

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 742 297**

51 Int. Cl.:

**F01K 3/12** (2006.01)

**F01K 13/02** (2006.01)

**F22B 1/00** (2006.01)

**F22B 35/00** (2006.01)

**F28D 9/00** (2006.01)

**F28D 20/00** (2006.01)

**F28F 3/04** (2006.01)

**F28F 27/00** (2006.01)

**G05D 23/19** (2006.01)

**F03G 6/06** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.03.2014 E 14161207 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.06.2019 EP 2918961**

54 Título: **Control de un flujo de fluido a través de un intercambiador de calor**

30 Prioridad:

**10.03.2014 EP 14158642**

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

**13.02.2020**

73 Titular/es:

**ALFA LAVAL CORPORATE AB (50.0%)  
Box 73  
221 00 Lund, SE y  
ALFA LAVAL PACKINOX (50.0%)**

72 Inventor/es:

**ALEND, FRANCK**

74 Agente/Representante:

**VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro**

ES 2 742 297 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

Control de un flujo de fluido a través de un intercambiador de calor

### 5 **Campo técnico**

La invención se refiere a un método para controlar un flujo de fluido en una planta térmica solar, lo que el fluido fluye a través de un intercambiador de calor de placas que tiene dos canales de fluido para el paso de dos fluidos a través del intercambiador de calor, de tal manera que el calor se transfiere entre los fluidos. Un regulador de flujo está dispuesto para regular cualquiera de los flujos del primer fluido y el segundo fluido.

A partir del documento EP 2 275 649 A1 se conoce un método según el preámbulo de la reivindicación 1.

### 15 **Antecedentes de la técnica**

Hoy en día existen muchos tipos diferentes de intercambiadores de calor de placas y se emplean en diversas aplicaciones dependiendo de su tipo. Generalmente, un intercambiador de calor tiene al menos un primer canal y un segundo canal para un primer fluido y un segundo fluido, respectivamente. El primer fluido ingresa al primer canal a través de un primer puerto de entrada, pasa a través del primer canal y sale del canal a través de un primer puerto de salida. El segundo fluido ingresa al segundo canal a través de un segundo puerto de entrada, pasa a través del segundo canal y sale del canal a través de un segundo puerto de salida. Los canales pueden tener, cada uno, la forma de varios canales múltiples, y el primer y el segundo canal están separados entre sí de manera que los fluidos no se mezclan. El flujo de fluidos es concurrente o a contracorriente.

25 Cuando uno de los fluidos es más caliente que el otro, el calor se transfiere desde el fluido más caliente al más frío a través de elementos que forman los canales de fluido, es decir, elementos que separan los fluidos entre sí. Ejemplos de tales elementos son las placas de transferencia de calor en intercambiadores de calor de placas, los tubos en intercambiadores de calor de carcasa y tubos, las espirales en intercambiadores de calor en espiral, las tuberías de los intercambiadores de calor de tubería, etc. A menudo se desea que la transferencia de calor del fluido caliente al fluido más frío sea lo más eficiente posible.

Para lograr una transferencia eficiente de calor se han aplicado una serie de diferentes técnicas. Por ejemplo, para los intercambiadores de calor de placas, se utilizan diferentes patrones de las placas para aumentar la turbulencia y, por lo tanto, la transferencia de calor. También se utilizan diferentes materiales con diferentes propiedades de convección de calor y con diferentes espesores, etc. Otras técnicas se centran en regular el flujo de fluidos para que aumente la eficiencia de transferencia de calor.

Las medidas que se toman para aumentar la transferencia de calor de manera más eficiente pueden afectar negativamente a otros factores, como una caída de presión sobre el intercambiador de calor y la integridad estructural de los elementos que separan los fluidos entre sí. La regulación del flujo de fluidos a veces puede causar efectos no deseados en otras partes de un sistema del que forma parte el intercambiador de calor.

En la técnica anterior se describen varias técnicas para mejorar la eficiencia de transferencia de calor y muchas de hecho aumentan con éxito la transferencia de calor. Sin embargo, siempre se desean mejoras.

### 45 **Sumario**

Un objeto de la invención es superar al menos parcialmente una o más de las limitaciones identificadas anteriormente de la técnica anterior. En particular, es un objetivo proporcionar un método que pueda aumentar la eficiencia de transferencia de calor de un intercambiador de calor.

Para conseguir estos objetivos se proporciona un método para controlar un flujo de fluido a través de un intercambiador de calor. El intercambiador de calor comprende un primer canal de fluido para pasar un primer fluido a través del intercambiador de calor y un segundo canal de fluido para pasar un segundo fluido a través del intercambiador de calor, de modo que el calor se transfiere desde el primer fluido al segundo fluido cuando el primer fluido es más cálido que el segundo fluido. Se dispone un regulador de flujo para regular i) un flujo del primer fluido que pasa a través del intercambiador de calor, y/o ii) un flujo del segundo fluido que pasa a través del intercambiador de calor. El método comprende: obtener una primera temperatura del primer fluido antes de que pase a través del intercambiador de calor; obtener una segunda temperatura del primer fluido después de que haya pasado a través del intercambiador de calor; obtener una tercera temperatura del segundo fluido antes de que pase a través del intercambiador de calor; obtener una cuarta temperatura del segundo fluido después de que haya pasado a través del intercambiador de calor; determinar una primera diferencia calculando una diferencia entre la primera temperatura y la cuarta temperatura; determinar una segunda diferencia calculando una diferencia entre la segunda temperatura y la tercera temperatura; determinar un primer valor de error calculando una diferencia entre un primer valor predeterminado y la primera diferencia; determinar un segundo valor de error calculando una diferencia entre un segundo valor predeterminado y la segunda diferencia; y controlar el regulador de flujo en dependencia del primer

valor de error y el segundo valor de error.

El método es ventajoso en que es aplicable para todos los tipos de intercambiadores de calor que operan con dos fluidos independientes, donde se transfiere calor desde uno de los fluidos al otro. Esto incluye intercambiadores de calor de placa, intercambiadores de calor de tubo y carcasa, intercambiadores de calor soldados, intercambiadores de calor soldados e intercambiadores de calor donde las juntas están dispuestas entre las placas de transferencia de calor. El flujo de los fluidos puede ser concurrente o a contracorriente. El método mejora la eficiencia de un intercambiador de calor al optimizar la velocidad de flujo del fluido y mantener una variación constante o predefinida de las temperaturas de salida del fluido. Además, la eficiencia del intercambio de calor puede mejorarse mediante el método que equilibra los caudales del fluido proporcionalmente a su capacidad térmica, teniendo en cuenta los calores latentes y sensibles de cada fluido, por ejemplo, en caso de almacenamiento térmico en una planta solar térmica. El método también permite una respuesta relativamente rápida a las variaciones del proceso, puede reducir los daños mecánicos al intercambiador de calor debido a un alto gradiente térmico en el intercambiador de calor y puede, en comparación con el control manual, reducir los errores operativos.

El método puede comprender controlar el regulador de flujo para minimizar el primer valor de error y minimizar el segundo valor de error.

El método puede comprender: determinar un primer factor de corrección basado en un término proporcional del primer valor de error; determinar un segundo factor de corrección basado en un término proporcional del segundo valor de error; y controlar el regulador de flujo en dependencia del primer y segundo factores de corrección para minimizar el primer valor de error y el segundo valor de error.

El método puede comprender: determinar el primer factor de corrección basado en un término integral del primer valor de error, y determinar el segundo factor de corrección basado en un término integral del segundo valor de error.

El método puede comprender: determinar el primer factor de corrección basado en un término derivado del primer valor de error; y determinar el segundo factor de corrección basado en un término derivado del segundo valor de error.

El método puede comprender, cuando el flujo del primer fluido y el flujo del segundo fluido se invierten y cuando el primer fluido es más frío que el segundo fluido para transferir calor desde el segundo fluido al primer fluido: obtener la primera temperatura midiendo una temperatura del segundo fluido antes de que pase a través del intercambiador de calor; obtener la segunda temperatura midiendo la temperatura del segundo fluido después de que haya pasado a través del intercambiador de calor; obtener la tercera temperatura midiendo la temperatura del primer fluido antes de que pase a través del intercambiador de calor; y obtener la cuarta temperatura midiendo la temperatura del primer fluido después de que haya pasado a través del intercambiador de calor.

El primer fluido es calentado por energía solar y el segundo fluido se puede utilizar para el almacenamiento de calor. El método puede comprender entonces: transferir el segundo fluido desde un almacenamiento en frío a un almacenamiento en caliente a través del intercambiador de calor, de modo que el calor se transfiera desde el primer fluido al segundo fluido; y transferir el segundo fluido desde el almacenamiento en caliente al almacenamiento en frío a través del intercambiador de calor, cuando el flujo del primer fluido y el flujo del segundo fluido se invierten, de tal manera que el calor se transfiere desde el segundo fluido al primer fluido.

En una realización, el control del regulador de flujo en dependencia del primer valor de error y el segundo valor de error regula el flujo del segundo fluido solamente.

El término proporcional puede comprender una ganancia proporcional que tiene un valor del 0,005 al 0,35. El término integral puede comprender una ganancia integral que tiene un valor de 0,006 a 0,20. El término derivado puede comprender una ganancia derivada que tiene un valor de 0,35 a 2,0.

Según la invención se proporciona el método para controlar un flujo de fluido en una planta térmica solar. Este método comprende cualquiera de las realizaciones descritas anteriormente para controlar un flujo de fluido a través de un intercambiador de calor. La planta térmica solar comprende el intercambiador de calor, el regulador de flujo, un colector de calor para calentar el primer fluido y un almacenamiento en frío y un almacenamiento en caliente para el segundo fluido. El regulador de flujo está dispuesto para regular un flujo del segundo fluido para pasarlo en i) una primera dirección desde el almacenamiento en frío, a través del intercambiador de calor y hacia el almacenamiento en caliente y en ii) una segunda dirección desde el almacenamiento en caliente, a través del intercambiador de calor y al almacenamiento en frío. El método para operar la planta solar también comprende: controlar el regulador de flujo para minimizar el primer valor de error y el segundo valor de error cuando se pasa el segundo fluido en la primera dirección, así como cuando se pasa el segundo fluido en la segunda dirección.

El método proporcionado para controlar un flujo de fluido en una planta térmica solar comprende controlar el flujo a través de un intercambiador de calor que comprende de 200 a 900 placas de transferencia de calor, de las cuales

cada una tiene: un espesor de placa de 0,8 mm a 1,5 mm; una longitud de placa de 6 m a 14 m; una anchura de placa de 0,7 m a 2 m; un espacio de 2,5 mm a 8 mm entre las placas de transferencia de calor; y un ángulo de corrugación de 15° a 45°.

- 5 Todavía otros objetivos, características, aspectos y ventajas de la invención aparecerán a partir de la siguiente descripción detallada, así como de los dibujos.

### Breve Descripción de los Dibujos

- 10 Realizaciones de la invención se describirán ahora, a modo de ejemplo, con referencia a los siguientes dibujos esquemáticos, en los que

La figura 1 es una vista esquemática de una planta térmica solar en modo de carga cuando el medio de almacenamiento térmico es el fluido frío,

- 15 La figura 2 es una vista esquemática de la planta térmica solar de la figura 1, pero en modo de descarga cuando el medio de almacenamiento térmico es el fluido caliente,

La figura 3 es un diagrama de flujo de un método para controlar un flujo de fluido a través de un intercambiador de calor que forma parte de la planta solar térmica de las figuras 1 y 2,

- 20 La figura 4 es un diagrama de bloques de un dispositivo que implementa el método de la figura 3,  
Las figuras 5 y 6 son diagramas que muestran la velocidad de flujo y HAT/CAT cuando una planta térmica solar simulada está en modo de carga, y

Las figuras 7 y 8 son diagramas que muestran la velocidad de flujo y HAT/CAT cuando una planta térmica solar simulada está en modo de descarga.

