

(19)



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS
ESPAÑA



(11) Número de publicación: **2 986 292**

(51) Int. Cl.:

C02F 1/44 (2013.01)

B01D 61/36 (2006.01)

(12)

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

(86) Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **15.03.2017 PCT/IB2017/051497**

(87) Fecha y número de publicación internacional: **21.09.2017 WO17158526**

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.03.2017 E 17712552 (3)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.07.2024 EP 3429965**

(54) Título: **Sistema de purificación térmica de agua y método para operar dicho sistema**

(30) Prioridad:

16.03.2016 WO PCT/IB2016/051471

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

11.11.2024

(73) Titular/es:

**ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE (EPFL) (100.0%)
EPFL-TTO, EPFL Innovation Park J 1015 Lausanne, CH**

(72) Inventor/es:

ONG, CHIN LEE y THOME, JOHN R.

(74) Agente/Representante:

DEL VALLE VALIENTE, Sonia

ES 2 986 292 T3

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

DESCRIPCIÓN

Sistema de purificación térmica de agua y método para operar dicho sistema

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a un sistema de purificación térmica de agua y a un método para operar este sistema de purificación térmica de agua.

10 Antecedentes de la invención

Aproximadamente el 97 por ciento del agua de la superficie terrestre es agua salina. En vista del creciente consumo de agua potable para aplicaciones domésticas, agrícolas o industriales, existe la necesidad de producir agua potable a partir de fuentes tales como agua salobre o agua de mar.

15 Diferentes tecnologías permiten purificar el líquido de la alimentación bruta, que contiene sal u otras impurezas, para producir agua potable. Las técnicas de desalinización más comúnmente empleadas se pueden clasificar en dos categorías principales, a saber: i) la desalinización térmica convencional, como la destilación multietapa (MSF), la destilación multiefecto (MED), la compresión de vapor (VC) y ii) la separación no térmica basada en membranas, como la ósmosis inversa (RO), la nanofiltración (NF), la ósmosis directa (FO), la electrodialisis inversa (EDR), etc. Cada técnica individual tiene su propia limitación que va desde una baja eficiencia térmica, como las plantas de tecnología flash multietapa (MSF) que emplean el proceso de evaporación instantánea, hasta plantas de destilación múltiples efectos (MED) que utilizan la evaporación por pulverización de piensos líquidos, hasta las ineficientes capacidades de eliminación de boro de los sistemas de separación basados en membranas no térmicas, como RO, NF o EDR.

20 La destilación por membrana (MD) es un proceso de separación por membrana no isotérmica que emplea membranas hidrófobas, publicado por primera vez en la patente n.º US 3361645 A. Con los enormes avances que se están realizando en la investigación científica sobre membranas, los esfuerzos para la implementación industrial de los sistemas de distrofia muscular están cobrando actualmente un gran interés.

25 En resumen, la destilación por membrana (MD) es un proceso que implica la evaporación de la alimentación líquida calentada en la interfaz líquido/vapor ubicada en los poros de una membrana hidrófoba. Más específicamente, la evaporación de la alimentación líquida se produce sólo en los poros de la membrana y no en la alimentación líquida a bruta. La velocidad de evaporación y difusión del vapor en MD depende de la fuerza impulsora transmembrana, es decir, la diferencia en la presión parcial del vapor a través de la membrana y la característica de permeabilidad de la membrana, que se define en función de los parámetros geométricos de la membrana, tales como el tamaño de los poros de la membrana, el grosor de la membrana, la tortuosidad y la porosidad efectiva. Por tanto, una configuración de sistema definida con una configuración de flujo correspondiente, como la temperatura y el caudal de alimentación, producirá solo un flujo de destilado finito en términos cuantitativos. Termodinámicamente, una característica distintiva

30 de la MD es una caída en la temperatura de alimentación del líquido a medida que avanza la evaporación. Esto se define como enfriamiento por evaporación, cuando el calor sensible de la alimentación líquida se convierte en calor latente durante la vaporización. La caída de temperatura de la alimentación líquida produce una fuerza impulsora más baja, lo que resulta en una menor tasa de producción de vapor y, por tanto, en una reducción del flujo global de destilado de membrana. Las limitaciones generales asociadas con el bajo flujo específico de membrana, es decir, la producción de vapor/destilado por unidad de área de membrana y la caída de la temperatura de alimentación del líquido, estrechamente interrelacionada, siguen siendo las desventajas más cruciales que limitan la mejora del rendimiento del proceso de MD para una implementación industrial y comercialización exitosas. Se han realizado enormes esfuerzos para capitalizar el proceso de MD y diversas técnicas de implementación para aumentar el rendimiento general. Esto incluye operar el sistema MD en vacío parcial para mejorar la evaporación del líquido alimentado y, al mismo tiempo, reducir la resistencia a la difusión/transporte del vapor para mejorar la condensación.

35 Otra solución incluye la recuperación de calor para el recalentamiento parcial de la alimentación líquida para minimizar el efecto de una fuerza motriz más baja que surge de la caída de temperatura de la alimentación líquida. Se hace referencia a un artículo reciente revisado por pares sobre un aparato MD multiefecto de Zhao y col., "Experimental study of the memsys vacuum multi-effect-membrane-distillation (V-MEMD) module", Desalination 323 (2913), págs. 150-160, donde esos autores implementaron una configuración de recuperación de calor múltiple mediante la integración de láminas de condensación y aumentaron el área de la membrana para mejorar el rendimiento sistémico del aparato. Aunque la producción de destilado aumentó con un mayor número de efectos/etapas y área de membrana, se pueden extraer dos conclusiones de sus resultados experimentales. En primer lugar, el flujo específico se redujo de 3,8 a 3,0 l/m²-h cuando el número de efectos/etapas se incrementó de 2 a 4 etapas y, en segundo lugar, se produjo una reducción del 55 % del flujo específico, de 8,7 a 3,9 l/m²-h, cuando el número de áreas de membrana implementadas en los bastidores se incrementó de 7 a 17 bastidores, es decir, de 1,88 a 5,0 m². El rendimiento sistémico general y la eficiencia térmica fueron, por tanto, adversamente inferiores en comparación con los procesos de desalinización térmica convencionales.

40 El consumo energético relativamente alto y el bajo rendimiento de eficiencia de una implementación de este tipo se atribuyen a un proceso de condensación ineficiente, cuando dicho vapor producido en la etapa anterior se transporta

a través de un conducto a la etapa siguiente para condensarse, lo que resulta en una mayor resistencia al transporte de vapor, lo que a su vez resulta en una mayor presión en la cámara de vapor, lo que a su vez reduce la fuerza motriz transmembrana y, por tanto, reduce el rendimiento del destilado.

- 5 Un objetivo de la presente invención es proponer un sistema de purificación de agua de alta eficiencia térmica basado en membranas que tenga consumos de energía térmica y eléctrica mucho más bajos, pero también con un flujo de membrana sistémico global aumentado. Las posibles aplicaciones industriales de un sistema de este tipo incluyen la desalinización, los procesos industriales, el tratamiento del agua con aceite de esquisto bituminoso, el tratamiento de aguas residuales o los procesos de recuperación de agua que requieren la eliminación de sólidos o impurezas disueltos de cualquier líquido de alimentación bruto mediante el proceso de separación térmica.

10 Para mejorar la eficiencia térmica de un proceso de separación térmica existente, por ejemplo la desalinización, una solución consiste en precalentar de manera eficiente el líquido de alimentación bruto. El precalentamiento eficiente de la alimentación de líquido bruto se puede lograr mediante la energía térmica recuperada del proceso de condensación de vapor que se produce en las secciones de vapor respectivas. Idealmente, una baja resistencia al transporte de vapor producirá un proceso de condensación óptimo, que no es el caso cuando hay conductos de transmisión de vapor para canalizar el vapor entre los módulos precedentes/sucesivos a condensar. Más específicamente, no se puede lograr una ganancia específica en el flujo de membrana específico ($\text{l/m}^2\cdot\text{h}$) sin reducir la resistencia al transporte de vapor. Para los sistemas de destilación que aprovechan el proceso de MD, se usa un aumento en el área de la membrana para lograr esto; es decir, una gran superficie de membrana garantiza que se produzca suficiente vapor para adaptarse a la recuperación de calor latente para el precalentamiento de la alimentación bruta y el recalentamiento del alimento líquido de destilación para minimizar la caída de temperatura. Esto no está dentro del alcance de la presente invención, ya que en esta presente invención se proponen un área de membrana mínima y una baja resistencia al transporte de vapor mediante condensación directa.

15 25 La presente invención no aprovecha únicamente el proceso MD, sino una implementación híbrida de un proceso combinado de ebullición por flujo y MD para aumentar el rendimiento del destilado. La integración de los tubos de ebullición del intercambiador de calor en etapas induce la ebullición del flujo nucleado en las superficies externas de los tubos en contacto con la alimentación de líquido ubicada en las secciones de líquido en ebullición. Este proceso de ebullición por flujo nucleado que se produce en la superficie externa de los tubos es técnicamente diferente a los procesos tales como la evaporación de una película descendente por pulverización, el destello de vapor o la evaporación en la interfaz líquido/vapor de un líquido, conocidos ya en otras técnicas anteriores. La implementación actual sirve para aumentar el rendimiento de un sistema de destilación de este tipo al incorporar tubos intercambiadores de calor en ebullición de flujo nucleado como el proceso de vaporización principal, al tiempo que complementa el proceso MD. Esta novedosa función y dispositivo de ebullición, implementados en la presente invención, aumentarán significativamente la producción de vapor/destilado y pueden producir un aumento de hasta un 95 % del destilado total, produciéndose el destilado restante mediante el proceso MD (esencialmente un aumento de capacidad unas pocas veces con respecto a un sistema solo MD). El alcance de la invención difiere ampliamente del de los sistemas MD de última generación en que requiere un área de membrana mínima, pero aún así es capaz de producir un mayor rendimiento de destilado al capitalizar principalmente la combinación del flujo, la ebullición en las superficies externas de los tubos del intercambiador de calor dentro de las secciones de líquido en ebullición y la evaporación en la superficie de la membrana mediante el proceso MD.

20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 El segundo aspecto de la invención implica la minimización de las pérdidas termodinámicas al tiempo que se optimiza significativamente la resistencia al transporte de calor y masa a través de los módulos de destilación, lo que resulta en un aumento significativo en la eficiencia y el rendimiento generales del sistema de destilación. Esto se logra mediante la implementación de la condensación directa de vapor mediante la introducción de tubos de precalentamiento del intercambiador de calor y/o tubos de ebullición de flujo interno dentro de cada sección de vapor inmediata adyacente a las secciones de líquido en ebullición. Esto promueve procesos de transferencia de calor conjuntos simultáneos que implican: i) la ebullición por flujo en los tubos del intercambiador de calor en las secciones de líquido en ebullición y ii) el aumento de la evaporación de la membrana mediante el proceso MD y iii) la condensación directa en la superficie externa de los tubos de precalentamiento del intercambiador de calor y/o en los tubos de ebullición de flujo interno en las secciones de vapor de las unidades de destilación. Por tanto, la presente invención elimina las líneas de transmisión de vapor. La primera ventaja de la eliminación de las líneas de transmisión de vapor es la prevención de la sobresaturación de las secciones de vapor, mitigando así el aumento de la presión de la cámara de vapor, lo que conduciría a una menor fuerza impulsora transmembrana. El proceso de condensación directa, tal como se propone en esta invención, da como resultado una presión de cámara de vapor más baja y, por tanto, mejora el proceso MD al mantener una fuerza impulsora transmembrana más alta. En general, una reducción del 5 % en la presión de la cámara de vapor conducirá a un aumento del 5 % en la producción de vapor a través del proceso MD. La segunda ventaja es la eliminación de la condensación de vapor en las líneas de transmisión, lo que no contribuye al proceso de recuperación/vaporización del calor. Por ejemplo, considere un sistema de destilación de 8 módulos con una eficiencia ideal; una pérdida de 1 kg de vapor debido a la condensación en la línea de transmisión del primer módulo puede provocar una pérdida de 7 litros en la producción de destilado de los siguientes módulos de destilación (suponiendo una densidad de líquido, ρ de 1 kg/l), es decir, 1 litro de producción de destilado perdido en cada módulo del segundo al octavo efecto/etapa. La tercera ventaja implica una menor resistencia térmica y al transporte de masa a través de los módulos de destilación, donde la menor caída de temperatura es muy ventajosa, ya que permite incorporar un

mayor número de efectos/etapas en el sistema, lo que a su vez reduce el consumo específico de energía (térmica y eléctrica) del sistema de destilación.

