

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 738 389**

51 Int. Cl.:

F23C 5/08 (2006.01)

F23C 13/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.08.2016** **E 16306000 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.06.2019** **EP 3279561**

54 Título: **Aparato para proceso endotérmico con disposición mejorada de los tubos**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
22.01.2020

73 Titular/es:

**L'AIR LIQUIDE, SOCIETE ANONYME POUR
L'ETUDE ET L'EXPLOITATION DES PROCEDES
GEORGES CLAUDE (100.0%)**

**75, Quai d'Orsay
75007 Paris, FR**

72 Inventor/es:

TUDORACHE, DIANA

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 738 389 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

Aparato para proceso endotérmico con disposición mejorada de los tubos

5 La presente invención se refiere al diseño de hornos caldeados por arriba o caldeados por abajo para la reformación de metano con vapor (SMR) y otras reacciones endotérmicas como el craqueo de materiales de alimentación hidrocarbonados en reactores caldeados externamente.

Aunque la descripción siguiente se referirá sólo al proceso SMR, es aplicable también a los otros procesos que utilizan el mismo tipo de reactores.

10 El proceso SMR está basado fundamentalmente en la reacción de reformación de hidrocarburos ligeros tales como metano que da lugar a una mezcla de hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO) en presencia de vapor de agua. La reacción principal es endotérmica y lenta y requiere aporte de calor adicional, así como la presencia de un catalizador. Usualmente, las eficiencias de los reactores SMR están limitadas por la transmisión de calor y no por la cinética de las reacciones.

15 En la práctica industrial, el reactor SMR comprende usualmente tubos dispuestos en un horno, estando dichos tubos llenos con catalizador, en la mayoría de los casos en forma de pélets, y alimentados con la mezcla de gases de proceso (usualmente metano y vapor).

Para diseño del horno están disponibles diversas configuraciones bien probadas, como las ilustradas por la Figura 1 que presenta caldeo por arriba (conocido también como caldeo hacia abajo), caldeo por abajo (conocido también como caldeo hacia arriba), caldeo lateral, y pared de terraza.

20 La tecnología de caldeo por arriba es uno de los diseños más citados y está propuesta por varios proveedores de tecnología. Los hornos caldeados por arriba están constituidos típicamente por una cámara de combustión revestida interiormente de refractario que contiene varias filas de tubos que contienen el catalizador. El calor necesario para que ocurra la reacción endotérmica es proporcionado por quemadores de techo dispuestos en filas entre los tubos, y también por filas de quemadores de techo adicionales en el costado del horno, a lo largo de las paredes del horno. Los productos de combustión que salen de los quemadores son expulsados por lo general verticalmente hacia abajo, de tal modo que las filas de tubos se enfrentan a las llamas en su parte superior. Usualmente está provisto un colector de escape de los gases de combustión al nivel del suelo del horno.

La tecnología de caldeo por abajo es menos común en las plantas modernas. Conforme a la tecnología de caldeo por abajo, los quemadores están dispuestos en fila en el suelo del área de caldeo entre las filas de tubos y son caldeados verticalmente hacia arriba.

30 El objetivo principal del diseño del horno (llamado también diseño de la cámara de combustión) es maximizar el calor transmitido desde los quemadores a los tubos – por las llamas del quemador y también por las paredes y el gas de combustión caliente mientras se respeta una limitación de temperatura operativa máxima de los tubos. La temperatura operativa máxima de los tubos o MOT (conocida también como limitación operativa máxima o MOT) es una función de varios factores, y particularmente de la carga mecánica de los tubos (principalmente la presión del gas de alimentación), de las propiedades mecánicas de las aleaciones utilizadas para los tubos y de la vida útil deseada de los tubos expuestos a termofluencia y envejecimiento térmico.

35 Cualquier intensificación del calor transmitido a los tubos tiene un impacto positivo directo, sea por aumento de la productividad o por aumento de la compacidad de la cámara de combustión, lo cual es valioso en términos de gastos de capital. Sin embargo, la intensificación del calor transmitido implica usualmente niveles más altos de temperatura de piel de los tubos, que reducen la vida útil de los tubos o exigen el uso de aleaciones más resistentes, que son mucho más caras.

40 La falta de homogeneidad en la distribución del trabajo de calor en el horno conducirá a que algunos de los tubos estén más calientes que otros; por tanto, los perfiles de temperatura de los tubos son elementos críticos para el diseño del horno y durante la operación del mismo. Los perfiles de temperatura de los tubos proporcionan información decisiva cuando se busca un compromiso satisfactorio entre eficiencia y durabilidad, siendo un compromiso satisfactorio realmente esencial.

45 Durante las operaciones, las eficiencias del horno están limitadas por tanto por la temperatura del tubo más caliente; ésta no debería ser más alta que la MOT. Entretanto, la eficiencia del proceso, es decir la productividad, depende del flujo calorífico y las temperaturas medias de los tubos. Por tanto, cuanto menor es la diferencia entre la temperatura del tubo más caliente y la temperatura media de los tubos, tanto mejor es la eficiencia del horno.

50 En aras de la simplicidad, la mayoría de las explicaciones que siguen se dan con relación a un horno caldeado por arriba. Sin embargo, debe tenerse presente que las figuras y explicaciones con relación a un horno caldeado por abajo serían comparables.

- 5 En un horno de este tipo caldeado por arriba, como se muestra en la figura 2, los tubos que contienen el catalizador están dispuestos en filas dentro del horno. La alimentación se suministra por la parte superior de los tubos; el gas de síntesis producido - que contiene hidrógeno y monóxido de carbono como componentes principales, y varios componentes menores y trazas - se retira por la parte de abajo de los tubos. Los quemadores están dispuestos en filas entre las filas de tubos y entre los tubos y las paredes. Los gases de combustión resultantes se extraen por túneles de escape.
- 10 La Figura 3 presenta una vista desde arriba del mismo horno caldeado por arriba que muestra 8 filas de 48 tubos, estando cada fila organizada en tres secciones (crujías) de 16 tubos cada una - y 9 filas de 15 quemadores dispuestos también en tres secciones (crujías) que contienen 5 quemadores cada una, y paralelas a las filas de tubos. Las filas de quemadores están terminadas por una pared (pared a lo largo del eje Y, identificadas también como "paredes finales"). Para todas las filas de tubos, los tubos finales enfrentados a la pared final se identifican como "tubos finales de pared".
- 15 Para cada fila de tubos o quemadores, el elevado número de tubos y/o quemadores en cada fila induce limitaciones geométricas en el horno, lo cual hace necesario añadir travesaños de soporte para garantizar la seguridad del horno; dichos soportes dividen por tanto las filas de tubos y asimismo las filas de quemadores en varias secciones (conocidas también como crujías) repetidas periódicamente. Todas las secciones terminan o bien por una pared final o por un plano de simetría - plano que se encuentra en el centro del espacio que queda entre dos secciones adyacentes para permitir la instalación de los soportes. Los tubos finales más próximos a los planos de simetría se identifican como "tubos finales de simetría" o "tubos de simetría".
- 20 Las expresiones "tubos de sección exterior" o "tubos exteriores" se refieren a los "tubos finales de pared" y los "tubos finales de simetría" sin hacer una distinción entre ellos.
- 25 Todos los tubos que no son "tubos finales de pared" o "tubos de simetría" se identifican como "tubos de sección interior" o "tubos interiores".
- La presencia de las paredes finales próximas a los "tubos finales de pared" y la división de las filas de tubos en secciones - creando por tanto un espacio diferente entre dos tubos adyacentes particulares - conducen a un reparto heterogéneo del calor disponible entre los "tubos finales de pared", los "tubos finales de simetría" y los "tubos interiores".
- 30 En toda la descripción, la expresión "fila de quemadores" debe entenderse como "fila de quemadores paralela a las filas de tubos", identificándose también esta dirección de las filas como eje X.
- En los hornos a los cuales se aplica la invención, es decir con quemadores dispuestos en filas paralelas a las filas de tubos, para cada quemador la dirección del chorro de llama creado por el quemador se ve afectada por:
- la interacción con chorros próximos que fluyen en el mismo sentido, y
 - la presencia de pared (si existe) que podría conducir también a un reparto heterogéneo del calor entre los tubos pertenecientes a la misma fila.
- 35 La heterogeneidad de la distribución de calor entre los tubos dentro de una fila que proviene de la interacción de los chorros de llama dentro de una fila de quemadores paralela a las filas de tubos (a lo largo del eje X) ha sido considerada con anterioridad; se ha encontrado una solución, que se describe en la Patente Europea EP 3 182 003 A1, que cae bajo el Artículo 54(3) EPC, que resuelve el problema del sobre- (o infra)-calentamiento de los tubos que proviene del reparto de los quemadores dentro de la fila de quemadores adyacente a la fila de tubos. Por tanto, este tipo de
- 40 heterogeneidad de la distribución del calor entre los tubos no se considera en esta invención.
- Sin embargo, persiste un problema de heterogeneidad de la distribución del calor que concierne principalmente a los tubos de sección exteriores y que no está resuelto por la solicitud de patente citada anteriormente.
- 45 Esta invención tiene como objetivo centrarse en el comportamiento de los tubos que forman filas a lo largo del eje X y pretende mejorarlo; más específicamente, la invención tiene como objetivo aportar una solución a la falta de homogeneidad en el calentamiento de los tubos finales de pared, tubos de pared de simetría y tubos interiores a lo largo de una fila, debida a la influencia de las paredes finales y el espacio entre las secciones de los tubos, con independencia de un diseño equivocado de los quemadores o una operación inadecuada de los mismos.
- 50 Los tubos finales de pared y los tubos de simetría tienen factores de vista mayores con las paredes finales cuando se comparan con sus tubos interiores vecinos más próximos (el factor de vista de una superficie (i) con una superficie (j)) se define como la fracción de la radiación que abandona la superficie (i) que es interceptada por la superficie (j)). Un sector angular mayor de los tubos finales está expuesto a las paredes finales cuando se comparan con los tubos interiores (lo que significa un factor angular mayor con la pared final). Una exposición mayor a las paredes calientes significa que los tubos de las paredes finales recibirán más calor radiativo.

