

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 926 691**

51 Int. Cl.:

F23N 5/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.10.2019** **E 19205660 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.06.2022** **EP 3816513**

54 Título: **Método para mejorar la homogeneización de las temperaturas en un reformador de metano con vapor mediante el ajuste de la distribución de potencia**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
27.10.2022

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;
LODIER, GUILLAUME;
AMMOURI, FOUAD y
LAGARDE, JULIEN**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 926 691 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

Método para mejorar la homogeneización de las temperaturas en un reformador de metano con vapor mediante el ajuste de la distribución de potencia

La presente invención se refiere a un método para mejorar un proceso endotérmico que tiene lugar en un horno que contiene tubos que se llenan con un catalizador para la conversión química de una alimentación gaseosa y se colocan verticalmente en filas dentro del horno, montándose los quemadores en filas con filas de quemadores interiores colocados entre dos filas de tubos y filas de quemadores exteriores colocados entre una fila de tubos y una pared lateral paralela a las filas de tubos, con el calor transfiriéndose de los quemadores a los tubos y con caudales asociados, donde el método mejora la homogeneización de las temperaturas de los tubos regulando parte de los quemadores.

El mismo permite mejorar el funcionamiento de los hornos de reformado, tanto en términos de seguridad como de eliminación de cuellos de botella, y es especialmente adecuado para hornos de combustión superior o de combustión inferior para el reformado de metano con vapor (SMR) y otras reacciones endotérmicas como el craqueo de materias primas de hidrocarburos en reactores de combustión externa.

El proceso SMR se basa principalmente en la reacción de reformado de hidrocarburos ligeros, tales como el metano, que da lugar a una mezcla de hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO) en presencia de vapor. La reacción es endotérmica y lenta y requiere un aporte de calor adicional, así como un catalizador para que se produzca. Por lo general, el rendimiento de los reactores SMR está limitado por la transferencia de calor y no por la cinética de las reacciones.

En la práctica industrial, el reactor SMR suele estar compuesto por reformadores tubulares -también conocidos como tubos- colocados en un horno, dichos tubos se llenan de catalizador -generalmente en forma de pellets- y se alimentan con la mezcla de gas de proceso de metano y vapor.

Existen varias configuraciones totalmente probadas para el diseño de hornos: pared de combustión superior (también conocida como de combustión descendente), pared de combustión inferior (también conocida como combustión ascendente), pared de combustión lateral y pared de terraza.

La tecnología de combustión superior es uno de los diseños más referenciados y se ofrece por varios proveedores de tecnología.

En aras de la simplicidad, la mayoría de las explicaciones que siguen se hacen con referencia a un horno de combustión superior, sin embargo, la mayoría de las figuras y explicaciones se aplican también a los hornos de combustión inferior. Las explicaciones se hacen con respecto a un proceso de reformado de metano con vapor, pero se aplican también a otras reacciones endotérmicas como el craqueo de materias primas de hidrocarburos en reformadores de combustión externa.

Los hornos de combustión superior normalmente se fabrican con una cámara de combustión revestida de material refractario que contiene varias filas de tubos que contienen catalizador. Para cada fila de tubos, el gas de síntesis se recolecta de cada tubo en una tubería común fuera de la cámara de combustión conocida como colector de gas de síntesis. El gas de síntesis recolectado de todas las filas se une al cabezal cruzado y se transfiere después al enfriador de gas de proceso.

El calor necesario para que se produzca la reacción es proporcionado por los quemadores de techo colocados en filas entre los tubos, y también por las filas de quemadores de techo adicionales en el lado del horno, a lo largo de las paredes laterales del horno paralelas a las filas de tubos. Los productos de la combustión que salen de los quemadores se suelen soplar verticalmente hacia abajo, de modo que las filas de tubos se enfrentan a las llamas en su parte superior. En el nivel del suelo del horno se suele proporcionar un colector de salida de gases de combustión. Las filas exteriores de quemadores, es decir, a lo largo de las paredes laterales, solo calientan una fila de tubos en un lado y la pared lateral refractaria en el otro lado. Cada una de las filas internas de quemadores situadas en el centro de la cámara de combustión calientan dos filas de tubos a ambos lados de la fila de quemadores. Por lo tanto, los quemadores exteriores necesitan proporcionar menos energía que los quemadores interiores.

La tecnología de combustión inferior es menos común en las plantas modernas. De acuerdo con la tecnología de combustión inferior, los quemadores se disponen también en filas pero se instalan en el suelo del área de combustión entre las filas de tubos y disparan verticalmente hacia arriba.

El objetivo principal del horno (también llamado diseño de la cámara de combustión) es maximizar el calor transferido desde los quemadores a los tubos -desde las llamas de los quemadores y también desde las paredes y los gases de combustión calientes- respetando al mismo tiempo una restricción de temperatura máxima de funcionamiento de los tubos. La temperatura máxima de funcionamiento de los tubos o MOT (también conocida como restricción máxima de funcionamiento) es una función de varios factores, en particular 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 la fluencia y al envejecimiento térmico.

5 Cualquier intensificación del calor transferido a los tubos tiene un impacto positivo directo, ya sea por el aumento de la productividad o por la mejora de la compacidad de la cámara de combustión, lo cual es valioso en términos de gastos de capital. Sin embargo, la intensificación del calor transferido suele implicar niveles de Temperatura Superficial del Tubo (TST) más elevados que reducen su vida útil o requieren aleaciones más resistentes - que son mucho más caras.

10 La falta de homogeneidad en la distribución de la carga térmica en el horno hará que algunos de los tubos estén más calientes que los otros, por lo que los perfiles de temperatura de los tubos son elementos críticos para el diseño del horno y durante su funcionamiento. Cuando se busca un buen compromiso entre rendimiento y durabilidad -y un buen compromiso es realmente esencial-, los perfiles TST de la temperatura superficial del tubo (conocida también como de temperatura de pared del tubo TWT o simplemente temperatura del tubo) brindan información decisiva.

15 Por consiguiente, durante el funcionamiento, el rendimiento del horno está limitado por la temperatura del tubo más caliente, es decir, la temperatura máxima del tubo o MTT, que no debe ser superior a la MOT. Mientras tanto, el rendimiento del proceso (la productividad o eficiencia de conversión, o una combinación de ambas) depende del flujo de calor y de la temperatura media de los tubos. Por consiguiente, cuanto menor sea la diferencia entre la temperatura del tubo más caliente y la temperatura del tubo más fría, mejor será el rendimiento del horno.

20 En diseños comunes, los extremos inferiores de los tubos que pertenecen a una fila están conectados a un colector de gas de síntesis. Para cada colector de gas de síntesis, un sensor de temperatura asociado mide la temperatura del gas de síntesis recolectado. Esta temperatura es representativa de la temperatura media de los tubos conectados. 25 Otra estimación del rendimiento viene dada por la diferencia entre la temperatura del colector de gas de síntesis más caliente y la temperatura del colector de gas de síntesis más frío, conocida como "dispersión de temperatura del colector de gas de síntesis".

30 En el reformado de metano con vapor, para permitir que ocurran las reacciones de reformado, los tubos contienen un medio catalizador. En un horno de combustión superior, la alimentación se suministra a los tubos en su extremo superior, el gas de síntesis producido, que contiene hidrógeno y monóxido de carbono como componentes principales junto con residuos, se extrae en la parte inferior de los tubos. Al ser la cámara de combustión del horno generalmente de forma rectangular, los quemadores están dispuestos en filas a lo largo del horno, entre las filas de tubos para las 35 filas de quemadores interiores, y entre las filas de tubos exteriores y las paredes laterales para las filas de quemadores exteriores para proporcionar el calor necesario para la conversión del gas de proceso. Los gases de combustión se extraen a través de túneles de escape.

40 Un resultado inherente a las limitaciones de diseño de la cámara de combustión es una transferencia no homogénea del calor disponible entre los tubos del reformador. Algunas de las razones que conducen a esta transferencia no homogénea se enumeran a continuación:

- la forma en que se distribuyen los tubos y quemadores en las filas dentro de la cámara de combustión;
- 45 • mala distribución de los flujos de aire y combustible que emergen de distintos colectores hacia las boquillas de los quemadores;
- diferentes flujos de momento del chorro entre los quemadores de las filas exteriores y de las filas interiores;
- 50 • distribución de gas de alimentación desequilibrada;
- disposición de la apertura de los túneles para la salida de humos;
- 55 • el efecto geométrico del conducto de humos convergente.

Pueden surgir discrepancias adicionales entre las temperaturas de los tubos en el sitio:

- 60 • durante la acumulación de la cámara de combustión, como un llenado de catalizador no uniforme o una instalación incorrecta del quemador;
- también durante la explotación de la planta, como un problema de avería del quemador, por ejemplo, una condición de funcionamiento que crea coque en las puntas o instalaciones de gas del quemador o el envejecimiento del catalizador.

65

Todos estos inconvenientes inherentes al diseño de la cámara de combustión o que pueden aparecer durante la construcción de la cámara de combustión o que van surgiendo a medida que se opera la unidad, conducen a la diferencia entre las temperaturas de tubos más calientes y más frías, lo que se conoce como "dispersión de temperatura del tubo".

Es obligatorio reducir la dispersión de temperatura del tubo para garantizar el mejor equilibrio entre la eficiencia y la vida útil del tubo en un horno SMR.

También es obligatorio corregir y/o compensar aquellas discrepancias que no estén previstas. Por lo tanto, encontrar estrategias de mitigación es de gran interés para mejorar la operación de las plantas SMR.

Cuando no es posible prevenir o prever diferencias en el comportamiento de los tubos, una solución es aplicar un método curativo, aplicable en el sitio, que mitigue las diferencias de temperatura entre los tubos de reformado.

Una solución para reducir la dispersión de temperatura es adaptar la potencia de los quemadores individualmente para homogeneizar la transferencia de calor al reformado; esto se puede obtener mediante la regulación individual de los quemadores.

La reducción de la dispersión de temperatura así obtenida conducirá a una mejora del rendimiento de la planta; otra ventaja es que la solución se puede aplicar durante las operaciones normales sin tener que esperar los períodos de mantenimiento.

El cambio de la potencia del quemador se puede obtener actuando una o varias corrientes:

- la corriente de combustible secundaria -comúnmente gas de escape- que suele tener la mayor contribución a la potencia del quemador;
- la corriente de combustible primaria -comúnmente gas natural-, esta corriente tiene menor flexibilidad en cuanto a las variaciones de caudal ya que se requiere una cantidad mínima para asegurar el buen funcionamiento del quemador en caso de fluctuaciones en la composición del contribuidor principal;
- la corriente comburente; también es teóricamente posible, pero teniendo este flujo el caudal más alto, será necesario tener cuidado con las interacciones entre quemadores con diferentes relaciones de flujo de momento.

La reducción del caudal de al menos una de las corrientes de combustibles (primaria o secundaria) o comburente puede obtenerse regulando sus válvulas correspondientes, también puede obtenerse instalando orificios de restricción de caudal.

Un quemador cuya potencia se ha reducido al disminuir el caudal de una o varias corrientes se denomina "quemador regulado".

Mitigar la dispersión de las temperaturas del tubo, y por consiguiente las estrategias de mitigación, es de gran interés para mejorar la operación de las plantas SMR.

