energía 42 que utiliza sal fundida como fluido de almacenamiento de energía térmica. El circuito de almacenamiento de energía 42 incluye un depósito de almacenamiento de sal caliente aislante 44 y un depósito de almacenamiento de sal relativamente fría 46. Un primer intercambiador de calor 48 está previsto para transferir calor a la sal fundida fría a medida que fluye en el circuito de almacenamiento de energía 42 desde el depósito de almacenamiento en frío 46 al depósito de almacenamiento de sal caliente 44 y un segundo intercambiador de calor 50 está previsto para recuperar calor de la sal fundida caliente a medida que fluye en el circuito de almacenamiento de energía 42 desde el depósito de almacenamiento de sal caliente 44 al depósito de almacenamiento de sal fría 46.

La central de energía térmica solar 20 puede funcionar en diferentes modos en función de las necesidades de generación de energía establecidas y de la cantidad de radiación solar que se encuentre disponible.

Durante las horas diurnas, la central de energía 20 puede funcionar en un modo de funcionamiento combinado generación/almacenamiento, siempre que exista una cantidad suficiente de radiación solar. En este modo de funcionamiento, el agua que circula en el receptor de radiación solar 28 es calentada mediante la energía térmica resultante de la radiación solar reflejada por el campo de helióstatos 24 para incidir sobre el receptor de radiación solar 28. Esto genera vapor sobrecalentado, típicamente a una presión de aproximadamente entre 120 y 175 bares y a una temperatura de aproximadamente entre 560 °C y 570 °C. En la realización ilustrada, el vapor sobrecalentado generado tiene una presión de aproximadamente 140 bares y una temperatura de aproximadamente 565 °C.

Con el fin de calentar directamente el agua que circula en el receptor de radiación solar 28, el receptor de radiación solar 28 incluye típicamente una pluralidad de paneles de receptor conectados en serie, que pueden, por ejemplo, estar dispuestos circunferencialmente alrededor del receptor de radiación solar 28. Cada uno de los paneles de receptor comprende una pluralidad de tubos paralelos de pequeño diámetro dispuestos verticalmente que están conectados por sus extremos superior e inferior mediante cabezales. El agua que circula en el receptor de radiación solar 28 fluye a través de los tubos en los paneles de receptor donde es calentada directamente por la energía térmica resultante de la radiación solar reflejada por el campo de helióstatos 24 para incidir sobre los paneles de receptor. Aunque se pueden preferir múltiples paneles de receptor circunferencialmente dispuestos, se podría proporcionar un único panel de receptor.

Una parte elevada del caudal másico de vapor sobrecalentado es suministrado directamente al grupo electrógeno de turbina de vapor para su expansión en la turbina de vapor 34. Como ya se ha indicado anteriormente, la expansión del vapor sobrecalentado en la turbina de vapor 34 acciona el generador eléctrico 36, generando de ese modo energía eléctrica.

La parte restante del caudal másico de vapor sobrecalentado se desvía desde el circuito de generación de energía 30 al circuito de almacenamiento de energía 42 a través de una válvula de desvío 52. La válvula de desvío 52 puede ser controlada para variar la relación entre el caudal másico de vapor sobrecalentado suministrado directamente a la turbina de vapor 34 para la generación de energía eléctrica y el caudal másico de vapor sobrecalentado desviado al circuito de almacenamiento de energía 42. En general, es posible desviar una parte más grande del vapor sobrecalentado generado por el receptor de radiación solar 28 al circuito de almacenamiento de energía 42 durante períodos soleados, cuando la cantidad de radiación solar disponible, y por tanto de vapor sobrecalentado, sobrepasa la que es necesaria para hacer funcionar la turbina de vapor 34 a plena carga.