5 Entretanto, considerando que un tubo tiende a enfriar sus alrededores, dos tubos de simetría adyacentes no se encuentran tan próximos uno a otro como dos tubos adyacentes interiores, por lo que aquéllos están rodeados por volúmenes más sustanciales de gases de combustión calientes que los tubos interiores; un tubo de pared final tiene en su proximidad solamente un tubo interior que está más frío que los gases de combustión. Por tanto, los tubos finales de simetría y los tubos finales de pared reciben más calor por convección y radiación de los gases de combustión calientes circundantes que los tubos interiores.

Para ilustrar este fenómeno de falta de homogeneidad de la transmisión de calor, se han realizado simulaciones numéricas utilizando un solucionador Computational Fluid Dynamic (CFD) 3-D destinado al cálculo de la transmisión de calor entre la cámara de combustión y los reactores catalíticos tubulares.

10 Con este objetivo, se definen crujías representativas de hornos SMR caldeados por arriba; las "crujías representativas" definidas tienen que ser secciones representativas como se ha definido anteriormente - es decir secciones que, cuando se asocian, representarán el horno; aquéllas deben tener también en cuenta la presencia de las paredes o de los planos de simetría. El reformador modular estándar estaría compuesto entonces por el ensamblaje de crujías representativas hasta alcanzar la capacidad deseada de la planta.

15 Dependiendo del número de tubos y quemadores en las filas y/o las limitaciones geométricas adicionales, pueden existir tipos diferentes de "crujías representativas" con números diversos de quemadores y tubos. Sin embargo, debe indicarse que la invención es aplicable también a todos los tipos de secciones en términos de número de quemadores, número de tubos y en términos del final de la sección (pared final o simetría entre secciones).

Crujías representativas diferentes se muestran en la figura 4.

20 La Figura 5 presenta la temperatura máxima de tubo para los 16 tubos de una representativa de la Figura 4.

Se pone de relieve el recalentamiento de los tubos exteriores. La crujía representativa está compuesta de un subconjunto de 16 tubos, calentados por dos filas de 5 quemadores de la misma potencia, terminados por paredes finales en ambos extremos. La figura muestra que la presencia de una pared final induce una transmisión de calor heterogénea a los tubos de reformación; los tubos finales de pared de la crujía representativa alcanzan una temperatura de piel mayor que los tubos interiores, como se muestra por los resultados CFD 3-D. En el caso presentado, la diferencia entre el valor máximo de temperatura de piel para los tubos finales de pared y la media del valor máximo de la temperatura de piel para los tubos interiores dentro de la crujía representativa es alrededor de 5°C.

Por consiguiente, existe un problema de falta de homogeneidad en el calentamiento a lo largo de una fila de tubos que no proviene de la disposición de los quemadores, y la invención tiene como objetivo resolver este problema a fin de mejorar la homogeneidad del flujo calorífico en un SMR caldeado por arriba (y asimismo caldeado por abajo) por limitación del recalentamiento de los tubos exteriores (tubos finales de pared y asimismo tubos finales de simetría). El documento EP 2 708 812 A1 describe un horno para realización de un proceso endotérmico conforme al preámbulo de la reivindicación 1.

Los inventores han encontrado que el modo en que están dispuestos los tubos en una fila, las diversas distancias entre tubos, paredes finales y planos de simetría, y más exactamente algunas ratios específicas de distancia son muy importantes para evitar el calentamiento irregular de los tubos. Las distancias de interés se presentan en la Figura 6; esta figura muestra una de las crujías representativas de la Figura 4 con 16 tubos alineados flanqueados por dos filas de 5 quemadores, siendo uno de los extremos una pared y siendo el segundo el plano de simetría. En la figura se indican también las distancias que se ha encontrado son parámetros fundamentales, que son las siguientes:

- 40 - T2T es la distancia entre dos tubos adyacentes en la crujía;
- T2W es la distancia entre el tubo de pared final y la pared final;
- T2S es la distancia entremedias de dos tubos finales de simetría, por tanto, el doble de la distancia entre el tubo próximo al plano de simetría y el plano de simetría (entre dos crujías adyacentes).

Las ratios que los inventores consideran decisivas son $T2T/T2S$ y $T2T/T2W$.

45 Es un objetivo de la presente invención mitigar la distribución de calor entre los tubos dentro de una fila.

Es un objetivo adicional de la invención reducir las diferencias de temperatura entre los tubos exteriores y los tubos interiores.

La presente invención propone lograr dichos objetivos gracias a un horno y un método para diseñar este horno que evitarán el problema de recalentamiento de los tubos exteriores, por medio de una disposición optimizada de los tubos a lo largo de las filas de quemadores.

50 Es por tanto un objeto de la invención proponer un horno para realización de un proceso endotérmico, que comprende tubos que contienen un catalizador para conversión de una alimentación gaseosa, en donde los tubos están posicionados en filas dentro del horno, en donde están montados quemadores entre los tubos y entre los tubos y las

5 paredes del horno paralelas a las filas de tubos, y en donde las filas de quemadores y las filas de tubos están terminadas por paredes finales y están divididas en secciones, siendo en cada fila de tubos la distancia desde un tubo de pared final a la pared final T2W, siendo la distancia entre dos tubos interiores adyacentes en una sección T2T, y siendo la distancia entre dos tubos finales de simetría de dos secciones adyacentes T2S, caracterizado por que los tubos están dispuestos en las filas de tal manera que las ratios $T2T/T2W$ y $T2T/T2S$ son mayores que 0,5 y menores que 2, limitando así las diferencias en la transmisión de calor a los tubos exteriores (tubos finales de pared y tubos finales de simetría) con respecto a los tubos interiores y reduciendo la diferencia de temperatura entre tubos exteriores y tubos interiores.

A continuación se presentan realizaciones preferidas:

10 En un horno preferido de la invención, las ratios $T2T/T2W$ y $T2T/T2S$ son mayores que 0,75 y menores que 1,75, conduciendo así a una reducción mejorada de la diferencia de temperatura de los tubos entre tubos exteriores e interiores.

Preferiblemente, $T2T/T2W$ y $T2T/T2S$ son iguales, y son mayores que 0,75 y menores que 1,75.

La invención es particularmente adecuada para un horno con quemadores montados en el techo del horno.

15 Conforme a otra realización, los quemadores están montados en el suelo y caldean verticalmente hacia arriba.

El reformador de la invención es ventajosamente un horno reformador de metano con vapor.