En las plantas SMR, ahora es una práctica estándar equipar los quemadores con válvulas y, por consiguiente, la regulación de los quemadores no requiere implementar el apagado de la planta.

Se conoce la disminución de la dispersión de las temperaturas del tubo mediante la regulación de los quemadores *per se*, sin embargo, la forma de proceder a una elección juiciosa de un conjunto adecuado de quemadores puede mejorarse en gran medida.

Es conocido seleccionar un conjunto de quemadores para ser regulados gracias a la metodología empírica de prueba y error. Este método es una práctica del experto en la materia para las plantas existentes, sin embargo, requiere mucho tiempo y los resultados pueden no ser satisfactorios.

Se propone otra solución en el documento EP 2325562 que describe un método de operar un horno donde se desea ajustar la temperatura de los tubos al criterio de temperatura objetivo seleccionado; el método proporciona un enfoque sistemático y cuantitativo para determinar cómo ajustar los caudales del quemador para obtener las temperaturas superficiales deseadas del tubo, por ejemplo, para minimizar la desviación de temperatura entre las temperaturas superficiales del tubo a una altura predeterminada en el horno. Los caudales de los quemadores se ajustan de acuerdo con los caudales objetivo calculados, que se calcularon utilizando la estimación de una función matemática y la información de temperatura. El método requiere adquirir información sobre la temperatura de los tubos de proceso capturando imágenes que comprenden datos de píxeles y procesar los datos de píxeles para obtener la información de temperatura. El enfoque incluye también proporcionar una estimación de la función matemática que caracteriza una relación entre los cambios de caudal del quemador y los cambios de temperatura de los tubos de proceso. El

inconveniente del método es su complejidad y el tiempo requerido para estimar los parámetros de la función matemática necesarios a partir de mediciones iterativas de TST asociadas con la adquisición y procesamiento de imágenes que incluyen información de temperatura. Por lo tanto, el método requiere material, mano de obra en el sitio y el tiempo necesario para operar la cámara IR para evaluar la relación entre la regulación del quemador y la TST.

Como se ha indicado anteriormente, encontrar los mejores quemadores para regular puede ser complicado y llevar mucho tiempo en la práctica, especialmente para hornos grandes con numerosos quemadores y tubos, y esto es una debilidad real de las soluciones conocidas.

Por consiguiente, sigue existiendo la necesidad de un método de regulación mejorado que permita identificar un conjunto adecuado de quemadores a regular y regularlos para mitigar la dispersión de las temperaturas del tubo. Más precisamente, existe la necesidad de un método que permita adquirir un conjunto adecuado de quemadores para ser regulados gracias a una metodología eficiente, rápida y fácil de implementar, aportando por consiguiente una ventaja determinante con respecto a las soluciones ya conocidas.

La invención tiene por objeto proponer un método para mejorar y controlar en funcionamiento las temperaturas superficiales de los tubos presentes en un horno gracias a una determinación eficaz y rápida de un conjunto adecuado de quemadores -también denominado mapa de quemadores- que deberían tener ventajosamente su potencia reducida para disminuir la dispersión de la temperatura de los tubos en el horno. Gracias a la solución de la invención, se puede lograr mucho más rápidamente que en las soluciones conocidas un mapa adecuado de quemadores a regular para alcanzar al menos un parámetro elegido un objetivo previsto. Los parámetros se eligen con vistas a mejorar el rendimiento del proceso. A continuación se enumeran ejemplos de parámetros elegidos y los objetivos relacionados:

- el parámetro que es la TST máxima, siendo el objetivo reducir la TST máxima;
- el parámetro que es la dispersión de TST, siendo el objetivo reducir la dispersión de TST;
- el parámetro que es la dispersión de temperatura del colector de gas de síntesis, siendo el objetivo reducir también la dispersión de SCT.

Por lo tanto, el método limita los requisitos de mano de obra en el sitio y el riesgo asociado con la misma. Gracias a la invención, se requerirá mano de obra en el sitio solo para realizar un único conjunto de mediciones de TST y, finalmente, para regular las válvulas manualmente si estas tareas no se pueden realizar de forma remota desde la sala de control. Para la primera implementación de la metodología en una planta, se requiere una etapa de calibración, que implica adquirir información sobre la temperatura real del tubo para al menos un tubo, preferiblemente el más cercano a un quemador en condiciones no reguladas y reguladas. La información se puede obtener utilizando los medios presentes en el sitio para medir la temperatura del tubo, comúnmente por medio de un termopar y/o un pirómetro y/o una cámara de infrarrojos, pero también por cualquier otro medio adecuado.

Con las soluciones de la técnica anterior para obtener un mapa de quemador a regular presentado anteriormente, se tarda demasiado en obtener el mapa y, por consiguiente, es difícil usar con frecuencia tales soluciones en el sitio para que los operadores tomen decisiones en el trabajo del día a día.

Aplicando la solución de la presente invención, se evita este inconveniente. Gracias a la invención, la determinación de un mapa de quemadores a regular a una o más relaciones de potencia elegidas τ se puede establecer en pocos minutos. La relación de potencia τ de un quemador dado es una representación de la potencia entregada por este quemador.

En el contexto de la invención, la relación de potencia τ es:

$$\tau = \frac{P \text{ no regulada} + \Delta P}{P \text{ no regulada}}$$

donde P no regulada es la potencia del quemador en modo de funcionamiento normal (es decir, modo nominal) y ΔP es la variación de potencia inducida por la regulación:

ya sea $\Delta P < 0$: caso cuando la potencia del quemador ha disminuido debido a la regulación del quemador;

o $\Delta P > 0$: caso cuando la potencia del quemador de un quemador no regulado aumenta debido a la redistribución de potencia entre los quemadores no regulados en el horno.

La relación de potencia τ de un quemador dado se puede expresar también como un porcentaje, y en ese caso:

$\tau \% = 100 \%$ significa que el quemador y todos los quemadores están en estado estándar (es decir, nominal) y $\Delta P = 0$

$\tau \% = 0 \%$ significa que el quemador está cerrado; $\Delta P = P$ no regulada

$\tau \% > 100 \%$ significa que el quemador está en estado estándar, pero con potencia redistribuida -se tiene en cuenta que los demás quemadores del horno están regulados. Cuando al menos un quemador está regulado, la potencia en exceso se redistribuye en consecuencia entre los quemadores no regulados para mantener invariable la suma de todas las potencias de los quemadores.

$\tau \% < 100 \%$ significa que el quemador ha sido regulado para disminuir la potencia entregada por este quemador

La solución de la invención se basa en:

1) Una etapa de calibración requerida para la primera implementación de la metodología en una planta;. Esta etapa implica adquirir información sobre la temperatura real del tubo de un solo tubo más cercano a un quemador antes y después de la regulación.

2) Adquisición de datos iniciales mediante la adquisición de información sobre una temperatura del tubo real para los tubos presentes en el horno en condiciones no reguladas,

3) Adquisición automática de un mapa de quemadores a regular aplicando la siguiente metodología:

i) elegir parámetros y objetivos representativos del rendimiento de la planta - normalmente TST máxima y disminución de, y/o dispersión y disminución de TST, y disminución de y/o dispersión de SCT, y/u otros parámetros adecuados con objetivo asociado,

ii) elegir una o más relaciones de potencia para aplicar a una pluralidad de quemadores en el horno,

iii) calcular después automáticamente la variación de la TST en respuesta a la regulación de diferentes quemadores en el horno para obtener automáticamente un mapa óptimo de quemadores a ser regulados,

4) Finalmente, la regulación individual de los quemadores de acuerdo con dicho mapa de quemadores a regular.

Los inventores han encontrado que era posible determinar rápidamente un mapa adecuado de quemadores a regular, gracias a una estimación rápida de la TST de los tubos -punto 3 iii) aquí arriba- en respuesta a la regulación de los diferentes quemadores aplicando algunas reglas que simplifican el cálculo del impacto de la regulación de uno o más quemadores en los tubos presentes en sus proximidades.

Conseguir un mapa de quemadores a regular es crucial. La solución de acuerdo con la invención, como se describe a continuación, permite acelerar drásticamente la consecución de dicho mapa al proponer un modelo físico simplificado del impacto de la regulación del quemador en la temperatura superficial del tubo TST.

Para poder proponer algunas reglas que rijan el impacto de la regulación de un quemador sobre las variaciones de temperatura superficial del tubo, los inventores, en primer lugar, han establecido el impacto de la regulación de los quemadores -sobre la temperatura superficial del tubo- mediante simulaciones numéricas. Las simulaciones se realizaron utilizando un solucionador interno SMR3D destinado al cálculo de la transferencia de calor entre la cámara de combustión y los tubos. Más precisamente, se usa Dinámica de fluidos computacional (CFD) en 3D para la cámara de combustión y se usa un modelo 1D para tener en cuenta la cinética de las reacciones de reformado, se pueden usar solucionadores adecuados conocidos o solucionadores internos. Las simulaciones se realizan en un dominio representativo de la cámara de combustión (parte de la cámara de combustión representativa del todo) para definir un modelo físico simplificado.

El análisis de las temperaturas superficiales del tubo en respuesta a varias regulaciones de los quemadores llevó a los inventores a definir las siguientes reglas de comportamiento (punto 1 a punto 3 a continuación y Figura 4 a Figura 6) que se utilizaron para construir el modelo físico simplificado de la invención:

Punto 1. La Figura 4 ilustra el impacto de regular un solo quemador en la TST de los tubos circundantes, la misma muestra también que regular un quemador exterior (Figura 4a) se comporta de forma diferente que regular un quemador interior (Figura 4b):

- para los quemadores exteriores y también para los quemadores interiores, la regulación de un quemador impacta significativamente en las dos filas de tubos más cercanas, dichas filas se denominan en

lo sucesivo "filas impactadas", siendo insignificante el impacto en los tubos de las filas más lejanas. Para un quemador exterior, las dos filas impactadas están en el mismo lado del quemador regulador, mientras que para un quemador interior, las dos filas impactadas están una a cada lado del quemador regulador;

- una regulación del quemador exterior tiene un alto impacto en la fila de tubos más cercana y un impacto menor en la segunda fila impactada mientras que una regulación del quemador interior distribuye el impacto en la fila de tubos más cercana a cada lado;

- dentro de cada fila impactada, un quemador regulado tiene el mayor impacto sobre los tubos más cercanos, -dichos tubos se denominarán en lo sucesivo "tubos impactados"-, disminuyendo rápidamente el impacto al alejarse del quemador regulado; el número de tubos afectados por la regulación de un quemador se estima en $4 \times N_{\text{tubos}}/N_{\text{quemadores}}$ (obviamente redondeado a un número entero) donde N_{tubos} es el número de tubos en la fila y $N_{\text{quemadores}}$ es el número de quemadores en la fila.

Punto 2. Como se ilustra en la Figura 5a y la Figura 5b, también se ha encontrado ventajosamente, gracias a las simulaciones numéricas, que los quemadores regulados tienen efectos acumulativos sobre la TST de los tubos impactados. La Figura 5a muestra el resultado de una sola simulación con dos quemadores regulados, la Figura 5b muestra el resultado de la suma de dos simulaciones con regulación individual.

Punto 3. Además, como se ilustra en la Figura 6, la variación de TST es proporcional a la potencia del quemador regulado. Gracias a las simulaciones, se ha podido establecer que la variación de la temperatura superficial del tubo (TST) y la relación de potencia son aproximadamente proporcionales.