El vapor sobrecalentado desviado al circuito de almacenamiento de energía 42 es alimentado a través del primer intercambiador de calor 48 durante un ciclo de carga. El vapor sobrecalentado es enfriado en el primer intercambiador de calor 48 y el calor es transferido desde el vapor sobrecalentado a la sal fundida a medida que circula desde el depósito de almacenamiento de sal fría 46 al depósito de almacenamiento de sal caliente 44. De acuerdo con la presente descripción, el vapor sobrecalentado es enfriado en el primer intercambiador de calor 48 hasta una temperatura superior a su temperatura de saturación para que el vapor que sale del primer intercambiador de calor 48 permanezca en su estado sobrecalentado. Como se ilustra claramente con el diagrama de temperatura - entalpía (T- h) mostrado en la figura 4, este enfoque innovador para calentar la sal fundida durante el ciclo de carga maximiza la transferencia de calor desde el vapor hasta la sal fundida y reduce sustancialmente la 'pérdida de punto de estricción' descrita anteriormente en esta memoria descriptiva con referencia al diagrama de temperatura - entalpía (T- h) de la figura 2. En particular, se verá a partir del diagrama de temperatura - entalpía (T- h) de la figura 4 que la línea T- h (con la etiqueta D) para la sal fundida coincide estrechamente con la línea T- h (con la etiqueta A) para el vapor en su estado sobrecalentado. Por consiguiente, la sal fundida alcanza una temperatura máxima que está cerca de la temperatura máxima del vapor sobrecalentado. Por ejemplo, cuando el vapor sobrecalentado

circulado a través del intercambiador de calor (a una presión constante de aproximadamente 140 bares) tiene una temperatura de entrada de aproximadamente 565 °C y una temperatura de salida de aproximadamente 337 °C, por encima de su temperatura de saturación, la sal fundida puede alcanzar una temperatura máxima de 535 °C. Esto está muy cerca de la temperatura de entrada del vapor sobrecalentado.

5 A fin de maximizar la eficacia de funcionamiento de la central de energía térmica solar 20, el vapor sobrecalentado procedente de la salida del primer intercambiador de calor 48 es suministrado a un calentador de agua de alimentación 54 o a otro dispositivo de precalentamiento adecuado que suministre agua de alimentación precalentada al receptor de radiación solar. El vapor sobrecalentado que ha sido expandido a través de las etapas de la turbina de vapor 34 es suministrado al condensador 38 para producir agua. En la realización ilustrada, la temperatura del agua condensada es de aproximadamente 68 °C, aunque la temperatura podría ser cualquiera dentro de la gama de entre aproximadamente 50 °C y aproximadamente 80 °C. Durante el modo de funcionamiento combinado generación/almacenamiento, el agua condensada no pasa por el calentador de agua de alimentación 40 y es suministrada directamente al calentador de agua de alimentación 54, sin ser precalentada, donde es mezclada con el vapor sobrecalentado desde la salida del primer intercambiador de calor 48. La mezcla del vapor sobrecalentado y el agua condensada relativamente fría en el calentador de agua de alimentación 54 recupera más energía térmica del vapor sobrecalentado y calienta el agua condensada relativamente fría para proporcionar agua de alimentación precalentada. El agua de alimentación precalentada es entonces simplemente bombeada al receptor de radiación solar 28 mediante una bomba de agua de alimentación 56. En la realización ilustrada, la temperatura del agua de alimentación precalentada es de entre aproximadamente 240 °C y aproximadamente 320 °C, dependiendo de la relación entre el caudal másico de vapor sobrecalentado suministrado directamente a la turbina de vapor 34 para la generación de energía eléctrica y el caudal másico de vapor sobrecalentado desviado al circuito de almacenamiento de energía 42. Naturalmente, es importante que la temperatura del agua en la salida del calentador de agua de alimentación 54 no sobrepase la temperatura de condensación a la presión dada para asegurar que la bomba de agua de alimentación 56 pueda ser empleada para suministrar el agua de alimentación precalentada al receptor de radiación solar 28. La temperatura del agua de salida puede ser mayor en determinados casos si un eyector de vapor se utiliza como dispositivo de precalentamiento en lugar del calentador de agua de alimentación 54.