Conforme a otro aspecto, la invención se refiere a un proceso endotérmico a realizar en un horno que comprende tubos y quemadores, comprendiendo dicho proceso:

20 - introducir una alimentación gaseosa y vapor en tubos que contienen un catalizador para conversión de la alimentación gaseosa, en donde los tubos están dispuestos en filas en el interior del horno,

- quemar un combustible con aire en quemadores que están montados entre los tubos y entre los tubos y las paredes del horno que son paralelas a las filas de tubos,

- descargar los productos generados en los tubos,

25 en donde las filas de quemadores y las filas de tubos están terminadas por paredes finales y están divididas en secciones, siendo la distancia entre los quemadores de pared final y la pared final T2W, siendo la distancia entre dos tubos adyacentes en una sección T2T, y siendo la distancia entre dos tubos finales de simetría de dos secciones adyacentes T2S, caracterizado por que los tubos están dispuestos en las filas de tal manera que las ratios $T2T/T2W$ y $T2T/T2S$ son mayores que 0,5 y menores que 2, limitando así las diferencias en la transmisión de calor a los tubos exteriores (tubos finales de pared y tubos finales de simetría) con respecto a los tubos interiores y reduciendo la
30 diferencia de temperatura entre tubos exteriores y tubos interiores.

Adicionalmente, el proceso de la invención puede ser - considerado aisladamente o en combinación:

- un proceso para la reformación de metano con vapor,

- un proceso en donde las ratios $T2T/T2W$ y $T2T/T2S$ son mayores que 0,75 y menores que 1,75,

- un proceso conforme a la reivindicación 9 donde las ratios $T2T/T2W$ y $T2T/T2S$ son iguales,

35 - un proceso conforme a las reivindicaciones 7 a 10 en donde el horno es un horno caldeado por arriba,

- un proceso conforme a las reivindicaciones 7 a 10 en donde el horno es un horno caldeado por abajo.

El horno de la presente invención y sus ventajas se describirán con más detalle en los ejemplos siguientes y sobre la base de los dibujos, donde:

La Figura 1 muestra la configuración de los quemadores para diseños de horno típicos;

40 la Figura 2 muestra una disposición típica utilizando una representación 3D de un horno caldeado por arriba utilizado para la producción de gas de síntesis;

la Figura 3 muestra una vista desde arriba de un horno caldeado por arriba, que pone de relieve la organización de tubos y quemadores;

45 la Figura 4 muestra una vista desde arriba del mismo horno que pone de relieve "crujías representativas" a la escala del horno;

la Figura 5 muestra el perfil de temperatura de piel máxima de los tubos para los 16 tubos de una "crujía representativa" seleccionada terminada por paredes en ambos lados;

la Figura 6 muestra los parámetros fundamentales - conforme a la invención - para el reparto de los tubos en una crujía representativa con 16 tubos alineados flanqueados por dos filas de 5 semi-quemadores, siendo un extremo una pared final, y siendo el segundo extremo el plano de simetría;

5 la Figura 7 presenta tres repartos diferentes de los tubos en la crujía representativa de la Figura 5 con 16 tubos alineados en una fila y flanqueados por dos filas de 5 semi-quemadores terminados por paredes en ambos lados;

la Figura 8 ilustra la diferencia entre la temperatura circunferencial de un tubo a la altura de 6 m (teniendo el tubo 12 m de altura) y la temperatura media a la misma altura para un tubo interior y un tubo exterior para los tres casos presentados en la Figura 7;

10 la Figura 9 muestra las temperaturas máximas de piel de los tubos para los 16 tubos de la crujía representativa para los mismos tres casos de la Figura 8;

la Figura 10 presenta una tabla con los resultados y análisis de simulaciones aplicadas a una gama de crujías representativas.

15 Como se ha expuesto anteriormente, la invención tiene como objetivo proponer un diseño mejorado de un horno de tipo caldeado por arriba o caldeado por abajo - como se ilustra en la figura 1 - para la realización de un proceso endotérmico. El objetivo es mitigar las variaciones de temperatura a lo largo de una fila de tubos, paralela al eje X, gracias a un reparto mejorado de los tubos a lo largo de dicha fila.

Para poder identificar y proponer las disposiciones óptimas de los tubos a lo largo de una fila, se han realizado simulaciones numéricas para diferentes valores T2T, T2W y T2S para varias plantas SMR.

20 La herramienta utilizada para identificar los repartos óptimos de los tubos en una "crujía representativa" es la herramienta utilizada anteriormente en esta memoria para poner de manifiesto las diferencias en las temperaturas de los tubos que resultan del diseño actual.

Las simulaciones numéricas se realizaron sobre "crujías representativas" de SMR caldeadas por arriba utilizando un solucionador Computational Fluid Dynamic (CFD) 3-D destinado al cálculo de la transmisión de calor entre la cámara de combustión y los reactores catalíticos tubulares.

25 Para un horno dado, se eligen crujías representativas; las "crujías representativas" definidas tendrían que ser representativas de secciones repetidas, y deberían tener en cuenta también la presencia de las paredes, así como los vacíos entre secciones para hornos con dos secciones o más. El reformador modular estándar con la capacidad deseada estaría compuesto entonces por el ensamblaje de un número adecuado de crujías representativas.

La lectura de la descripción más detallada que sigue de las figuras ayudará a la comprensión de la invención.

30 La Figura 2 es una vista en perspectiva 3-D de un horno; más exactamente, la misma muestra una disposición típica de un horno 1 caldeado por arriba utilizado para producir un gas de síntesis a partir de una alimentación que contiene metano y vapor. En el interior del horno 1 están dispuestos en filas los tubos de catalizador 2. La alimentación se suministra a través de los tubos 2, generalmente de 12 m de altura, desde la parte superior al fondo; el gas de síntesis producido que contiene hidrógeno y monóxido de carbono como componentes principales, y componentes residuales, se retira por la parte del fondo de los tubos 2. Los quemadores 3 están dispuestos en filas entre las filas de tubos y entre las filas de tubos y las paredes. Los gases de combustión resultantes se retiran por túneles de escape 4.

35 La Figura 3 presenta una vista desde arriba de un horno caldeado por arriba 1 con 8 filas 5 de 48 tubos cada una, estando dispuestas las filas en tres secciones 10 de 16 tubos cada una - y 9 filas 6 de 15 quemadores 9, paralelas a las filas de tubos, y dispuestas en las mismas tres secciones 10 de 5 quemadores cada una. Las filas 5 de tubos están terminadas por una pared 7 (las paredes a lo largo del eje Y se identifican también como "paredes finales"). Para todas las filas 5 de tubos, los tubos finales 8a que están orientados hacia la pared 7 se identifican como "tubos finales de pared ". Dentro de la fila, los tubos finales de pared están rodeados por una pared 7 en un lado y por un tubo en el lado opuesto. Dentro de la fila, los tubos de sección interior 8c están rodeados por dos tubos, uno a cada lado. La reacción endotérmica de reformación tiene lugar en los tubos y por consiguiente la superficie de piel de los tubos está más fría que las paredes de refractario y los gases de combustión. La presencia de la pared final y los gases de combustión más calientes puede conducir a un recalentamiento de los quemadores de los tubos finales.

40 Como ya se ha indicado, un número importante de tubos y quemadores hace necesario añadir travesaños de soporte para garantizar la seguridad del horno; dichos soportes dividen las filas en varias partes (conocidas como secciones o conocidas como crujías 10). Las secciones 10 terminan por una pared 7 o por un plano de simetría 11 que separa dos secciones adyacentes. Los tubos finales 8b más próximos a los planos de simetría 11 se identifican como "tubos finales de simetría". La distancia o separación entre dos tubos finales de simetría 8b de dos crujías adyacentes es más importante que la distancia entre dos tubos en la misma crujía, y por consiguiente un factor de vista mayor con las paredes finales del horno que los tubos de sección interiores y también un volumen mayor de gases de combustión calientes circundantes, conduciendo a un recalentamiento cuando se comparan con los tubos interiores 8c.

45 50

La Figura 4 muestra una vista desde arriba del horno que pone de relieve "crujías representativas" a la escala del horno - véanse los rectángulos de color gris. Como ejemplo, la "crujía representativa" 12 está compuesta de un subconjunto de 16 tubos alineados, calentados por dos filas de 5 quemadores de la misma potencia, siendo un extremo W representativo de la pared final 7, y siendo el segundo extremo S representativo del plano de simetría 11 - en el centro del vacío (separación) entre dos secciones adyacentes.

La Figura 5 presenta el perfil de la temperatura máxima de un tubo calculada gracias al modelo CFD 3-D para una crujía representativa con 16 tubos y 5 quemadores terminada por paredes una en cada extremo con $T_{2T} = 0,35$ m, $T_{2W} = 0,52$ M, $T_{2T}/T_{2W} = 0,67$. Esto ilustra claramente que la transmisión de calor a los tubos no es homogénea. Se observa una temperatura de piel más alta para los tubos exteriores comparados con los tubos interiores; la diferencia de temperatura alcanza 5°C .