### 25 Descripción detallada

Con referencia a la figura 1 se ilustra una planta térmica solar 1. La planta térmica solar 1 comprende cuatro circuitos 201, 202, 203, 204 que interactúan entre sí para generar electricidad a partir de la energía solar.

- 30 El primer circuito 201 circula aceite térmico (HTF)  $F_{HTF}$  y comprende un colector de calor 2, un primer intercambiador de calor 3, un segundo intercambiador de calor 6, una primera válvula 10, una segunda válvula 11 y una bomba 12 para hacer circular el HTF en el primer circuito 201.

- 35 El segundo circuito 202 circula un medio de almacenamiento térmico  $F_{MS}$  y comprende el primer intercambiador de calor 3, un almacenamiento en caliente 4 y un almacenamiento en frío 5 para el medio de almacenamiento térmico y una primera bomba 13 y una segunda bomba 14 para el transporte del medio de almacenamiento térmico en cualquier dirección entre el almacenamiento en caliente 4 y el almacenamiento en frío 5. El medio de almacenamiento es sal fundida, tal como una mezcla de 60 % de  $NaNO_3$  y 40 % de  $KNO_3$  en peso.

- 40 El tercer circuito 203 circula agua de alimentación y comprende el segundo intercambiador de calor 6, una turbina 7, un condensador 8 y una bomba 15 para hacer circular el agua de alimentación en el tercer circuito 203.

- 45 El cuarto circuito 204 circula el agua y comprende el condensador 8, una torre de enfriamiento 9 y una bomba 16 para hacer circular el agua en el cuarto circuito 204.

- 50 El colector de calor 2 tiene la forma de filas de espejos parabólicos altamente reflectantes montados en estructuras de soporte, que son inclinables alrededor de un eje que está normalmente dispuesto en la dirección norte-sur, para seguir el sol cuando se mueve de este a oeste. En una línea focal de los espejos parabólicos se montan tubos de acero inoxidable especialmente recubiertos llamados receptores. El HTF fluye a través de los receptores y puede calentarse a una temperatura de 390 °C. Exactamente a qué temperatura se calienta el HTF puede regularse, por ejemplo, mediante el caudal de la circulación del HTF en el primer circuito 201.

- 55 La energía térmica que se adquiere por el HTF en el primer circuito 201 se transfiere al agua de alimentación a través del segundo intercambiador de calor 6 para producir vapor sobrecalentado, que impulsa la turbina 7 que a su vez está acoplado a un generador (no mostrado) que genera electricidad. El vapor que sale de la turbina 7 ingresa al condensador 8 donde se condensa en un proceso de enfriamiento húmedo que extrae agua de enfriamiento de la torre de enfriamiento 9.

- 60 Es necesario el almacenamiento térmico como un amortiguador para hacerse cargo de la cobertura de nubes, la operación de la planta más allá de la puesta del sol y para satisfacer la demanda máxima de electricidad. Para lograr esto, el tamaño del colector de calor 2 es mayor que el requerido para generar una potencia eléctrica nominal de la planta térmica solar 1. El exceso de energía térmica solar disponible se utiliza para calentar una masa más alta y una tasa baja de HTF en los tubos receptores. Una cantidad predeterminada de HTF continúa hacia el segundo intercambiador de calor 6 para producir vapor sobrecalentado, mientras el exceso se alimenta al primer intercambiador de calor 3. En el primer intercambiador de calor 3, el HTF transfiere calor al medio de almacenamiento térmico, que proviene del almacenamiento en frío 5 y se pasa al almacenamiento en caliente 4,

- 65

donde se almacena.

El intercambiador de calor 3 es un intercambiador de calor convencional de placas soldadas y tiene un primer canal de fluido 35 para el paso del HTF a través del intercambiador de calor 3 y un segundo canal de fluido 36 para el paso del medio de almacenamiento térmico a través del intercambiador de calor 3. El primer canal de fluido 35 y el segundo canal de fluido 36 normalmente comprenden un número de subcanales, donde cada segundo subcanal en el primer intercambiador de calor 3 pertenece al primer canal de fluido 35 y donde cada otro, el segundo canal de fluido pertenece al segundo canal de fluido 36. De este modo, el calor se transfiere del HTF al medio de almacenamiento térmico cuando el HTF es más cálido que el medio de almacenamiento térmico.

La primera bomba 13 regula un flujo (baja tasa de masa) del medio de almacenamiento térmico que se pasa desde el almacenamiento en frío 5 al almacenamiento en caliente 4, a través del primer intercambiador de calor 3.

La figura 1 ilustra la planta térmica solar 1 cuando el colector de calor 2 genera energía en exceso, donde el HTF se alimenta al primer intercambiador de calor 3 para transferir calor al medio de almacenamiento térmico que bombea la primera bomba 13, desde el almacenamiento en frío 5, a través del primer intercambiador de calor 3 y dentro del almacenamiento en caliente 4. El HTF se alimenta luego al primer intercambiador de calor 3 a través de un primer puerto 31, pasa el primer canal de fluido 35 y sale a través de un segundo puerto 32. El medio de almacenamiento térmico se alimenta al primer intercambiador de calor 3 a través de un tercer puerto 33, pasa el primer canal de fluido 35 y sale a través de un cuarto puerto 34.

El exceso de energía, o calor, en el HTF es a través del primer intercambiador de calor 3 transferido al medio de almacenamiento térmico que se alimenta desde el almacenamiento en frío 5, en el primer intercambiador de calor 3 y para el almacenamiento en caliente 4 mediante la primera bomba 13. La primera bomba 13 recibe una señal de control  $U(t)$  que regula la velocidad de la bomba, es decir, regula el caudal másico que la primera bomba 13 proporciona al medio de almacenamiento térmico para bombearlo desde el almacenamiento en frío 5 al almacenamiento en caliente 4. Se dice que la planta solar térmica 1 está en modo de carga cuando el exceso de energía se transfiere al medio de almacenamiento térmico desde el HTF.

La figura 2 ilustra la planta térmica solar 1 durante una cobertura de nubes completa o después de la puesta del sol, donde la primera válvula 10 y la segunda válvula 11 se ajustan de tal manera que el flujo de HTF a través del colector de calor 2 está cerrado y donde la dirección del flujo de HTF a través del primer intercambiador de calor 3 y el segundo intercambiador de calor 6 se invierte, lo que se puede lograr mediante la bomba 12 en el primer circuito 201. La segunda bomba 14 bombea entonces el medio de almacenamiento térmico desde el almacenamiento en caliente 4, hasta el primer intercambiador de calor 3 del que sale y luego entra en el almacenamiento en frío 5. En este proceso, el HTF recibe calor del medio de almacenamiento térmico de modo que, en el segundo intercambiador de calor 6, puede calentar el agua de alimentación para producir vapor sobrecalentado que acciona la turbina 7. Además, en caso de que el HTF fluya a través del colector de calor 2 pero no se caliente lo suficiente y cuando haya fluido térmico disponible en el almacenamiento caliente 4, entonces el calor puede transferirse desde el medio fluido térmico al HTF para aumentar la generación de energía.

La segunda bomba 14 recibe una señal de control  $U(t)$  que regula la velocidad de la bomba, es decir, regula el caudal másico que la segunda bomba 14 proporciona al medio de almacenamiento térmico para bombearlo desde el almacenamiento en caliente 4 al almacenamiento en frío 5. Se dice que la planta solar térmica 1 está en modo de descarga cuando la energía se transfiere del medio de almacenamiento térmico al HTF.

La operación y la estructura de la planta térmica solar 1 y sus componentes descritos hasta ahora se implementan de acuerdo con los principios y técnicas conocidas y cualquier tipo de componentes que son adecuados para el uso descrito anteriormente puede emplearse.

Es importante asegurarse de que todos los componentes de la planta térmica solar 1 operan de manera eficiente, incluyendo el primer intercambiador de calor 3. Para mejorar la eficiencia del primer intercambiador de calor 3, es preferible controlar los caudales del HTF y el medio de almacenamiento térmico, por ejemplo, para mantener temperaturas constantes o una variación de temperatura predeterminada del HTF y el medio de almacenamiento térmico cuando el fluido sale del primer intercambiador de calor 3. También se desea mejorar la eficiencia del intercambio de calor en el primer intercambiador de calor 3 equilibrando los caudales del HTF y el medio de almacenamiento térmico proporcionalmente a su capacidad térmica, teniendo en cuenta los calores latentes y sensibles de cada fluido.

Tal control de flujo es relevante para procesos estables, así como para procesos más transitorios, donde se produce el cambio regular de los flujos o/y temperaturas de entrada o/y presiones de entrada, como en el proceso de intercambio de calor realizado en la planta térmica solar 1. Para el proceso transitorio en la planta solar térmica 1, se utiliza el control automático de la velocidad de flujo para mejorar la eficiencia general de la unidad, es decir, la eficiencia total de la transferencia de calor, incluso en el modo de carga y el modo de descarga. Esto presenta ventajas como el control de fluidos que reacciona adecuadamente a las variaciones en los flujos de fluidos en la planta térmica solar 1, y una mayor eficiencia general que reduce los daños mecánicos a los componentes debido a

los altos gradientes térmicos en, por ejemplo, el primer intercambiador de calor 3. El control automático de la velocidad de flujo a menudo también reduce los errores operativos que, de lo contrario, podrían tener consecuencias negativas para el proceso y la vida útil de los diversos componentes de la planta solar térmica 1.

5 El control automático de velocidad de flujo se implementa como un método para controlar un flujo de fluido a través del primer intercambiador de calor 3. El control se basa en mediciones de temperatura y proporciona un control preciso, ya que las mediciones de temperatura son un tipo de medición preciso, especialmente en condiciones de proceso en tiempo real y en comparación con, por ejemplo, el control que usaría mediciones de flujo como entrada. Una medición de temperatura también es un buen indicador para definir una eficiencia térmica del primer intercambiador de calor 3. Por lo tanto, mediante el uso de mediciones de temperatura, el control es accionado directamente por los datos que deberían mejorarse.

15 El método para controlar el flujo de fluido a través del primer intercambiador de calor 3 se lleva a cabo por una unidad de control 17 que controla la primera bomba 13 cuando la planta térmica solar 1 está en el modo de carga y controla la segunda bomba 14 cuando la planta térmica solar 1 está en el modo de descarga. Para lograr esto, la unidad de control 17 envía la señal de control  $U(t)$  que regula la velocidad de la bomba 13, 14 respectiva. En este contexto, las bombas 13, 14 operan como un regulador de flujo, ya que regulan el flujo del medio de almacenamiento térmico. En lugar de usar las bombas ilustradas como reguladores de flujo, se puede usar una configuración de bomba y/o válvulas de control diferentes.

20 Volviendo a la figura 1, el método requiere la introducción de datos que se reciben desde los sensores de temperatura 21, 22, 23, 24 que leen los valores de temperatura en los puertos 31, 32, 33, 34 del primer intercambiador de calor 3. Específicamente, un primer sensor de temperatura 21 mide una temperatura  $T_{calienteentrada}$  en el primer puerto 31, un segundo sensor de temperatura 22 mide una temperatura  $T_{calientesalida}$  en el segundo puerto 32, un tercer sensor de temperatura 23 que mide una temperatura  $T_{fríaentrada}$  en el tercer puerto 33 y un cuarto sensor de temperatura 24 mide una temperatura  $T_{fríasalida}$  en el cuarto puerto 34.