A veces, cuando hay energía solar suficiente para calentar directamente el agua que circula en los paneles de receptor del receptor de radiación solar 28 para proporcionar vapor a la presión y a la temperatura deseadas para el funcionamiento efectivo de la central de energía 20 en el modo descrito anteriormente, la central de energía 20 puede funcionar en un modo de recuperación de energía para suministrar vapor sobrecalentado al sistema de generación de energía 32. En este modo de funcionamiento, el segundo intercambiador de calor 50 se utiliza para recuperar energía térmica de la sal fundida caliente durante un ciclo de descarga a medida que la sal fundida caliente fluye desde el depósito de almacenamiento de sal caliente 44 al depósito de almacenamiento de sal fría 46. Este modo de funcionamiento se utiliza normalmente durante las horas nocturnas, cuando la radiación solar no está disponible para generar vapor en el receptor de radiación solar 28. Sin embargo, también se puede utilizar durante las horas diurnas si no hay radiación solar suficiente para generar vapor en el receptor de radiación solar 28 a la presión y a la temperatura deseadas para el circuito de generación de energía 30, por ejemplo durante condiciones nubladas.

Debido al enfoque innovador descrito anteriormente que se utiliza para calentar la sal fundida durante el ciclo de carga, el agua que circula a través del segundo intercambiador de calor 50 se calienta de manera más eficiente durante el ciclo de descarga generando así vapor sobrecalentado a una temperatura mucho más alta de la que es posible en la central de energía térmica solar convencional descrita anteriormente. Esto se ilustra claramente en el diagrama de temperatura - entalpía (T- h) mostrado en la figura 5, en el que se puede observar que a medida que la sal fundida se enfría desde su temperatura de almacenado de 535 °C (línea E) y calienta el agua que circula a través del segundo intercambiador de calor 50 (línea F), el vapor recalentado generado como resultado de la transferencia de calor alcanza una temperatura de 525 °C a una presión de 109 bares. Ésta está cerca de la temperatura de 565 °C del vapor sobrecalentado originalmente utilizado para calentar la sal fundida.

El vapor sobrecalentado generado por la transferencia de calor en el segundo intercambiador de calor 50 es suministrado directamente al circuito de generación de energía 30 en el que se expande en la turbina de vapor 34 para accionar el generador eléctrico 36 y de ese modo generar energía eléctrica. El vapor expandido es suministrado al condensador 38 para producir agua de alimentación para su recirculación a la torre solar. El agua condensada es suministrada a continuación al calentador de agua de alimentación 40, donde es calentada por el vapor extraído de la turbina de vapor 34. El agua de alimentación precalentada resultante es suministrada después al segundo intercambiador de calor 50 para seguir calentándose en el modo descrito anteriormente, creando de ese modo un ciclo cerrado.

Se apreciará que mientras que la central de energía 20 está funcionando en el modo de recuperación de energía, el calentador de agua de alimentación 54 está inactivo.

Como entenderá la persona experta en la materia, el calentador de agua de alimentación 40 comprende intercambiadores de calor 401 a 405, en los que el agua de alimentación es calentada mediante el vapor extraído de

la turbina de vapor 34. En la realización ilustrada, se utilizan varias etapas de calentamiento de agua de alimentación, en las que cada intercambiador de calor sucesivo 401 a 405 utiliza vapor purgado de una etapa de turbina diferente en orden ascendente de presión. También ha de tenerse en cuenta que el calentador de agua de alimentación 40 utiliza también el denominado principio de "desagüe en cascada", en el que el agua de alimentación que fluye en cada intercambiador de calor 401 a 405 se pasa primero a través de un módulo de recalentamiento correspondiente 406 a 410 para recalentar el vapor / agua que ha desaguado a través del intercambiador de calor y que ha traspasado calor al agua de alimentación. A partir de entonces, el desagüe es alimentado a un calentador de agua de alimentación a presión inferior en la dirección aguas arriba con respecto al flujo de agua de alimentación. El objetivo de estas medidas es reducir las diferencias de temperatura entre etapas de calentamiento de agua de alimentación y con ello aumentar la eficiencia termodinámica de acuerdo con la Segunda Ley de la Termodinámica.