Como se ha expuesto anteriormente, la invención tiene como objetivo controlar las heterogeneidades de flujo calorífico en una crujía representativa a fin de controlar en consecuencia el flujo calorífico a todo lo largo de la fila, y mejorar finalmente el control del flujo calorífico en todo el horno. Para alcanzar este resultado, la invención tiene como objetivo limitar el calor transmitido a los tubos exteriores gracias a un diseño mejorado de la disposición de los tubos a lo largo de las filas.

Para optimizar las disposiciones de los tubos, se han llevado a cabo simulaciones numéricas del comportamiento de diferentes plantas SMR.

La crujía representativa 12 se utilizará para presentar las distancias específicas importantes destinadas a describir la invención. Como ya se ha expuesto, la disposición de los tubos a lo largo de una fila puede definirse por las tres distancias T_{2T} , T_{2W} and T_{2S} . Identificadas en la Figura 6, las distancias corresponden a lo siguiente:

- T_{2T} es la distancia entre dos tubos adyacentes en la crujía representativa;
- T_{2W} es la distancia entre la pared final 7 y el tubo final de pared 8a en la crujía representativa;
- T_{2S} es la distancia entremedias de dos tubos finales de simetría.

Las tres distancias arriba identificadas son de gran importancia y representativas de la fila, más precisamente en la forma de las dos ratios T_{2T}/T_{2S} y T_{2T}/T_{2W} .

Observación: una crujía puede caracterizarse por un par de las ratios siguientes:

- (T_{2T}/T_{2W} y T_{2T}/T_{2S}) para una crujía próxima a una pared final 7 en un lado y un plano de simetría en el otro lado
- (T_{2T}/T_{2S} y T_{2T}/T_{2W}) para una sección media con planos de simetría 11 en ambos extremos
- (T_{2T}/T_{2W} y T_{2T}/T_{2W}) para una sección con paredes finales 7 en ambos extremos en el caso de un reformador pequeño con una única sección. Esta configuración se utilizará para las simulaciones presentadas más adelante y para las figuras en relación con las simulaciones propuestas para describir la invención.

Las figuras que siguen presentan los diferentes repartos de los tubos a los que se han aplicado simulaciones, y los resultados obtenidos.

La Figura 7 muestra tres repartos diferentes de los 16 tubos de la crujía de la Figura 5 caracterizados por las ratios (T_{2T}/T_{2W} y T_{2T}/T_{2W}) que se mantuvieron iguales; para cada caso, se indican las ratios T_{2T}/T_{2W} y los tubos se representan como círculo negro, círculo gris o círculo blanco conforme al reparto. Los tubos finales de pared 8a-1, 8a-2 and 8a-3 están situados a distancias diferentes de la pared final. Los tubos interiores 6-1, 6-2 and 6-3 tienen la misma separación entre ellos y también con los tubos finales de pared. Se utilizarán las mismas formas para diferenciar a los tres casos en las figuras afines siguientes. Para los tres casos, el reparto de los 5 quemadores se estableció a fin de asegurar patrones de flujo similares conforme a EP 15307007.3.

La Figura 8 muestra para los mismos tres casos la diferencia entre la temperatura circunferencial de los tubos a la altura de 6 m y la temperatura media de los tubos a la misma altura. Para cada caso se muestran un tubo de pared final y un tubo interior: 8a-1 y 6-1, 8a-2 y 6-2, y finalmente el tubo exterior 8a-3 y el tubo interior 6-3.

Los resultados de la simulación numérica ponen de relieve que los tubos finales de pared se calentarán más o menos dependiendo del reparto de los tubos. Cuando la distancia entre la pared y el tubo final es superior al paso del tubo (distancia entre dos tubos interiores), el tubo de pared final se recalienta, efecto observado para el caso referenciado de círculo negro con $T_{2T}/T_{2W} \sim 0,7$. El perfil de temperatura circunferencial para el tubo de pared final que es el más próximo a un tubo interior corresponde al caso referenciado de círculo gris con las ratios $T_{2T}/T_{2W} = 1$ (es decir la distancia entre el tubo de pared final y la pared final más próxima es igual a la distancia entremedias de los tubos). Para caso referenciado de círculo blanco, el tubo de pared final estaba demasiado próximo a la pared final, lo que conduce a un infra-calentamiento del sector angular de tubos que mira a la pared final. Cuando el

tubo de pared final está demasiado próximo a la pared, el mismo dificultará la transmisión de calor por los gases calientes. Por esta razón, la tira de la pared situada en la sombra del tubo emitirá menos flujo radiativo comparada con las otras regiones de pared.

5 La Figura 9 muestra el perfil de temperatura máxima de piel de los tubos para los tres mismos casos y confirma las observaciones hechas en cuanto al perfil circunferencial de los tubos: el perfil de temperatura de los tubos referenciados con círculo gris es el más uniforme y regular con una fluctuación de temperatura entre el tubo más caliente y el más frío de aproximadamente 5°C, mientras que el caso referenciado con círculo negro conduce a una fluctuación de temperatura de los tubos de aproximadamente 8°C, y el perfil de temperatura de los tubos referenciados con círculo blanco presenta un infra-calentamiento severo del tubo de pared final, conduciendo a la fluctuación máxima de temperatura de aproximadamente 19°C.

Para recuperar las reglas generales de diseño, se realizó un estudio paramétrico sobre 10 ejemplos de crujías de referencia con valores diferentes para las distancias T2T, T2S y T2W. Este estudio permitió identificar las ratios T2T/T2W and T2T/T2S óptimas y definir por tanto las reglas óptimas de diseño, así como estimar la ganancia en términos de homogeneización de la temperatura entre los tubos.

15 La Figura 10 presenta una tabla con el impacto de la disposición de los tubos sobre el porcentaje de trabajo de los tubos (calor transmitido al tubo) de un tubo exterior con respecto al trabajo del tubo interior más próximo dentro de diferentes crujías de referencia. El trabajo relativo de un tubo exterior con respecto al trabajo de los tubos interiores cuantificará la cantidad de calor recibida por un tubo exterior con respecto a un tubo interior.

20 Dado que el objetivo principal de la invención es resolver el problema de la falta de uniformidad de las temperaturas a lo largo de una fila de tubos, esto significa que los mejores ejemplos son aquéllos que dan un valor de trabajo relativo lo más bajo posible; en los ejemplos mostrados, los valores de trabajo relativo máximos son aproximadamente 3%, mientras que los más bajos están próximos a -3%. Un trabajo relativo próximo a 0% indica que los tubos interiores y exteriores tienen temperaturas similares, mientras que un trabajo relativo alto próximo a 3%, o más, indica que el tubo exterior está recalentado, y un trabajo relativo bajo próximo a -3%, o menos, indica que el tubo exterior está infra-calentado. Así pues, cuanto más próximo a 0% es el trabajo relativo en una crujía, tanto mayor es la eficiencia de un reformador de metano con vapor.

Las reglas de ratio de los tubos que se recuperaron son:

- a fin de tener un valor de trabajo relativo en el intervalo de -2% a 2%, las ratios T2T/T2W y T2T/T2S deberían ser mayores que 0,5 y menores que 2;
- 30 - si las ratios T2T/T2W y T2T/T2S son mayores que 0,75 y menores que 1,25, el valor de trabajo relativo esperado estará comprendido en el intervalo de -1% a 1%.

Por último, la regla de ratios no tiene fundamentalmente dependencia alguna del número de tubos (ni del número de quemadores) en las crujías representativas.

35 Los resultados anteriores proponen reglas de diseño que es necesario aplicar a la disposición de los tubos a todo lo largo de las filas a fin de obtener temperaturas de tubo más regulares a todo lo largo de las filas.

La observancia de las reglas anteriores contribuirá a prevenir el recalentamiento y el fallo de los tubos, con lo que disminuirán el reemplazamiento de tubos y las paradas.