- 5 Los tubos de ebullición de flujo interno proporcionan la flexibilidad adicional para adaptarse a la condensación directa eficiente del vapor en la cámara de vapor adyacente a la membrana porosa. Se sabe que la transferencia de calor por cambio de fase, es decir, la condensación y la ebullición por flujo, son procesos de transferencia de calor superiores debido a sus menores resistencias térmicas en comparación con la transferencia de calor monofásica totalmente líquida. Se pueden obtener cinco ventajas significativas con la integración de tubos intercambiadores de calor de ebullición internos, a saber: i) acomodar la condensación del vapor en la periferia del tubo externo de dichos tubos de ebullición de flujo interno cuando dicha temperatura de alimentación de líquido bruto que fluye dentro de los tubos de precalentamiento ha aumentado igual a la temperatura del vapor y no se produce condensación de vapor, ii) generación adicional de vapor a través del flujo interno (ebullición del flujo interno) mejorado. La condensación dentro de la cámara de vapor da como resultado una cámara de vapor más baja y, por lo tanto, una mayor diferencia de presión transmembrana, iv) aumenta la eficiencia del proceso de precalentamiento del líquido de alimentación bruto cuando dicho destilado más caliente se condensa en la superficie externa de los tubos de ebullición de flujo interno que fluyen hacia abajo debido a la gravedad, precalienta el líquido bruto que fluye dentro de los tubos de precalentamiento y v) aloja una mayor carga de energía térmica en el sistema. En condiciones de alta carga térmica, cuando la temperatura de dicho líquido de alimentación bruto que fluye por los tubos de precalentamiento es igual a la temperatura del vapor en la cámara de vapor y, por lo tanto, no es posible una condensación de vapor adicional en los tubos de precalentamiento, los tubos de ebullición de flujo interno actuarán como disipador de calor al convertir este calor latente adicional que surge del proceso de condensación de vapor en calor latente de vaporización mediante ebullición por flujo. Por ejemplo, considerar un sistema de destilación de 8 módulos con una eficiencia ideal. Los tubos de ebullición de flujo interno dentro de la sección de vapor del primer efecto pueden consumir de manera efectiva 1 kW adicional de energía térmica consumida para generar vapor mediante el proceso de ebullición de flujo interno mediante los tubos de ebullición de flujo interno dentro de la sección de vapor del primer efecto. Esto da como resultado una ganancia adicional de ocho veces en el vapor/destilado producido por el sistema de destilación de 8 módulos (la producción de destilado equivale a 8 kW de energía térmica suponiendo una eficiencia ideal). Esta mejora del rendimiento no se puede lograr técnicamente con la integración únicamente de los tubos de precalentamiento. En la sección posterior de esta descripción se presenta una simulación de comparación de rendimiento.
- 10 30 El documento EP 0088315 A1 describe un dispositivo y un proceso de desalinización que comprenden un dispositivo de destilación por membrana con intersticio de aire enrollado en espiral con recuperación de calor para el precalentamiento del líquido de alimentación bruto. En esta técnica anterior, una membrana permeable al vapor alargada en espiral separa el líquido de alimentación de la cámara de vapor alargada, mientras que una capa impermeable al vapor que actúa como una lámina de condensación separa el vapor de condensación del líquido de alimentación bruto a precalentar. El precalentamiento interno del líquido de alimentación bruto se logra utilizando la energía térmica transferida desde el vapor de condensación. El destilado condensado fluye entonces hacia una salida de destilado ubicada en la dirección corriente abajo del flujo del líquido de alimentación caliente. En esta realización, se describe un único proceso de evaporación y condensación en contraposición al proceso de vaporización y condensación múltiple presentado en la presente invención. Esta invención aprovecha principalmente el principio de destilación por membrana (MD) en contraposición a los procesos combinados actuales de ebullición del flujo de tubos de un intercambiador de calor y el principio MD en la presente invención.
- 15 40 50 El documento WO 2005/089914 A1 describe un dispositivo y un método de destilación por membrana de múltiples etapas enrollados en espiral con una solución de precalentamiento del líquido de alimentación bruto que se lleva a cabo externamente utilizando energía térmica del vapor de condensación, el líquido de salmuera y el destilado líquido. En la realización del aparato de destilación con pluralidad de membranas, el vapor producido en el evaporador y en las etapas posteriores se canaliza a través de un conducto de una etapa a otra etapa para recalentar el líquido de alimentación. Una de las desventajas es el aumento de la resistencia al transporte de vapor y las pérdidas de transmisión. La pérdida de vapor en el conducto de transmisión debido a la condensación dentro del conducto dará como resultado un proceso de recuperación de calor no eficiente para el recalentamiento del líquido de alimentación y una pérdida global en el rendimiento del destilado. Esta invención aprovecha principalmente el principio de destilación por membrana (MD) en contraposición a los actuales procesos de flujo tubular, ebullición y MD del intercambiador de calor totalmente integrados presentados en la presente invención. El documento DE 102009020179 55 60 65 describe un aparato de destilación por membrana de múltiples etapas que tiene un evaporador y múltiples etapas de condensación/evaporación. El precalentamiento del líquido de alimentación bruto se realiza mediante una fuente de energía térmica externa. Esta solución no implementa ninguna configuración compacta integrada de precalentamiento del líquido de alimentación bruto en la cámara de vapor, que es el objetivo de la presente invención. Esta invención aprovecha principalmente el principio de destilación por membrana (MD) en contraposición a los procesos actuales totalmente integrados de los procesos actuales de flujo tubular, ebullición y MD del intercambiador de calor presentados en la presente invención.

Otro ejemplo, el documento US 2014/0216916 A1 describe un dispositivo de destilación por membrana para la purificación de un líquido de alimentación, que comprende una pluralidad de etapas de condensación/evaporación, en el que el líquido de alimentación bruto se precalienta en al menos una cámara de vapor adicional, a la que se suministra el vapor alimentado a una etapa de condensación/evaporación y en la que se condensa el vapor. En esta descripción,

el vapor producido se canaliza nuevamente a través de un conducto de una etapa a otra etapa. Esto incurre en una resistencia adicional al transporte de vapor y, por tanto, puede resultar en un aumento de la presión de la cámara de vapor y, como consecuencia, da como resultado un proceso de vaporización menos eficiente. En todas las realizaciones, esta invención implementa líneas/conductos de transmisión de vapor para permitir el precalentamiento y el recalentamiento de la alimentación líquida sin procesar. Como se indica claramente en la descripción del texto y las figuras, la recuperación de calor para el precalentamiento del pienso se facilita mediante una etapa de condensación/evaporación ampliada en la parte trasera de cada módulo de destilación para alojar el dispositivo de precalentamiento, que está separado de la unidad de evaporación y condensación. Además, esta solución no implementa una configuración de precalentamiento de alimentación directa compacta integrada que minimice la resistencia al transporte de calor/masa, que es otro objetivo de la presente invención. Los tubos de ebullición de flujo del intercambiador de calor no están implementados en la sección de líquido de los módulos para generar vapor y los tubos de precalentamiento no se implementan dentro de la cámara de vapor directamente adyacente a las membranas porosas. Esta invención tampoco implementa ningún tubo de ebullición de flujo interno dentro de las cámaras de vapor. Más específicamente, esta invención aprovecha principalmente el principio de destilación por membrana (MD) en contraposición a los procesos integrados de flujo tubular, ebullición y MD del intercambiador de calor presentados en la presente invención. Por lo tanto, se observa que no hay dispositivos tubulares de ebullición por flujo para generar vapor, mientras que la presente invención implementa este proceso.

El documento WO 2014/020461 A1 describe un sistema de desalinización que comprende un dispositivo de generación de vapor, un dispositivo de destilación por membrana y un dispositivo de intercambio de calor, en donde el líquido alimentado al dispositivo de intercambio de calor se calienta mediante el líquido de salmuera del dispositivo de generación de vapor. En esta técnica anterior, el vapor producido en el dispositivo de generación de vapor se canaliza a través de un conducto hacia otro módulo de destilación de membrana. Por tanto, esta invención implementa líneas/conductos de transmisión de vapor para adaptarse a la condensación de vapor. Esto provoca una mayor resistencia a la transferencia de calor y masa, lo que da como resultado un proceso de condensación/evaporación menos eficiente. Evidentemente, esta invención se refiere al principio MD convencional mediante el cual el proceso de flujo se modifica para introducir una alimentación líquida parcial en ebullición en las paredes de condensación no permeables mediante la recuperación de calor de la salmuera líquida y el vapor de condensación. En particular, los tubos de ebullición del flujo del intercambiador de calor no se están implementando en la sección de líquido de los módulos para generar vapor y los tubos de precalentamiento no se implementan dentro de la cámara de vapor directamente adyacente a las membranas porosas. Esta invención tampoco implementa ningún tubo de ebullición de flujo interno dentro de las cámaras de vapor, que es el alcance de la presente invención. Además, el proceso de condensación de vapor y precalentamiento se lleva a cabo por medio de intercambiadores de calor externos, lo que da como resultado una estructura no compacta para el sistema.

El documento US 2010/0072135 A1 describe un método de destilación por membrana para la purificación de un líquido. Esta invención no implementa ningún proceso de ebullición por flujo tubular para aumentar el rendimiento del destilado; el rendimiento del destilado se logra solo mediante el proceso de destilación por membrana. No hay dispositivos de ebullición de flujo integrados para inducir la ebullición (por lo tanto, la producción de vapor adicional) dentro del aparato de destilación. Además, no se implementan tubos de ebullición de flujo interno en el sistema. El rendimiento del destilado para esta invención depende completamente del área de la membrana, por lo que un mayor rendimiento requerirá un área de membrana adicional. En la presente invención, el proceso primario se lleva a cabo mediante la ebullición del flujo del tubo del intercambiador de calor, mientras que el MD solo se identifica como el proceso secundario.

El documento EP 2 606 953 A1 describe un sistema de destilación por membrana que comprende una pluralidad de módulos de destilación por membrana que se acoplan a presión en serie y en el que la salida del destilado está provista de una membrana hidrófila permeable a los fluidos, en donde la membrana permeable a los fluidos es una válvula elastomérica. La descripción afirma que la unidad de destilación por membrana que funciona a la presión más baja está acoplada a la unidad colectora de destilado mediante un sifón y que hay un intercambiador de calor entre el colector de destilado, la primera de dichas membranas permeables a los fluidos, y que una pluralidad de entradas acopladas con dichas salidas de destilado se extienden con un intercambiador de calor a lo largo de dicha conexión, preferiblemente en una dirección de contraflujo. Los inventores también afirman que el sistema de destilación por membrana tiene un circuito ascendente de vapor compuesto por un intercambiador de calor donde el fluido del circuito ascendente de vapor se calienta a través del calor residual de otros sistemas. Por tanto, esta invención no describe un proceso de ebullición por flujo en tubos intercambiadores de calor, que utilice tubos de precalentamiento para el precalentamiento de la materia prima y tubos de ebullición de flujo interno dentro de las cámaras de vapor.

El documento WO 2014/163507 A1 se refiere a un sistema de destilación por membrana y a una fuente de energía para proporcionar calor para el proceso MD, en donde la fuente de energía se origina en el generador y se transfiere mediante un ciclo intermedio al primer módulo de destilación. La alimentación de fluido se calienta mediante un intercambiador de calor y, opcionalmente, se evapora parcialmente el fluido en el circuito para producir una mezcla de alimentación bifásica antes de canalizar dicho líquido al primer módulo de membrana. Esta invención aprovecha el proceso de destilación por membrana, incluida la preferencia de introducir una alimentación bifásica en los módulos de membrana. Por tanto, contrariamente a la presente invención, el documento WO 2014/163507 A1 no describe un módulo de destilación con características híbridas que comprenda dispositivos tales como tubos de ebullición de flujo

integrados en la sección de alimentación de líquido, tubos de precalentamiento y ebullición de flujo interno en las cámaras de vapor.

5 El documento WO 2014/058305 A1 describe un sistema de destilación por membrana y el método para poner en marcha dicho sistema y su uso. Esta invención se refiere a la generación externa de una alimentación multifásica usando un módulo de pretratamiento antes de canalizar dicha alimentación a un generador de vapor. Esta invención no propone un módulo de destilación con características híbridas que comprenda dispositivos tales como tubos de ebullición de flujo integrados dentro de la sección de alimentación de líquido, tubos de precalentamiento y ebullición de flujo interno en las cámaras de vapor.

10 Resumen de la invención

Desde este punto de vista, la presente invención se refiere a un sistema de purificación térmica de agua para producir un líquido destilado a partir de un líquido de alimentación bruto tal como se define en la reivindicación 1.

15 Las características importantes del sistema de purificación térmica de agua se definen en las reivindicaciones dependientes 2 a 7.

20 La presente invención se refiere también al método para operar el sistema de purificación térmica de agua según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, tal como se define en la reivindicación 8.

Las características importantes del método de la presente invención se definen en las reivindicaciones dependientes 9 a 11.

25 Así configurado, el sistema de purificación térmica de agua de la presente invención optimiza la energía térmica y el proceso de transferencia de masa que mejora la eficiencia energética global del sistema. La implementación de tubos intercambiadores de calor en las secciones de líquido en ebullición en varias unidades de destilación consecutivas produce vapor adicional además del vapor producido por la evaporación inducida por la membrana. La fuente principal del vapor generado a través de la ebullición por flujo en la superficie externa de los tubos de ebullición del 30 intercambiador de calor da como resultado hasta el 95 % de la producción de destilado, mientras que el proceso MD ahora actúa como un proceso secundario que agrega aproximadamente el 5 % de la producción de destilado. La sección de líquido en ebullición adyacente a la sección de vapor elimina cualquier línea de transmisión de vapor, reduciendo así la resistencia al transporte de vapor y las pérdidas de energía térmica debidas a la condensación dentro de las líneas de transmisión.

35 La compacidad se mejora mediante la implementación de tubos de precalentamiento del líquido de alimentación bruto en la sección de vapor para la condensación directa del vapor, lo que mejora el proceso de recuperación de energía térmica y permite una mayor vaporización del líquido de alimentación bruto en ebullición en las secciones de líquido de ebullición. Además, se logra una mayor eficiencia al implementar al menos un tubo intercambiador de calor de 40 ebullición interno en la sección de vapor que canaliza el líquido de alimentación bruto que fluye hacia su interior, optimizando aún más el proceso de recuperación de energía térmica mediante la reutilización de la energía térmica para una vaporización adicional del líquido de alimentación bruto.

45 La presente invención implementa un proceso integrado de ebullición, evaporación y condensación directa para una recuperación eficiente del calor y su reutilización dentro de una unidad de destilación compacta. Las mejoras en el proceso de transferencia de calor y masa aumentan la eficiencia termodinámica general del sistema, lo que permite la integración de más unidades de destilación para un mayor rendimiento sistémico.

50 Breve descripción de los dibujos

Otras características y ventajas de la presente invención aparecerán más claramente a partir de la descripción detallada de una realización de la invención que se presenta únicamente a modo de ejemplo no restringido y se ilustra mediante los dibujos adjuntos en los que:

55 la Figura 1 es una vista esquemática en perspectiva de un sistema de purificación térmica de agua según una realización ejemplar de la presente invención, con cuatro unidades de destilación consecutivas;

la Figura 2 es una vista superior esquemática de dos unidades de destilación consecutivas del sistema ilustrado en la Figura 1;

60 la Figura 3 es una vista lateral esquemática de las unidades de destilación ilustradas en la Figura 2;

la Figura 4 es una vista lateral esquemática de una sección de vapor de una unidad de destilación en una realización adicional de la presente invención;

- la Figura 5 es una vista superior esquemática de un sistema de purificación térmica de agua similar al ilustrado en la Figura 1, pero con ocho unidades de destilación consecutivas;
- 5 la Figura 6 es una vista similar a la Figura 5, excepto que se muestran las temperaturas del líquido o vapor en cada etapa del proceso de purificación;
- la Figura 7 es una vista frontal esquemática de una sección de vapor de las unidades de destilación ilustradas en la Figura 2;
- 10 la Figura 8 es una vista frontal esquemática de la sección de vapor ilustrada en la Figura 4;
- la Figura 9 es una vista en perspectiva de una realización ejemplar de una sección de líquido en ebullición del sistema de la presente invención;
- 15 la Figura 10 es una vista en perspectiva de una primera realización ejemplar de una sección de vapor del sistema de la presente invención;
- la Figura 11 es una vista en perspectiva de una segunda realización ejemplar de una sección de vapor del sistema de la presente invención;
- 20 la Figura 12 es una vista en perspectiva de una tercera realización ejemplar de una sección de vapor del sistema de la presente invención;
- 25 la Figura 13 es una vista en perspectiva despiezada de una realización ejemplar de una unidad de destilación del sistema de la presente invención;
- la Figura 14 es una vista frontal de la sección de líquido en ebullición ilustrada en la Figura 9, en la que los elementos que rodean los tubos del intercambiador de calor se ven por transparencia;
- 30 la Figura 15 es una vista frontal de la sección de vapor ilustrada en la Figura 10, observándose los elementos que rodean los tubos de precalentamiento por transparencia.