También podrá verse en la figura 3 que el agua de drenaje procedente del módulo de recalentamiento 408 es alimentada a un recipiente de mezcla 60, donde es mezclada con el agua de alimentación procedente del intercambiador de calor 402 y condensado procedente de la línea 61, recibido de la turbina de vapor 34. Mientras tanto, el drenaje procedente del primer módulo de recalentamiento 406 es reciclado en el agua de alimentación en la salida del condensador 38.

Aunque se han descrito realizaciones ejemplares en los párrafos anteriores, debe entenderse que pueden hacerse diversas modificaciones a estas realizaciones sin apartarse del ámbito de aplicación de las reivindicaciones adjuntas. Por tanto, el alcance y el campo de aplicación de las reivindicaciones no deberían limitarse a las realizaciones ejemplares descritas anteriormente. Cada característica descrita en la memoria descriptiva, incluyendo las reivindicaciones y los dibujos, puede ser sustituida por características alternativas que sirvan para los mismos propósitos, equivalentes o similares, a menos que se indique expresamente lo contrario.

Por ejemplo, durante el modo de funcionamiento combinado de generación/almacenamiento, el vapor sobrecalentado procedente del primer intercambiador de calor 48 podría ser suministrado directamente a la turbina de vapor 34 para su expansión en la turbina de vapor 34. En este caso, se entenderá que el vapor sobrecalentado es utilizado para favorecer directamente la generación de energía eléctrica, en lugar de para precalentar el agua de alimentación suministrada al receptor de radiación solar 28.

Las presiones y temperaturas del vapor en diferentes puntos de la central de energía térmica solar 20 se proporcionan únicamente con fines ilustrativos. Se debe entender que otras presiones y temperaturas del vapor están enteramente dentro del ámbito de aplicación de las reivindicaciones adjuntas.

Aunque el fluido de almacenamiento de energía térmica es típicamente una sal fundida, se podrían emplear otros fluidos de almacenamiento de energía térmica que tengan una alta capacidad de calor específico.

Con el fin de simplificar la construcción de las centrales de energía térmica solar 20 descritas anteriormente con referencia a la figura 3, los depósitos de almacenamiento de sal caliente y de sal relativamente fría individuales 44, 46 podrían ser reemplazados, respectivamente, por un único depósito de almacenamiento de sal fundida termoclina. En un depósito de almacenamiento de sal fundida termoclina, se almacena sal fundida caliente normalmente en la parte superior del depósito y la sal fundida más fría se almacena normalmente en el fondo del depósito. En este caso, los intercambiadores de calor 48, 50 estarán dispuestos en un circuito que permita la circulación de la sal fundida entre los lugares de almacenamiento calientes y fríos.

A menos que el contexto requiera claramente otra cosa, en toda la descripción y las reivindicaciones, las palabras "comprende", "que comprende", y equivalentes, deben interpretarse en un sentido inclusivo en vez de en un sentido exclusivo o exhaustivo; es decir, en el sentido de "incluyendo, aunque no limitado a".

REIVINDICACIONES

1. Central de energía térmica solar (20) que comprende:

una torre (22);

una pluralidad de helióstatos (26) que rodean la torre y forman un campo de helióstatos (24);

5 un receptor de radiación solar (28) montado en la torre (22) para recibir la radiación solar reflejada por el campo de helióstatos (24);

un circuito de generación de energía (30) que incluye una turbina de vapor (34) para accionar un generador eléctrico (36) a fin de producir energía eléctrica, pudiendo ser calentada el agua que circula a través del receptor de radiación solar (28) directamente mediante radiación solar reflejada sobre el receptor de radiación solar (28) por el campo de helióstatos (24) para generar vapor sobrecalentado para accionar la turbina de vapor (34);

un circuito de almacenamiento de energía (42) que incluye un fluido de almacenamiento de energía térmica y un intercambiador de calor (48) para recibir una parte de vapor sobrecalentado desviado del circuito de generación de energía (30) y para transferir calor desde el vapor sobrecalentado desviado al fluido de almacenamiento de energía térmica;

15 caracterizada por que el intercambiador de calor (48) puede funcionar para enfriar el vapor sobrecalentado desviado a una temperatura por encima de su temperatura de saturación para que el vapor salga del intercambiador de calor (48) en su estado sobrecalentado.