REIVINDICACIONES

1. Un horno (1) para realización de un proceso endotérmico, que comprende tubos (2) que contienen un catalizador para convertir una alimentación gaseosa, en donde los tubos están dispuestos en filas (5) en el interior del horno, en donde están montados quemadores (3) entre los tubos y entre los tubos y las paredes del horno paralelas a las filas de tubos, y en donde las filas de quemadores (6) y las filas de tubos (5) están terminadas por paredes finales (7) y están divididas en secciones (10) siendo, en cada fila de tubos, la distancia desde un tubo de pared final (8a) a la pared final T2W, siendo la distancia entre dos tubos interiores adyacentes (8c) en una sección T2T, y siendo la distancia entre dos tubos finales de simetría (8b) de dos secciones adyacentes T2S, caracterizado por que los tubos están dispuestos en las filas de tal manera que las ratios $T2T/T2W$ and $T2T/T2S$ son mayores que 0,5 y menores que 2, limitando así las diferencias en la transmisión de calor a los tubos exteriores con respecto a los tubos interiores y reduciendo la diferencia de temperatura entre los tubos exteriores y los tubos interiores, donde los tubos exteriores son los tubos finales de pared y los tubos finales de simetría.
2. El horno conforme a la reivindicación 1, caracterizado por que $T2T/T2W$ y $T2T/T2S$ son mayores que 0,75 y menores que 1,75.
3. El horno conforme a la reivindicación 2, caracterizado por que $T2T/T2W$ and $T2T/T2S$ son iguales.
4. El horno conforme a cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que los quemadores están montados en el techo del horno.
5. El horno conforme a una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que los quemadores están montados en el suelo del horno y caldean verticalmente hacia arriba.
6. El horno conforme a cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que es un horno de reformación de metano con vapor.
7. Un proceso endotérmico para realización en un horno (1) que comprende tubos (2) y quemadores (3), comprendiendo dicho proceso:
- introducir alimentación gaseosa y vapor en tubos (2) que contienen un catalizador para convertir la alimentación gaseosa, en donde los tubos están dispuestos en filas (5) dentro del horno,
 - quemar un combustible con aire en quemadores que están montados entre los tubos y entre los tubos y las paredes del horno que son paralelas a las filas de tubos,
 - descargar los productos generados en los tubos,
- en donde los las filas de quemadores y las filas de tubos están terminadas por paredes finales (7) y están divididas en secciones (10), siendo la distancia desde los quemadores finales de pared (8a) y la pared final T2W, siendo la distancia entre dos tubos adyacentes (8c) en una sección T2T, y siendo la distancia entre dos tubos finales de simetría (8b) de dos secciones adyacentes T2S, caracterizado por que los tubos están dispuestos en las filas de tal manera que las ratios $T2T/T2W$ y $T2T/T2S$ son mayores que 0,5 y menores que 2, limitando así las diferencias en la transmisión de calor a los tubos exteriores con respecto a los tubos interiores y reduciendo la diferencia de temperatura entre tubos exteriores y tubos interiores, donde los tubos exteriores son los tubos finales de pared y los tubos finales de simetría.
8. Un proceso conforme a la reivindicación 7 para reformación de metano con vapor.
9. Un proceso conforme a la reivindicación 7 u 8, donde las ratios $T2T/T2W$ y $T2T/T2S$ son mayores que 0,75 y menores que 1,75.
10. Un proceso conforme a la reivindicación 9, donde las ratios $T2T/T2W$ y $T2T/T2S$ son iguales.
11. Un proceso conforme a las reivindicaciones 7 a 10, en donde el horno es un horno caldeado por arriba.
12. Un proceso conforme a las reivindicaciones 7 a 10, en donde el horno es un horno caldeado por abajo.