Estas reglas de comportamiento respecto a la evolución de la TST de los tubos en el horno SMR en respuesta a la regulación del quemador han contribuido al establecimiento de un modelo físico simplificado para predecir de forma bastante instantánea el impacto de la regulación de los quemadores en la temperatura superficial del tubo.

Después, para finalizar la invención, el modelo se combinó con un algoritmo de optimización para obtener automáticamente el mapa de quemadores a regular. Puede usarse un algoritmo de optimización interno o algoritmos para optimización conocidos en la técnica, tales como algoritmos de optimización de caja negra.

Con base en lo anterior, se estableció una metodología que tenía como objetivo mejorar la distribución del calor transferido a los tubos, de acuerdo con el uno o más parámetros y el objetivo elegido, por ejemplo, reduciendo la temperatura máxima del tubo o mitigando la dispersión de la temperatura del tubo o del colector.

Por consiguiente, un objeto de la invención es proponer un método para mejorar un proceso endotérmico que tiene lugar en un horno que contiene tubos que se llenan con un catalizador para la conversión química de una alimentación gaseosa y se colocan verticalmente en filas dentro del horno, montándose los quemadores en filas con filas de quemadores interiores colocados entre dos filas de tubos y filas de quemadores exteriores colocados entre una fila de tubos y una pared lateral paralela a las filas de tubos, con el calor transfiriéndose de los quemadores a los tubos y con caudales asociados, donde el método mejora la homogeneización de las temperaturas de los tubos regulando parte de los quemadores, en donde el método comprende las etapas de:

etapa a) adquirir opcionalmente información sobre una temperatura real del tubo para al menos un tubo más cercano a un quemador en estado estándar y regulado,

etapa b) adquirir información sobre una temperatura real de los tubos presentes en el horno con todos los quemadores presentes en el horno en condiciones estándar no reguladas,

etapa c) obtener un mapa de quemadores a regular que incluya:

c1) elegir al menos un parámetro representativo de los rendimientos del horno con un objetivo de mejora,

c2) elegir al menos una o más relaciones de potencia para la regulación del quemador,

c3) utilizar la información de la etapa b) y un modelo físico simplificado del impacto de la regulación de un quemador en la temperatura superficial del tubo para los tubos en el horno para conocer individualmente el impacto de la regulación de un quemador en el objetivo elegido de la etapa c1), e identificar individualmente los quemadores a regular,

c4) obtener un mapa de quemadores del horno donde se identifican individualmente los quemadores a regular,

etapa d) regular de los quemadores de acuerdo con el mapa obtenido en la etapa c4).

De acuerdo con la invención, dicho modelo físico simplificado del impacto de la regulación del quemador sobre la temperatura superficial del tubo se basa en las siguientes reglas 1) a 3) de comportamiento:

1) regular un quemador impacta significativamente en las dos filas de tubos más cercanas, estando dichas dos filas de tubos más cercanas del mismo lado para un quemador exterior y una a cada lado del quemador para un quemador interior; la regulación de un quemador exterior tiene un mayor impacto en la fila de tubos más cercana que en la segunda fila, mientras que la regulación de un quemador interior distribuye el impacto en las filas de tubos más cercanas en ambos lados; dentro de cualquiera de las filas impactadas, la regulación de un quemador tiene el mayor impacto en los tubos más cercanos, el impacto en los tubos disminuye rápidamente mientras se alejan del quemador regulado, el número de tubos impactados por la regulación de un quemador se estima en $4 \times N_{\text{tubos}} / N_{\text{quemadores}}$, para los tubos impactados, la variación de la temperatura superficial del tubo es proporcional a la distancia desde el quemador regulado

con N_{tubos} = número de tubos en la fila, y $N_{\text{quemadores}}$ = número de quemadores en la fila;

2) se acumulan los impactos de los quemadores regulados en la temperatura del tubo;

3) las variaciones de temperatura de los tubos son proporcionales a la relación de potencia τ , con τ siendo:

$$\tau = \frac{P \text{ no regulada} + \Delta P}{P \text{ no regulada}}$$

donde P no regulada es la potencia del quemador en modo de funcionamiento estándar y ΔP es la variación de potencia inducida por la regulación con $\Delta P < 0$ cuando la potencia del quemador ha disminuido debido a la regulación del quemador y $\Delta P > 0$ cuando la potencia del quemador aumenta debido a la redistribución de la potencia entre los quemadores no regulados del horno.

Ventajosamente, el uno o más parámetros de la etapa c1) se elige entre los siguientes: Temperatura máxima superficial del tubo, Dispersión de la temperatura superficial del tubo, Dispersión de la temperatura del colector de gas de síntesis con el objetivo de mejora siendo la reducción del valor del parámetro.

Preferiblemente, en la etapa c3), el modelo físico simplificado se combina con un algoritmo de optimización que es un algoritmo de optimización interno o algoritmos de optimización conocidos en la técnica, tales como los algoritmos de optimización de caja negra.

La regulación de los quemadores puede obtenerse cerrando parcialmente al menos una válvula instalada en al menos una de las corrientes de combustible o corriente comburente, preferiblemente en las corrientes de combustible, y más preferiblemente en la corriente de combustible secundario.

Ventajosamente, la relación de potencia $\tau\%$ de un quemador regulado está entre el 90 % y el 50 %, preferiblemente entre el 80 % y el 60 %.

Preferiblemente, la información sobre la temperatura real del tubo de la etapa b) es la temperatura superficial del tubo, obteniéndose preferiblemente por medio de un termopar o un pirómetro o una cámara de infrarrojos, o deduciéndose de la temperatura del colector de gas de síntesis que se obtiene preferiblemente por medio de un termopar.

El método puede comprender la calibración de la etapa a) donde se realizan mediciones reales de la temperatura del tubo para uno o más tubos impactados por un quemador regulado, al menos para un tubo frente a dicho quemador en condiciones no reguladas y reguladas, con el quemador siendo preferiblemente un quemador exterior

El método de la invención permite desatascar los cuellos de botella en un proceso/instalación de producción de hidrógeno -u otro gas o una mezcla de gases- a partir de un gas de síntesis obtenido por reformado de gas con vapor, homogeneizando las temperaturas de los tubos mediante el ajuste de la distribución de potencia.

Al reducirse la TST máxima por debajo de la MOT, se puede aumentar la carga de la unidad hasta que la temperatura máxima del tubo alcance la MOT.

Otro objeto de la invención es proponer un horno que contiene tubos que se llenan con un catalizador para la conversión química de una alimentación gaseosa y se colocan verticalmente en filas dentro del horno, montándose los quemadores en filas con filas de quemadores interiores colocados entre dos filas de tubos y filas de quemadores exteriores colocados entre una fila de tubos y una pared lateral paralela a las filas de tubos, con el calor transfiriéndose de los quemadores a los tubos y con caudales asociados, caracterizado por que parte de los quemadores son regulados individualmente de acuerdo con a un mapa obtenido por cualquiera de los métodos descritos anteriormente.

La presente invención y sus ventajas se describirán con más detalle basándose en los dibujos y en los ejemplos que siguen.

En los dibujos:

- 5 la Figura 1 muestra una disposición convencional de tubos y quemadores utilizando una representación en 3D de un horno de combustión superior utilizado para la síntesis de gas de síntesis;
- la Figura 2 muestra una vista superior del horno de combustión superior que destaca la organización de tubos y quemadores y también un dominio representativo;
- 10 la Figura 3a muestra las corrientes principales que ingresan a un quemador en un modo operativo estándar;
- la Figura 3b muestra las corrientes principales que entran al quemador de la Figura 3a en un modo operativo con un quemador regulado al cerrar parcialmente la válvula de combustible primaria y secundaria;
- 15 la Figura 4a muestra el impacto de regular un quemador exterior -con una relación de potencia r del 50 %- en la TST de los tubos en un dominio representativo;
- la Figura 4b muestra el impacto de regular un quemador interior -con una relación de potencia r del 50 %- en la TST de los tubos en el mismo dominio representativo;
- 20 la Figura 5a muestra el impacto de regular simultáneamente un quemador exterior y un quemador interior en la TST -relación de potencia r del 50 %- como resultado de una simulación con dos quemadores regulados;
- la Figura 5b muestra el impacto de regular simultáneamente un quemador exterior y un quemador interior en la TST -relación de potencia r del 50 %- resultante de la suma de dos simulaciones individuales con un quemador;
- 25 la Figura 6a muestra el impacto de regular un quemador exterior en la TST para una relación de potencia r del 0% (válvula cerrada);
- 30 la Figura 6b muestra el impacto de regular un quemador exterior en la temperatura superficial del tubo para una relación de potencia r del 75% (válvula 3/4 abierta);
- la Figura 6c muestra la relación entre la variación de TST y la relación de potencia r ;
- 35 la Figura 7a muestra un primer ejemplo de un mapa de quemadores a regular obtenido por el método de la invención para el horno de la Figura 1, con dos relaciones de potencia elegidas $r\% = 60\%$ y $r\% = 80\%$, y siendo los parámetros objetivo la TST máxima y la dispersión de TST;
- 40 la Figura 7b muestra perfiles de TST experimentales: para el modo operativo estándar de los quemadores (es decir, todos los quemadores están en el estado estándar sin regulación) y para la regulación optimizada del quemador de acuerdo con el mapa de la Figura 8a;
- 45 la Figura 8a muestra un segundo ejemplo de un mapa de quemadores a regular obtenido por el método de la invención para el mismo horno con una única relación de potencia elegida de $r\%=60\%$ aplicada, el objetivo para ambos parámetros TST máxima y dispersión de temperatura del colector de gas de síntesis es reducirlos.
- la Figura 8b muestra perfiles experimentales de TST para el modo operativo estándar de los quemadores y para la regulación optimizada de los quemadores de acuerdo con el mapa presentado en la Figura 9a;
- 50 la Figura 9 muestra la evolución de la distribución de la temperatura del colector de gas de síntesis para la configuración estándar y los mapas de regulación implementados en el sitio tal como *para* el 1º ejemplo de la Figura 8a y el 2º ejemplo de la Figura 9a.
- 55 La siguiente descripción detallada de las figuras y de los ejemplos ayudará a comprender la invención.
- La Figura 1 es una vista en perspectiva 3D de un horno; más exactamente, muestra una disposición típica de un horno de combustión superior **1** utilizado para producir un gas de síntesis. Unos tubos **2** que contienen catalizador de reformado están dispuestos en filas dentro del horno **1**. A la entrada de los reformadores tubulares **2** se suministra un gas de alimentación, una mezcla gaseosa de metano y vapor en la parte superior de la cámara de combustión y, a medida que fluye a través del lecho catalítico hacia el fondo de los tubos **2**, el gas de proceso se transforma y sale como gas de síntesis: una mezcla principalmente de hidrógeno y monóxido de carbono (también conocido como gas de síntesis). Unos quemadores **3** se colocan entre las filas de tubos, estando por consiguiente cada fila de tubos revestida por dos filas de quemadores; la dirección de las filas de tubos y también de las filas de quemadores es la dirección del eje X. Los gases de combustión, producidos por la combustión en los quemadores **3** de una mezcla de

combustible y aire, son extraídos a través de túneles de escape **4** instalados en la parte inferior del horno, paralelo a las filas. La dirección perpendicular a las filas se identifica como eje Y.