2. Central de energía térmica solar de acuerdo con la reivindicación 1, en la que el intercambiador de calor (48) funciona para enfriar el vapor sobrecalentado desviado hasta una temperatura de entre aproximadamente 330 °C y 350 °C en la salida del intercambiador de calor (48) cuando la presión del vapor es de aproximadamente 140 bares.

3. Central de energía térmica solar de acuerdo con la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en la que la central de energía térmica solar (20) incluye un dispositivo de precalentamiento (54) para suministrar agua de alimentación precalentada al receptor de radiación solar (28), funcionando el dispositivo de precalentamiento (54) para mezclar el vapor sobrecalentado procedente del intercambiador de calor (48) con agua para proporcionar el agua de alimentación precalentada.

4. Central de energía térmica solar de acuerdo con la reivindicación 3, en la que la temperatura del agua de alimentación precalentada suministrada por el dispositivo de precalentamiento (54) al receptor de radiación solar (28) está comprendida entre aproximadamente 240 °C y 320 °C.

5. Central de energía térmica solar de acuerdo con la reivindicación 3 o la reivindicación 4, en la que el dispositivo de precalentamiento (54) funciona para mezclar el vapor sobrecalentado procedente del intercambiador de calor (48) con agua condensada procedente de la turbina de vapor (34) para proporcionar el agua de alimentación precalentada.

6. Central de energía térmica solar de acuerdo con la reivindicación 5, en la que el agua condensada se suministra desde un condensador (38), colocado aguas abajo de la turbina de vapor (34), directamente al dispositivo de precalentamiento (54).

7. Central de energía térmica solar de acuerdo con la reivindicación 5 o la reivindicación 6, en la que la temperatura del agua condensada es de entre aproximadamente 50 °C y 80 °C.

8. Central de energía térmica solar de acuerdo con la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en la que la central de energía térmica solar (20) está dispuesta para suministrar el vapor sobrecalentado que sale del intercambiador de calor (48) a la turbina de vapor (34) para su expansión en la turbina de vapor (34).

9. Método de funcionamiento de una central de energía térmica solar (20), comprendiendo la central:

una torre (22);

una pluralidad de helióstatos (26) que rodean la torre y forman un campo de helióstatos (24);

45 un receptor de radiación solar (28) montado en la torre (22) para recibir la radiación solar reflejada por el campo de helióstatos (24);

un circuito de generación de energía (30) que incluye una turbina de vapor (34) para accionar un generador eléctrico (36) a fin de producir energía eléctrica; y

un circuito de almacenamiento de energía (42) que incluye un fluido de almacenamiento de energía térmica y un intercambiador de calor (48) para recibir vapor sobrecalentado desviado del circuito de generación de energía (30) y para transferir calor desde el vapor sobrecalentado hasta el fluido de almacenamiento de energía térmica;

en el que el método de funcionamiento comprende las etapas de:

- 5 hacer circular agua a través del receptor de radiación solar (28) de manera que el agua sea calentada directamente mediante la radiación solar reflejada sobre el receptor de radiación solar (28) por el campo de helióstatos (24) para generar vapor sobrecalentado;

suministrar una primera parte del vapor sobrecalentado a la turbina de vapor (34) en el circuito de generación de energía (30); y

- 10 desviar una segunda parte del vapor sobrecalentado al intercambiador de calor (48) en el circuito de almacenamiento de energía (42);

caracterizado por que el vapor sobrecalentado desviado es enfriado en el intercambiador de calor (48) hasta una temperatura superior a su temperatura de saturación para que el vapor salga del intercambiador de calor (48) en su estado sobrecalentado.