30 El HTF que entra y sale a través del primer y segundo puertos 31, 32 del primer intercambiador de calor 3 se conoce como un "primer fluido"  $F_{HTF}$  y el medio de almacenamiento térmico que entra y sale a través del tercer y cuarto puertos 33, 34 del primer intercambiador de calor 3 se conoce como un "segundo fluido"  $F_{MS}$ . Las lecturas de temperatura medidas  $T_{calienteentrada}$ ,  $T_{calientesalida}$ ,  $T_{fríaentrada}$ ,  $T_{fríasalida}$  se transmiten a la unidad de control 17, de modo que la unidad de control 17 obtiene las lecturas como una primera temperatura  $T_{calienteentrada}$  del primer fluido  $F_{HTF}$  antes de que pase el intercambiador de calor 3, como una segunda temperatura  $T_{calientesalida}$  del primer fluido  $F_{HTF}$  después de que haya pasado a través del intercambiador de calor 3, como una tercera temperatura  $T_{fríaentrada}$  del segundo fluido  $F_{MS}$  antes de que pase a través del intercambiador de calor 3, y como una cuarta temperatura  $T_{fríasalida}$  del segundo fluido  $F_{MS}$  después de que haya pasado a través del intercambiador de calor 3.

40 En detalle y con referencia adicional a la figura 9, la unidad de control 17 también comprende una unidad central de proceso 171 (CPU), una interfaz de entrada/salida electrónica 172 (E/S) y una unidad de memoria 173. La unidad de procesamiento 17 está conectada a través de su interfaz 172 y a través de conectores convencionales (no mostrados) a los sensores de temperatura 21, 22, 23, 24 y al regulador de flujo en forma de la primera bomba 13 y la segunda bomba 14.

45 Como se ha indicado, la unidad de procesamiento 17 puede obtener la primera, segundo, tercera y cuarta lecturas de temperatura  $T_{calienteentrada}$ ,  $T_{calientesalida}$ ,  $T_{fríaentrada}$ ,  $T_{fríasalida}$  y puede, de manera intermitente o continua, regular un flujo del segundo fluido  $F_{MS}$  pasado a través del intercambiador de calor 3 enviando la señal de control  $U(t)$  a cualquiera de las bombas 13, 14. La unidad de control 17 también puede regular el flujo del primer fluido  $F_{HTF}$  que pasa a través del intercambiador de calor 3 enviando una señal de control correspondiente a la bomba 12 que alimenta el HTF.

50 Volviendo a la unidad de control 17, la CPU 171 está conectada a y controla la interfaz de entrada/salida electrónica 172 y almacena los datos en lecturas de datos respectivamente de la unidad de memoria 173. La CPU 171 es una unidad central de procesamiento o microprocesador de tipo convencional y representa la porción de la unidad de control 17 que es capaz de llevar a cabo instrucciones de un programa informático que se almacena, por ejemplo, en la unidad de memoria 173. La CPU 171 es el elemento principal que realiza o inicia las funciones de la unidad de control de la unidad de procesamiento 17, y en particular el método para controlar el flujo de fluido a través del primer intercambiador de calor 3, que se describe con más detalle a continuación. La interfaz de entrada/salida 172 permite que un operador ingrese parámetros de operación y varios valores para ser usados por la CPU 171. Tales valores son normalmente valores predeterminados que pueden usarse en el método. La interfaz de entrada/salida 172 permite que la unidad de control 17 envíe información sobre el control del flujo de fluido y las lecturas de temperatura de los sensores 21, 22, 23, 24.

65 Con referencia a la figura 3 se ilustra un diagrama de flujo de un método realizado por la unidad de control 17. El método gira en torno al inicio de una señal de control que mejora la eficiencia de transferencia de calor del primer intercambiador de calor 3. El método generalmente está automatizado y funciona ejecutando repetidamente una secuencia de etapas 101-116. En el ejemplo ilustrado, la unidad de control 17 puede implementar el método, es

decir, la unidad de control 17 está configurada para realizar las etapas 101-116. Esto significa que la planta térmica solar 1 también está configurada para realizar las etapas 101-116, ya que comprende la unidad de control 17.

5 El método se ejemplifica en la planta térmica solar 1 de la figura 1 cuando está en el modo de carga y en la planta térmica solar 1 cuando está en el modo de descarga como se ilustra en la figura 2. A continuación, el "fluido caliente" se refiere al fluido que, cuando ingresa al primer intercambiador de calor 3, es más cálido que el otro fluido cuando el otro fluido ingresa al primer intercambiador de calor 3. El otro fluido es entonces el "fluido frío". Por lo tanto, cuando la planta solar térmica 1 está en modo de carga, el fluido caliente es el HTF y el fluido frío es el medio de almacenamiento térmico. Cuando la planta térmica solar 1 está en el modo de descarga, el fluido caliente es el medio de almacenamiento térmico y el fluido frío es el HTF. El fluido caliente proporciona lecturas de temperatura  $T_{calienteentrada}$  y  $T_{calientesalida}$ , mientras que el fluido frío proporciona lecturas de temperatura  $T_{fríaentrada}$  y  $T_{fríasalida}$ , ver las figuras 1 y 2.

15 En una primera etapa 101, la primera, segunda, tercera y cuarta lecturas de temperatura  $T_{calienteentrada}$ ,  $T_{calientesalida}$ ,  $T_{fríaentrada}$ ,  $T_{fríasalida}$  se obtienen mediante la unidad de control 17 de los sensores de temperatura 21, 22, 23, 24.

20 En una etapa siguiente 102 una denominada temperatura aproximación caliente  $HAT$ , que se refiere como una primera diferencia  $HAT$ , se calcula mediante el cálculo de una diferencia entre la primera temperatura  $T_{calienteentrada}$  y la cuarta temperatura  $T_{fríasalida}$  (es decir, la diferencia entre la temperatura de entrada del fluido caliente y temperatura de salida del fluido frío):

$$HAT = T_{calienteentrada} - T_{fríasalida}$$

25 En una siguiente etapa 103 una denominada temperatura de aproximación fría  $CAT$ , que se refiere como una segunda diferencia  $CAT$ , se calcula mediante el cálculo de una diferencia entre la segunda temperatura  $T_{calientesalida}$  y la tercera temperatura  $T_{fríaentrada}$  (es decir, la diferencia entre la temperatura exterior del fluido caliente y la temperatura interior del fluido frío):

$$CAT = T_{calientesalida} - T_{fríaentrada}$$

30 En una siguiente etapa 104, un primer valor de error  $\varepsilon_{HAT}$  se determina calculando una diferencia entre un primer valor predeterminado  $HAT_{objetivo}$  y la primera diferencia  $HAT$ . El valor predeterminado  $HAT_{objetivo}$  es un valor de temperatura de aproximación en caliente objetivo (deseado) y puede ajustarse antes o durante la operación de la planta solar térmica 1. El primer valor de error  $\varepsilon_{HAT}$  se determina, así como la diferencia entre el objetivo y el valor actual de  $HAT$ :

$$\varepsilon_{HAT} = (HAT_{objetivo} - HAT)$$

40 En una etapa siguiente 105 un segundo valor de error  $\varepsilon_{CAT}$  se determina calculando una diferencia entre un segundo valor predeterminado  $CAT_{objetivo}$  y la segunda diferencia  $CAT$ . El valor predeterminado  $CAT_{objetivo}$  es un valor de temperatura de aproximación en frío objetivo (deseado) y puede ajustarse antes o durante la operación de la planta solar térmica 1.  $CAT_{objetivo}$  puede estar relacionado con el valor de  $HAT_{objetivo}$  y cada uno de  $CAT_{objetivo}$  y  $HAT_{objetivo}$  puede depender de las características del primer intercambiador de calor 3. El segundo valor de error  $\varepsilon_{CAT}$  se determina, así como la diferencia entre el objetivo y el valor actual de  $CAT$ :

$$\varepsilon_{CAT} = (CAT_{objetivo} - CAT)$$

50 En una etapa siguiente 106 se determina que un primer conjunto de etapas 107 y 108 se llevan a cabo si la planta térmica solar 1 está en el modo de carga, es decir, si el HTF es el "fluido caliente" que deberá transferir calor al medio de almacenamiento térmico, que entonces es el "fluido frío". Si este no es el caso, es decir, cuando la planta solar térmica 1 está en el modo de descarga, se realiza un segundo conjunto de etapas 109 y 110 y luego el medio de almacenamiento térmico es el "fluido caliente" que transferirá calor al HTF que entonces es el "fluido frío".

55 Como parte de las etapas 107, 108, 109 y 110 una temperatura derivado aproximación de calor  $\frac{d \varepsilon_{HAT}}{dt}$  se calcula en una etapa de tiempo  $T_s$ :

$$\frac{d \varepsilon_{HAT}}{dt} = \frac{HAT(t) - HAT(t - T_s)}{T_s}$$

60 Un derivado de temperatura de aproximación fría  $\frac{d \varepsilon_{CAT}}{dt}$  también se calcula en una etapa de tiempo  $T_s$ :

$$\frac{d \varepsilon_{CAT}}{dt} = \frac{CAT(t) - CAT(t - T_s)}{T_s}$$

Un error integral HAT (temperatura de aproximación caliente)  $\int_{t-\Delta t_{int}}^t \varepsilon_{HAT} dt$  en el período  $[t - \Delta t_{int}; t]$  también se calcula. Esta integral se puede calcular numéricamente mediante la siguiente suma:

$$\sum_{n=1}^N \left( \frac{\varepsilon_{HAT}(t-(n-1)Ts) + \varepsilon_{HAT}(t-nTs)}{2} \right) \times Ts, \quad \text{con } N = \text{int} \left( \frac{\Delta t_{int}}{Ts} \right).$$

Un error integral CAT (temperatura de aproximación fría)  $\int_{t-\Delta t_{int}}^t \varepsilon_{CAT} dt$  en el período  $[t - \Delta t_{int}; t]$  también se calcula. Esta integral se puede calcular numéricamente mediante la siguiente suma:

$$\sum_{n=1}^N \left( \frac{\varepsilon_{CAT}(t-(n-1)Ts) + \varepsilon_{CAT}(t-nTs)}{2} \right) \times Ts, \quad \text{con } N = \text{int} \left( \frac{\Delta t_{int}}{Ts} \right).$$

En estos cálculos  $t$  es el tiempo actual,  $\Delta t_{int}$  es el periodo de cálculo de las integrales de CAT y HAT (puede tomarse igual a 20 segundos, pero podría ajustarse).  $\alpha$  es un coeficiente proporcional,  $\beta$  es un coeficiente derivado y  $\gamma$  es un coeficiente integral, mientras que  $Ts$  es una etapa de tiempo en segundos.  $Ts$  puede ser, por ejemplo, 5 segundos y puede ajustarse.

Cuando se realizan las etapas 107 y 108, se calcula un factor de corrección de aproximación en caliente  $Cf_{HAT}$  en la etapa 107 como:

$$Cf_{HAT} = \alpha \varepsilon_{HAT} + \beta \frac{d \varepsilon_{HAT}}{dt} + \frac{\gamma}{\Delta t_{int}} \int_{t-\Delta t_{int}}^t \varepsilon_{HAT} dt$$

mientras que un factor de corrección de aproximación en frío  $Cf_{CAT}$  se calcula en la etapa 108 como:

$$Cf_{CAT} = - \left( \alpha \varepsilon_{CAT} + \beta \frac{d \varepsilon_{CAT}}{dt} + \frac{\gamma}{\Delta t_{int}} \int_{t-\Delta t_{int}}^t \varepsilon_{CAT} dt \right)$$

Por lo tanto, la etapa 107 comprende determinar un factor de corrección aproximación de calor, también denominado como un primer factor de corrección  $Cf_{HAT}$ , basado en un término proporcional  $\alpha \varepsilon_{HAT}$  del primer error valor  $\varepsilon_{HAT}$ , basado en un término derivado  $\beta \frac{d \varepsilon_{HAT}}{dt}$  del primer valor de error  $\varepsilon_{HAT}$  y basado en un término integral  $\gamma \int \varepsilon_{HAT}$  del primer valor de error  $\varepsilon_{HAT}$ . La etapa 108 comprende determinar un factor de corrección de aproximación en frío, también denominado segundo factor de corrección  $Cf_{CAT}$ , basado en un término proporcional  $\alpha \varepsilon_{CAT}$  del segundo valor de error  $\varepsilon_{CAT}$ , basado en un término derivado  $\beta \frac{d \varepsilon_{CAT}}{dt}$  del segundo valor de error  $\varepsilon_{CAT}$  y basado en un término integral  $\gamma \int \varepsilon_{CAT}$  del segundo valor de error  $\varepsilon_{CAT}$ .