Descripción detallada de las realizaciones de la invención

- 35 Con referencia a la Figura 1, se muestra una realización a modo de ejemplo del sistema de purificación térmica de agua según la presente invención.
- En esta realización, el sistema 10 de purificación térmica de agua comprende unidades de destilación adyacentes primera a cuarta 1a, 1b, 1c y 1d que fluyen consecutivamente por el líquido de alimentación bruto que se va a concentrar. Este líquido de alimentación bruto puede ser agua salobre, agua de mar o aguas residuales de procesos industriales, por ejemplo. Este líquido de alimentación bruto fluye dentro del sistema según un circuito de flujo y una dirección de flujo específicos ilustrados en la Figura 1 mediante dos tipos de flechas. El primer tipo de flechas corresponde a conductos, tuberías o conductos para transportar el líquido de alimentación bruto L_P desde la cuarta unidad 1d de destilación a la primera unidad 1a de destilación. Como se detalla en los siguientes párrafos, el líquido de alimentación bruto L_P se precalienta de este modo antes de fluir a través de una cavidad del intercambiador de calor, que está adaptada para aumentar la temperatura del líquido de alimentación bruto L_P hasta que dicho líquido de alimentación bruto esté parcialmente hirviendo o cerca de su punto de ebullición. En los párrafos siguientes, para distinguir mejor el líquido de alimentación bruto que sale de la cavidad del intercambiador de calor, se utilizará el término “líquido de alimentación bruto en ebullición” y la referencia L_B en sustitución del término “líquido de alimentación bruto” y la referencia L_P . Se pueden proporcionar ventajosamente otros elementos intercambiadores de calor para calentar el líquido de alimentación bruto en ebullición L_B . Tales elementos intercambiadores de calor pueden consistir en una pluralidad de tubos intercambiadores de calor, a través de los cuales fluye un medio caliente H_M , tal como agua caliente o vapor. Tal como se ilustra en la Figura 1, estos tubos intercambiadores de calor están parcialmente integrados en una o más unidades de destilación, optimizando así el espacio ocupado por el sistema y limitando las pérdidas térmicas durante el transporte del fluido. El segundo tipo de flechas corresponde a conductos, tuberías o conductos para transportar el líquido de alimentación bruto en ebullición L_B desde la primera unidad 1a de destilación a la cuarta unidad 1d de destilación. Durante este transporte, la fase de vapor de dicho líquido de alimentación bruto en ebullición L_B se separa de su fase líquida, condensándose posteriormente dicha fase de vapor contra las superficies frías del sistema y recogiéndose como un líquido destilado.
- 60 Con referencia a las Figuras 2 y 3, se muestran dos unidades de destilación 1a, 1b consecutivas, es decir, una primera y una segunda, del sistema 10 mostrado en la Figura 1.
- Cada unidad de destilación comprende una sección 2 de líquido en ebullición y una sección 3 de vapor adyacente a la misma, estando dichas secciones 2, 3 separadas por una membrana 7 hermética a los líquidos y permeable al vapor. Esta membrana 7 está configurada para, por un lado, evitar que la fase líquida del líquido de alimentación bruto

- en ebullición L_B que fluye dentro de la sección 2 de líquido en ebullición fluya a través de la sección 3 de vapor y, por otro lado, permitir la evaporación del líquido de alimentación bruto en ebullición L_B en su superficie 7a y permitir que la fase de vapor de dicho líquido de alimentación bruto en ebullición L_B se difunda a través de la sección 3 de vapor a través de sus poros. La sección 2 de líquido en ebullición de la segunda unidad 1b de destilación está separada de la sección 3 de vapor de la primera unidad 1a de destilación mediante una placa de separación 6 hermética a los líquidos y al vapor, que puede estar provista ventajosamente de microestructuras mejoradas, tales como microcavidades o aletas microsalientes. Esta placa 6 está configurada para evitar cualquier circulación de fluido entre las dos secciones adyacentes y permitir la condensación en forma de película de la fase de vapor del líquido de alimentación bruto en ebullición L_B que fluye dentro de la sección 3 de vapor en la superficie 6a que está orientada hacia dicha sección de vapor. Además, esta placa 6, que se calienta durante el proceso de condensación, tiene una superficie 6b más caliente que está orientada hacia la sección 2 de líquido en ebullición de la segunda unidad 1b de destilación. Esta superficie 6b más caliente, que está en contacto con el líquido de alimentación bruto en ebullición L_B que fluye dentro de dicha sección 2 de líquido en ebullición, puede provocar la ebullición fluida de dicho líquido de alimentación bruto en ebullición en la superficie 6b. Para mejorar nuevamente la producción de vapor en la sección 2 de líquido en ebullición, una pluralidad de tubos 8 intercambiadores de calor se extienden ventajosamente a través de dicha sección 2 de líquido en ebullición. Estos tubos 8 intercambiadores de calor, que son atravesados por el medio caliente H_M , transfieren energía térmica a través de sus superficies externas 8a al líquido de alimentación bruto en ebullición L_B que fluye dentro de la sección 2 de líquido en ebullición, de modo que este líquido de alimentación bruto en ebullición L_B hierva en contacto con dichas superficies externas 8a. Los tubos 8 intercambiadores de calor pueden estar provistos ventajosamente de estructuras mejoradas interna y externamente, tales como aletas salientes dispuestas a lo largo de sus superficies externas 8a y nervaduras internas para mejorar la transferencia térmica que se produce entre el exterior de dichos tubos y el interior de los mismos, mejorando así la ebullición del líquido de alimentación bruto en ebullición L_B contra las superficies externas de dichos tubos 8 intercambiadores de calor.
- El líquido de alimentación bruto en ebullición L_B entra sucesivamente en la sección 2 de líquido en ebullición de la primera unidad 1a de destilación a través de los orificios 4 de entrada, se vaporiza parcialmente mediante ebullición y evaporación en dicha sección 2 de líquido en ebullición, difundiéndose la fase de vapor a través de la membrana 7 y saliendo la fase líquida de la sección 2 de líquido en ebullición a través de los orificios 5 de salida. Posteriormente, esta fase líquida se canaliza a través de conductos a los orificios 4 de entrada de la sección 2 de líquido en ebullición de la segunda unidad 1b de destilación. Las válvulas reguladoras o de purga 14 pueden disponerse ventajosamente a lo largo de los conductos entre los orificios 5 de salida y los orificios 4 de entrada para reducir la presión del líquido de alimentación bruto en ebullición L_B . Este proceso puede repetirse para la segunda unidad 1b de destilación y, a continuación, para cada unidad de destilación sucesiva del sistema 10.
- Para precalentar el líquido de alimentación bruto, el sistema 10 comprende una pluralidad de tubos 9 de precalentamiento que se extienden a través de las secciones de vapor 3 de las unidades 1a-1d de destilación, siendo atravesados consecutivamente por dichos tubos 9 de precalentamiento por el líquido de alimentación bruto antes de que dicho líquido de alimentación bruto fluya a través de la cavidad del intercambiador de calor y, posteriormente, a través de las secciones 2 de líquido en ebullición de dichas unidades de destilación 1a-1 d. Estos tubos 9 de precalentamiento permiten precalentar el líquido de alimentación bruto contenido en su interior mediante el uso de energía térmica transferida por el vapor de condensación contenido en el vapor secciones 3 de las unidades 1a-1d de destilación cuando dicho vapor se condensa contra las superficies externas 9a de los tubos 9 de precalentamiento. Para mejorar la transferencia térmica que se produce entre el exterior de dichos tubos y el interior de los mismos, dichos tubos 9 pueden estar provistos ventajosamente de aletas salientes dispuestas a lo largo de sus superficies externas 9a y estructuras de nervaduras internas.
- En la realización mostrada en las Figuras 2, 3 y 7, en cada sección 3 de vapor de las unidades 1a-1d de destilación se disponen tres tubos 9 de precalentamiento separados verticalmente, con el líquido de alimentación bruto L_P a precalentar que fluye hacia su interior. El líquido destilado producido por la condensación del vapor contra las superficies externas 9a de dichos tubos 9 de precalentamiento y contra las superficies 6a de la placa de separación 6 fluye hacia abajo en la parte inferior de dichas secciones de vapor 3 y sale de las mismas a través de los puertos 11 de descarga de destilado dispuestos en un lado inferior de dichas secciones de vapor. Posteriormente, este líquido destilado se canaliza hacia un tanque de almacenamiento a través de un conducto de destilado que está en comunicación fluídica con los puertos 11 de descarga de destilado.
- En la realización alternativa mostrada en las Figuras 4 y 8, dos tubos 9 de precalentamiento separados verticalmente están dispuestos en la parte inferior de cada sección 3 de vapor de las unidades 1a-1d de destilación y dos tubos 15 de ebullición internos separados verticalmente están dispuestos en la parte superior de cada sección 3 de vapor. Estos tubos 15 de ebullición internos son atravesados por el líquido de alimentación bruto en ebullición L_B que sale del puerto de salida 5 de la sección 2 de líquido en ebullición dispuesta corriente arriba de la misma en relación con la dirección del flujo de dicho líquido de alimentación bruto en ebullición L_B y están en comunicación de fluido con el puerto de entrada 4 de la sección 2 de líquido en ebullición dispuesto corriente abajo con respecto a la dirección del flujo de dicho líquido de alimentación bruto en ebullición L_B preferiblemente mediante una válvula reguladora o de destello. El vapor contenido en las secciones de vapor 3 se condensa contra las superficies periféricas de dichos tubos 9 de precalentamiento y dichos tubos 15 de ebullición internos, lo que induce la ebullición por flujo dentro de dichos tubos 15 de ebullición internos. El líquido destilado producido por la condensación del vapor contra las superficies

externas de los tubos 15 de ebullición internos puede tener ventajosamente una temperatura más alta que el líquido de alimentación bruto L_P que fluye dentro de los tubos 9 de precalentamiento, precalentando así ventajosamente dicho líquido de alimentación bruto L_P .

- 5 En la realización mostrada en las Figuras 5 y 6, el sistema 10 comprende ocho unidades 1a a 1h de destilación consecutivas, teniendo dichas unidades de destilación sustancialmente la misma estructura que las unidades de destilación ilustradas en la Figura 1.
- 10 Sin embargo, en esta realización, los tubos del intercambiador de calor 8 se extienden solo a través de las secciones 2 de líquido en ebullición de las unidades 1a, 1b y 1c de destilación primera, segunda y tercera. Estos tubos 8 intercambiadores de calor se colocan corriente abajo de una cavidad 16 del intercambiador de calor que comprende una pared aislante 17 y una placa de transferencia de calor 18 espaciada horizontalmente de la misma, estando dicha placa de transferencia de calor 18 espaciada horizontalmente de la primera placa de separación 6' que bordea la sección 2 de líquido en ebullición de la primera unidad 1a de destilación. La pared aislante 17 y la placa de transferencia de calor 18 definen una primera trayectoria de flujo para el líquido de alimentación bruto precalentado L_P que sale de los tubos 9 de precalentamiento de la primera unidad 1a de destilación y la placa de transferencia de calor 18 y la primera placa de separación 6' definen una segunda trayectoria de flujo para el medio caliente H_M . Así configurada, la cavidad 16 del intercambiador de calor permite calentar el líquido de alimentación bruto L_P que fluye a través de la primera trayectoria de flujo a través de la placa de transferencia de calor 18. Tal como se muestra en la Figura 6, debido a la temperatura más alta T_{HM} del medio caliente H_M en relación con la temperatura T_{10LP} del líquido de alimentación bruto L_P que sale de los tubos 9 de precalentamiento de la primera unidad 1a de destilación, la temperatura del líquido de alimentación bruto L_P aumenta para alcanzar la temperatura T_{11LP} a la salida de la primera trayectoria de flujo y antes de que dicho líquido de alimentación bruto L_P se canalice a través de conductos hacia la sección 2 de líquido en ebullición de dicha primera unidad 1a de destilación. Esta temperatura final T_{11LP} es sustancialmente igual o ligeramente superior a la temperatura inicial T_{1LB} del líquido de alimentación bruto en ebullición L_B que fluye a través de las sucesivas secciones 2 de líquido en ebullición de las unidades 1a a 1h de destilación. Por tanto, esta temperatura final T_{11LP} puede ser ventajosamente igual al punto de ebullición del líquido de alimentación bruto L_B , de modo que el proceso de ebullición se produce casi inmediatamente cuando el líquido de alimentación bruto en ebullición L_B entra en la sección de ebullición 2 de la primera unidad 1a de destilación.
- 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65
- El sistema 10 ilustrado en las Figuras 5 y 6 también comprende una cámara de precalentamiento 20 dispuesta corriente arriba de la última unidad 1h de destilación con respecto a la dirección del flujo del líquido de alimentación bruto L_P . Esta cámara de precalentamiento 20 comprende una pared aislante 17' y una placa de transferencia de calor 18' espaciada horizontalmente de la misma, y dicha placa de transferencia de calor 18' limita con la sección 3 de vapor de la última unidad 1h de destilación. La pared aislante 17' y la placa de transferencia de calor 18' definen una primera trayectoria de flujo para el líquido de alimentación bruto L_P suministrado desde una fuente de líquido bruto 23.
- Así configurada, la cámara de precalentamiento 20 permite calentar el líquido de alimentación bruto L_P a través de la placa de transferencia de calor 18' debido a la temperatura más alta del vapor T_{8VAPOR} que fluye dentro de la sección 3 de vapor de la última unidad 1h de destilación en relación con la temperatura T_{1LP} del líquido de alimentación bruto L_P de la primera trayectoria de flujo. Por tanto, la temperatura del líquido de alimentación bruto L_P aumenta para alcanzar una temperatura final T_{2LP} de dicha primera trayectoria de flujo y antes de que dicho líquido de alimentación bruto L_P se canalice a través de conductos dentro de los tubos 9 de precalentamiento de la última unidad 1h de destilación.
- Tal como se ilustra en la Figura 5, el sistema 10 puede comprender ventajosamente un conducto de destilado 12 en comunicación fluídica con los puertos 11 de descarga de destilado de las unidades 1a a 1h de destilación, canalizando dicho conducto de destilado 12 el líquido destilado hacia un tanque 13 de almacenamiento a través de una pluralidad de constricciones 19, permitiendo dichas constricciones 19 aislar las presiones variables que se producen dentro del conducto de destilado 12. De hecho, desde la primera unidad 1a de destilación hasta la última unidad 1h de destilación, la presión del líquido destilado tiende a disminuir. El sistema 10 también puede comprender una descarga de salmuera 21 para recoger el líquido de alimentación bruto concentrado en ebullición L_B que sale de la sección 2 de líquido en ebullición de la última unidad 1h de destilación y una línea de gas no condensable 22 para recoger los gases no condensables que salen de las secciones de vapor 3 de las unidades 1a a 1h de destilación.
- Por tanto, las etapas operativas del sistema 10 que se muestran en las Figuras 5 y 6 son sucesivamente:
- canalizar el líquido de alimentación bruto L_P que tiene inicialmente una primera temperatura T_{1LP} hacia la sección 2 de líquido en ebullición de una primera unidad 1a de destilación a través de una pluralidad de tubos 9 de precalentamiento adaptados para aumentar la temperatura $T(n)_{LP}$ del líquido de alimentación bruto L_P desde dicha primera temperatura T_{1LP} a una segunda temperatura T_{11LP} ;
 - canalizar el líquido de alimentación bruto en ebullición L_B que tiene inicialmente una temperatura T_{1LB} , siendo dicha temperatura T_{1LB} igual o ligeramente inferior a dicha segunda temperatura T_{11LP} , hacia las secciones 2 de líquido en ebullición de dicha primera la unidad 1a de destilación y, posteriormente, de las unidades 1b a 1h de destilación consecutivas;

- 5 c) calentar dicho líquido de alimentación bruto en ebullición L_B con una pluralidad de tubos 8 intercambiadores de calor que se extienden a través de las secciones 2 de líquido en ebullición de dicha primera unidad 1a de destilación y dos unidades 1b y 1c, de destilación consecutivas adicionales, para hervir el líquido de alimentación bruto L_B que fluye dentro de dichas secciones 2 de líquido en ebullición, con una disminución de la temperatura $T(n)_{LB}$ del líquido de alimentación bruto en ebullición L_B en cada sección 2 de líquido en ebullición debido a la caída de presión dentro de cada sección 2 de líquido en ebullición desde su puerto de entrada 4 hasta el puerto de salida 5 de la misma;
- 10 d) hacer pasar el vapor producido por el líquido de alimentación bruto en ebullición L_B que hierve en la sección 2 de líquido en ebullición de cada unidad de destilación a través de la membrana 7 hermética a los líquidos y permeable al vapor hacia la sección 3 de vapor adyacente a la misma;
- 15 e) condensar dicho vapor en dicha sección 3 de vapor para producir un líquido destilado;
- 15 f) canalizar dicho líquido destilado al tanque 13 de almacenamiento.