- 15 10. Método de funcionamiento de acuerdo con la reivindicación 9, en el que después de que el vapor sobrecalentado sale del intercambiador de calor (48), el vapor sobrecalentado se mezcla con agua para proporcionar agua de alimentación precalentada al receptor de radiación solar (28).

11. Método de funcionamiento de acuerdo con la reivindicación 10, en el que el vapor sobrecalentado se mezcla con agua condensada procedente de la turbina de vapor (34) para proporcionar el agua de alimentación precalentada.

- 20 12. Método de funcionamiento de acuerdo con la reivindicación 11, en el que el agua condensada se suministra directamente desde la turbina de vapor (34), sin precalentamiento, para mezclarse con el vapor sobrecalentado.

13. Método de funcionamiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 10 a 12, en el que el vapor sobrecalentado y el agua se mezclan en un dispositivo de precalentamiento (54).

- 25 14. Método de funcionamiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 10 a 13, en el que el agua de alimentación precalentada se calienta en el receptor de radiación solar (28) durante dicha etapa de circulación para generar vapor sobrecalentado.

15. Método de funcionamiento de acuerdo con la reivindicación 9, en el que después de que el vapor sobrecalentado sale del intercambiador de calor (48), el vapor sobrecalentado es suministrado a la turbina de vapor (34) para su expansión dentro de la misma.