Cuando se realizan las etapas 109 y 110, se calcula el factor de corrección de aproximación en caliente  $Cf_{HAT}$  en la etapa 109 como:

$$Cf_{HAT} = - \left( \alpha \varepsilon_{HAT} + \beta \frac{d \varepsilon_{HAT}}{dt} + \frac{\gamma}{\Delta t_{int}} \int_{t-\Delta t_{int}}^t \varepsilon_{HAT} dt \right)$$

mientras que el factor de corrección de aproximación en frío  $Cf_{CAT}$  se calcula en la etapa 110 como:

$$Cf_{CAT} = \alpha \varepsilon_{CAT} + \beta \frac{d \varepsilon_{CAT}}{dt} + \frac{\gamma}{\Delta t_{int}} \int_{t-\Delta t_{int}}^t \varepsilon_{CAT} dt$$

En los cálculos anteriores  $\alpha \varepsilon_{HAT}$  es un término proporcional y  $\alpha$  es una ganancia proporcional (coeficiente) de este término.  $\alpha$  puede tener un valor de 0,005 a 0,35.  $\beta \frac{d \varepsilon_{CAT}}{dt}$  es un término derivado y  $\beta$  es una ganancia derivada (coeficiente) de este término.  $\beta$  puede tener un valor de 0,35 a 2,0.  $\gamma \int \varepsilon_{HAT}$  es un término integral (coeficiente) y  $\gamma$  es una ganancia integral de este término.  $\gamma$  puede tener un valor de 0,006 a 0,20.

En una siguiente etapa 111 un factor de corrección se determina  $Cf$ , que el factor  $Cf$  se va a aplicar en la señal de control  $U(t)$  para las bombas 13, 14, también conocido como parámetro de control  $U(t)$ , es decir, se utiliza para controlar el caudal del medio de almacenamiento térmico. En el ejemplo de las figuras 1 y 2, la señal de control  $U(t)$  controla la velocidad de la bomba, pero también podría, dependiendo de la implementación, controlar la posición de la válvula de control o algún otro medio de control de flujo de fluido. El factor de corrección  $Cf$  se calcula como:

$$Cf = \frac{(Cf_{HAT} + Cf_{CAT})}{2}$$

5 Las etapas anteriores pueden realizarse en cada etapa de tiempo  $T_s$ . Para evitar inestabilidades y problemas numéricos, se aplica el siguiente límite:

$$Cf \in [-1; -0,005] \cup [0] \cup [0,005; 0,999]$$

10 Por lo tanto, en una etapa siguiente 112 se realizan las siguientes limitaciones y ajustes correspondientes:

si  $Cf > 0,99$  entonces  $Cf = 0,99$   
 si  $Cf < -1$  entonces  $Cf = -1$   
 si  $abs(Cf) < 0,005$  entonces  $Cf = 0$

15 En una siguiente etapa 113 se determina si el factor de corrección  $Cf$  es mayor o igual a cero. Si este es el caso, la señal de control  $U(t)$  en la etapa 114 se determina como:

$$U(t) = U(t - T_s) \times (1 + Cf) \text{ (cuando } Cf \leq 0)$$

20 Si el factor de corrección  $Cf$  es menor que cero, entonces la señal de control  $U(t)$  se determina en la etapa 115 como:

$$U(t) = \frac{U(t-T_s)}{(1-Cf)} \text{ (cuando } Cf > 0).$$

25 En la última etapa 116 la señal de control  $U(t)$  es utilizada por la unidad de control 17 para controlar la primera bomba 13 si la planta térmica solar 1 está en el modo de carga, o para controlar la segunda bomba 14 si la planta térmica solar 1 está en el modo de descarga. El valor máximo de  $U(t)$  está limitado al valor máximo permitido por la bomba relevante y por la planta térmica solar 1 (capacidad, velocidades máximas de la bomba, etc.). Dado que el método incluye minimizar el primer valor de error  $\varepsilon_{HAT}$  y el segundo valor de error  $\varepsilon_{CAT}$ , se deduce que el control comprende controlar el regulador de flujo en forma de cualquiera de las bombas 13 y 14 en dependencia del primer valor de error  $\varepsilon_{HAT}$  y el segundo valor de error  $\varepsilon_{CAT}$ . En una realización alternativa, el control se realiza regulando el flujo del HTF a través del intercambiador de calor en lugar del flujo del medio de almacenamiento térmico, lo que significa que el control puede comprender controlar el regulador de flujo en forma de bomba 12 en dependencia del primer valor de error  $\varepsilon_{HAT}$  y el segundo valor de error  $\varepsilon_{CAT}$ . Sin embargo, se prefiere controlar el flujo del medio de almacenamiento térmico.

30 Dado que también se aplican factores de corrección, el control 116 del regulador de flujo en forma de bombas 13 y 14 depende también del primer y segundo factores de corrección  $Cf_{HAT}$ ,  $Cf_{CAT}$ , lo que minimiza el primer valor de error  $\varepsilon_{HAT}$  así como el segundo valor de error  $\varepsilon_{CAT}$ .

35 El método y el control 116 del regulador de flujo 13, 14 para reducir al mínimo el primero y segundo valores de error  $\varepsilon_{HAT}$  y  $\varepsilon_{CAT}$  se realiza al pasar el segundo fluido (medio de almacenamiento térmico)  $F_{MS}$  en la primera dirección, cuando la planta térmica solar está en el modo de carga, así como cuando pasa el segundo fluido  $F_{MS}$  en la segunda dirección cuando la planta térmica solar está en el modo de descarga.

40 Cuando la planta térmica solar está en el modo de descarga, entonces el flujo del primer fluido  $F_{HTF}$  (HTF) y el flujo del segundo fluido  $F_{MS}$  a través del primer intercambiador de calor se invierten en comparación con cuando la planta 1 está en el modo de carga. Luego, en la etapa 101, la primera temperatura  $T_{calienteentrada}$  se obtiene midiendo la temperatura del segundo fluido  $F_{MS}$  antes de que pase a través del intercambiador de calor 3, la segunda temperatura  $T_{calientesalida}$  se obtiene midiendo la temperatura del segundo fluido  $F_{MS}$  después de ha pasado a través del intercambiador de calor 3, la tercera temperatura  $T_{friaentrada}$  se obtiene midiendo la temperatura del primer fluido  $F_{HTF}$  antes de que pase por el intercambiador de calor 3, y la cuarta temperatura  $T_{friasalida}$  se obtiene midiendo la temperatura del primer fluido  $F_{MS}$  después de que haya pasado por el intercambiador de calor 3.

45 Para la gestión de tanto el modo de carga y el modo de descarga de la planta térmica solar 1, el método incluye la transferencia de la segunda fluido  $F_{MS}$  desde el almacenamiento en frío 5 al almacenamiento en caliente 4 a través del intercambiador de calor 3, de manera que el calor se transfiere desde el primer fluido  $F_{HTF}$  hasta el segundo fluido  $F_{MS}$ , y la transferencia del segundo fluido  $F_{MS}$  desde el almacenamiento en caliente 4 al almacenamiento en frío 3 a través del intercambiador de calor 3, de modo que el calor se transfiere desde el segundo fluido  $F_{MS}$  al primer fluido  $F_{HTF}$ , cuando se invierte el flujo del primer fluido  $F_{HTF}$  y el flujo del segundo fluido  $F_{MS}$ .

50 Por lo tanto, para poner en práctica el control automático del flujo del medio de almacenamiento térmico, las mediciones necesarias son temperaturas de entrada y de salida del fluido caliente, así como temperaturas de

entrada y salida del fluido frío. Esto significa que el control no necesita conocer el caudal del fluido caliente o el caudal del fluido frío. Este método proporcionará un control del caudal para mantener el HAT lo más cerca posible de la  $HAT_{objetivo}$  y la CAT lo más cerca posible de la  $CAT_{objetivo}$ . Esto se hará controlando el flujo de un fluido que podría estar frío o caliente, pero que normalmente es el medio de almacenamiento térmico.

El método es similar al control que emplea el denominado control PID (control proporcional derivado integral) y está optimizado para un intercambiador de calor como el primer intercambiador de calor 3 cuando está dispuesto en una planta térmica solar del tipo ejemplificado. El método puede implementarse directamente en sistemas de control distribuido convencionales que se usan comúnmente para controlar procesos en industrias. La unidad de control 17 puede ser, en sí misma, un sistema de control distribuido.

El valor predeterminado  $HAT_{objetivo}$  tiene un valor que puede determinarse empíricamente y depende del tipo del primer intercambiador de calor 3, incluyendo su estructura, tamaño y otras propiedades que tiene normalmente. El valor predeterminado  $CAT_{objetivo}$  tiene un valor que también puede determinarse empíricamente y que también depende del tipo del primer intercambiador de calor 3. Cada uno de la  $HAT_{objetivo}$  y la  $CAT_{objetivo}$  se puede establecer en cero. Incluso si esto no siempre representa valores realistas, el método aún puede usarse con éxito para controlar el flujo del medio de almacenamiento térmico. Los valores comunes para  $HAT_{objetivo}$  y  $CAT_{objetivo}$  son de 1 - 5 °C.

En general, el método de acuerdo con las diversas realizaciones descritas en este documento puede implementarse por un dispositivo de procesamiento de datos, tales como la unidad de control 17, que está conectada a las bombas 13, 14 y, opcionalmente, la bomba 12 para el control de las mismas enviando la señal de control  $U(t)$ . La unidad de control 17 también está conectada a los sensores de temperatura 21, 22, 23, 24 para adquirir lecturas de temperatura  $T_{calienteentrada}$ ,  $T_{calientesalida}$ ,  $T_{fríaentrada}$ ,  $T_{fríasalida}$ .

La figura 4 muestra un ejemplo de un dispositivo de procesamiento de datos 17' configurado para implementar el método de la figura 3. El dispositivo 17' incluye una entrada 172a para recibir las lecturas de temperatura de los sensores 21, 22, 23, 24 y otra información tal como el modo de la planta térmica solar 1 (modo de carga o modo de descarga, aunque esto puede calcularse comparando temperaturas de entrada de fluido) y otros parámetros que se utilizan en el método. El dispositivo 17' incluye además un módulo (o medios) de obtención 301 para obtener la lectura de temperatura en la etapa 101, un módulo (o medios) de cálculo 302 para determinar  $HAT$  en la etapa 102, un módulo (o medios) de cálculo 303 para determinar  $CAT$  en la etapa 103, un módulo de cálculo (o medios) 304 para determinar  $\epsilon_{HAT}$  en la etapa 104, un módulo de cálculo (o medios) 305 para determinar  $\epsilon_{CAT}$  en la etapa 105, un módulo de determinación (o medios) 306 para determinar si el segundo fluido  $F_{MS}$  es el fluido frío en la etapa 106, cuatro módulos (o medios) de cálculo 307, 308, 309, 310 para determinar  $Cf_{HAT}$  y  $Cf_{CAT}$  en las etapas 107, 108, 109, 110, un módulo (o medios) de cálculo 311 para determinar  $Cf$  en la etapa 111, un módulo (o medios) de determinación 312 para establecer  $Cf$  como en la etapa 112, un módulo (o medios) de determinación 313 para determinar si  $Cf$  es menor o igual a cero que en la etapa 113, dos módulos (o medios) de determinación de parámetros de control 314, 315 para calcular el parámetro de control  $U(t)$  como en las etapas 114, 115 y un módulo (o medios) de control 316 que controla las bombas 13, 14 y opcionalmente la bomba 12 de acuerdo con la etapa 116 y como se describe en conexión con las figuras 1, 2 y 3.