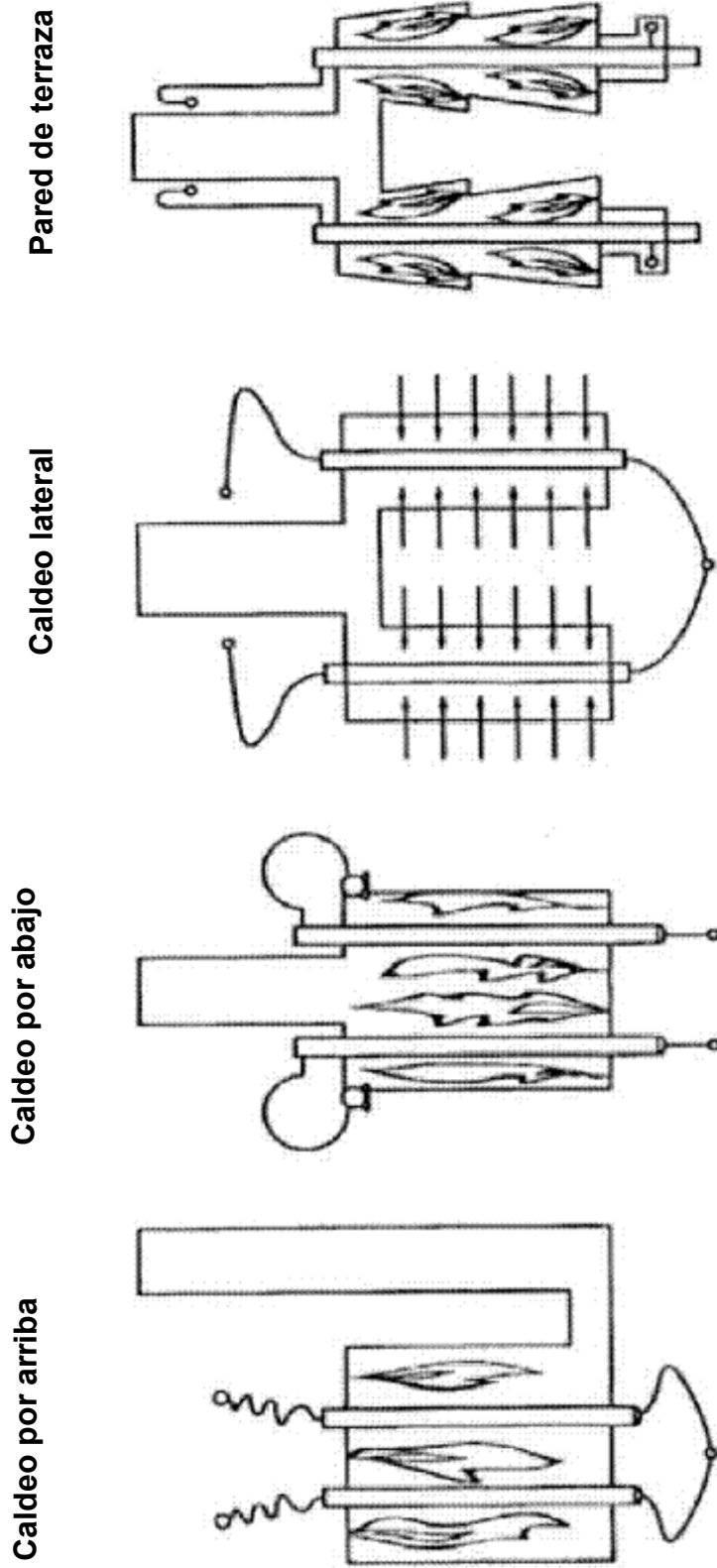


Figura 1

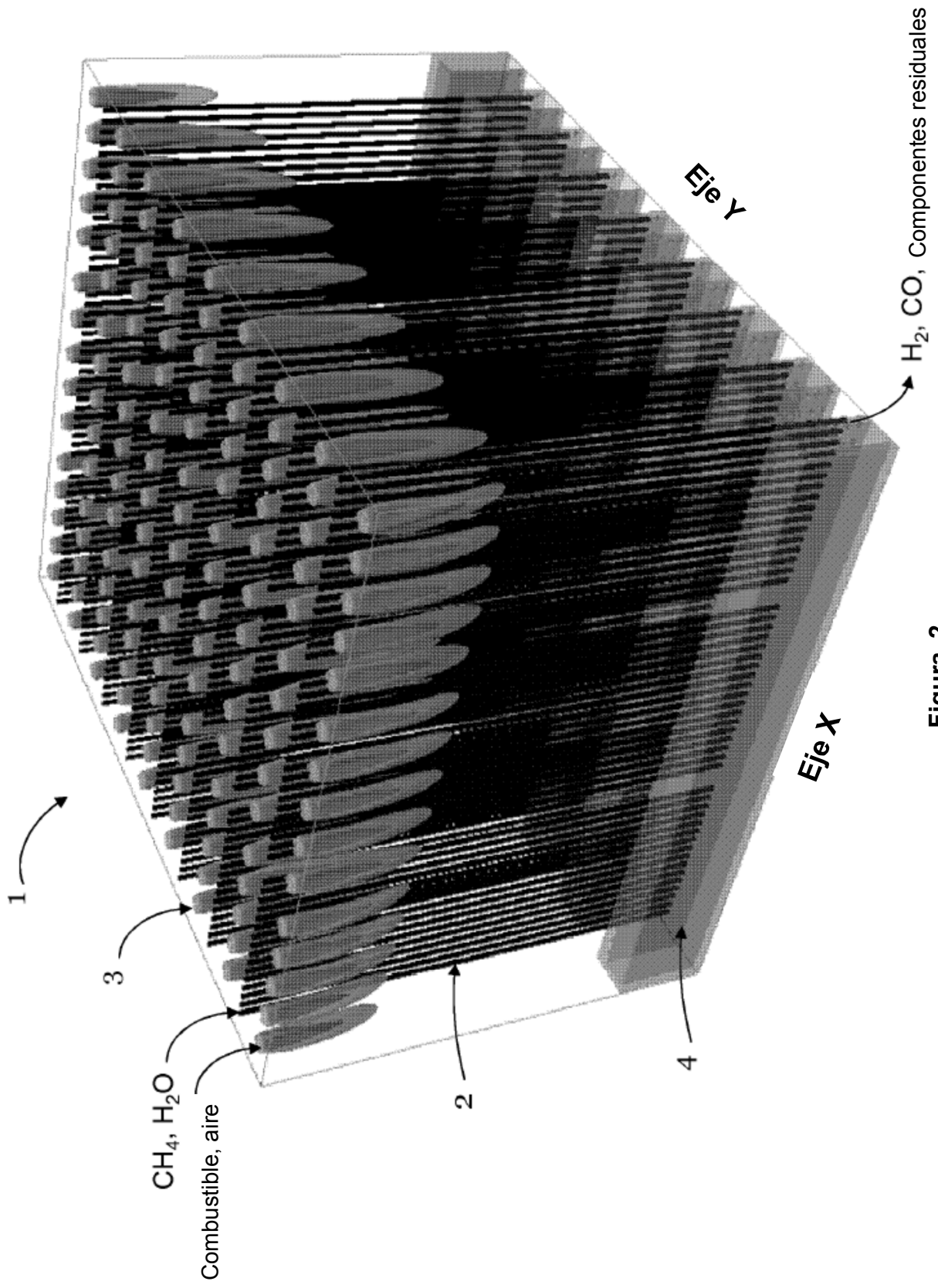


Figura 2

Figura 3