La Figura 2 presenta una vista superior del horno de combustión superior **1** que contiene 8 filas **5** de tubos con 50 tubos **2** y 9 filas **6a**, **6b** de quemadores, cada fila contiene 15 quemadores **3a**, respectivamente **3b**, paralelos a las filas de tubos. Los quemadores están organizados en 2 filas exteriores **6a** y 7 filas interiores **6b**; cada fila **6a** de quemadores **3a** (conocidos como quemadores exteriores) se extiende entre una de las dos paredes laterales **7** y una fila de tubos y cada fila interior **6b** de quemadores **3b** (conocidos como quemadores interiores) está rodeada por cada lado por una fila de tubos. Esta organización hace que los quemadores exteriores **3a**, que calientan los tubos de una fila, para funcionar normalmente a menor potencia que los quemadores interiores que calientan los tubos de dos filas. La Figura destaca, en gris, un dominio representativo **8** -en el sentido de la invención- compuesto por un subconjunto de 4 filas parciales de tubos con 17 tubos, calentados por 3 filas parciales de quemadores interiores y 1 fila parcial de semiquemadores internos (quemadores cortados por la mitad a lo largo del plano de simetría **S** paralelo al eje X y paralelo al plano **W** representante a la pared lateral). A lo largo de la dirección del eje Y, el dominio **8** también está limitado por 2 planos de simetría que son perpendiculares al plano de simetría **S**. Este dominio **8** se utiliza para la ilustración de la invención, para las simulaciones y también para las figuras en relación con las simulaciones.

La Figura 3a presenta las corrientes principales que ingresan a un quemador **3**, siendo transportada cada corriente por una tubería equipada con una válvula; es decir: la corriente comburente **9** fluye a través de la válvula **10**, la corriente de gas natural (combustible primario) **11** fluye a través de la válvula **12**, y la corriente de gas de escape (combustible secundario) **13** fluye a través de la válvula **14**. El horno está funcionando en modo estándar, las válvulas están completamente abiertas, los chorros fluyen sin restricciones.

Como se indicó anteriormente, la invención tiene como objetivo reducir la temperatura de los tubos más calientes; para conseguir este objetivo, la invención pretende reducir la potencia de algunos quemadores específicamente seleccionados reduciendo el caudal de preferiblemente una o más corrientes de combustible. Así se reduce la cantidad de calor transferido a los tubos impactados, lo que lleva a la disminución de sus temperaturas.

La Figura 3b presenta los flujos **9**, **11**, **13** entrando en el quemador que funciona según la invención. En un modo preferido de la invención, la potencia emitida por la corriente de gas de escape **13** -que en condiciones estándar es el principal contribuyente de combustible-, y de la corriente de gas natural **11** se reduce al regular la válvula **14** y respectivamente **12**. Esta reducción de la potencia del quemador proporcionada por la regulación de las válvulas de combustible inducirá en respuesta una disminución de la TST de los tubos cercanos de acuerdo con las reglas de comportamiento 1 a 3 mencionadas anteriormente. Tenga en cuenta que también se podría lograr una reducción en la potencia del quemador al regular solo una de las válvulas de combustible.

La Figura 4a ilustra, para un dominio representativo **8** -como se define en la Figura 2-, el impacto de regular un quemador exterior **3a** en la TST de los diferentes tubos. Las TST se obtienen utilizando un solucionador -conocido en sí- que calcula la transferencia de calor entre la cámara de combustión del horno y los tubos. En el caso presentado, el quemador fue regulado para obtener una relación de potencia del 50%.

La Figura 4b muestra el impacto de regular un quemador interior **3b** del mismo dominio en la TST de los diferentes tubos. Los TST se obtienen utilizando el mismo solucionador. La potencia del quemador interior regulado también se reduce para obtener una relación de potencia del 50 %.

En las dos Figuras 4a y 4b, para cada tubo en el dominio representativo, la variación de la TST (ΔTST , también denominada ΔT en las Figuras) se presenta con referencia a las temperaturas medidas sin regulación, es decir, en condiciones estándar; ΔTST varía de "0 °C" para los tubos que no se ven afectados por la regulación a "-13 °C" para el tubo más afectado. El ΔTST se representa mediante una escala de grises, que varía del blanco al negro, del color blanco para los tubos no impactados con $\Delta T = 0^\circ C$ al color negro para el tubo más impactado con $\Delta T = -13^\circ C$.

Por lo tanto, la Figura 4a y la Figura 4b ilustran la regla de comportamiento 1 mencionada anteriormente, que se puede resumir de la siguiente manera:

- regular un quemador impactará las dos filas de tubos más cercanas; el efecto sobre los tubos de las filas más alejadas con respecto al quemador regulado es insignificante; sin embargo, se debe tener en cuenta que para un tubo exterior, las dos filas más cercanas están del mismo lado, y para un tubo interior, están una a cada lado del quemador regulado;
- la regulación de un quemador exterior tiene un mayor impacto en su fila de tubos más cercana que un quemador interior;
- dentro de cada fila impactada, un quemador regulado tendrá el mayor impacto sobre los tubos más cercanos; el efecto en los tubos disminuye rápidamente al alejarse del quemador regulado; el número de tubos afectados por la regulación de un quemador se estima en $4 \times N_{\text{tubos}}/N_{\text{quemadores}}$ -redondeado a un

número entero- donde Ntubos es el número de tubos en la fila de tubos y Nquemadores es el número de quemadores en la fila de quemadores.

La Figura 5a muestra el impacto de regular simultáneamente dos quemadores, más precisamente, muestra el resultado de una sola simulación que tiene en cuenta el hecho de que dos quemadores están regulados: un quemador exterior **3a** y un quemador interior **3b**. Para ambos quemadores, la potencia del quemador se redujo en un 50 %.

La Figura 5b muestra la suma de los dos efectos calculados de la regulación individual de los mismos quemadores con las mismas relaciones de potencia.

La comparación de las Figuras 5a y 5b ilustra la regla de comportamiento 2 mencionada anteriormente: los quemadores que están regulados tienen un efecto acumulativo sobre la temperatura superficial del tubo. Esto significa que el impacto de un conjunto de quemadores regulados en una TST dada es simplemente la suma de las contribuciones individuales.

La Figura 6a y la Figura 6b muestran el impacto de diferentes relaciones de potencia para un quemador exterior **3a** en la TST de la mayoría de los tubos impactados. En la Figura 6a, la relación de potencia del quemador (cuadrado negro) es del 0 % (quemador cerrado). En la Figura 6b, la relación de potencia del quemador (también el cuadrado negro) es del 75 %, lo que significa que el quemador entrega el 75 % de su potencia nominal.

La variación de las temperaturas superficiales del tubo (denominada ΔT en las Figuras) se presenta en referencia a la temperatura medida sin regulación, variando de 0 °C para los tubos no impactados por la regulación a -23 °C para el tubo más impactado. La disminución de la temperatura TST para cada tubo se representa mediante una escala de grises, variando de blanco a negro, desde un ΔT de 0 °C que es de color blanco hasta un ΔT de -23 °C que es de color negro para el tubo más impactado en la Figura 6a. Las Figuras ilustran el hecho de que la disminución de la temperatura superficial del tubo es proporcional a la variación de la relación de potencia. Cuanto más cercana a cero es la relación de potencia, más disminuye la temperatura superficial del tubo TST.

La Figura 6c muestra la variación de TST en función de $r\%$ para el tubo más cercano a un quemador exterior regulado utilizando la información de las Figuras 4a, 6a y 6b. Los cuadrados negros ■ representan los tres casos en los que se redujo la relación de potencia ($r\%=0\%$, $r\%=25\%$ y $r\%=75\%$), mientras que el cuadrado vacío □ representa el caso en el que la potencia del quemador no cambia ($r\%=100\%$) y el "rombo ◇" es representativo de un caso en el que el quemador representado no está regulado mientras que, entretanto, un número significativo de otros quemadores en el horno están regulados, lo que lleva a la redistribución del flujo de combustible para los quemadores no regulados en el horno y por consiguiente al aumento de su potencia, dando lugar a una relación de potencia superior a 1. La Figura evidencia la regla de comportamiento 3 mencionada anteriormente: la variación de la temperatura superficial del tubo y la relación de potencia son proporcionales, como lo muestra la línea sólida para el tubo más cercano al quemador regulado.

Haciendo uso de la proporcionalidad (regla 3 de la invención) -regla válida en el área impactada alrededor del quemador- se puede recuperar la variación de la TST de cualquier tubo impactado por la regulación como ilustra la línea discontinua para un tubo más allá del quemador regulado.

Es debido a que los inventores han resaltado estas reglas que gobiernan la evolución de la TST de los tubos en el horno SMR en respuesta a la regulación del quemador - *es decir* la disminución rápida de la temperatura superficial del tubo con respecto a la distancia a los quemadores regulados- el impacto lineal de la relación de potencia en la temperatura superficial del tubo, efecto acumulativo de regular varios quemadores- que han podido desarrollar la metodología de la invención para determinar un mapa optimizado de regulación de quemadores.

Cuando el método de la invención se utiliza por primera vez en un reformador de vapor, o para adaptarse a diferentes condiciones de funcionamiento o para tener en cuenta cambios significativos, se puede calibrar el modelo físico simplificado. La etapa de calibración puede consistir en realizar mediciones de la temperatura de los tubos para uno o más tubos impactados por un quemador regulado, al menos para un tubo delante de dicho quemador en condiciones no reguladas y reguladas; el quemador es preferiblemente un quemador exterior, se puede realizar una medición adicional para el tubo impactado más lejano impactado por la regulación del quemador. La variación real de TST se obtiene comparando los dos valores en condiciones sin regulación y con regulación, lo que dará la pendiente de la una o más líneas en la Figura 6c.

Los datos de entrada de la etapa b) no se limitan a la temperatura superficial del tubo, también pueden ser la temperatura del colector de gas de síntesis; en este caso, la temperatura de los tubos se deduce de la temperatura del colector de gas de síntesis correspondiente. Normalmente, la deducción considera que los tubos de una fila están a la misma temperatura.

La metodología propuesta utiliza para el cálculo las siguientes herramientas:

- un algoritmo para la optimización,

- el modelo físico simplificado de acuerdo con la invención,
- uno o varios parámetros y su objetivo asociado de alcanzar lo que conducirá a una mejora del rendimiento del proceso - los parámetros y los objetivos relacionados son, por ejemplo: la dispersión de TST y su reducción, y/o la TST máxima y su reducción, y/ o el diferencial de temperatura del colector de gas de síntesis y su reducción. Estos parámetros son los preferidos en la actualidad debido a razones prácticas: buena representatividad del comportamiento del horno, datos de entrada fáciles de recopilar, sin embargo, la invención no se limita a esta elección de datos y parámetros de entrada, otros parámetros y objetivos pueden elegirse,
- una o más relaciones de potencia a aplicar

EJEMPLOS

La solución de la invención se ha puesto en práctica con éxito en el sitio en una planta de producción de hidrógeno con un horno reformador de metano con vapor de calor superior equipado con 400 tubos organizados en 8 filas de 50 tubos cada una y 135 quemadores que forman 9 filas de 15 quemadores cada una.

Gracias a la invención, al aplicar la metodología enseñada, fue posible determinar de forma automática y rápida uno o más mapas ventajosos de quemadores a regular con respecto al uno o más objetivos dados.