El dispositivo 17' también puede tener una salida 172b para emitir el parámetro de control  $U(t)$  para regular las bombas. Como se indica en la figura 4, el dispositivo 17' puede estar conectado eléctricamente a una unidad de memoria electrónica 173', por ejemplo, para recuperar los valores  $HAT_{objetivo}$  y  $CAT_{objetivo}$ , los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , la etapa de tiempo  $T_s$ , el período  $\Delta t_{int}$  y cualquier otro parámetro que pueda ser utilizado por el método y que pueda almacenarse en la unidad de memoria 173'.

El dispositivo 17' puede ser implementado por software de propósito especial (o firmware) que se ejecuta en uno o más dispositivos informáticos de propósito general o de propósito especial. En este contexto, debe entenderse que cada "módulo" o "medio" de dicho dispositivo informático se refiere a un equivalente conceptual de una etapa del método; no siempre hay una correspondencia uno a uno entre elementos/medios y piezas particulares de rutinas de hardware o software. Una pieza de hardware a veces comprende diferentes módulos/medios. Por ejemplo, una unidad de procesamiento puede servir como un módulo/medio cuando se ejecuta una instrucción, pero puede servir como otro módulo/medio cuando se ejecuta otra instrucción. Además, un módulo/medio puede implementarse mediante una instrucción en algunos casos, pero mediante una pluralidad de instrucciones en algunos otros casos. Naturalmente, es concebible que uno o más módulos (medios) sean implementados completamente por componentes de hardware analógico.

El software del dispositivo 17' puede incluir una o más unidades de procesamiento controlado (ver 171 de las figuras 1 y 2), por ejemplo, una CPU ("unidad central de procesamiento"), un DSP ("Procesador de Señal Digital"), un ASIC ("Circuito integrado específico de la aplicación"), componentes discretos analógicos y/o digitales, o algún otro dispositivo lógico programable, como una FPGA ("matriz de puerta programable de campo"). El dispositivo 17' puede incluir además una memoria del sistema y un bus del sistema que acopla varios componentes del sistema, incluyendo la memoria del sistema, a la unidad de procesamiento. El bus del sistema puede ser cualquiera de varios tipos de estructuras de bus que incluyen un bus de memoria o controlador de memoria, un bus periférico y un bus

local usando cualquiera de varias arquitecturas de bus. La memoria 130 del sistema puede incluir medios de almacenamiento de ordenador en forma de memoria volátil y/o no volátil, tal como memoria de solo lectura (ROM), memoria de acceso aleatorio (RAM) y memoria flash. El software de propósito especial, los valores predeterminados y cualquier otro dato necesario durante la ejecución, pueden almacenarse en la memoria del sistema o en otro medio de almacenamiento informático volátil/no volátil extraíble/no extraíble que está incluido o es accesible para el dispositivo informático, como medios magnéticos, medios ópticos, tarjetas de memoria flash, cinta digital, RAM de estado sólido, ROM de estado sólido, etc. La unidad de procesamiento del dispositivo 17' puede incluir una o más interfaces de comunicación, como una interfaz en serie, una interfaz en paralelo, una interfaz USB, una interfaz inalámbrica, un adaptador de red, etc., así como uno o más dispositivos de adquisición de datos, como un convertidor A/D. El software de propósito especial se puede proporcionar al dispositivo 17' en cualquier medio adecuado legible por ordenador, incluyendo un medio de grabación y una memoria de solo lectura. Normalmente, el dispositivo 17' corresponde a la unidad de control 17 mostrada en las figuras 1 y 2, mientras que la entrada 172a y la salida 172b corresponden a la interfaz de entrada/salida 172 y la unidad de memoria 173' corresponde a la unidad de memoria 173.

Hay que señalar que la unidad de control 17 está configurada a propósito para poner en práctica las etapas descritas en relación con la figura 3, por ejemplo, por tener acceso a las instrucciones de software que implementan las etapas, e incorpora propiedades tanto únicas que distingue a la unidad de control 17 de otras unidades de control de la técnica anterior.

Los coeficientes  $\alpha$  (la ganancia proporcional),  $\beta$  (la ganancia derivativa) y  $\gamma$  (la ganancia integral) pueden tener valores como se indica anteriormente, es decir,  $\alpha = 0,005$  a  $0,35$ ,  $\beta = 0,35$  a  $2,0$  y  $\gamma = 0,006$  a  $0,20$ .

Los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  normalmente dependen de las condiciones operativas de la planta térmica solar 1, como la calidad de los fluidos, los caudales y las temperaturas, y en la estructura y geometría del primer intercambiador de calor 3, como el tamaño, número de placas, etc. A continuación, el primer intercambiador de calor 3 es un intercambiador de calor que comprende de 200 a 900 placas de transferencia de calor, cada una de las cuales tiene: i) un espesor de placa de 0,8 mm a 1,5 mm, ii) una longitud de placa de 6 m a 14 m, iii) una anchura de placa de 0,7 m a 2 m, iv) un espacio de 2,5 mm a 8 mm entre las áreas de transferencia de calor de las placas de transferencia de calor, y v) un ángulo de corrugación de 15° a 45°. En este contexto, como se conoce comúnmente, un ángulo de corrugación puede ser el ángulo por el cual se inclinan las corrugaciones de la placa de transferencia de calor en relación con un plano normal de la placa de transferencia de calor. Un espacio de 2,5 mm a 8 mm entre las placas de transferencia de calor puede entenderse como un espacio de 2,5 mm a 8 mm entre los planos normales de las placas de transferencia de calor.

Para el intercambiador de calor de placas ejemplificado con las propiedades anteriores de los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  pueden tener valores dentro de los intervalos siguientes:  $\alpha = 0,005$  a  $0,35$ ,  $\beta = 0,35$  a  $2,0$  y  $\gamma = 0,006$  a  $0,20$ . La unidad de control 17 puede cambiar los valores dependiendo de si la planta solar térmica 1 está en el modo de carga o en el modo de descarga. Específicamente, para un intercambiador de calor de placas con las placas de transferencia de calor ejemplificadas anteriormente, pero también para otros intercambiadores de calor con otras placas, se pueden usar los siguientes coeficientes, que pueden variar dentro de un intervalo de 10 %, 20 %, o incluso más:

Modo de carga (medio de almacenamiento térmico: fluido frío; HTF: fluido caliente)	Modo de descarga (HTF: fluido frío; medio de almacenamiento térmico: fluido caliente)
$\alpha = 0,015$	$\alpha = 0,035$
$\beta = 1,0$	$\beta = 0,75$
$\gamma = 0,02$	$\gamma = 0,02$

Los valores anteriores para los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  proporcionan buenos resultados de transferencia de calor, pero podrían ser ajustados como se requiere en dependencia del intercambiador de calor y en el sistema de intercambiador de calor es parte de, incluso en el lugar después de que la operación haya comenzado.

Los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  se pueden determinar empíricamente en el sitio, pero también se pueden determinar mediante la realización de algunos cálculos y unas simulaciones. En el último caso, pueden usarse dos etapas de cálculo, donde la primera determina el orden de magnitud del coeficiente proporcional  $\alpha$  y el coeficiente derivado  $\beta$ , y donde la segunda determina el coeficiente integral  $\gamma$  y ajusta los otros dos  $\alpha$ ,  $\beta$ .

En los cálculos *HAT* se ha estimado como  $AT = Ae^{-tr} + B$ . Esta fórmula se ha aplicado para los siguientes valores:

Caudal medio de almacenamiento térmico (fluido frío)	Caudal de HTF (fluido caliente)	Fórmula de aproximación	
100%	90%	A	-4,92
		B	7,50
		$\tau$	205,00

(continuación)

Caudal medio de almacenamiento térmico (fluido frío)	Caudal de HTF (fluido caliente)	Fórmula de aproximación	
100%	80%	A	-13,53
		B	16,12
		τ	180,00
100%	70%	A	-23,55
		B	26,14
		τ	150,00
100%	60%	A	-33,92
		B	36,51
		τ	120,00
100%	50%	A	-44,43
		B	47,02
		τ	100,00

En la primera etapa para la determinación de los coeficientes se calculan solo los coeficientes proporcionales y derivados, por lo tanto, el término integral se descarta, lo que da:

5

$$Cf_{HAT} = \alpha \varepsilon_{HAT} + \beta \frac{d \varepsilon_{HAT}}{dt}$$

donde

10

$$\varepsilon_{HAT} = HAT_{objetivo} - HAT$$

$HAT_{objetivo}$  es la HAT (temperatura de aproximación de calor) cuando los caudales de HTF y el medio de almacenamiento térmico están equilibrados. Este es el caso en  $t = 0$ , que es la razón por la cual  $HAT_{objetivo} = A + B$ . Dado que  $HAT = Ae^{-t/\tau} + B$ , entonces  $\varepsilon_{HAT} = A(1 - e^{-t/\tau})$ .

15

De esto se deduce que

$$\frac{d \varepsilon_{HAT}}{dt} = \frac{A}{\tau} e^{-t/\tau}$$

20 y

$$Cf_{HAT} = \alpha A(1 - e^{-t/\tau}) + \frac{\beta A}{\tau} e^{-t/\tau}$$

$$Cf_{HAT} = \alpha A + \left(\frac{\beta A}{\tau} - \alpha A\right) e^{-t/\tau}$$

25

Esta igualdad se verifica, cualquiera que sea el tiempo  $t$ , si  $\alpha A = Cf_{HAT}$  y  $\left(\frac{\beta A}{\tau} - \alpha A\right) = 0$

Así  $\alpha = \frac{Cf_{HAT}}{A}$  y  $\beta = \alpha\tau = \frac{Cf_{HAT}\tau}{A}$

30 Entonces se pueden derivar los siguientes coeficientes proporcionales y derivados:

Caudal medio de almacenamiento térmico (fluido frío)	Caudal HTF (fluido caliente)	Fórmula de aproximación		Coeficientes del sistema de control	
100 %	90 %	A	-4,92	$Cf_{HAT}$	-0,10
		B	7,50	$\alpha$	0,0203
		τ	205,00	$\beta$	4,167
100%	80%	A	-13,53	$Cf_{HAT}$	-0,20
		B	16,12	$\alpha$	0,0148
		τ	180,00	$\beta$	2,661
100%	70%	A	-23,55	$Cf_{HAT}$	-0,30
		B	26,14	$\alpha$	0,0127
		τ	150,00	$\beta$	1,911

(continuación)

Caudal medio de almacenamiento térmico (fluido frío)	Caudal HTF (fluido caliente)	Fórmula de aproximación		Coeficientes del sistema de control	
100%	60%	A	-33,92	$C_{f_{HAT}}$	-0,40
		B	36,51	$\alpha$	0,0118
		$\tau$	120,00	$\beta$	1,415
100%	50%	A	-44,43	$C_{f_{HAT}}$	-0,50
		B	47,02	$\alpha$	0,0113
		$\tau$	100,00	$\beta$	1,125

Como primera aproximación, con el fin de limitar la corrección, los coeficientes del último cálculo se pueden utilizar, es decir:  $\alpha = 0,0113$  y  $\beta = 1,125$ .