Tal como se define en la reivindicación independiente 8, estas etapas operativas pueden adaptarse a cualquier sistema 10 que tenga al menos una unidad de destilación.

- 20 Además, estas etapas operativas pueden adaptarse a un sistema 10 que tenga la realización específica ilustrada en la Figura 4. Por tanto, simultáneamente a la etapa b), una etapa adicional b') puede consistir en canalizar el líquido de alimentación bruto en ebullición L_B que sale de los puertos 5 de salida de la sección 2 de líquido en ebullición de una unidad de destilación corriente arriba hacia la sección 3 de vapor de la misma a través de al menos un tubo 15 de ebullición interno antes de canalizar dicho líquido de alimentación bruto en ebullición L_B a la sección 2 de líquido en ebullición de una unidad de destilación corriente abajo, dicho flujo arriba y unidades de destilación posteriores son dos unidades de destilación consecutivas del sistema.

30 Las Figuras 9 y 14 ilustran una sección 2 de líquido en ebullición que comprende cinco tubos 8 intercambiadores de calor orientados verticalmente y espaciados horizontalmente, y varios puertos 4 de entrada y puertos 5 de salida. Las direcciones de flujo del medio caliente H_M y del líquido de alimentación bruto en ebullición L_B se muestran en las mismas figuras.

35 Las Figuras 10 y 15 ilustran una sección 3 de vapor que comprende cinco tubos de precalentamiento integrados 9 orientados horizontalmente y separados verticalmente, y un puerto de descarga de destilado 11. La dirección del flujo del líquido de alimentación bruto L_P se muestra en las mismas figuras.

40 La Figura 11 ilustra una sección 3 de vapor que comprende dos tubos de ebullición interna integrados 15 orientados horizontalmente y separados verticalmente posicionados en la parte superior de dicha sección de vapor y tres tubos 9 de precalentamiento orientados horizontalmente y separados verticalmente colocados en la parte inferior de dicha sección de vapor. El puerto de descarga de destilado 11, el líquido de alimentación bruto L_P y el líquido de alimentación bruto en ebullición L_B también se muestran en la misma figura.

45 La Figura 12 ilustra una sección 3 de vapor que comprende un conjunto de tubos de ebullición interna 15 situados en la parte superior de dicha sección de vapor, un conjunto de tubos 9 de precalentamiento situados en la parte inferior de dicha sección de vapor y un conducto de destilado 12 en comunicación fluídica con los orificios de descarga de destilado 11 de dicha sección de vapor.

50 La Figura 13 ilustra una unidad de destilación que comprende una superficie de condensación microestructurada 6a situada delante de la sección 2 de líquido en ebullición ilustrada en la Figura 9, y la sección 3 de vapor ilustrada en la Figura 10 situada delante de la superficie 6a de condensación con la superficie más caliente 6b situada en el lado opuesto de la superficie 6a de condensación, estando dicha sección 2 de líquido en ebullición y dicha sección 3 de vapor separadas por una membrana 7 hermética a los líquidos y permeable al vapor. La ebullición del flujo en la sección 2 de líquido en ebullición se produce en la superficie externa 8a de los tubos 8 intercambiadores de calor, mientras que la condensación de vapor en la sección 3 de vapor se produce en la superficie externa 9a de los tubos 9 de precalentamiento y la superficie 6a de condensación.

55 La descripción detallada anterior con referencia a los dibujos ilustra, en lugar de limitar, la invención. Existen numerosas alternativas que entran dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas. En particular, en una realización adicional de la presente invención, el sistema de purificación térmica de agua puede incluir una pluralidad de módulos consecutivos, comprendiendo cada módulo varias unidades de destilación consecutivas y estando en comunicación de fluido con un módulo adyacente mediante una configuración de flujo bifurcado para el líquido de alimentación bruto en ebullición que fluye dentro de las secciones de líquido en ebullición. El líquido de alimentación bruto que fluye dentro de los tubos de precalentamiento puede estar ventajosamente en una configuración de flujo bifurcado.

A continuación se proporcionan tres ejemplos para comparar la simulación de rendimiento de la presente invención (ejemplo 3) con los sistemas MD de las técnicas anteriores conocidas (ejemplos 1 y 2).

Parámetros del sistema

i) Fuente térmica = 30 kW, II) eficiencia supuesta del sistema, $\eta = 80\%$, III) Talimentación,in = 25 °C, IV) Talimentación,final = 70 °C, V) caudal de alimentación, $V_{\text{alimentación}} = 7 \text{ l/min}$, VI) calor latente, $H_{\text{LV}} = 2.333 \text{ kJ/kg}$ (constante supuesta para el agua a 70 °C), VII) flujo de membrana específico supuesto, $N = 10 \text{ l/min}$, VIII) área de membrana/por efecto, $A_m = 0,5 \text{ m}^2$, IX) densidad, $\rho = 1 \text{ kg/litro}$ y, X) número de efectos = 8.

Nota

- El documento US 2010/0072135 A1 afirmó una medición óptima del flujo específico de $1,9 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s-Pa}$. Suponiendo una fuerza motriz nominal, $\Delta P = 3,5 \text{ kPa}$ (0,035 bar), el flujo de membrana específico alcanzado es de $2,4 \text{ l/m}^2\text{-h}$. Vapor parcial para agua a $T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ($P_v = 31,2 \text{ kPa}$) y $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ($P_v = 3,17 \text{ kPa}$). Por tanto, la supuesta fuerza motriz nominal de 3,5 kPa en cada módulo se evalúa como $(31,2 - 3,17) / \text{efecto}$ 8.

- Zhao y col. (2013) obtuvieron un flujo de membrana específico de $3,0 - 8,7 \text{ l/m}^2\text{-h}$ a partir de sus experimentos.
- La suposición de $10 \text{ l/m}^2\text{-h}$ para esta simulación es proporcionar una comparación imparcial con las invenciones de MD de las técnicas anteriores conocidas.

Ejemplo 1: Sistema MD de 8 efectos con líneas de transmisión de vapor pero sin precalentamiento de la alimentación

Área total de la membrana ($A_m \times 8$ efectos)	4,0.	m^2
Consumo de energía térmica del primer módulo para la evaporación MD ($N \times A_m \times H_{\text{LV}} / 3600\text{s}$)	3,24	kW
Destilado total producido ($N \times A_m \times 8$ efectos $\times \eta$)	32	l/h
Energía térmica equivalente de salida total (total de destilado producido / $3600\text{s} \times H_{\text{LV}}$)	20,74	kW

El primer efecto (elevador de vapor) del sistema MD solo puede consumir 3,24 kW (10,8 %) de la energía térmica total disponible de 30 kW. Para consumir una carga térmica total de 30 kW, el área de la membrana tendría que ampliarse 9,26 veces hasta alcanzar los $4,63 \text{ m}^2/\text{efecto}$ y el área total de la membrana del sistema hasta los $37,04 \text{ m}^2$. En la simulación no se supusieron pérdidas por condensación en las líneas de transmisión.

Ejemplo 2: Sistema MD de 8 efectos con líneas de transmisión de vapor y precalentamiento de la alimentación

Consumo de energía térmica del primer módulo para la evaporación MD ($N \times A_m \times H_{\text{LV}} / 3600$)	3,24	kW
Consumo de energía térmica del primer módulo para el precalentamiento de la alimentación ($V_{\text{alimentación}}/60 \times (T_{\text{alimentación,final}} - T_{\text{alimentación,in}}) \times C_p$ (4189 kJ/kg-K) / (8 efectos $\times \eta$)	3,44	kW
Consumo de energía térmica del primer módulo para la evaporación MD ($N \times A_R \times H_{\text{LV}} / 3600$)	6,68	kW
Área total de membrana requerida para implementar el precalentamiento de MD y alimentación, A_R	1,03	m^2
Destilado total producido ($N \times A_R \times 8$ efectos $\times \eta$)	65,9	l/h
Energía térmica equivalente de salida total (total de destilado producido / $3600\text{s} \times H_{\text{LV}}$)	42,72	kW
Área total de la membrana ($A_R \times 8$ efectos)	8,24	m^2

Con el precalentamiento de la alimentación, el primer módulo de membrana es capaz de consumir 6,68 kW (22,3 %) de la energía térmica total disponible de 30 kW. Sin embargo, el área de la membrana tendrá que aumentarse de desde $0,5 \text{ m}^2$ hasta $1,03 \text{ m}^2$ para producir suficiente vapor para soportar el precalentamiento del alimento. El área total de la membrana del sistema ahora ha aumentado a $8,24 \text{ m}^2$. En la simulación no se supusieron pérdidas por condensación en las líneas de transmisión. Debido a la presencia de líneas de transmisión de vapor, no se tuvo en cuenta ninguna mejora del rendimiento en el proceso MD.

Ejemplo 3: La invención actual se ajusta a la realización mostrada en la Figura 5 con tubos de ebullición de flujo interno y condensación directa implementados en los tres primeros módulos. Para esta simulación, se supone una distribución equitativa de la energía térmica para la ebullición del flujo en los tres módulos. En aplicaciones prácticas, el primer efecto puede consistir preferiblemente en imponer una carga térmica mucho mayor para aumentar la producción de destilado y la eficiencia térmica.

	Área total de la membrana ($A_m \times 8$ efectos)	4,0	m^2
	Consumo de energía térmica del primer módulo para la evaporación MD ($N \times A_m \times H_{LV} / 3600$)	3,24	kW
	Energía térmica requerida para el precalentamiento/efecto de la alimentación bruta	3,44	kW
5	Consumo de energía térmica mediante ebullición en tubo (primer efecto de destilación) → (30 kW - 3,24 kW)/3 efectos	8,92	kW
	Consumo de energía térmica mediante ebullición en tubo (segundo efecto de destilación) → (30 kW - 3,24 kW)/3 efectos	8,92	kW
10	Consumo de energía térmica mediante ebullición en tubo (tercer efecto de destilación) → (30 kW - 3,24 kW)/3 efectos	8,92	kW
	Mejora estimada del rendimiento de MD debido a la condensación directa y a la ebullición por flujo interno	10	%
15	Destilado total MD producido mediante MD ($N \times A_m \times 8$ efectos $\times \eta \times 1,1$)	35,2	l/h
	Destilado total producido por ebullición en el primer efecto → $(8920/H_{LV} \times 3600) + ((8920 - 3440)/H_{LV} \times 3600 \times 7$ efectos $\times \eta$)	66,1	l/h
	Destilado total producido mediante ebullición en segundo efecto → $(8920/H_{LV} \times 3600) + ((8920 - 3440)/H_{LV} \times 3600 \times 6$ efectos $\times \eta$)	54,4	l/h
20	Destilado total producido por ebullición en el tercer efecto → $(8920/H_{LV} \times 3600) + ((8920 - 3440)/H_{LV} \times 3600 \times 5$ efectos $\times \eta$)	47,6	l/h
	Destilado total producido mediante MD y ebullición	203,3	l/h
	Energía térmica equivalente de salida total (total de destilado producido/3600 s $\times H_{LV}$)	131,75	kW

25 La energía térmica requerida para MD es de 3,24 kW, mientras que los 27,76 kW restantes se distribuyen en los tubos de ebullición del intercambiador de calor en los tres (3) primeros efectos, es decir, 8,92 kW para la ebullición o el efecto. Se consume una carga térmica total de 30 kW para vaporizar el líquido y producir un precalentamiento del líquido destilado y del líquido de alimentación bruta, manteniendo el área de la membrana a 0,5 m^2 por efecto, es decir, el área total de la membrana del sistema es de 4,0 m^2 . El rendimiento simulado indicó un aumento de 3,08 veces en la capacidad de producción de destilado en comparación con el sistema MD con características de precalentamiento (es decir, en comparación con el ejemplo 2 anterior), mientras que se encontró una producción de 10 % de destilado 6,35 veces mayor en comparación con un sistema MD sin precalentamiento de la alimentación (es decir, en comparación con el ejemplo 1 anterior).