En primer lugar, se realizó un solo conjunto de mediciones de TST bajo estándar *es decir* condiciones no reguladas; las mediciones se realizaron con un pirómetro desde el primer nivel de mirilla del horno;

Se utilizó el modelo físico simplificado de la invención basado en las reglas de comportamiento 1 a 3 antes mencionadas para obtener un mapa adecuado de quemadores a regular,

Gracias a su rápido tiempo de ejecución computacional, la combinación del modelo físico simplificado de la invención y un algoritmo de optimización propio, permite obtener de forma automática y rápida -a partir de las mediciones iniciales de TST obtenidas en condiciones estándar- un mapa de quemadores a regular a fin de mejorar el proceso como se esperaba (es decir, alcanzar el objetivo según sea necesario).

La oportunidad de realización de un mapa de quemadores a regular al aplicar la solución de la invención permite comparar los rendimientos de varios mapas de quemadores obtenidos para diferentes relaciones de potencia y/o diferentes parámetros y su objetivo.

La obtención de los mapas de quemadores a regular presentados en la figura 7a para el Ejemplo 1 y en la Figura 8a para el Ejemplo 2 tomó aproximadamente 10 minutos, los dos experimentos se realizaron en el mismo horno de reformado, siendo las condiciones estándar idénticas.

Para la implementación de la metodología de regulación en el sitio, la reducción de la potencia del quemador se obtuvo mediante una reducción adecuada del caudal de gas de escape, gracias a una válvula en las corrientes de gas de escape.

Las metodologías detalladas aplicadas para los dos ejemplos se presentan a continuación en relación con la Figura 7a y la Figura 7b para el Ejemplo 1 y con la Figura 8a y la Figura 8b para el Ejemplo 2.

Ejemplo 1.

La Figura 7a muestra un mapa de quemadores a regular obtenido por el método de la invención. En este primer ejemplo, se eligieron dos relaciones de potencia: 80 % y 60 %.

Se eligieron los siguientes parámetros objetivo: disminución de la TST máxima (es decir, TST del tubo más caliente) y disminución de la dispersión de TST; un objetivo adicional era minimizar la cantidad de quemadores que se debían regular.

En el mapa de quemadores a regular presentado en la Figura, los quemadores que se han identificado como requiriendo una relación de potencia del 80 % se representan como rombos negros "+", los quemadores que se han identificado como requiriendo una relación de potencia del 60 % se representan como cuadrados negros "■", los quemadores sin restricción, es decir, con el flujo de combustible sin cambios (exceptuando una pequeña parte redistribuida) se representan como cuadrados vacíos "□".

La Figura 7a muestra que para alcanzar el objetivo, es decir, disminuir la TST máxima y disminuir la dispersión de TST mientras se minimiza la cantidad de quemadores a regular, 24 quemadores -identificados individualmente- requieren

ser regulados, 13 quemadores deben ser regulados a una relación de potencia del 80 % y 11 quemadores requieren ser regulados a una relación de potencia del 60 %.

La Figura 7b muestra los perfiles de TST resultantes del mismo ejemplo: el perfil de TST experimental medido en el modo de funcionamiento estándar de los quemadores está representado por la línea gris; el perfil TST medido después de la estabilización de la planta con todos los quemadores regulados de acuerdo con el mapa de la Figura 8a (mostrado como círculos negros "•"). La MOT (temperatura máxima de funcionamiento) se representa con una línea discontinua.

En condiciones estándar, como se muestra en la Figura 7b, algunos tubos tienen una TST superior a la MOT (representada con una línea discontinua a 949 °C). Están demasiado calientes y esto puede provocar un fallo en el tubo.

Gracias a la implementación del método de la invención, al regular los quemadores de acuerdo con el mapa que se muestra en la Figura 7a, todas las TST se mantuvieron por debajo del límite de la MOT y mientras tanto la dispersión de TST se redujo en 15 °C; esto se consideró como una solución suficientemente buena.

Ejemplo 2.

La Figura 8a muestra otro mapa de quemadores a regular obtenido por el método de la invención aplicado al mismo horno. En este ejemplo, se decidió:

- aplicar una relación de potencia única del 60 %, y
- elegir como parámetros objetivos: la disminución de la TST máxima y la reducción de la dispersión de la temperatura del colector de gas de síntesis. En la Figura, los quemadores que requieren una tasa de regulación del 60 % se representan como "cuadrados negros ■"; los quemadores no regulados, es decir, con el flujo de combustible sin cambios (exceptuando una pequeña parte redistribuida) se representan como "cuadrados vacíos □".

La Figura 8a muestra los 37 quemadores -identificados individualmente- que, al ser regulados, permiten alcanzar el objetivo.

La Figura 8b muestra los perfiles de TST de los tubos obtenidos al aplicar la solución de la Figura 8a: el perfil de temperatura del tubo experimental medido en el modo de funcionamiento estándar de los quemadores (como línea gris continua) y el perfil de temperatura de TST para el mapa de quemadores de la Figura 8a (como "círculos negros •"). La MOT (temperatura máxima de funcionamiento) se representa con una línea discontinua.

Como se evidencia en la Figura 8b, en condiciones estándar, la TST de varios tubos excedió la temperatura máxima de funcionamiento.

Gracias a la implementación del método de la invención, es posible, mediante la regulación de los quemadores de acuerdo con el mapa que se muestra en la Figura 8a, mantener la TST de todos los tubos por debajo de la MOT, entretanto, la dispersión de la temperatura del gas de síntesis en el colector disminuye (se muestra en la Figura 9). Esto se consideró para el funcionamiento de la planta como una solución suficientemente buena.

Finalmente, la Figura 9 presenta la evolución de la temperatura medida del colector de gas de síntesis al implementar los mapas de regulación de la Figura 7a y la Figura 8a en el sitio.

- al regular en el sitio los quemadores de acuerdo con el mapa de regulación de la Figura 8a (Ejemplo 1 con 24 quemadores regulados), la temperatura del colector de gas de síntesis se redujo en 15 °C;
- al implementar en el sitio el mapa de regulación con 37 quemadores regulados de la Figura 8a (Ejemplo 2), la temperatura del colector de gas de síntesis se redujo en 25 °C.

Gracias a la invención, el tiempo requerido para establecer un mapa de quemadores a regular es del orden de diez minutos, mucho más corto que el tiempo requerido por las soluciones conocidas anteriores; esto se debe a que el modelo físico simplificado, identificado y aplicado por los inventores reduce drásticamente la duración de la determinación del mapa de quemadores a regular.

- esto hace que la solución sea un método curativo fácil que permite mitigar la transferencia de calor no homogénea del calor entre los tubos de reformado;
- los quemadores se regulan fácilmente de acuerdo con el mapa de quemadores regulados; el operador ajusta manualmente la potencia de los quemadores de acuerdo con el mapa gracias a las válvulas

instaladas en la tubería o la información se transmite a un "control de planta" y los quemadores se regulan automáticamente de acuerdo con el mapa en una sola operación;

5

- se puede utilizar con frecuencia en el sitio para que los operadores tomen decisiones en el trabajo diario;
- permite establecer varios mapas del quemador a regular con diferente relación de potencia para elegir la solución más adecuada.

REIVINDICACIONES

1. Método de mejora de un proceso endotérmico que tiene lugar en un horno que contiene tubos (2) que se llenan con un catalizador para la conversión química de una alimentación gaseosa y se colocan verticalmente en filas (5) dentro del horno, alimentándose los quemadores (3) con al menos corrientes de combustible primaria (11) y secundaria (13) y corriente de comburente (9) y montándose en filas (6, 6a, 6b) con filas (6b) de quemadores interiores (3b) colocados entre dos filas de tubos y filas (6a) de quemadores exteriores (3a) colocados entre una fila de tubos y una pared lateral (7) paralela a las filas de tubos, con el calor transfiriéndose de los quemadores a los tubos y con caudales asociados, donde el método mejora la homogeneización de las temperaturas de los tubos regulando parte de los quemadores, **caracterizado por que** el método comprende las etapas de:

etapa a) calibrar opcionalmente el modelo físico simplificado de la etapa c3) midiendo una o más temperaturas reales del tubo para al menos un tubo impactado por la regulación de un quemador en estado estándar y en estado regulado, etapa b) adquirir información sobre una temperatura real de los tubos presentes en el horno con todos los quemadores presentes en el horno en condiciones estándar no reguladas,

etapa c) obtener un mapa de quemadores a regular que incluya:

c1) elegir al menos un parámetro representativo de los rendimientos del horno con un objetivo de mejora,

c2) elegir al menos una o más relaciones de potencia para la regulación del quemador,

c3) utilizar la información de la etapa b) y un modelo físico simplificado del impacto de regular un quemador sobre la temperatura superficial del tubo en el horno basándose en las siguientes reglas 1) a 3) de comportamiento:

1) regular un quemador impacta significativamente en las dos filas de tubos más cercanas, estando dichas dos filas de tubos más cercanas del mismo lado para un quemador exterior y una a cada lado del quemador para un quemador interior; la regulación de un quemador exterior tiene un mayor impacto en la fila de tubos más cercana que en la segunda fila, mientras que la regulación de un quemador interior distribuye el impacto en las filas de tubos más cercanas en ambos lados; dentro de cualquiera de las filas impactadas, la regulación de un quemador tiene el mayor impacto en los tubos más cercanos, el impacto en los tubos disminuye rápidamente mientras se alejan del quemador regulado, el número de tubos impactados por la regulación de un quemador se estima en $4 \times N_{\text{tubos}} / N_{\text{quemadores}}$, para los tubos impactados, la variación de la temperatura superficial del tubo es proporcional a la distancia desde el quemador regulado

con N_{tubos} = número de tubos en la fila, y $N_{\text{quemadores}}$ = número de quemadores en la fila;

2) se acumulan los impactos de los quemadores regulados en la temperatura del tubo;

3) las variaciones de temperatura de los tubos son proporcionales a la relación de potencia τ , con τ siendo:

$$\tau = \frac{P_{\text{no regulada}} + \Delta P}{P_{\text{no regulada}}}$$

donde $P_{\text{no regulada}}$ es la potencia del quemador en modo de funcionamiento estándar y ΔP es la variación de potencia inducida por la regulación con $\Delta P < 0$ cuando la potencia del quemador ha disminuido debido a la regulación del quemador y $\Delta P > 0$ cuando la potencia del quemador aumenta debido a la redistribución de la potencia entre los quemadores no regulados del horno,

para conocer individualmente el impacto de la regulación de un quemador en el objetivo elegido de la etapa c1), e identificar individualmente los quemadores a regular,

c4) obtener un mapa de quemadores del horno donde se identifican individualmente los quemadores a regular, etapa d) regular de los quemadores de acuerdo con el mapa obtenido en la etapa c4).

2. Método de acuerdo con la reivindicación 1 **caracterizado por que** el uno o más parámetros de la etapa c1) se elige entre los siguientes: Temperatura máxima superficial del tubo, Dispersión de la temperatura superficial del tubo, Dispersión de la temperatura del colector de gas de síntesis con el objetivo de mejora siendo la reducción del valor del parámetro.

3. Método de acuerdo con la reivindicación 1 o 2 **caracterizado por que** en la etapa c3), el modelo físico simplificado se combina con un algoritmo de optimización que es un algoritmo de optimización interno o algoritmos de optimización conocidos en la técnica, tales como los algoritmos de optimización de caja negra.

4. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores **caracterizado por que** la regulación de los quemadores se obtiene cerrando parcialmente al menos una válvula instalada en al menos una de las corrientes de combustible o corriente de comburente preferiblemente en las corrientes de combustible y más preferiblemente en la corriente de combustible secundario.

5. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores **caracterizado por que** la relación de potencia $\tau\%$ de un quemador regulado está entre el 90 % y el 50 %, preferiblemente entre el 80 % y el 60 %.

6. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores **caracterizado por que** la información sobre la temperatura real del tubo de la etapa b) es la temperatura superficial del tubo, que se obtiene preferiblemente por medio de un termopar o un pirómetro o una cámara infrarroja, o deduciéndose de la temperatura del colector de gas

de síntesis que es la temperatura del gas de síntesis recogida en el colector del gas de síntesis y obteniéndose preferiblemente por medio de un termopar.

5 7. Método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores **caracterizado por que** el método comprende la etapa de calibración a) donde se realizan mediciones reales de la temperatura del tubo para uno o más tubos impactados por un quemador regulado, al menos para un tubo frente a dicho quemador en condiciones no reguladas y reguladas, con el quemador siendo preferiblemente un quemador exterior.

10 8. Horno que contiene tubos de reformado que se llenan con un catalizador para la conversión química de una alimentación gaseosa y se colocan verticalmente en filas dentro del horno, montándose los quemadores en filas con filas de quemadores interiores colocados entre dos filas de tubos y filas de quemadores exteriores colocados entre una fila de tubos y una pared lateral paralela a las filas de tubos, con el calor transfiriéndose de los quemadores a los tubos y con caudales asociados **caracterizado por que** parte de los quemadores se regulan individualmente de acuerdo con el mapa obtenido por el método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7.