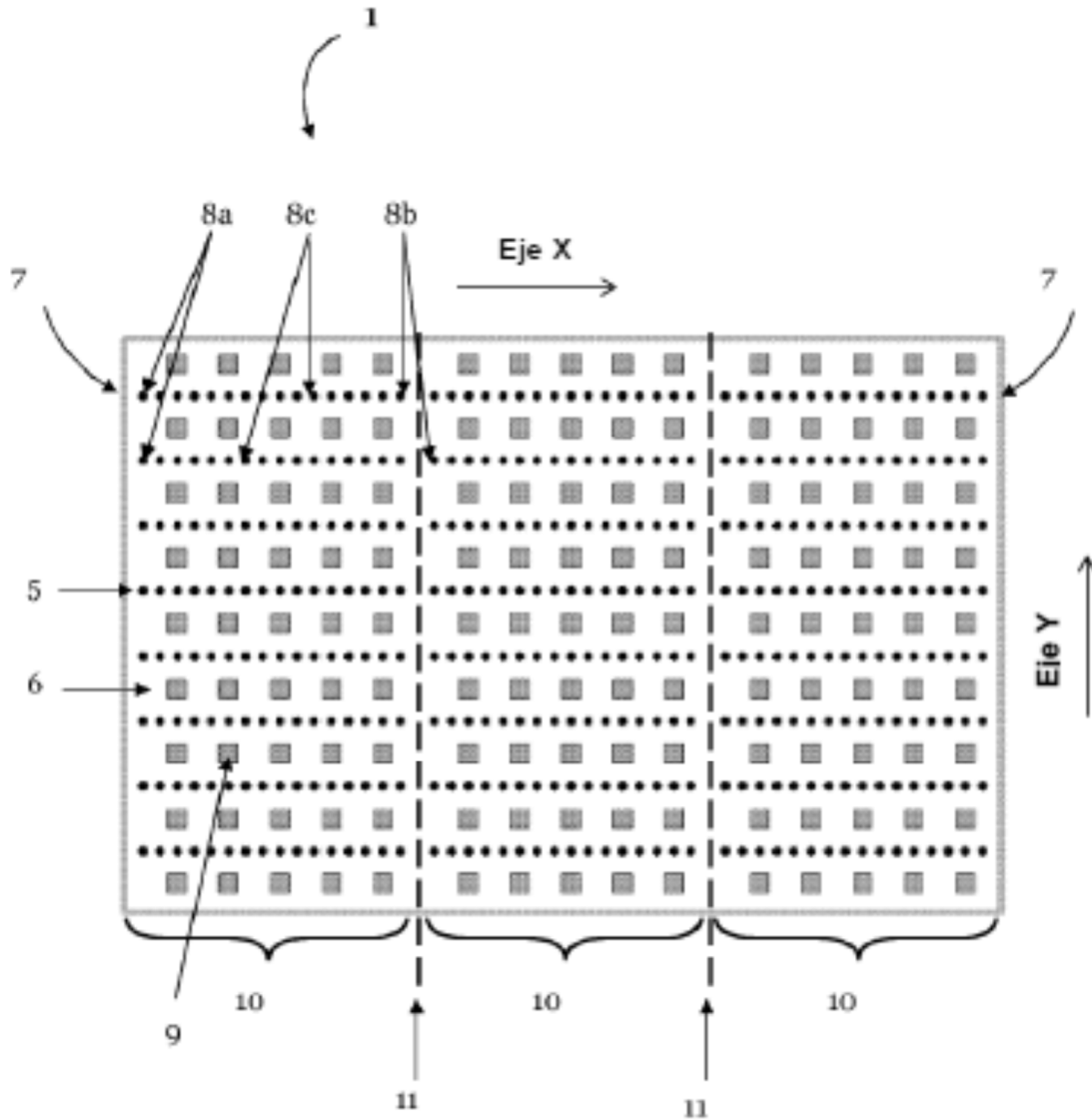


Figura 4

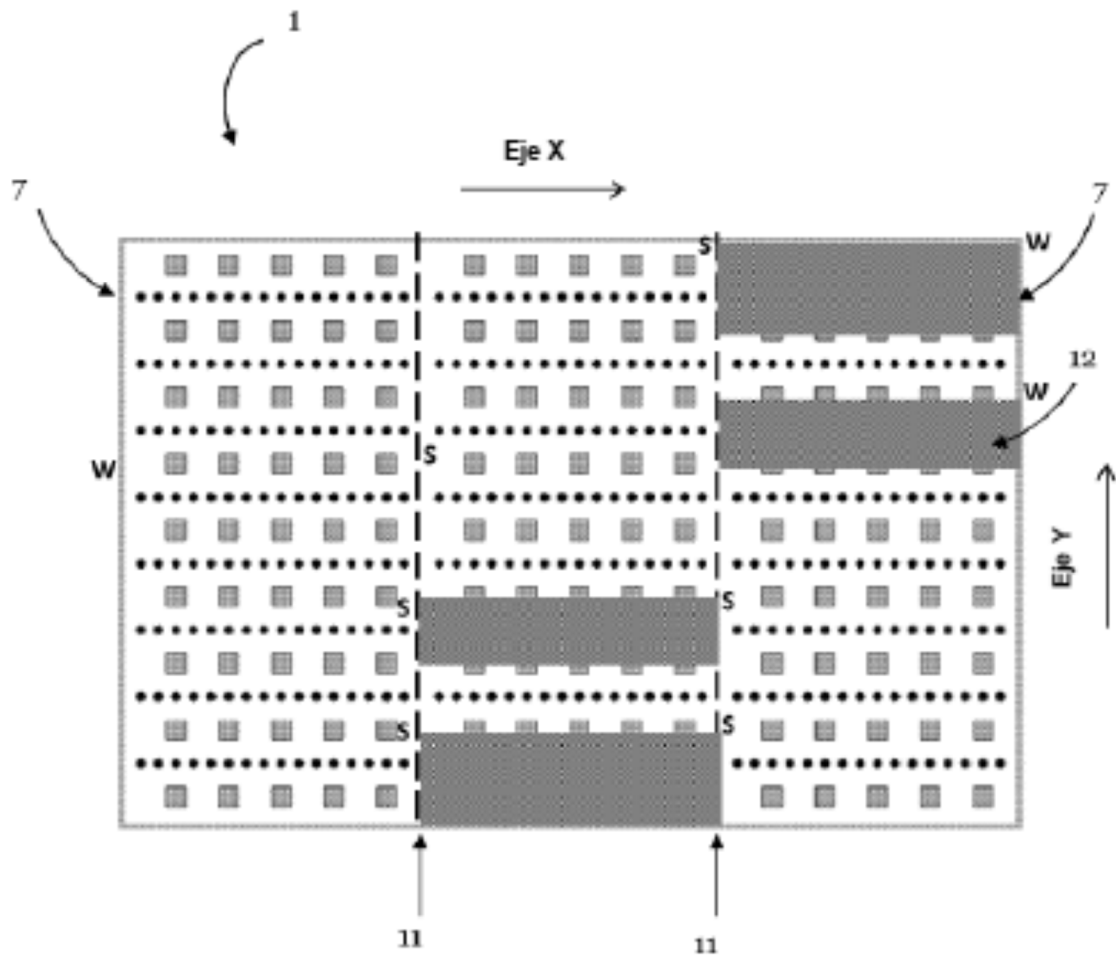
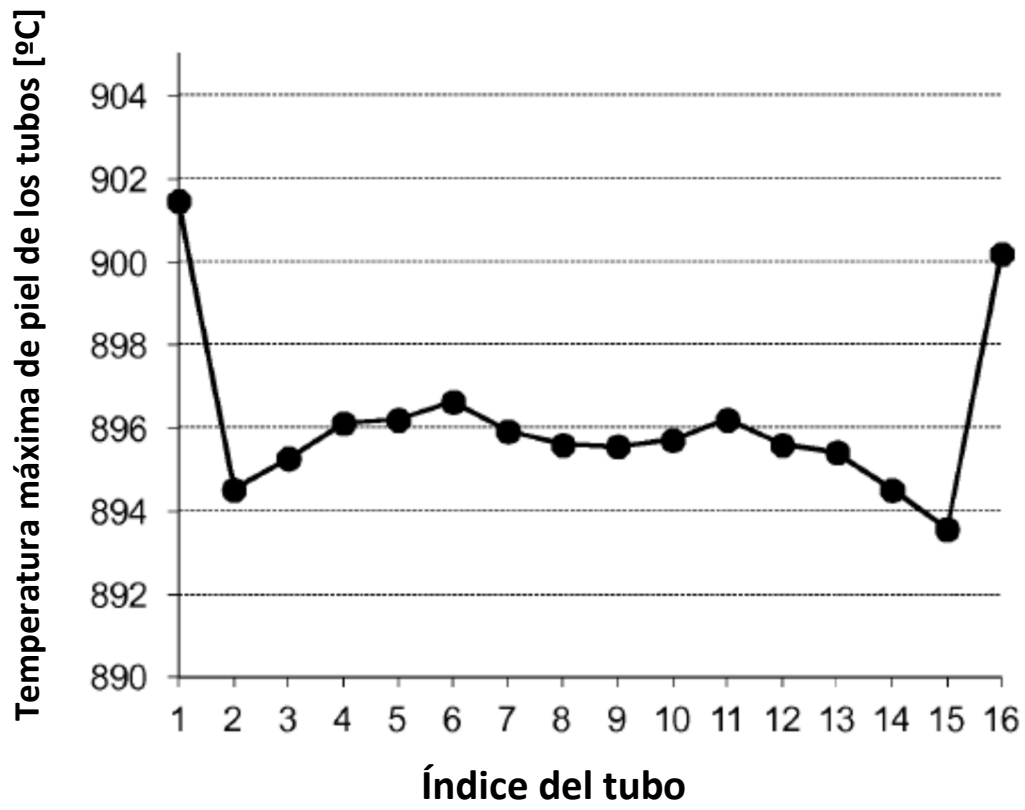