5 En la segunda etapa se determina el coeficiente  $\gamma$  e integral. Para hacer esto, se implementa un algoritmo convencional que describe el sistema de control de la planta solar térmica 1 mediante el uso de software de simulación convencional. Luego se utilizan tres datos de entrada: i) caudales de HTF, ii) temperatura de entrada de HTF y iii) temperatura de entrada del medio de almacenamiento térmico. El caudal del medio de almacenamiento térmico puede calcularse automáticamente controlando la HAT y la CAT como se describe en los algoritmos anteriores. El caudal de HTF no se utiliza para determinar el caudal del medio de almacenamiento térmico.

15 En primer modelo de un ciclo típico de un intercambiador de calor se modela, para ver la respuesta, añadir el coeficiente integral  $\gamma$  y ajustar el coeficiente proporcional  $\alpha$  y el coeficiente derivado  $\beta$ . Este cálculo se realiza de forma iterativa hasta que se obtiene un comportamiento satisfactorio. Los gráficos en las figuras 5 y 6 muestran el resultado de la simulación después de varias iteraciones. Aquí, "sales" en las figuras 5 y 6 se refiere al medio de almacenamiento térmico. A partir de estas figuras, se muestra que el comportamiento es satisfactorio y que la HAT y la CAT están bien controladas con variaciones inferiores a 3,6 °C, que es un valor muy aceptable en términos de eficiencia del proceso y tensiones térmicas.

20 El cálculo anterior se realizó en modo de carga, es decir, cuando el medio de almacenamiento térmico es el líquido frío y el HTF es el fluido caliente. Al realizar los mismos cálculos para el modo de descarga, el resultado será el que se muestra en las figuras 7 y 8. "sales" en las figuras 7 y 8 se refiere al medio de almacenamiento térmico. A partir de estas cifras, muestra que las variaciones de HAT y CAT no superan los 4,5 °C en el evento más grave (+50 % del caudal de HTF instantáneamente).

25 Por último, los siguientes coeficientes han sido elegidos, dando el mejor compromiso entre la reactividad y la amortiguación:

Modo de carga (medio de almacenamiento térmico: fluido frío; HTF: fluido caliente)	Modo de descarga (HTF: fluido frío; medio de almacenamiento térmico: fluido caliente)
$\alpha = 0,015$	$\alpha = 0,035$
$\beta = 1,0$	$\beta = 0,75$
$\gamma = 0,02$	$\gamma = 0,02$

30 Los cálculos descritos anteriormente se pueden usar para determinar los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Otras técnicas convencionales dentro del control PID pueden usarse igual de bien para determinar los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Alternativamente, los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  se determinan empíricamente. Los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  pueden ajustarse, por ejemplo, durante la operación de la planta solar térmica 1.

35 Cuando el método descrito para controlar el flujo de fluido a través del intercambiador de calor 3 se simula para los datos obtenidos de una planta solar térmica en operación en modo de carga y para la  $HAT_{objetivo} = 3,86$  °C y cuando la  $HAT_{objetivo} = CAT_{objetivo}$ , entonces se ha observado que la HAT es relativamente estable y varía solo entre 0,5 °C y 4 °C. Cuando el método para controlar el flujo de fluido a través del intercambiador de calor 3 se simuló para los datos obtenidos de la planta solar térmica en funcionamiento y en modo de descarga y para la  $HAT_{objetivo} = 5,25$  °C y cuando la  $HAT_{objetivo} = CAT_{objetivo}$ , entonces se ha observado que la HAT es relativamente estable y varía solo alrededor de 4,5 °C.

40 La invención se describe a continuación es aplicable para todos los intercambiadores de calor que trabajan con dos fluidos independientes. El intercambiador de calor puede operar con flujo concurrente o contracorriente y es un intercambiador de calor de placas, que puede ser un intercambiador de calor soldado o con juntas, etc. El método puede usarse para intercambiadores de calor en otros tipos de energía industrial y procesos químicos que en el ejemplificado, incluidos los de otros tipos de plantas solares.

45 Además, el control puede realizarse para cualquier fluido de los dos fluidos que ingresa al intercambiador de calor, aunque el control en el ejemplo descrito se ejecuta para el medio de almacenamiento térmico.

De la descripción anterior se deduce que, aunque se han descrito y mostrado diversas realizaciones de la invención, la invención no se limita a las mismas, sino que también puede ser realizada en otras maneras dentro del alcance de la materia objeto definida en las siguientes reivindicaciones.

5

## REIVINDICACIONES

1. Un método para controlar un flujo de fluido en una planta térmica solar (1), comprendiendo la planta térmica solar (1) un colector de calor (2) para calentar un primer fluido ( $F_{HTF}$ ) y un almacenamiento en frío (5) y un almacenamiento en caliente (4) para un segundo fluido ( $F_{MS}$ ), teniendo dicho segundo fluido ( $F_{MS}$ ) tiene la forma de sal fundida, y un intercambiador de calor (3),  
 5 comprendiendo el intercambiador de calor (3) un primer canal de fluido (35) para pasar un primer fluido ( $F_{HTF}$ ) a través del intercambiador de calor (3) y un segundo canal de fluido (36) para pasar un segundo fluido ( $F_{MS}$ ) a través del intercambiador de calor (3), de modo que el calor se transfiere desde el primer fluido ( $F_{HTF}$ ) al segundo fluido ( $F_{MS}$ ) cuando el primer fluido ( $F_{HTF}$ ) está más caliente que el segundo fluido ( $F_{MS}$ ), y  
 10 en donde un regulador de flujo (13, 14) está dispuesto para regular un flujo del segundo fluido ( $F_{MS}$ ) para pasarlo en una primera dirección desde el almacenamiento en frío (5), a través del intercambiador de calor (3) y al almacenamiento en caliente (4) y en una segunda dirección desde el almacenamiento en caliente (4), a través del intercambiador de calor (3) y hacia el almacenamiento en frío (5),  
 15 comprendiendo el método controlar un flujo de fluido a través del intercambiador de calor (3), en donde el regulador de flujo (12, 13, 14) está dispuesto para regular

- un flujo del primer fluido ( $F_{HTF}$ ) que pasa a través del intercambiador de calor (3), o  
 - un flujo del segundo fluido ( $F_{MS}$ ) pasado a través del intercambiador de calor (3), comprendiendo además el método:  
 20

obtener (101) una primera temperatura ( $T_{calienteentrada}$ ) del primer fluido ( $F_{HTF}$ ) antes de que pase por el intercambiador de calor (3),  
 25 obtener (101) una segunda temperatura ( $T_{calientesalida}$ ) del primer fluido ( $F_{HTF}$ ) después de que haya pasado por el intercambiador de calor (3),  
 obtener (101) una tercera temperatura ( $T_{fríaentrada}$ ) del segundo fluido ( $F_{MS}$ ) antes de que pase por el intercambiador de calor (3),  
 obtener (101) una cuarta temperatura ( $T_{fríasalida}$ ) del segundo fluido ( $F_{MS}$ ) después de que haya pasado por el intercambiador de calor (3),  
 30 y en donde el método se **caracteriza por:**

determinar (102) una primera diferencia ( $HAT$ ) calculando una diferencia entre la primera temperatura ( $T_{calienteentrada}$ ) y la cuarta temperatura ( $T_{fríasalida}$ ),  
 35 determinar (103) una segunda diferencia ( $CAT$ ) calculando una diferencia entre la segunda temperatura ( $T_{calientesalida}$ ) y la tercera temperatura ( $T_{calienteentrada}$ ),  
 determinar (104) un primer valor de error ( $\epsilon_{HAT}$ ) calculando una diferencia entre un primer valor predeterminado ( $HAT_{objetivo}$ ) y la primera diferencia ( $HAT$ ),  
 determinar (105) un segundo valor de error ( $\epsilon_{CAT}$ ) calculando una diferencia entre un segundo valor predeterminado ( $CAT_{objetivo}$ ) y la segunda diferencia ( $CAT$ ), y  
 40 controlar (116) el regulador de flujo (12, 13, 14) en dependencia del primer valor de error ( $\epsilon_{HAT}$ ) y el segundo valor de error ( $\epsilon_{CAT}$ ),  
 por lo que el primer valor de error ( $\epsilon_{HAT}$ ) y el segundo valor de error ( $\epsilon_{CAT}$ ) se minimizan al pasar el segundo fluido ( $F_{MS}$ ) en la primera dirección, así como al pasar el segundo fluido ( $F_{MS}$ ) en la segunda dirección, por lo que el intercambiador de calor (3) es un intercambiador de calor de placas y comprende  
 45 de 200 a 900 placas de transferencia de calor, cada una de las cuales tiene:

- un espesor de placa de 0,8 mm a 1,5 mm,  
 - una longitud de placa de 6 m a 14 m,  
 - una anchura de placa de 0,7 m a 2 m,  
 50 - un espacio de 2,5 mm a 8 mm entre las placas de transferencia de calor, y  
 - un ángulo de corrugación de 15° a 45°.

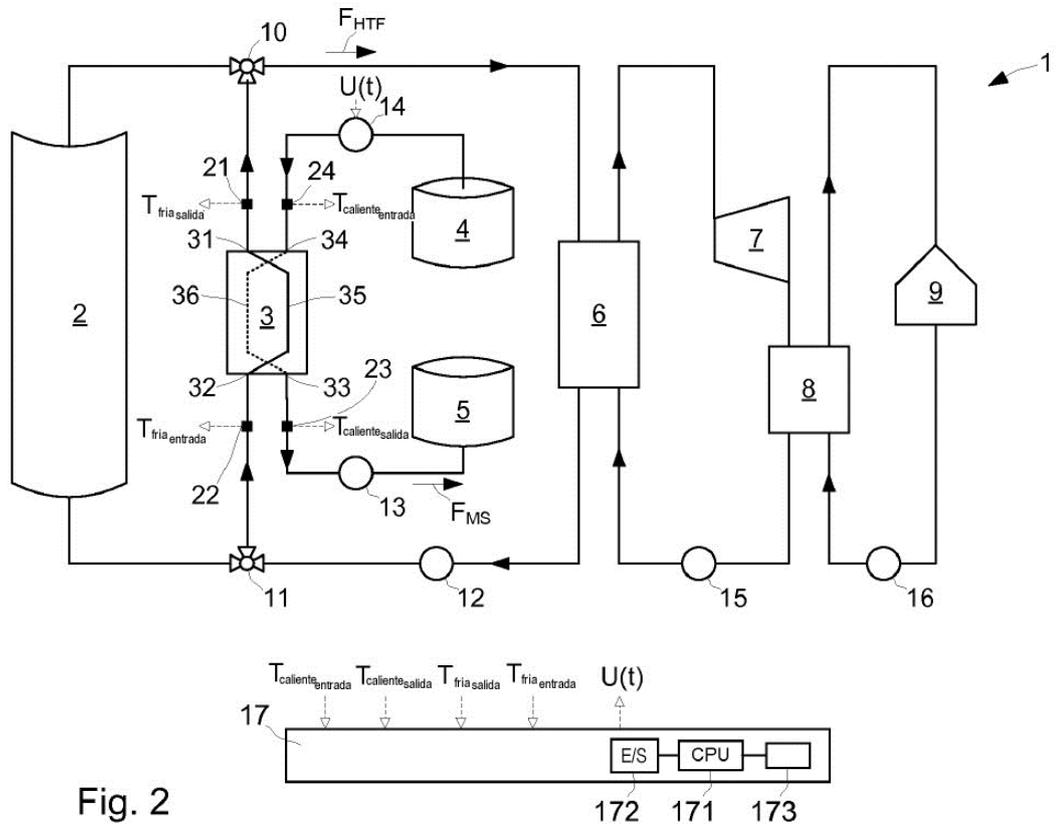
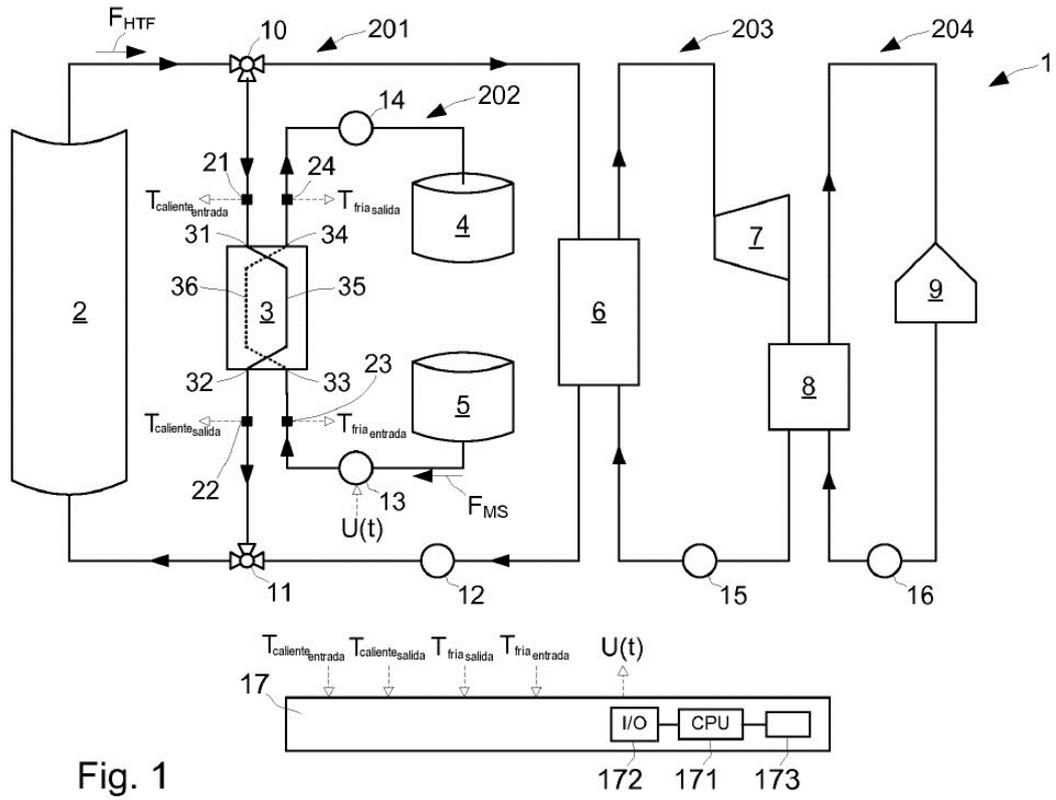
2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende:  
 55 controlar (116) el regulador de flujo (12, 13, 14) para minimizar el primer valor de error ( $\epsilon_{HAT}$ ) y el segundo valor de error ( $\epsilon_{CAT}$ ).