35

40

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

1. Sistema (10) de purificación térmica de agua para producir un líquido destilado a partir de un líquido de alimentación bruto (L_p , L_b) que comprende:
- 5 -una pluralidad de unidades de destilación (1a-1h) que son atravesadas consecutivamente por el líquido de alimentación bruto (L_p , L_b), cuya pluralidad de unidades de destilación (1a-1H) incluye una primera unidad (1a) de destilación y una pluralidad de unidades (1b-1h) de destilación consecutivas;
- 10 en donde cada unidad (1a-1h) de destilación comprende una sección (2) de líquido en ebullición y una sección (3) de vapor adyacente a la misma;
- 15 en donde la sección (2) de líquido en ebullición de cada unidad (1a-1h) de destilación comprende una pluralidad de puertos (4) de entrada y puertos (4) de salida, a través de los cuales entra y sale respectivamente del líquido de alimentación bruto (L_p , L_b);
- 20 en donde dos unidades (1a, 1b) de destilación consecutivas, respectivamente una unidad (1a) de destilación corriente arriba y una unidad (1b) de destilación corriente abajo, se implementan de manera que la sección (2) de líquido en ebullición de la unidad (1b) de destilación corriente abajo esté separada de la sección (3) de vapor de la unidad (1a) de destilación corriente arriba por una placa (6) de separación hermética a líquidos y vapor y de la sección (3) de vapor de la unidad (1b) de destilación posterior mediante una membrana (7) hermética a los líquidos y permeable al vapor;
- 25 -una cavidad (16) de intercambiador de calor adaptada para transferir energía térmica al líquido de alimentación bruto (L_p) antes de que dicho líquido de alimentación bruto entre en la sección (2) de líquido en ebullición de dicha primera unidad (1a) de destilación;
- 30 -una pluralidad de tubos (8) intercambiadores de calor que se extienden a través de la sección (2) de líquido en ebullición de al menos dicha primera unidad (1a) de destilación, estando dichos tubos (8) intercambiadores de calor configurados para transferir energía térmica desde un medio caliente (H_m) contenido en su interior al líquido de alimentación bruto (L_b) que fluye hacia el exterior, conduciendo así al líquido de alimentación bruto (L_b) a ebullición dentro de la sección (2) de líquido en ebullición;
- 35 -una pluralidad de tubos (9) de precalentamiento que se extienden a través de la sección (3) de vapor de cada unidad (1a-1h) de destilación, dichos tubos (9) de precalentamiento son atravesados consecutivamente por el líquido de alimentación bruto (L_p) antes de que dicho líquido de alimentación bruto fluya dentro de las secciones (2) de líquido en ebullición de las unidades de destilación (1a-1h) y están configurados para calentar el líquido de alimentación bruto (L_p) contenido en su interior usando la energía térmica transferida por el vapor contenido dentro de las secciones de vapor (3) de las unidades de destilación (1a-1h) cuando dicho vapor se condensa contra las superficies externas (9a) de los tubos (9) de precalentamiento, produciendo así un líquido destilado que fluye fuera de la sección (3) de vapor de cada unidad (1a-1h) de destilación a través de un orificio de descarga de destilado (11);
- 40 -un conducto de destilado (12) en comunicación fluídica con cada orificio de descarga de destilado (11), suministrando dicho conducto de destilado (12) a un tanque (13) de almacenamiento con el líquido destilado,
- 45 en donde dos unidades de destilación consecutivas, respectivamente una unidad (1a) de destilación corriente arriba y una unidad (1b) de destilación corriente abajo, se implementan de manera que los puertos (5) de salida de la sección (2) de líquido en ebullición de la unidad (1a) de destilación corriente arriba estén en comunicación fluídica con al menos un tubo (15) de ebullición interno que se extiende a través de la sección (3) de vapor de dicha unidad (1a) de destilación corriente arriba y de tal manera que los puertos (4) de entrada de la sección (2) de líquido en ebullición de la unidad (1b) de destilación posterior estén en comunicación fluídica con dicho al menos un orificio interno tubo (15) de ebullición.
- 55 2. Sistema (10) de purificación térmica de agua según la reivindicación 1, en donde dicha primera unidad (1a) de destilación está situada corriente arriba de la pluralidad de unidades (1b-1h) de destilación consecutivas del Sistema (10) de purificación térmica de agua, lo que conduce a una disminución de la temperatura ($T(n)_{LB}$) del líquido de alimentación bruto (L_b) cuando fluye desde dicha primera unidad (1a) de destilación a dicha pluralidad de unidades (1b-1h) de destilación consecutivas.
- 60 3. Sistema (10) de purificación térmica de agua según la reivindicación 1 o 2, en donde una pluralidad de tubos (8) intercambiadores de calor se extiende además a través de cada sección (2) de líquido en ebullición de i unidades (1b-1c) de destilación consecutivas adicionales entre la pluralidad de unidades (1b-1h) de destilación consecutivas, siendo i un número entero mayor que 0.
- 65 4. Sistema (10) de purificación térmica de agua según la reivindicación 3, en donde i+1 representa menos del 40 % del número total de unidades de destilación del Sistema (10) de purificación térmica de agua.

5. Sistema (10) de purificación térmica de agua según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde los orificios (4) de entrada de la sección (2) de líquido en ebullición de la unidad (1b) de destilación corriente abajo están en comunicación fluídica con dicho al menos un tubo (15) de ebullición interno a través de una válvula (14) reguladora o de destello.
- 5 6. Sistema (10) de purificación térmica de agua según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la placa (6) de separación que separa la sección (3) de vapor de una unidad (1a) de destilación corriente arriba de la sección (2) de líquido en ebullición de una unidad (1b) de destilación corriente abajo está configurada para calentar el líquido de alimentación bruto (L_B) contenido dentro de dicha sección (2) de líquido en ebullición usando energía térmica transferida por el vapor contenido dentro de dicha sección (3) de vapor cuando dicho vapor se condensa contra una superficie (6a) de condensación de dicha placa (6) de separación, haciendo así que el líquido de alimentación bruto (L_B) hierva dentro de dicha sección (2) de líquido en ebullición.
- 10 7. Sistema (10) de purificación térmica de agua según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde los tubos (9) de precalentamiento están provistos de aletas y nervaduras que sobresalen dispuestas a lo largo de su periferia, y dichas aletas y nervaduras mejoran la transferencia de calor entre el exterior de cada tubo (9) de precalentamiento y el interior del mismo.
- 15 8. Método para operar el Sistema (10) de purificación térmica de agua según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende las etapas de:
- 20 a)canalizar el líquido de alimentación bruto (L_P) que tiene inicialmente una primera temperatura (T_{1LP}) hacia la sección (2) de líquido en ebullición de dicha primera unidad (1a) de destilación a través de la pluralidad de tubos (9) de precalentamiento para aumentar la temperatura ($T(n)_{LP}$) del líquido de alimentación bruto (L_P) desde dicha primera temperatura (T_{10LP}) hasta una segunda temperatura (T_{10LP});
- 25 b)canalizar el líquido de alimentación bruto (L_P) que tiene inicialmente dicha segunda temperatura (T_{10LP}) hacia la sección (2) de líquido en ebullición de dicha primera unidad (1a) de destilación a través de la cavidad (16) del intercambiador de calor para aumentar la temperatura del líquido de alimentación bruto (L_P) desde dicha segunda temperatura (T_{10LP}) a una tercera temperatura (T_{11LP}) usando la energía térmica transferida desde el medio caliente (H_M);
- 30 c)canalizar el líquido de alimentación bruto (L_B) que tiene inicialmente dicha tercera temperatura (T_{11LP}), o una temperatura (T_{1LB}) ligeramente inferior a dicha tercera temperatura (T_{11LP}), hacia las secciones (2) de líquido en ebullición de dicha primera unidad (1a) de destilación y, posteriormente, de dicha pluralidad de unidades (1b-1h) de destilación consecutivas;
- 35 d)calentar dicho líquido de alimentación bruto (L_B) con la pluralidad de tubos (8) intercambiadores de calor que se extienden a través de la sección (2) de líquido en ebullición de al menos dicha primera unidad (1a) de destilación para hervir el líquido de alimentación bruto (L_B) que fluye dentro de dicha sección (2) de líquido en ebullición, con una disminución de la temperatura ($T(n)_{LB}$) del líquido de alimentación bruto (L_B) en cada sección (2) de líquido en ebullición debido a la caída de presión dentro de cada sección de líquido en ebullición desde sus orificios (4) de entrada hasta sus orificios (5) de salida;
- 40 e)hacer pasar el vapor producido por el líquido de alimentación bruto (L_B) en ebullición en la sección (2) de líquido en ebullición de cada unidad (1a-1h) de destilación a través de la membrana (7) hermética a los líquidos y permeable al vapor a la sección (3) de vapor adyacente a la misma;
- 45 f)condensar dicho vapor en dicha sección (3) de vapor para producir el líquido destilado;
- 50 g)canalizar dicho líquido destilado al tanque (13) de almacenamiento,
- el método comprende además, simultáneamente a la etapa c), la etapa c) que consiste en canalizar el líquido de alimentación bruto (L_B) que sale de los puertos (5) de salida de la sección (2) de líquido en ebullición de una unidad (1a) de destilación corriente arriba hacia la sección (3) de vapor de la misma a través de al menos un tubo (15) de ebullición interno antes de canalizar dicho líquido de alimentación bruto (L_B) a la sección (2) de líquido en ebullición de una unidad (1b) de destilación continua, siendo dichas unidades (1a, 1b) de destilación corriente arriba y corriente abajo dos unidades de destilación consecutivas del Sistema (10) de purificación térmica de agua.
- 55 9. Método según la reivindicación 8, en donde, durante la etapa c), el líquido de alimentación bruto (L_B) hierva.
- 60 10. Método según la reivindicación 8 o 9, en donde, durante la etapa f), la condensación del vapor se produce contra las superficies externas (9a) de los tubos (9) de precalentamiento, contra una superficie (6a) de condensación de cada una de dichas placas (6) de separación del Sistema (10) de purificación térmica de agua y contra una superficie externa de dicho al menos un tubo (15) de ebullición interno.
- 65 11. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, en donde la etapa d) incluye además calentar dicho líquido de alimentación bruto (L_B) con una pluralidad de tubos (8) intercambiadores de calor que se

ES 2 986 292 T3

extienden a través de cada sección (2) de líquido en ebullición de i unidades (1b-1c) de destilación consecutivas adicionales entre la pluralidad de unidades (1b-1h) de destilación consecutivas, siendo i un número entero mayor que 0.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