15

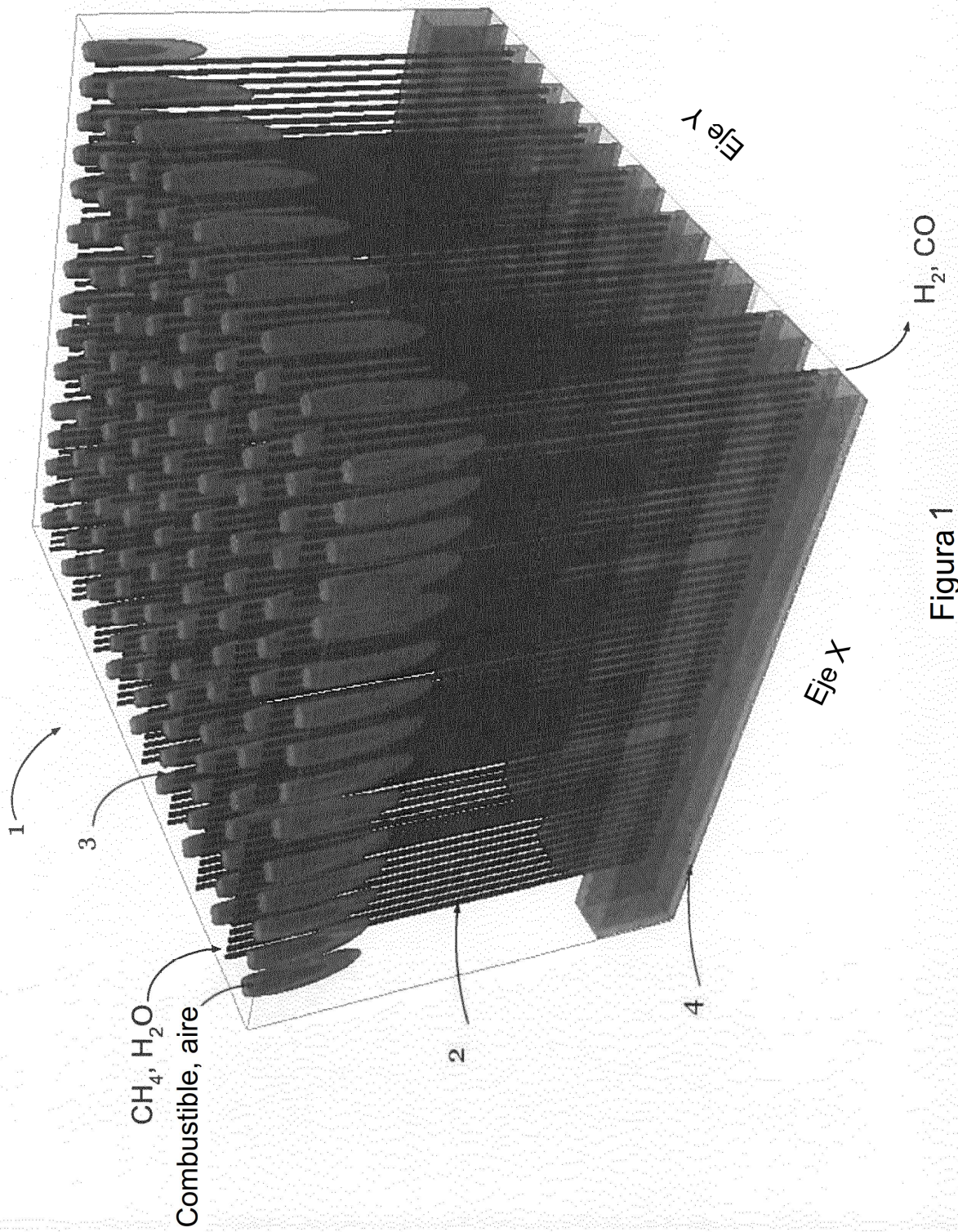


Figura 1

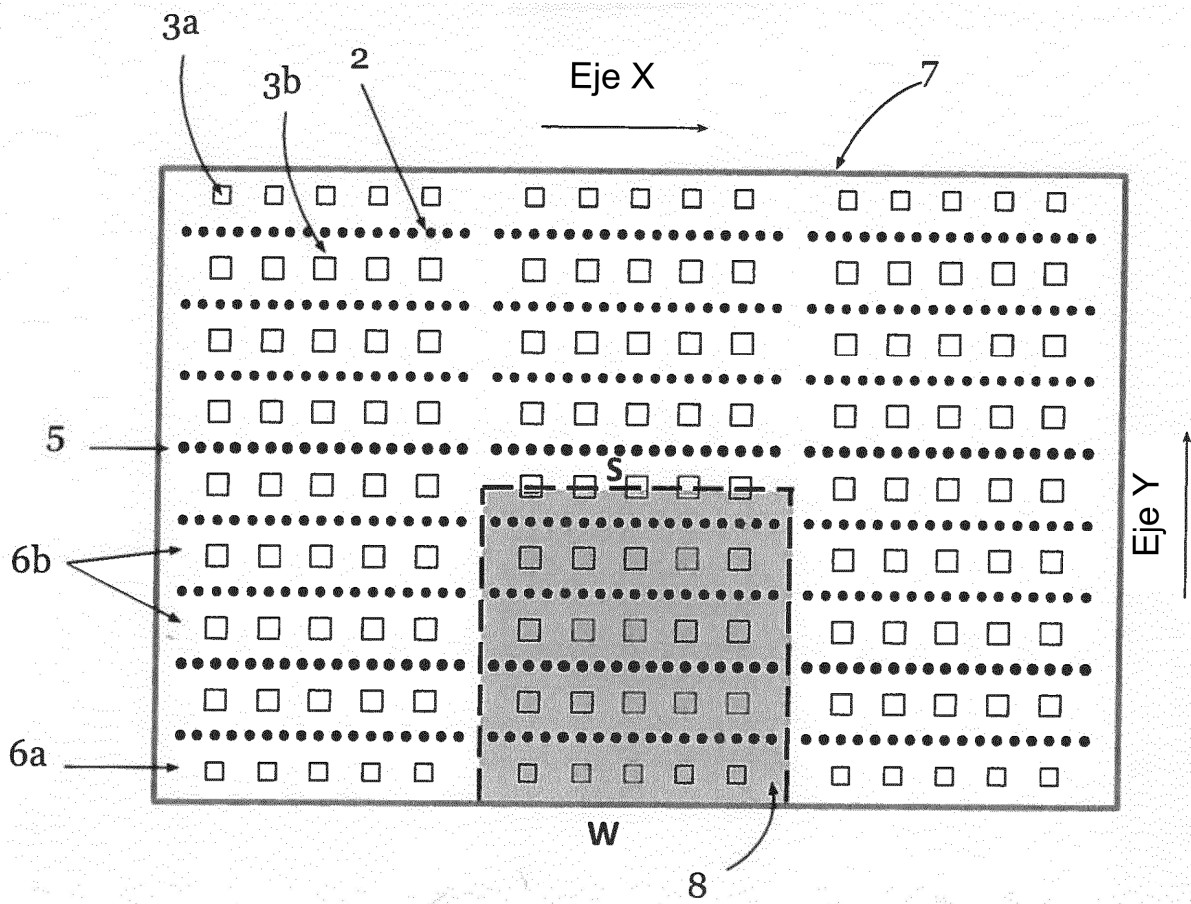


Figura 2

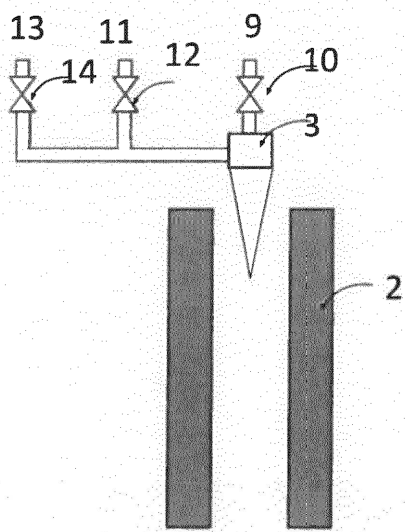


Figura 3a

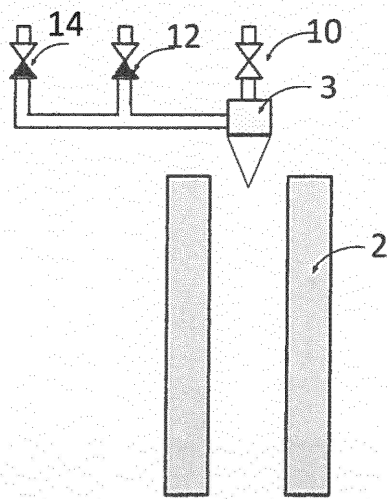
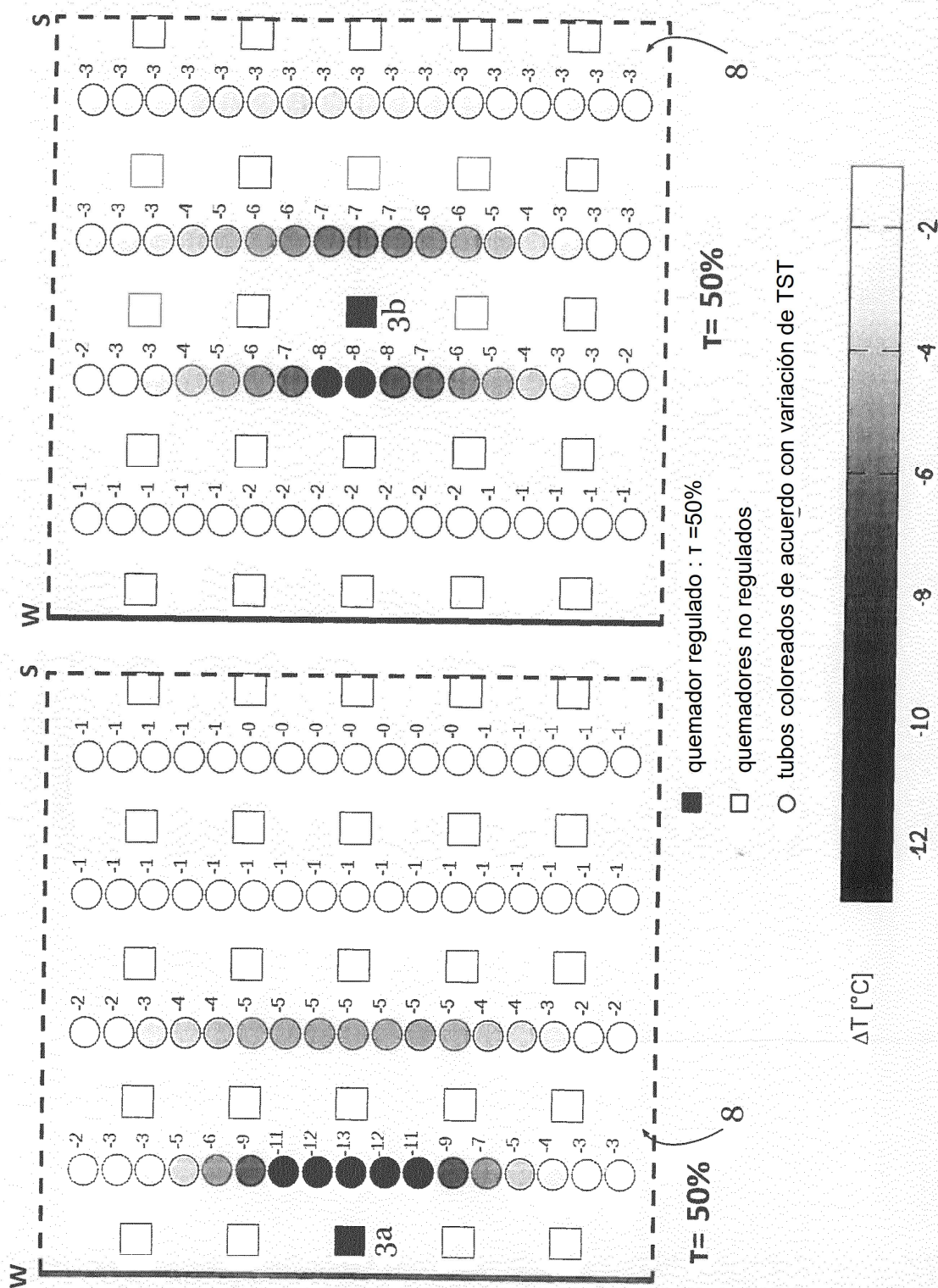


Figura 3b

Figura 4b



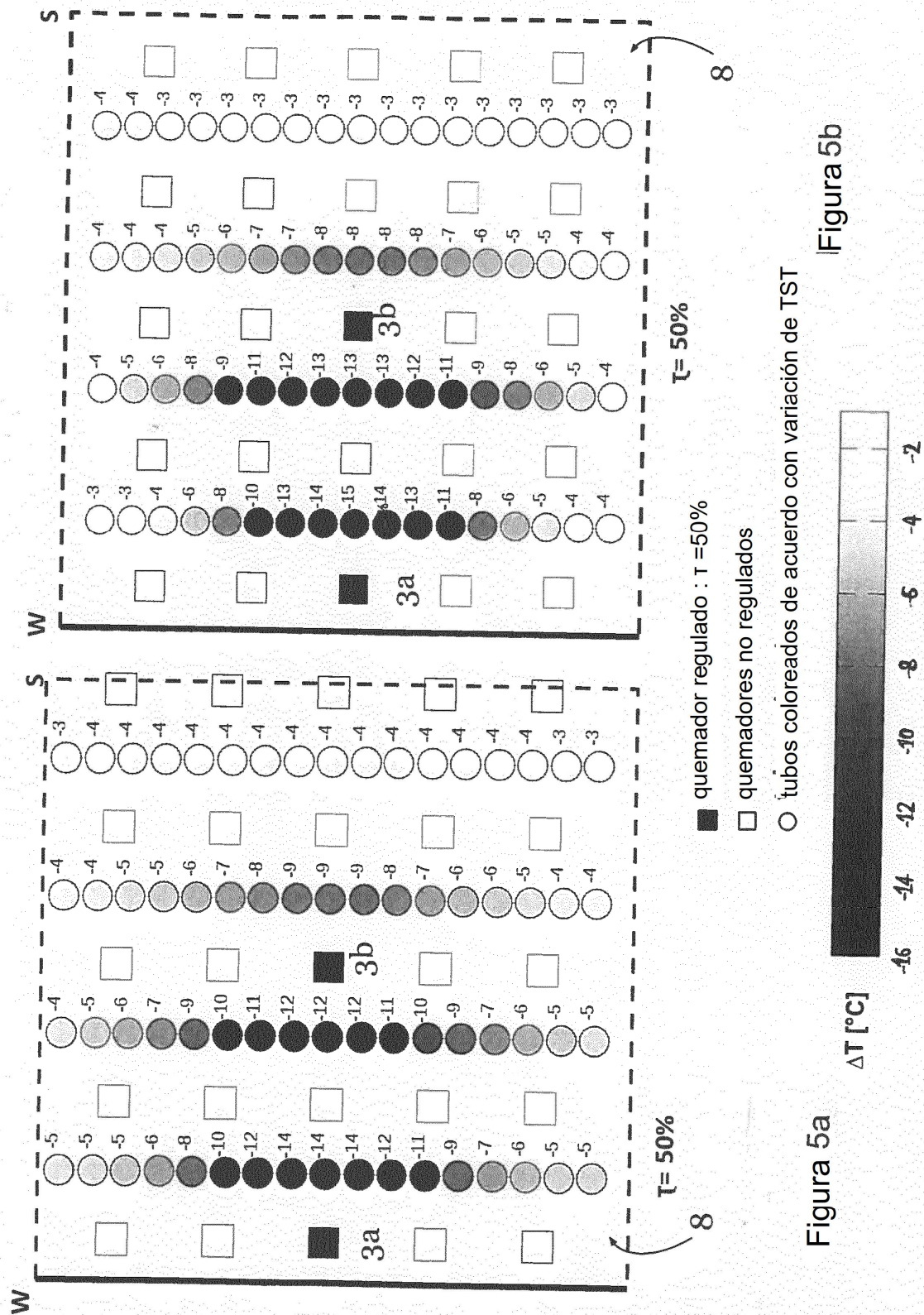
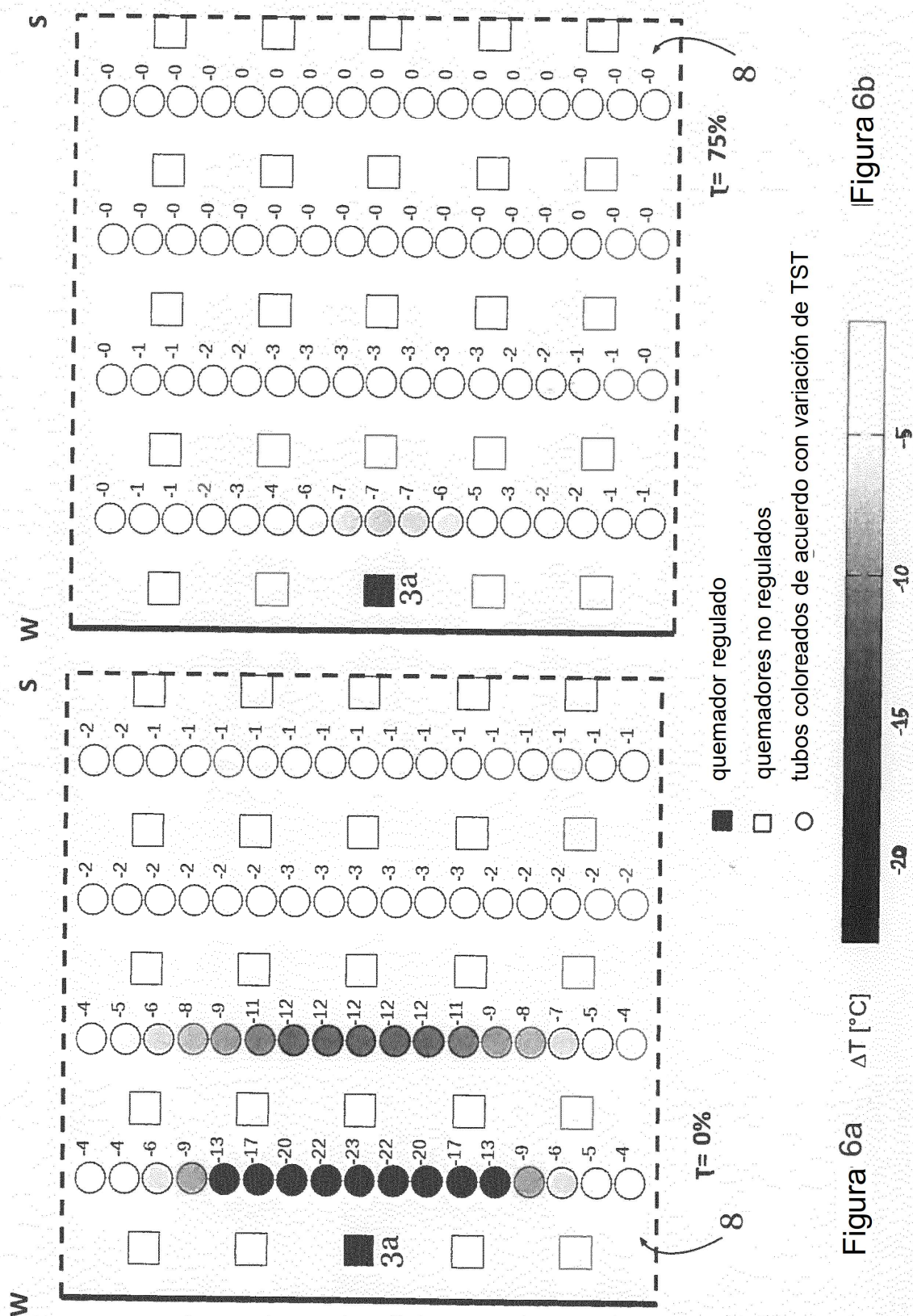