3. Un método de acuerdo con la reivindicación 2, que comprende:

determinar (107) un primer factor de corrección ( $Cf_{HAT}$ ) basado en un término proporcional ( $\alpha \epsilon_{HAT}$ ) del primer valor de error ( $\epsilon_{HAT}$ ),  
 60 determinar (108) un segundo factor de corrección ( $Cf_{CAT}$ ) basado en un término proporcional ( $\alpha \epsilon_{CAT}$ ) del segundo valor de error ( $\epsilon_{CAT}$ ), y  
 controlar (116) el regulador de flujo (12, 13, 14) en dependencia del primer y del segundo factores de corrección ( $Cf_{HAT}$ ,  $Cf_{CAT}$ ) para minimizar el primer valor de error ( $\epsilon_{HAT}$ ) y el segundo valor de error ( $\epsilon_{CAT}$ ).  
 65

4. Un método de acuerdo con la reivindicación 3, que comprende:

- determinar (107) el primer factor de corrección ( $Cf_{HAT}$ ) basado en un término integral ( $\gamma \int \epsilon_{HAT}$ ) del primer valor de error ( $\epsilon_{HAT}$ ), y  
 5 determinar (108) el segundo factor de corrección ( $Cf_{CAT}$ ) basado en un término integral ( $\gamma \int \epsilon_{CAT}$ ) del segundo valor de error ( $\epsilon_{HAT}$ ).
5. Un método de acuerdo con las reivindicaciones 3 o 4, que comprende:
- determinar (107) el primer factor de corrección ( $Cf_{HAT}$ ) basado en un término derivado ( $\beta \frac{d \epsilon_{HAT}}{dt}$ ) del primer valor  
 10 de error ( $\epsilon_{HAT}$ ), y  
 determinar (108) el segundo factor de corrección ( $Cf_{CAT}$ ) basado en un término derivado ( $\beta \frac{d \epsilon_{CAT}}{dt}$ ) del segundo valor de error ( $\epsilon_{CAT}$ ).
6. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 - 5, que comprende, cuando el flujo del primer  
 15 fluido ( $F_{HTF}$ ) y el flujo del segundo fluido ( $F_{MS}$ ) se invierten y cuando el primer fluido ( $F_{HTF}$ ) es más frío que el segundo fluido ( $F_{MS}$ ) para transferir calor del segundo fluido ( $F_{MS}$ ) al primer fluido ( $F_{HTF}$ ):
- obtener (101) la primera temperatura ( $T_{calienteentrada}$ ) midiendo la temperatura del segundo fluido ( $F_{MS}$ ) antes de  
 20 que pase a través del intercambiador de calor (3),  
 obtener (101) la segunda temperatura ( $T_{calientesalida}$ ) midiendo la temperatura del segundo fluido ( $F_{MS}$ ) después de  
 que haya pasado a través del intercambiador de calor (3),  
 obtener (101) la tercera temperatura ( $T_{fríaentrada}$ ) midiendo la temperatura del primer fluido ( $F_{HTF}$ ) antes de que  
 25 pase por el intercambiador de calor (3), y  
 obtener (101) la cuarta temperatura ( $T_{fríasalida}$ ) midiendo la temperatura del primer fluido ( $F_{MS}$ ) después de que  
 haya pasado a través del intercambiador de calor (3).
7. Un método de acuerdo con la reivindicación 6, en el que el primer fluido ( $F_{HTF}$ ) es calentado por energía solar y el  
 30 segundo fluido ( $F_{MS}$ ) se usa para almacenar calor, comprendiendo el método  
 transferir el segundo fluido ( $F_{MS}$ ) desde un almacenamiento en frío (5) a un almacenamiento en caliente (4) a través  
 del intercambiador de calor (3), cuando el calor se transfiere desde el primer fluido ( $F_{HTF}$ ) al segundo fluido ( $F_{MS}$ ) y  
 transferir el segundo fluido ( $F_{MS}$ ) desde el almacenamiento en caliente (4) al almacenamiento en frío (3) a través del  
 intercambiador de calor (3), de modo que el calor se transfiera desde el segundo fluido ( $F_{MS}$ ) al primer fluido ( $F_{HTF}$ ),  
 cuando el flujo del primer fluido ( $F_{HTF}$ ) y el flujo del segundo fluido ( $F_{MS}$ ) se invierten y el calor se transfiere desde el  
 35 segundo fluido ( $F_{MS}$ ) al primer fluido ( $F_{HTF}$ ).
8. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 - 10, en el que el control (116) del regulador  
 de flujo (12, 13, 14) en dependencia del primer valor de error ( $\epsilon_{HAT}$ ) y el segundo valor de error ( $\epsilon_{CAT}$ ) solamente  
 40 regula el flujo del segundo fluido ( $F_{MS}$ ).
9. Un método de acuerdo con la reivindicación 3, en el que el término proporcional ( $\alpha \epsilon_{HAT}$ ) comprende una ganancia  
 proporcional ( $\alpha$ ) que tiene un valor de 0,005 a 0,35.
10. Un método de acuerdo con la reivindicación 4, en el que el término integral ( $\gamma \int \epsilon_{HAT}$ ) comprende una ganancia  
 45 integral ( $\gamma$ ) que tiene un valor de 0,006 a 0,20.
11. Un método de acuerdo con la reivindicación 5, en el que el término derivado ( $\beta \frac{d \epsilon_{CAT}}{dt}$ ) comprende una ganancia  
 derivada ( $\beta$ ) que tiene un valor de 0,35 a 2,0.