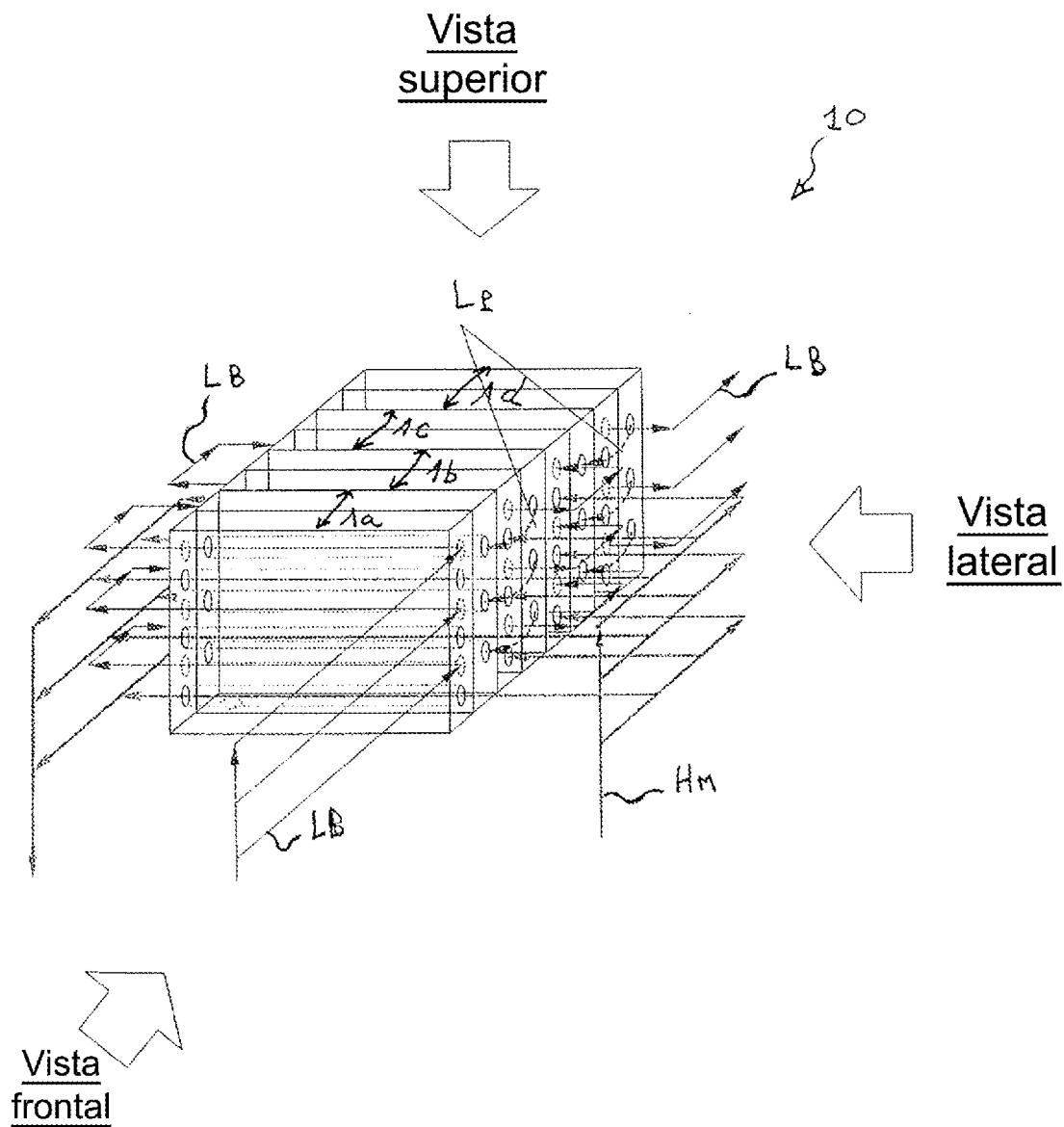


Figura 1

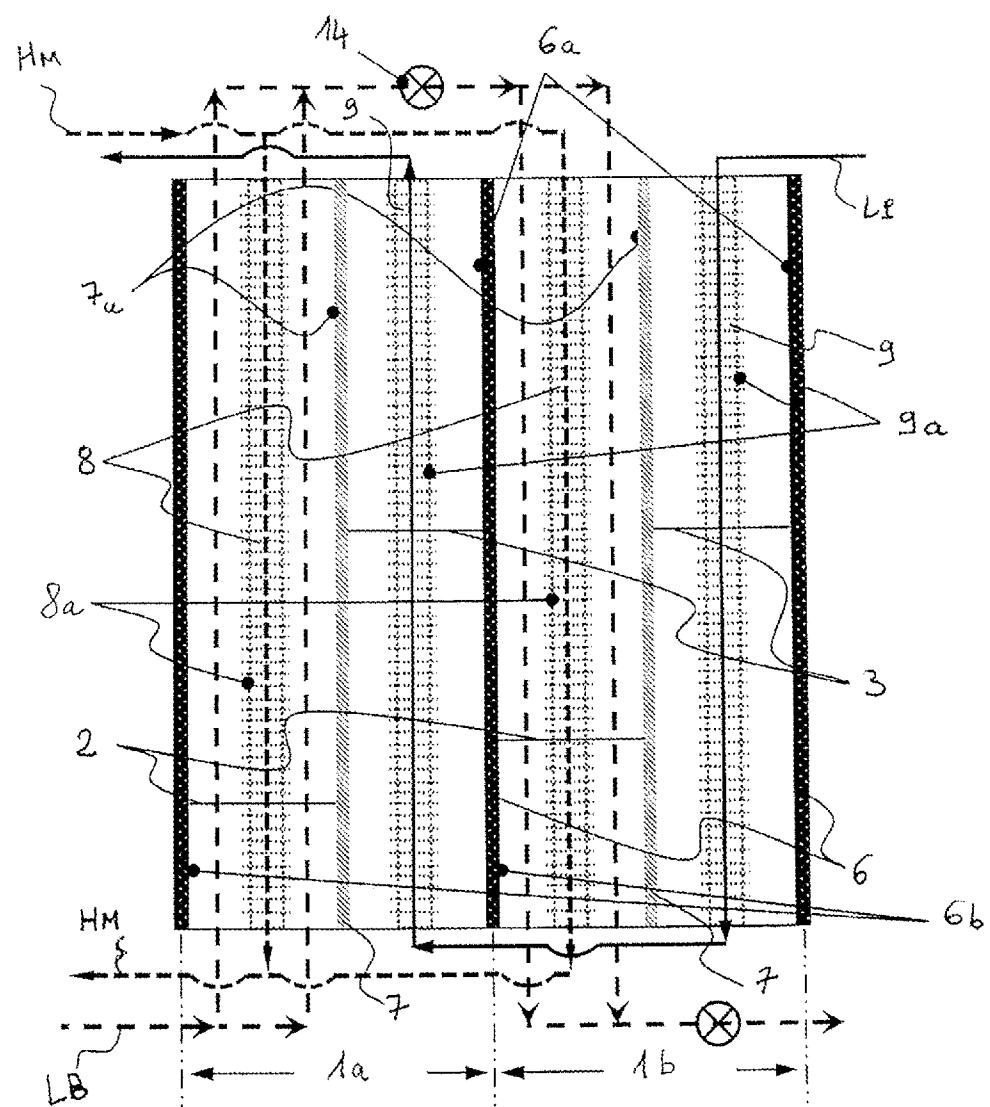


Figura 2

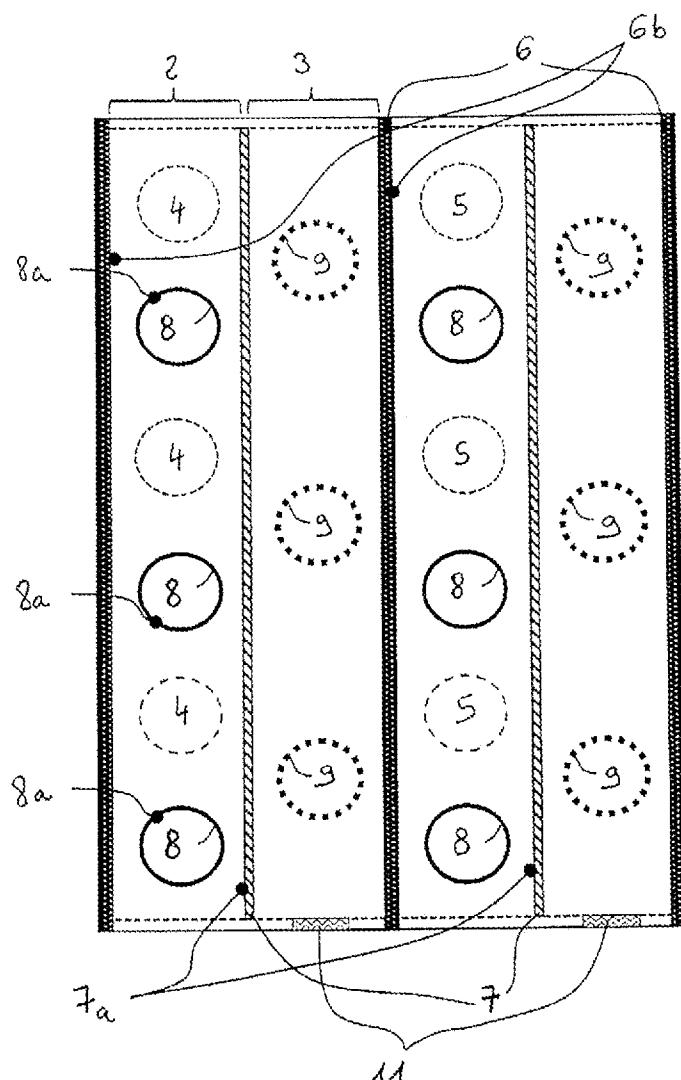


Figura 3

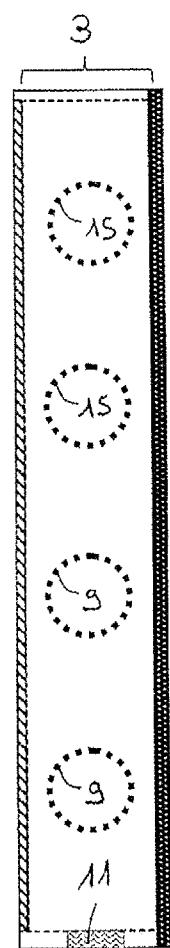


Figura 4

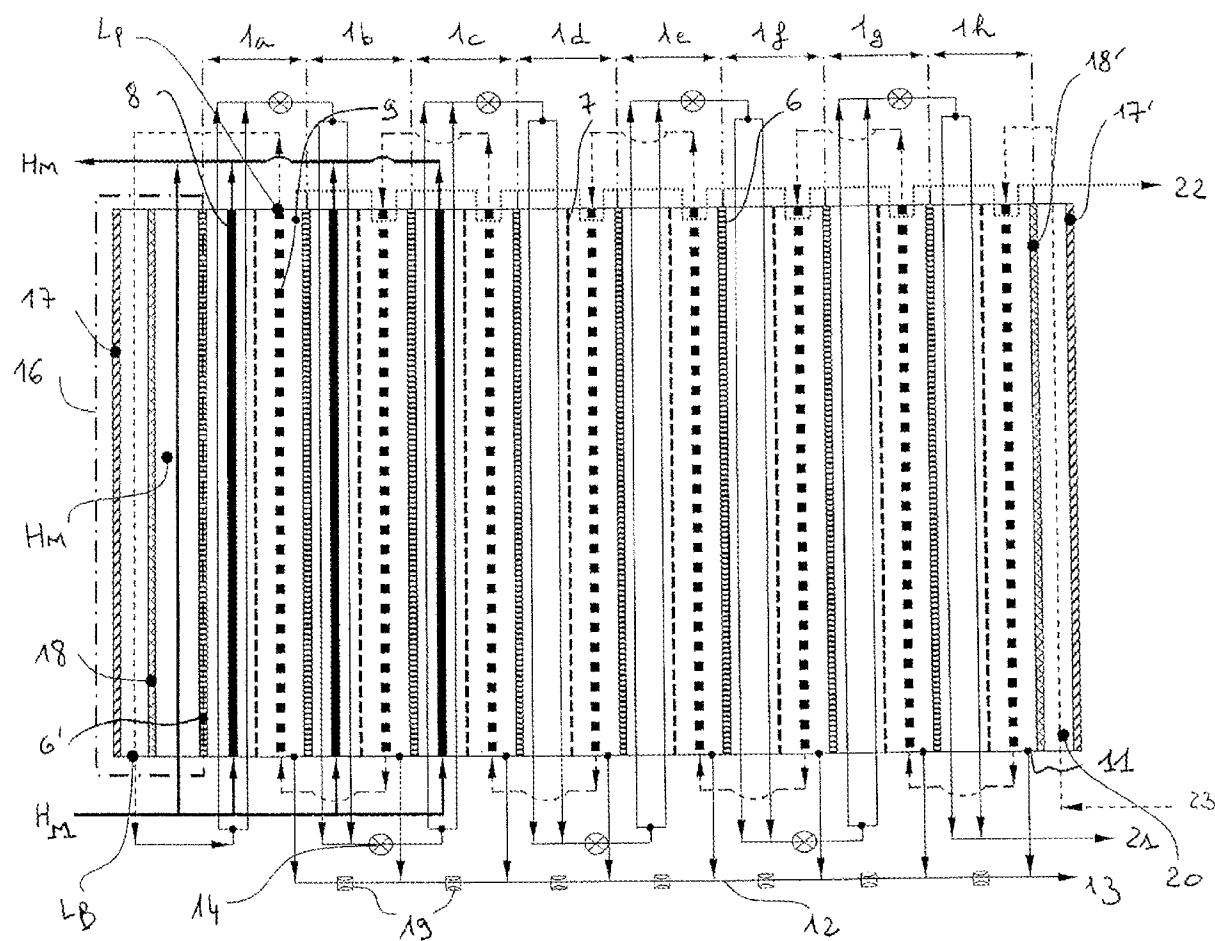


Figura 5