30

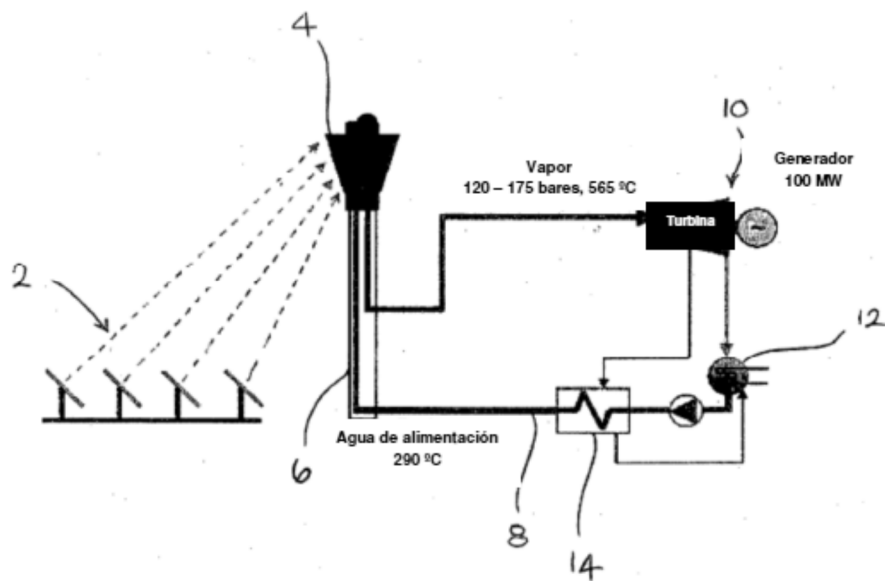


Figura 1

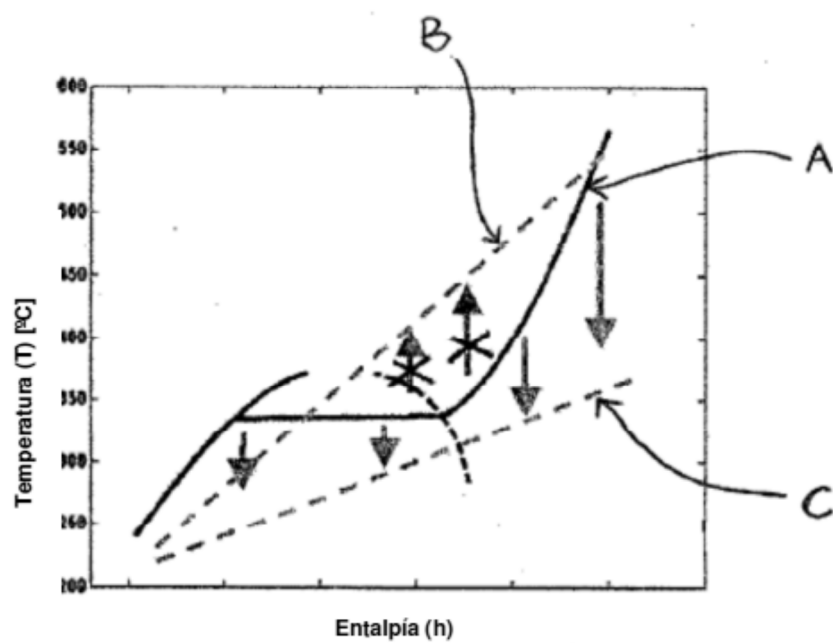


Figura 2

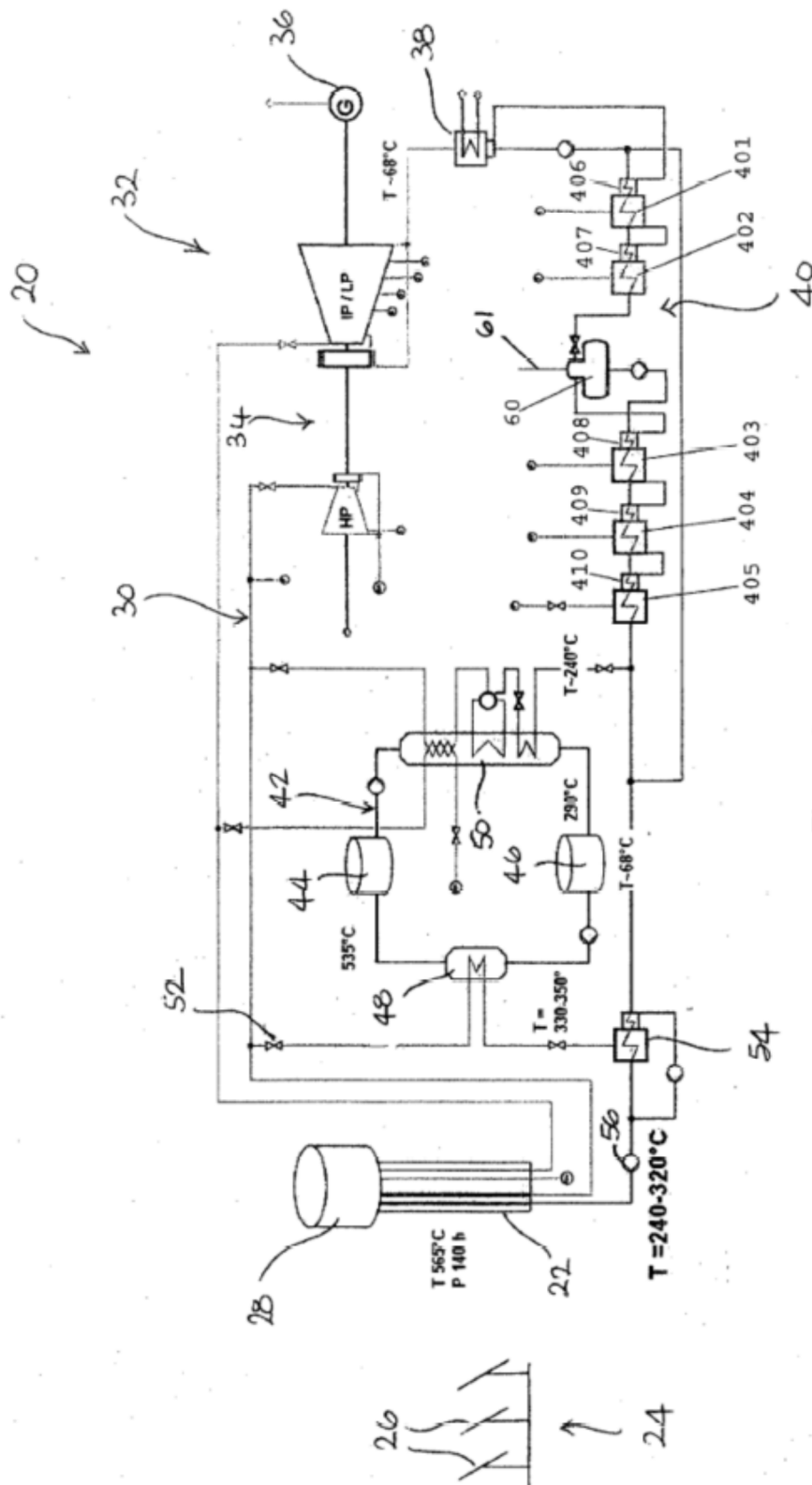