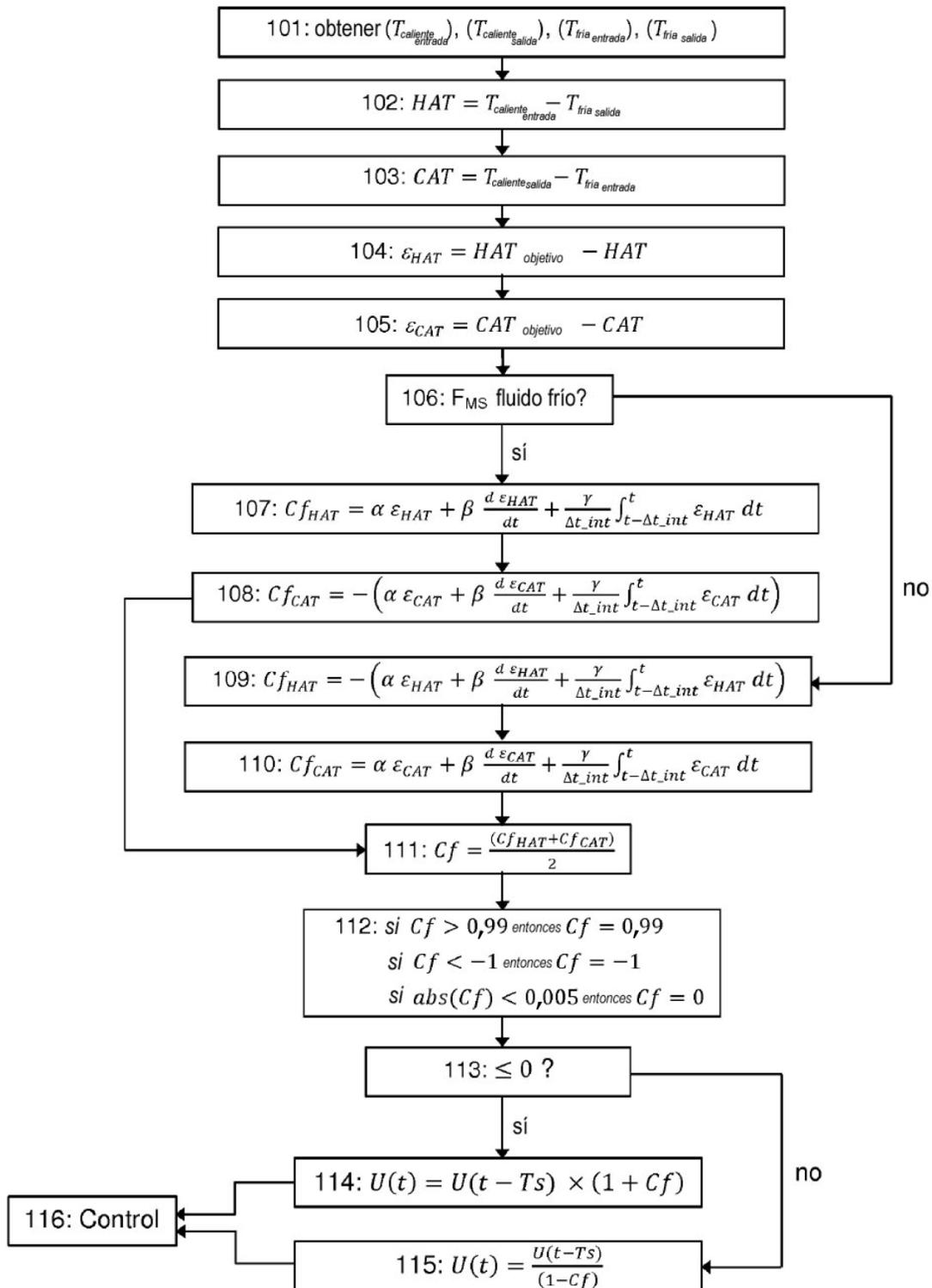


Fig. 3

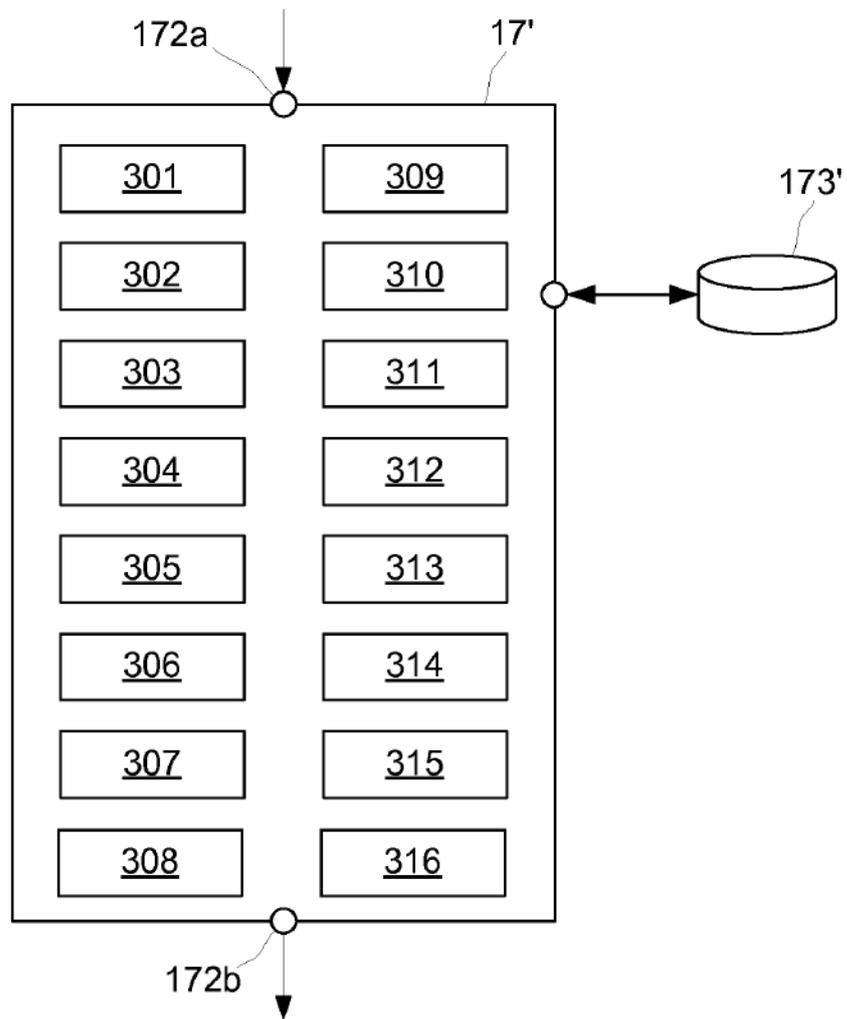


Fig. 4

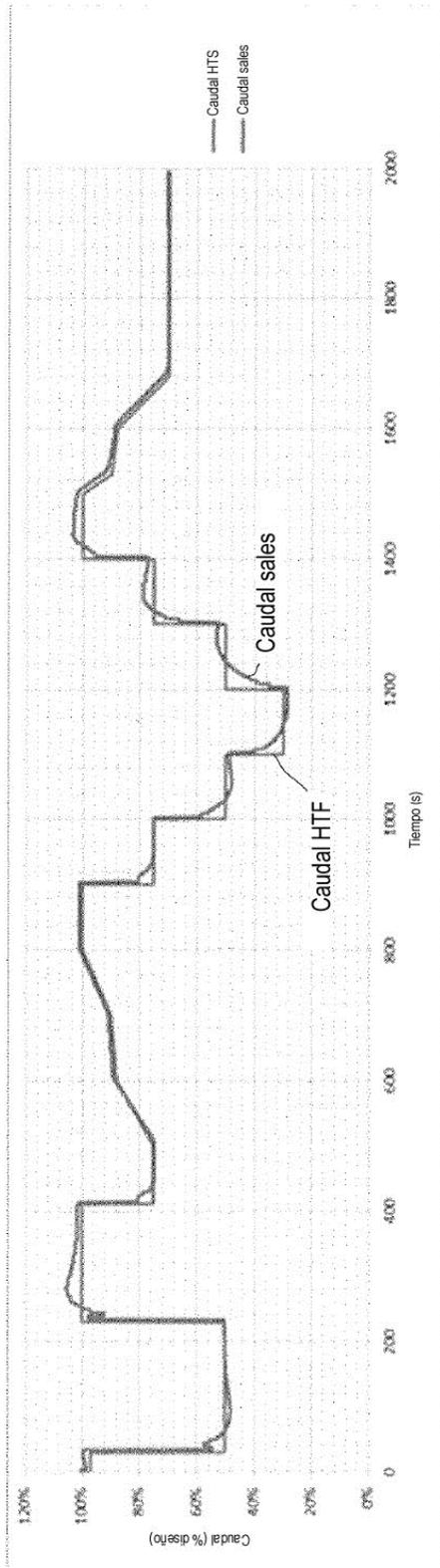


Fig. 5

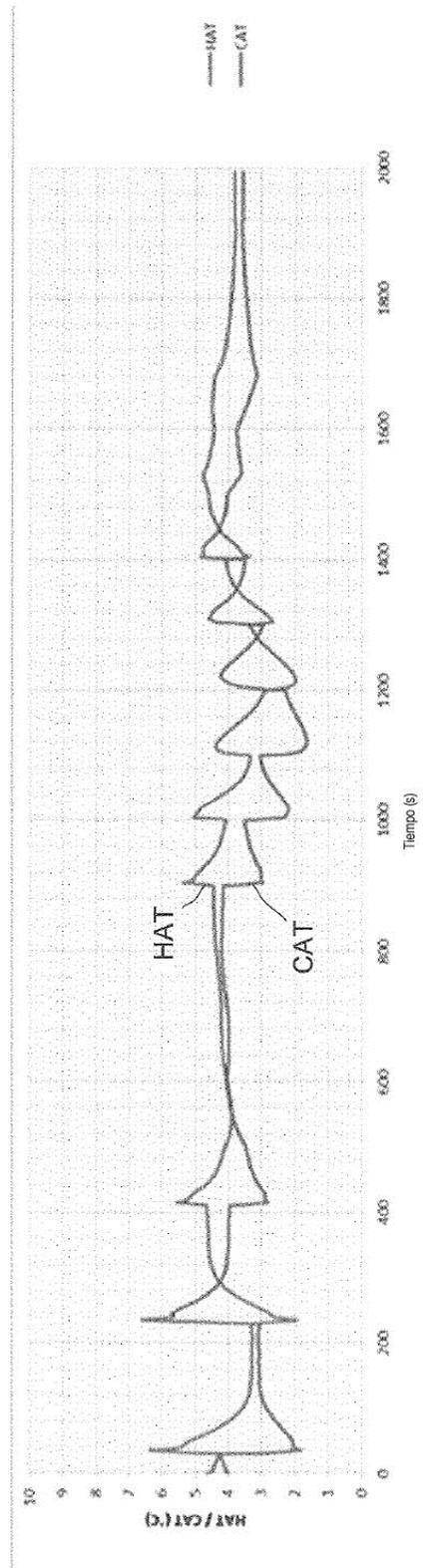


Fig. 6

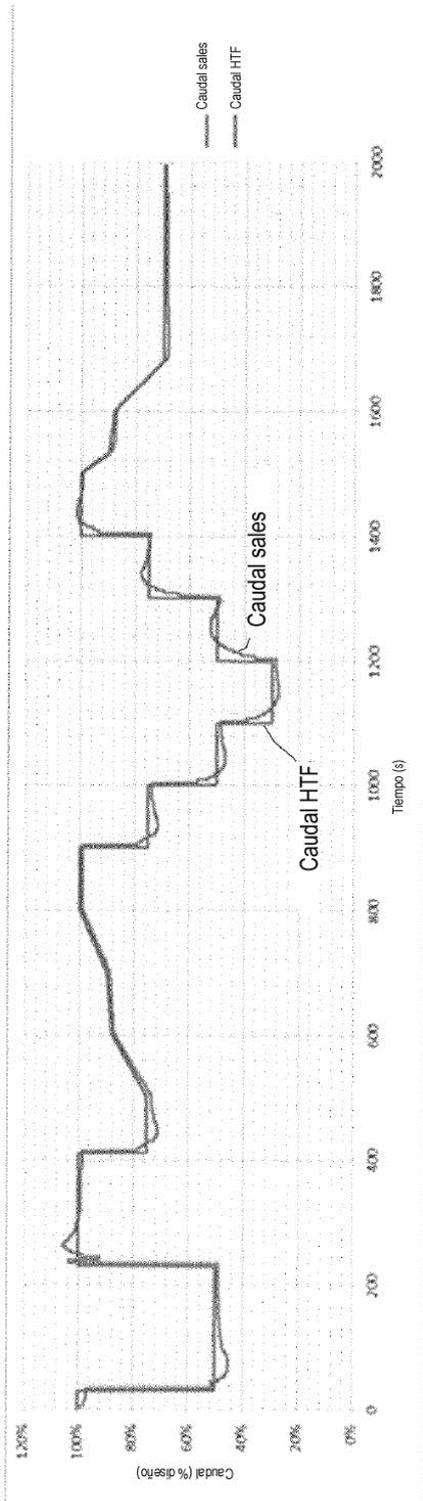


Fig. 7

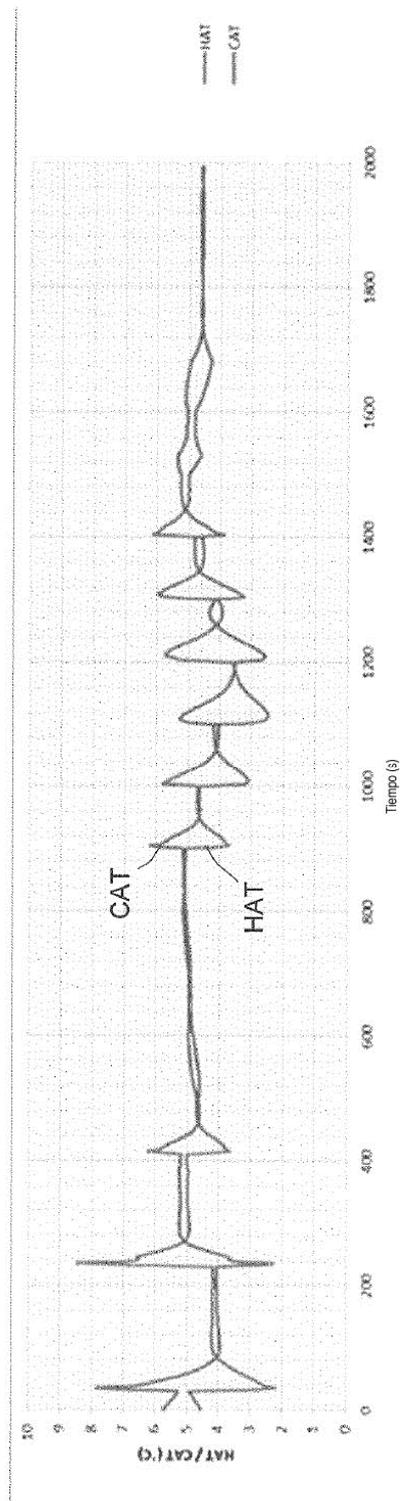


Fig. 8