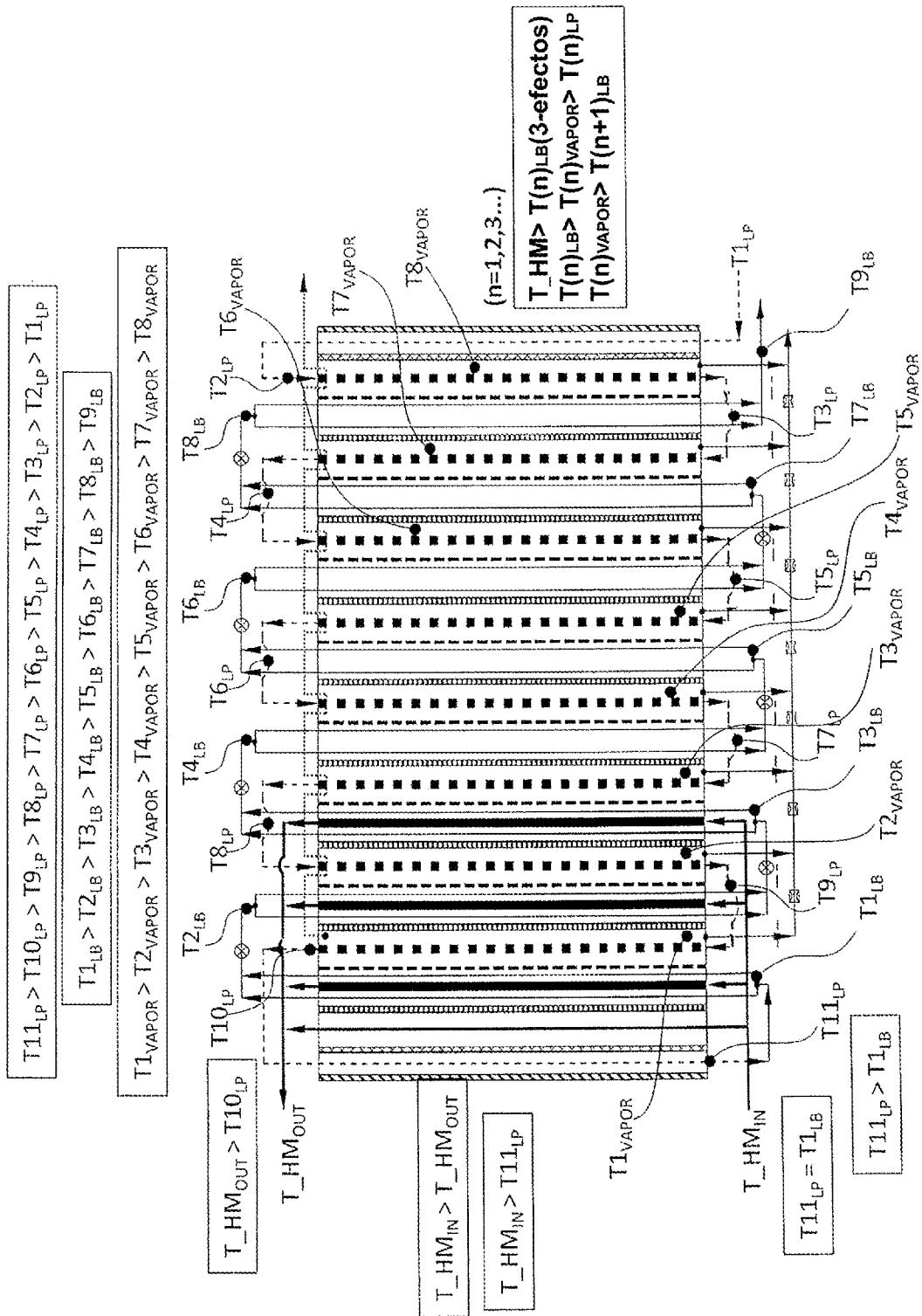


Figura 6

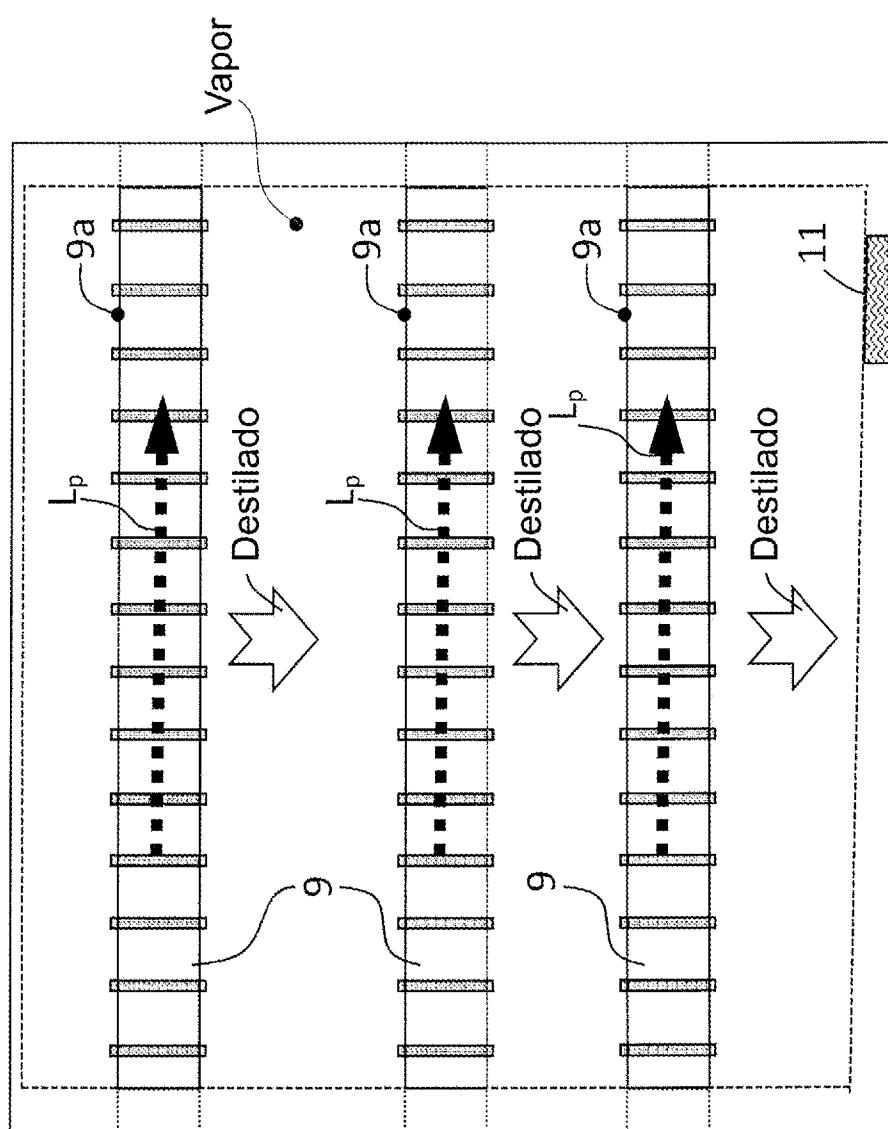


Figura 7

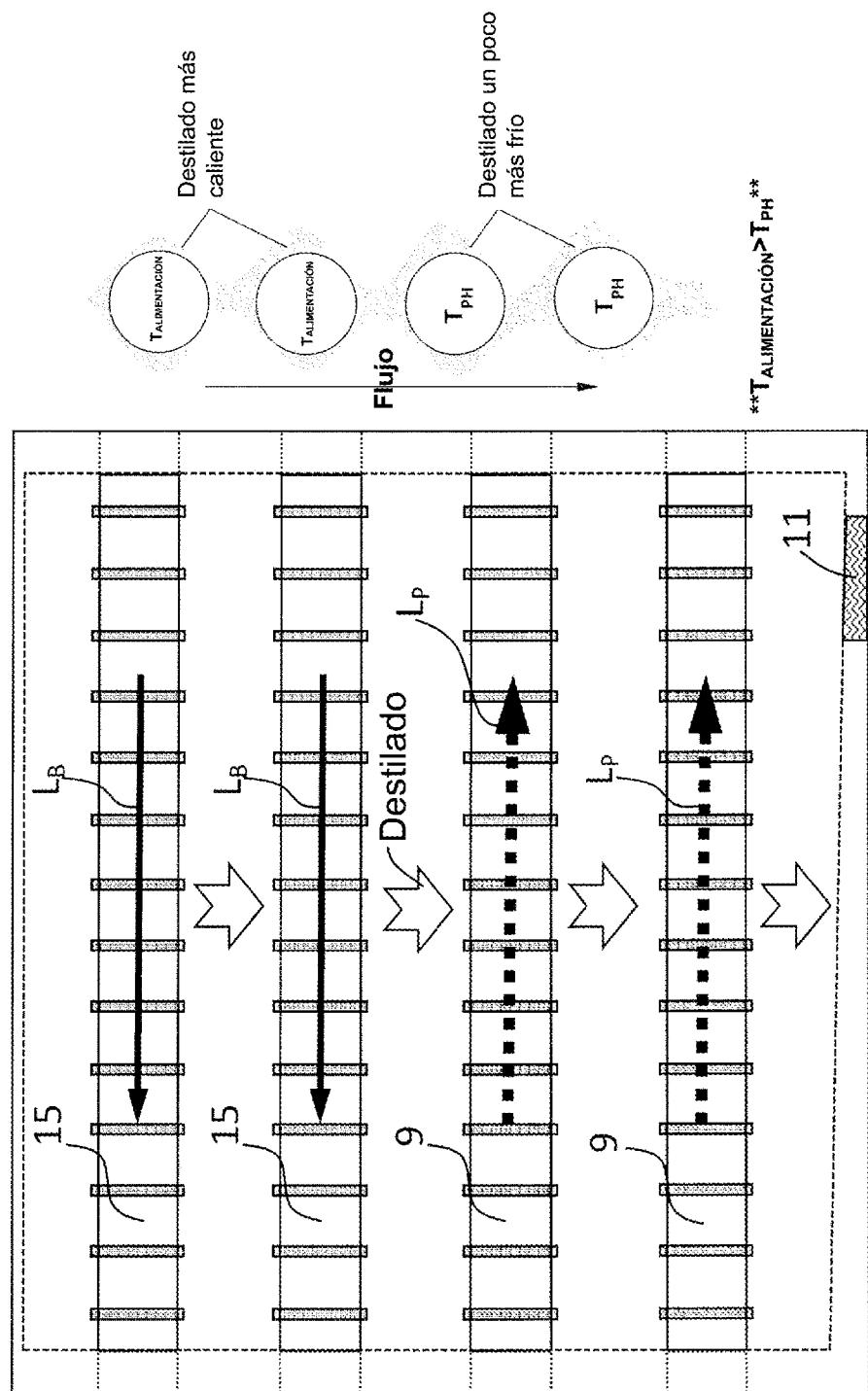


Figura 8

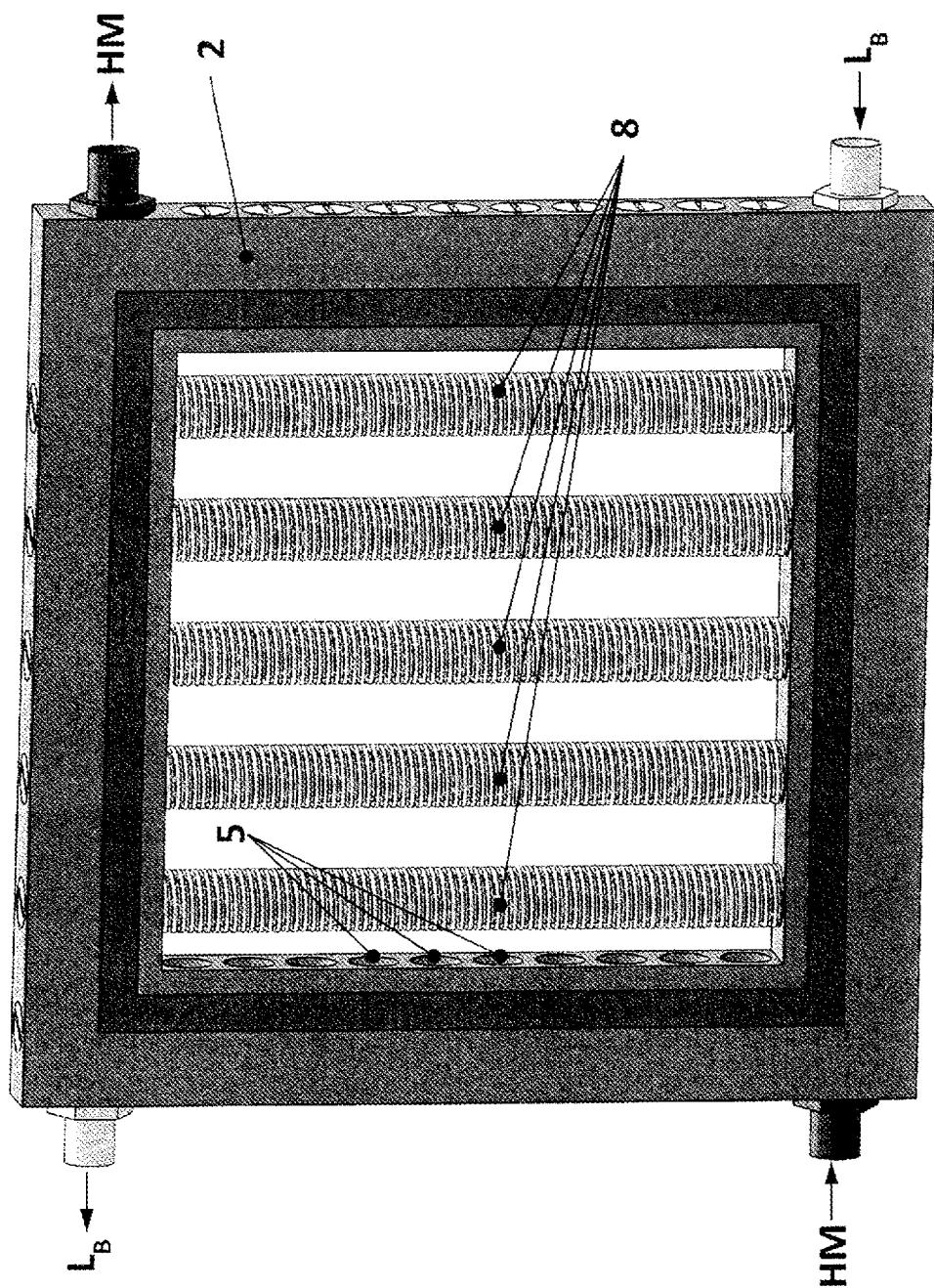


Figura 9

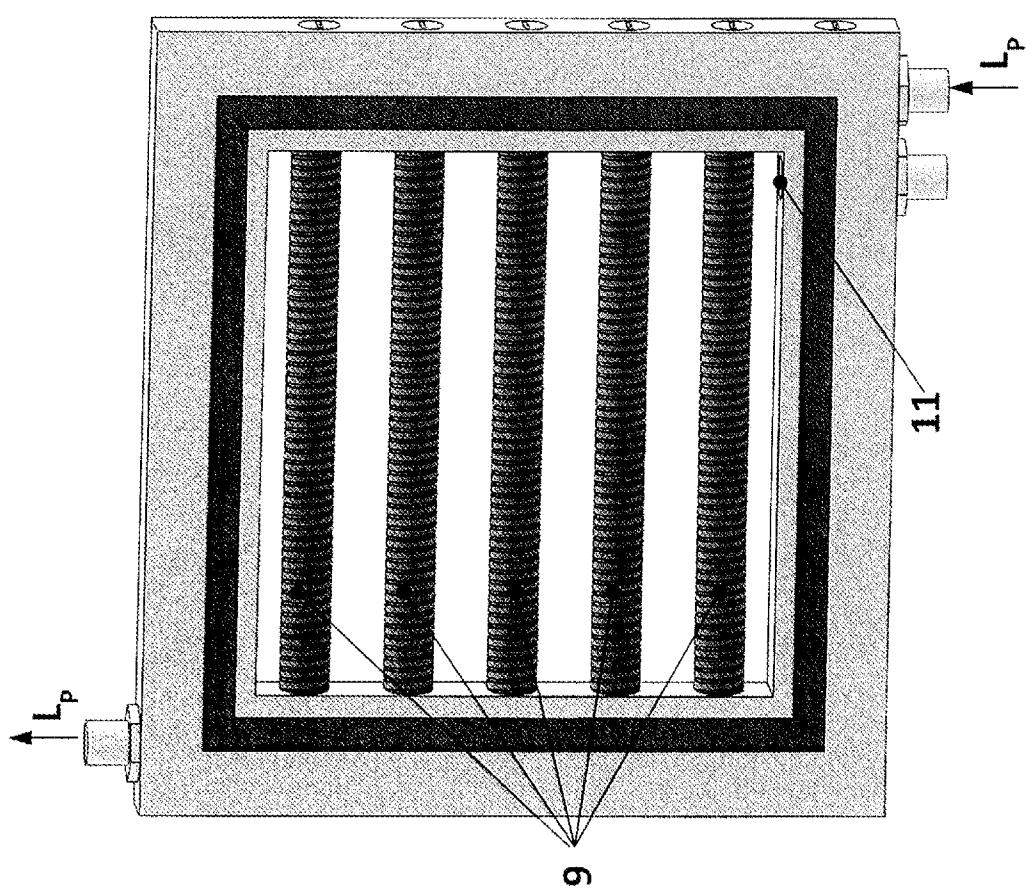


Figura 10