Figura 3

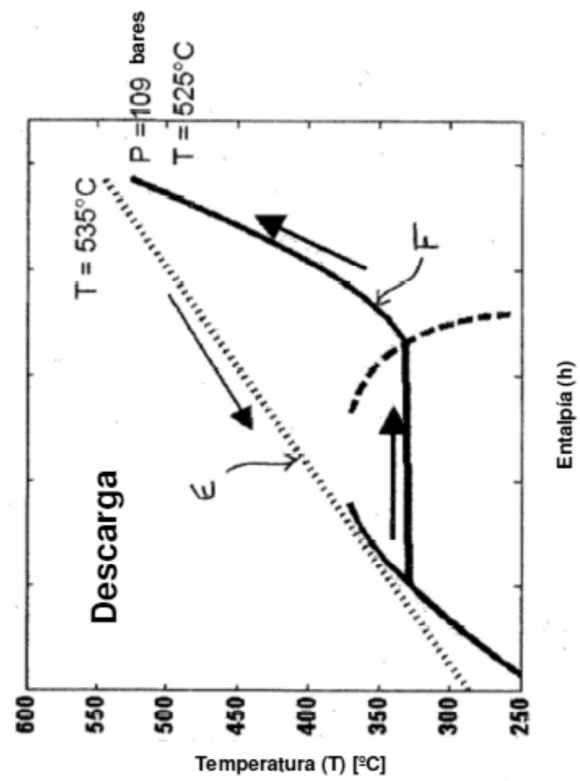


Figura 5

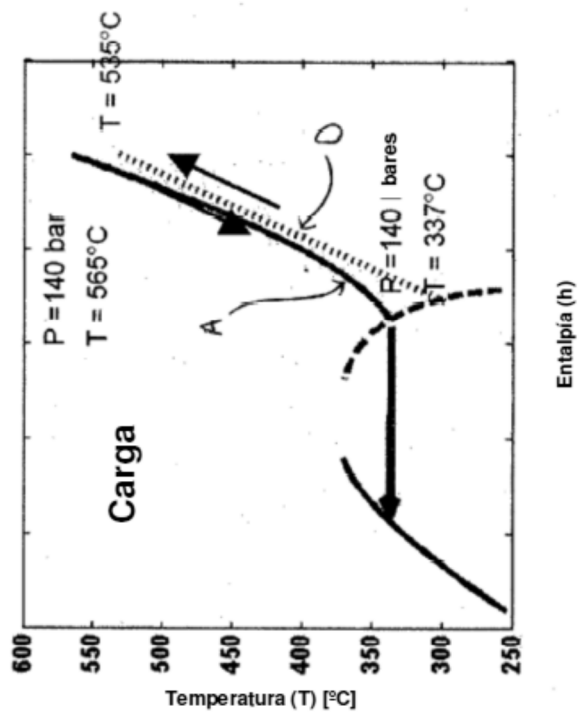


Figura 4