Figura 5



12

Figura 6

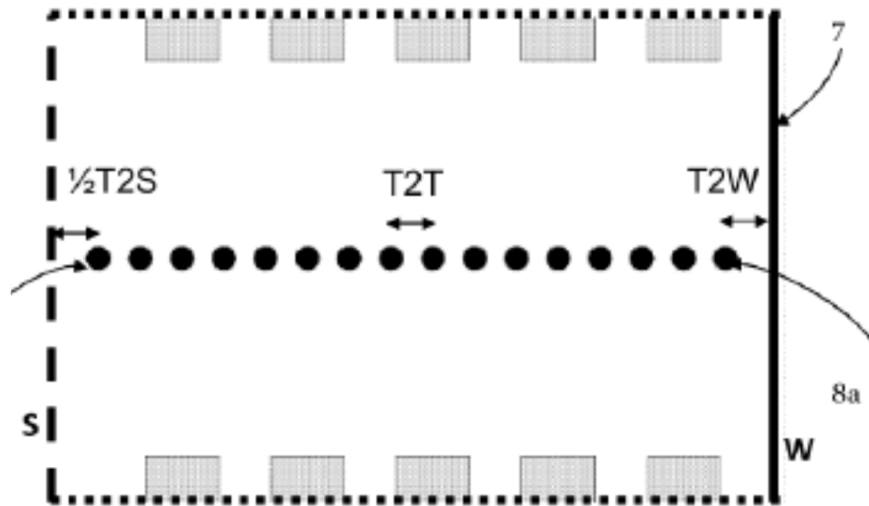


Figura 7

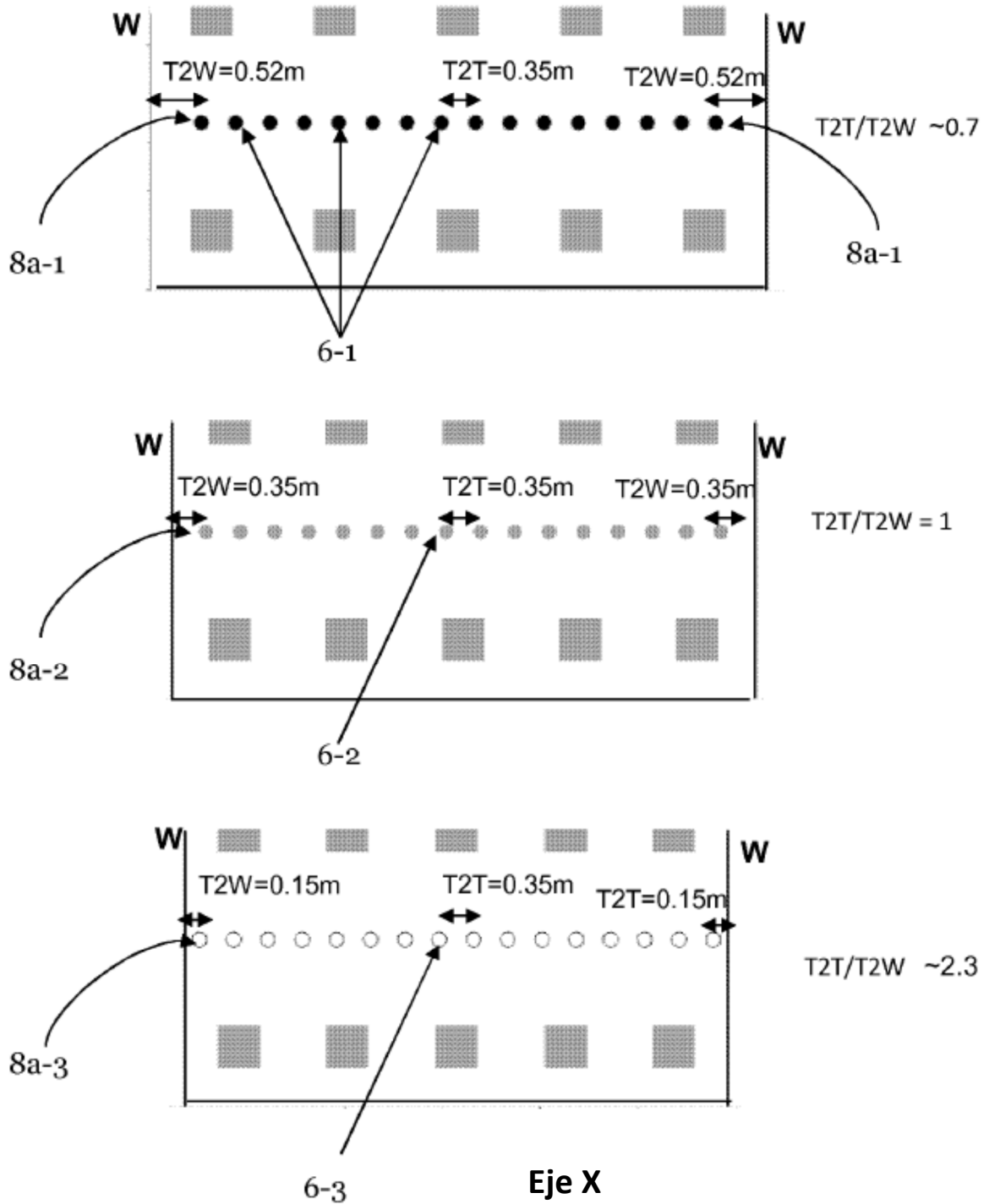


Figura 8

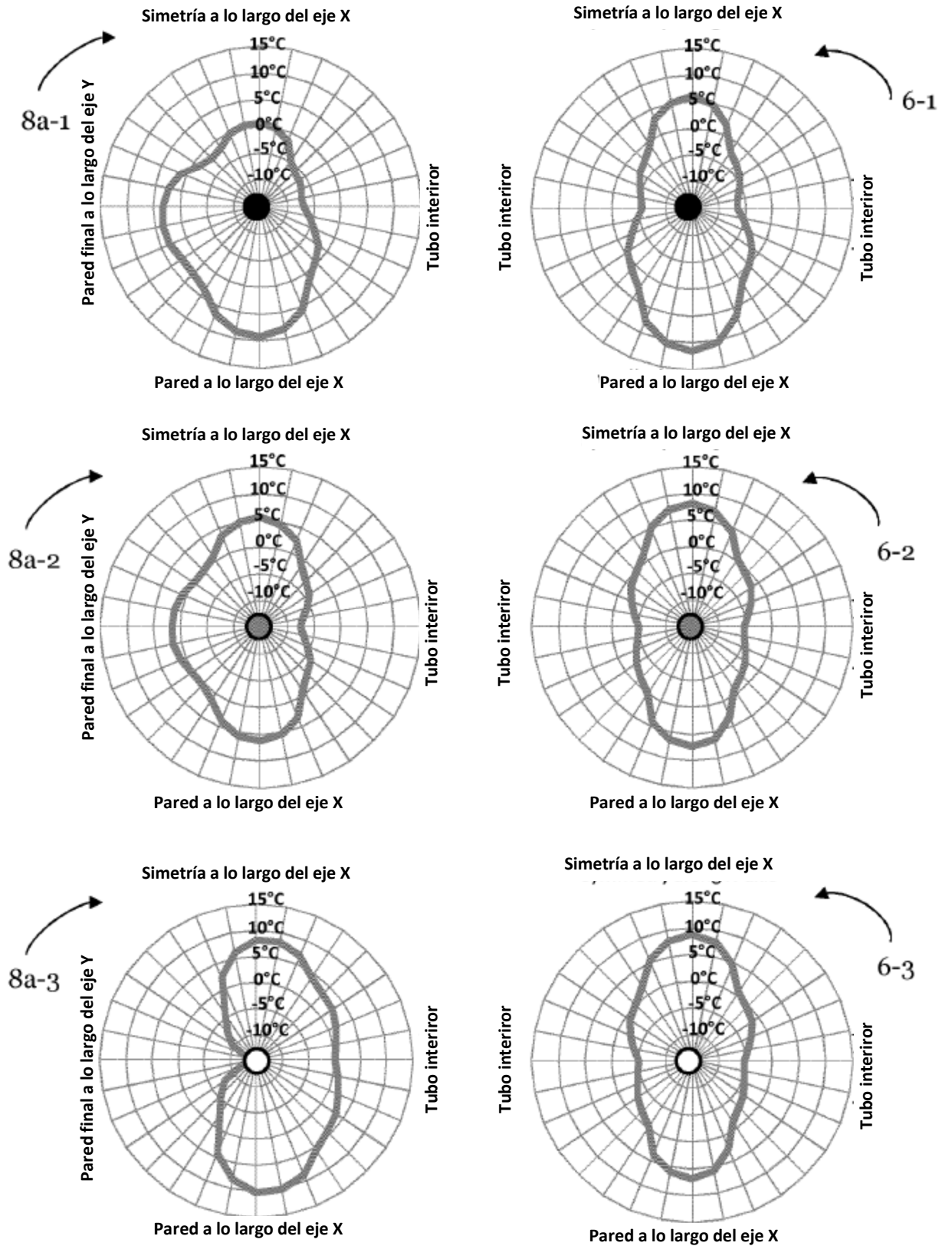
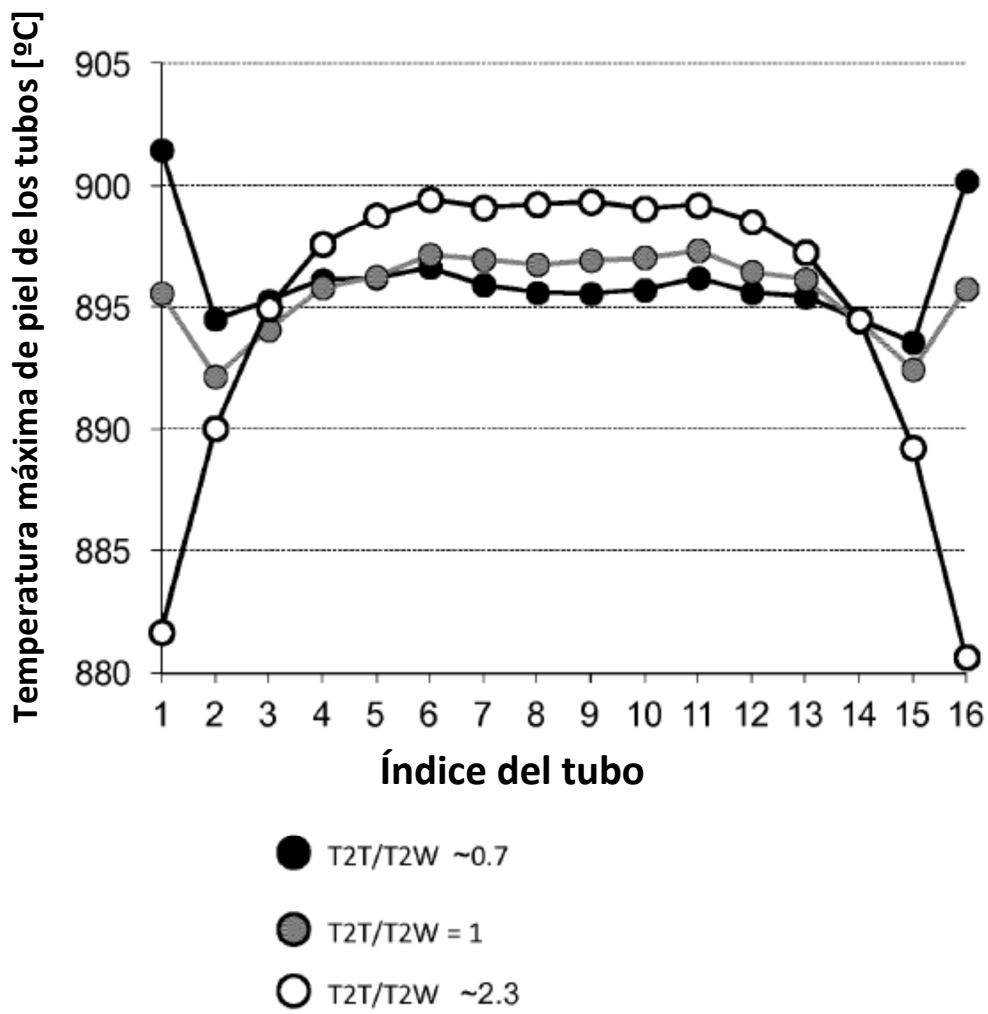


Figura 9



Número de tubos por	T2T	T2S	T2T/T2S	Trabajo relativo [%]
17	300	1400	0.21	2.96%
18	300	800	0.38	2.48%
17	300	800	0.38	2.54%
15	300	400	0.75	1.70%
16	300	300	1.00	-0.11%
Número de tubos por crujía	T2T	T2W	T2T/T2W	Trabajo relativo [%]
16	350	520	0.67	1.65%
15	300	390	0.77	1.20%
16	300	375	0.80	1.31%
16	350	350	1.00	1.31%
16	350	150	2.33	-3.21%

Figura 10