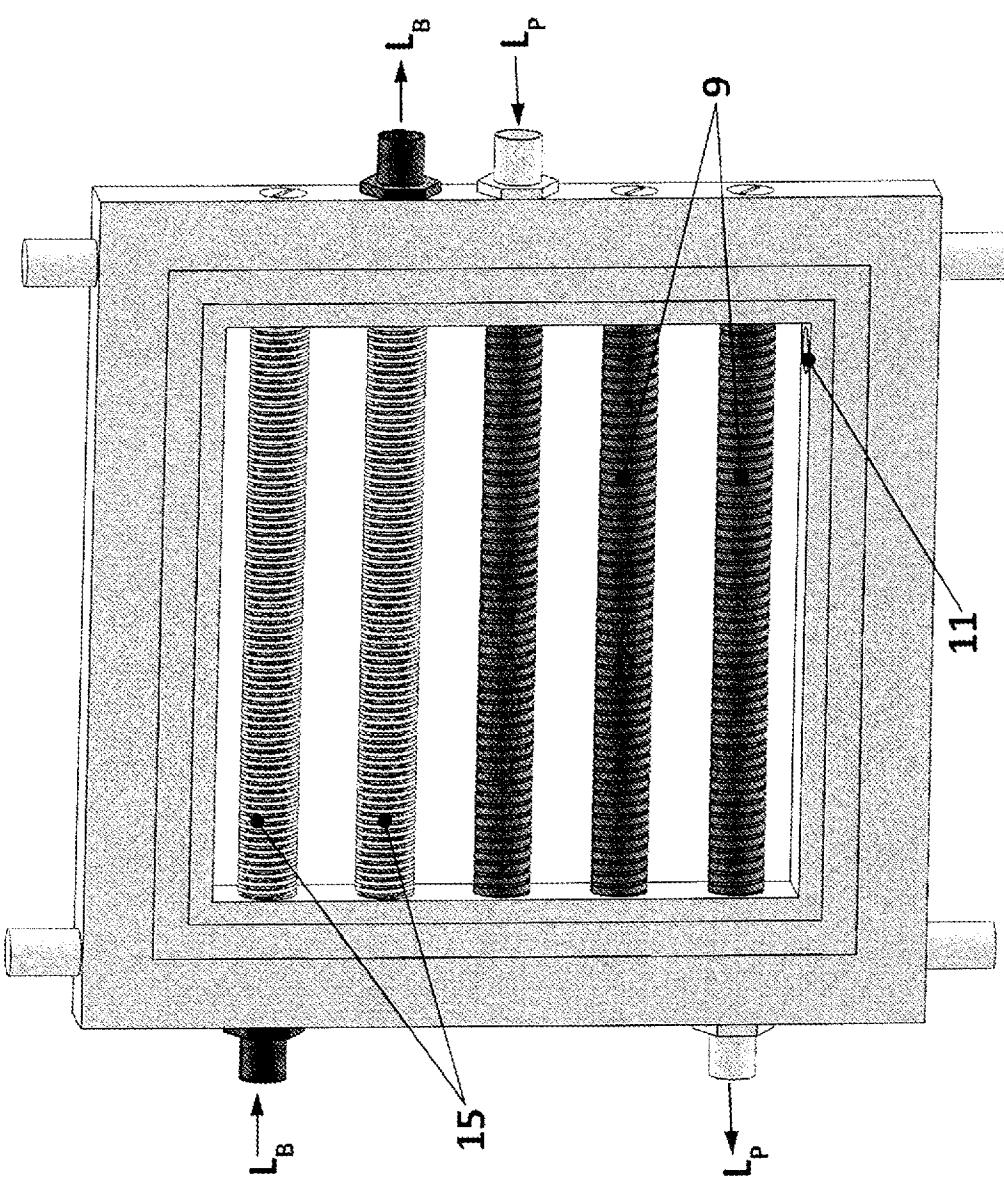


Figura 11

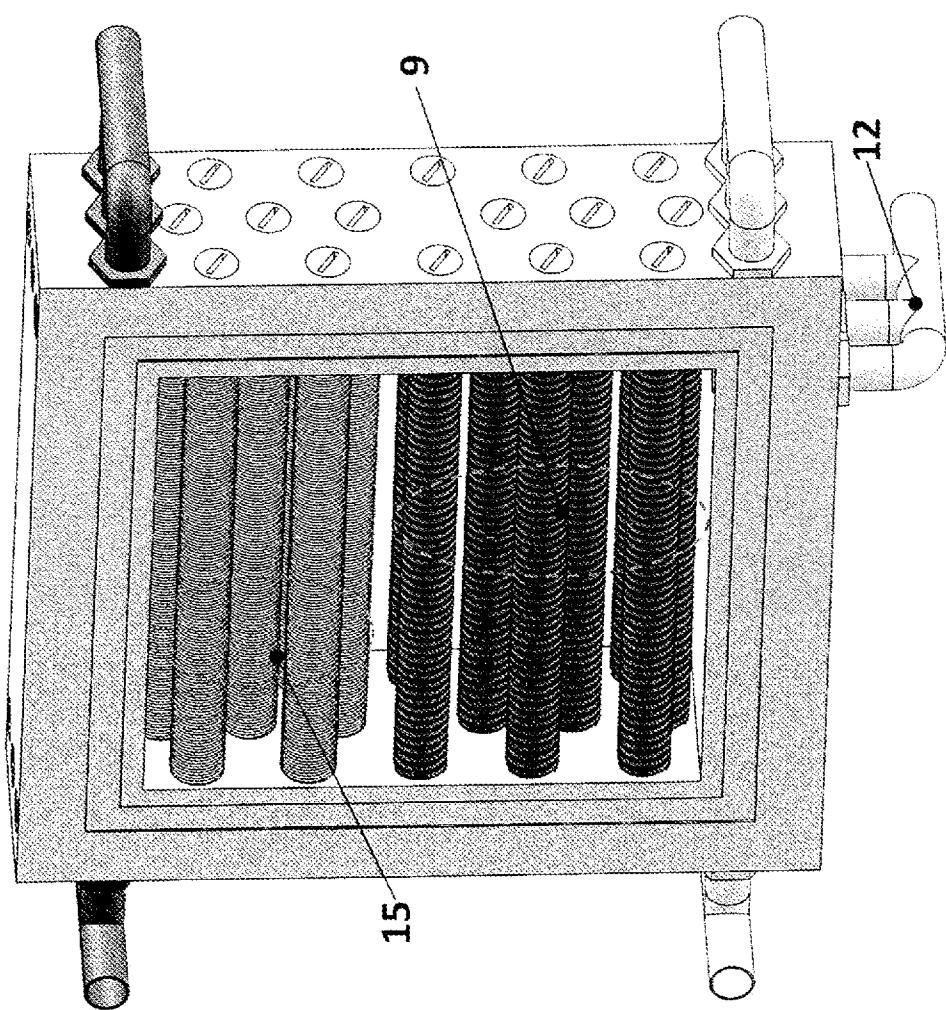


Figura 12

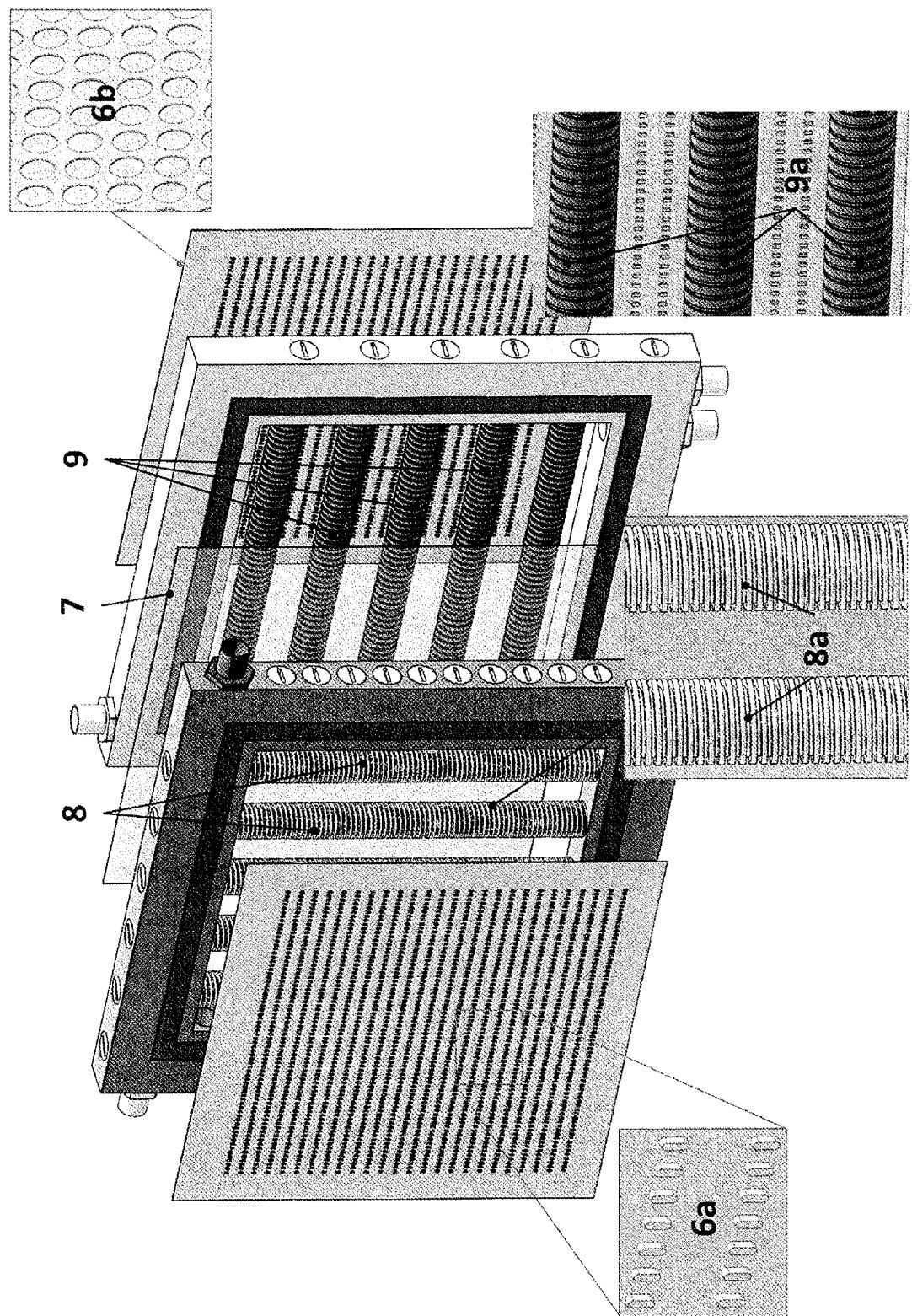


Figura 13

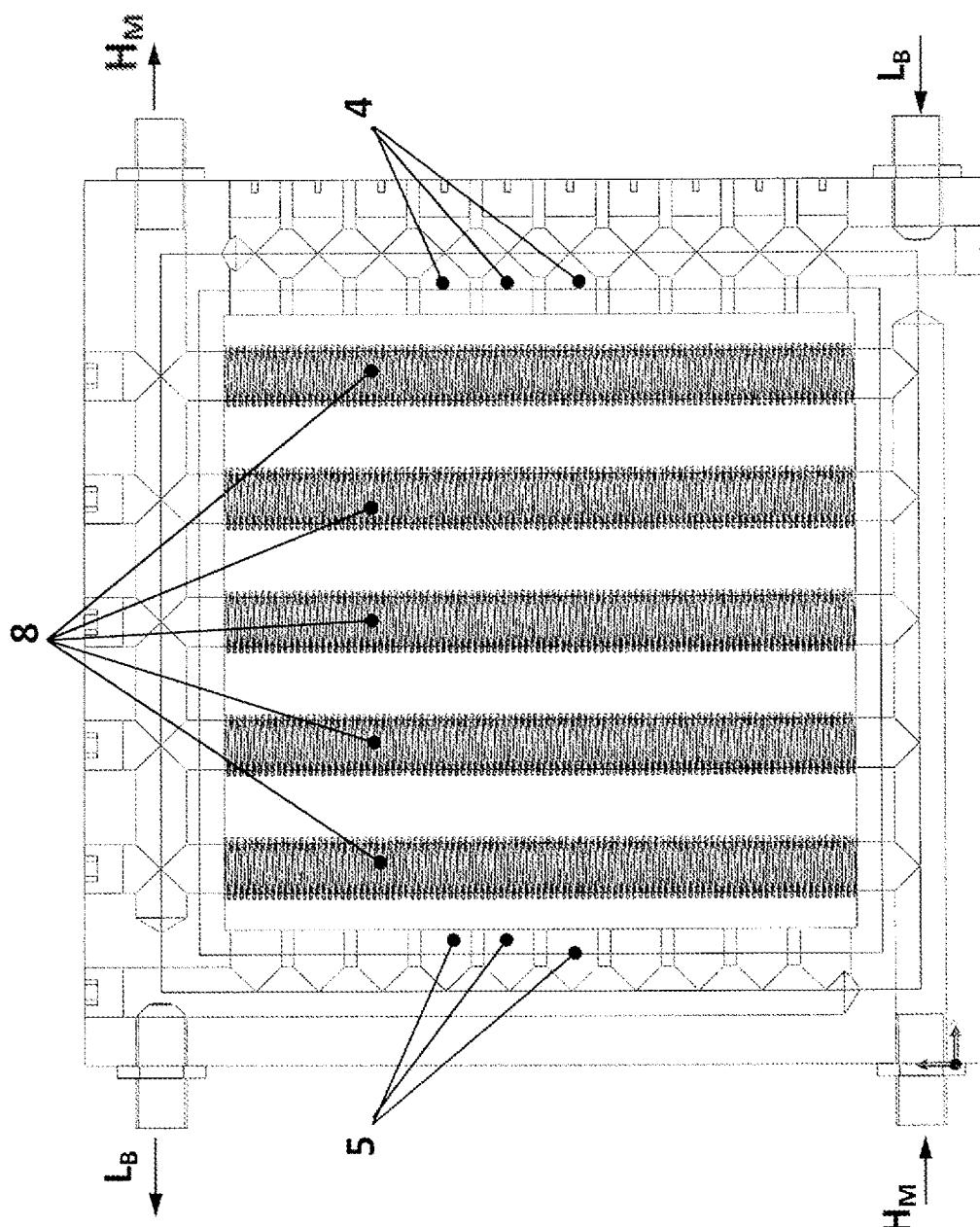


Figura 14

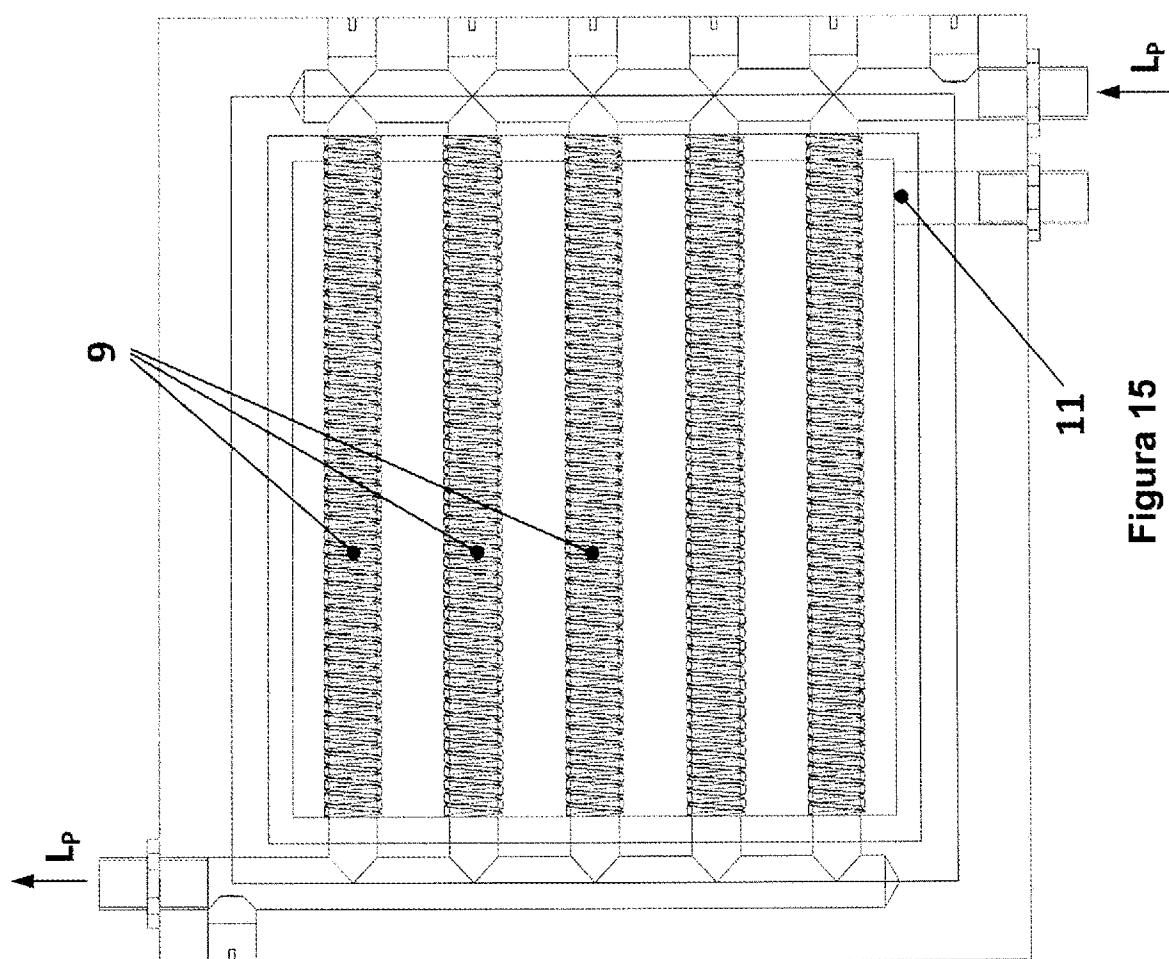


Figura 15