Figura 5a

Figura 5b



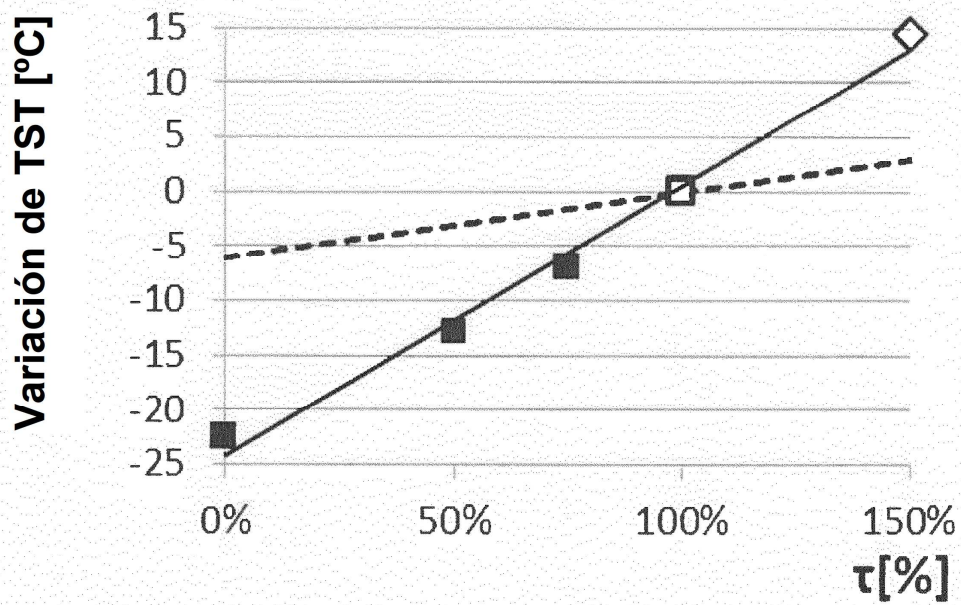


Figura 6c

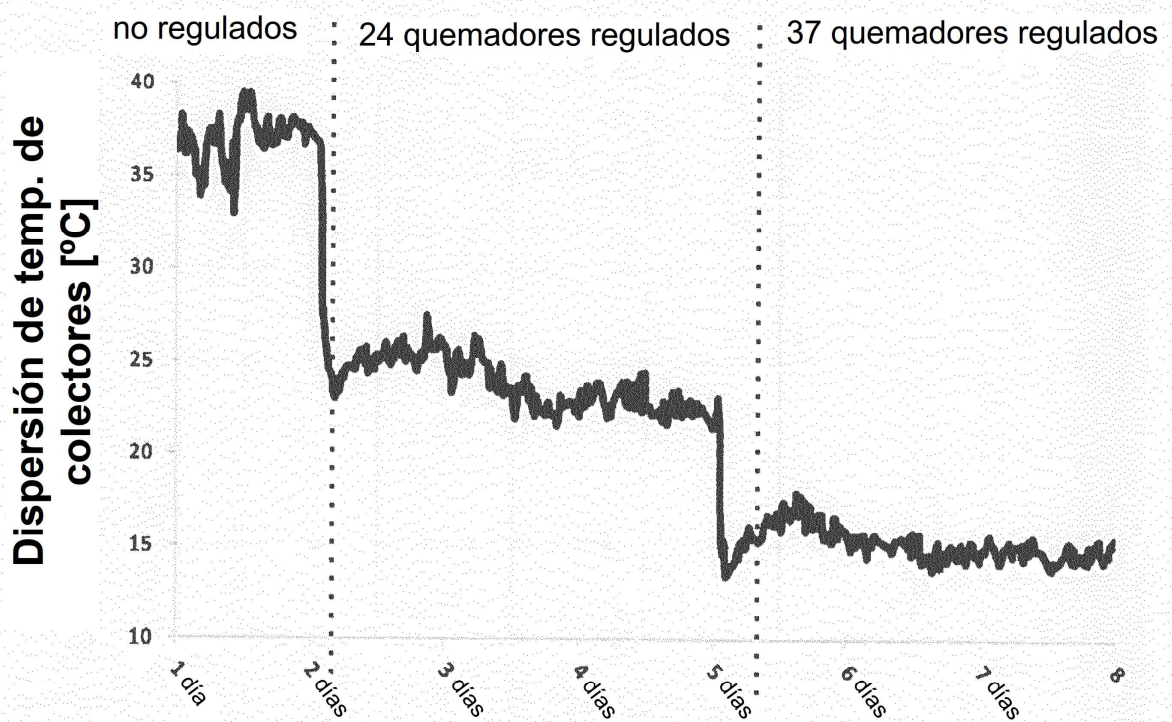


Figura 9

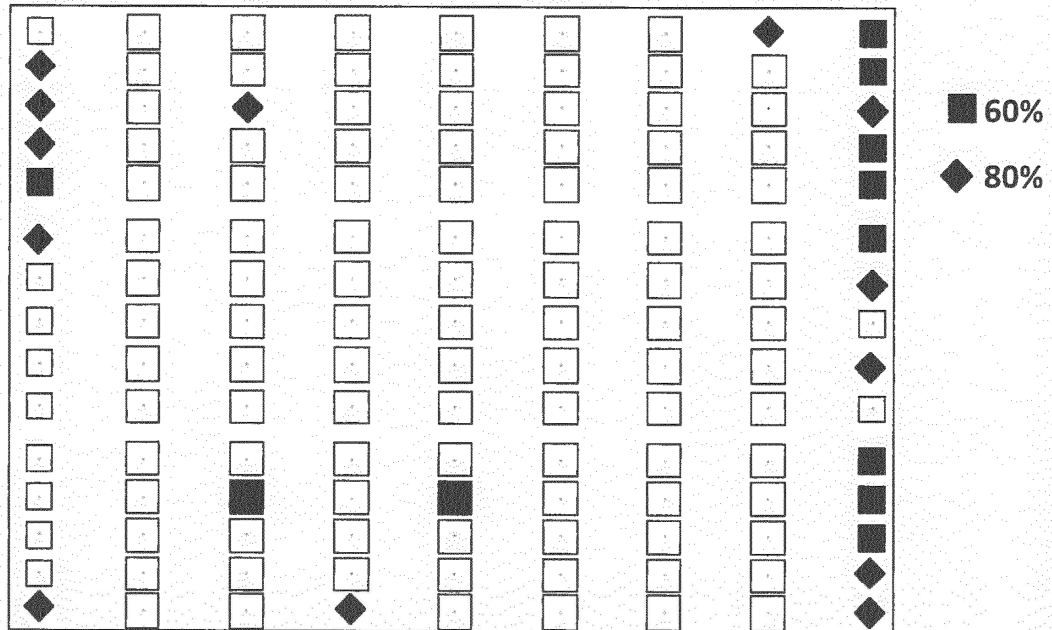


Figura 7a

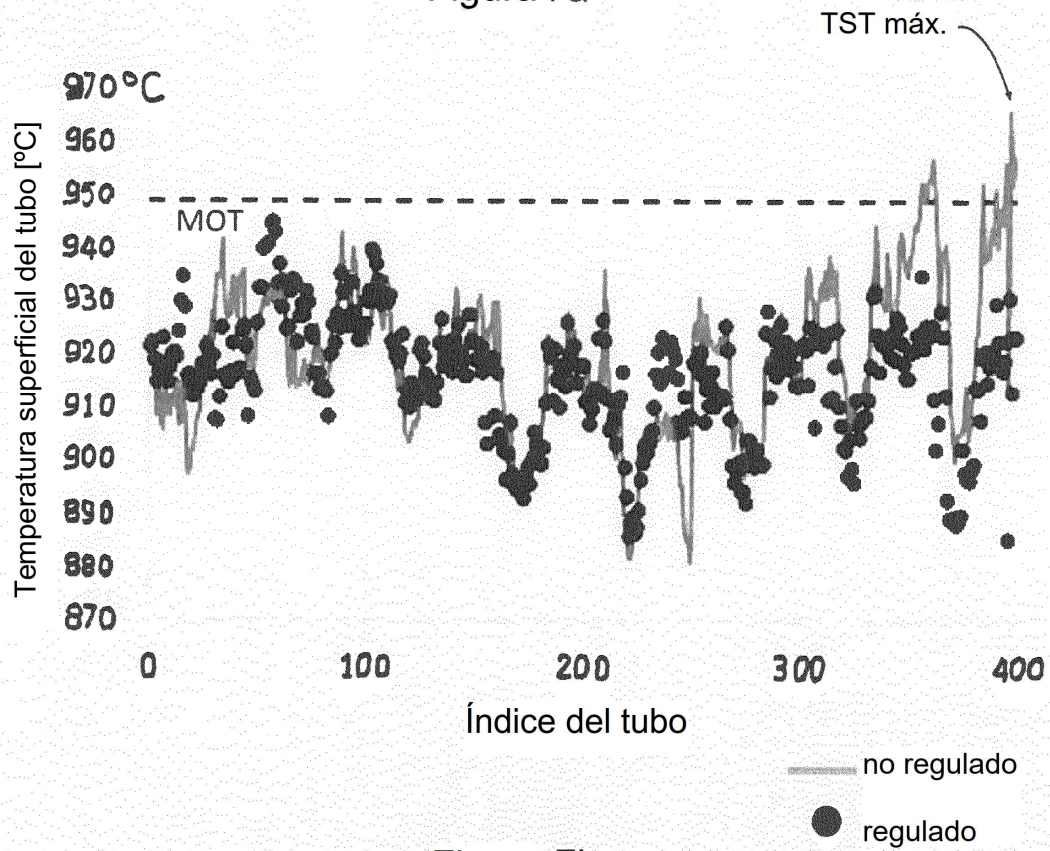


Figura 7b

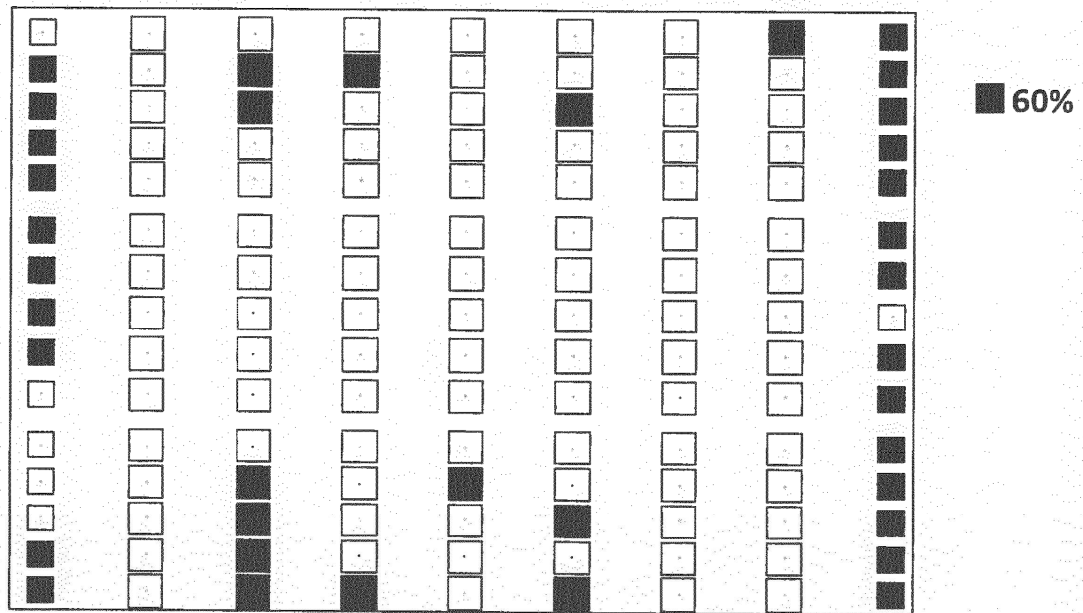


Figura 8a

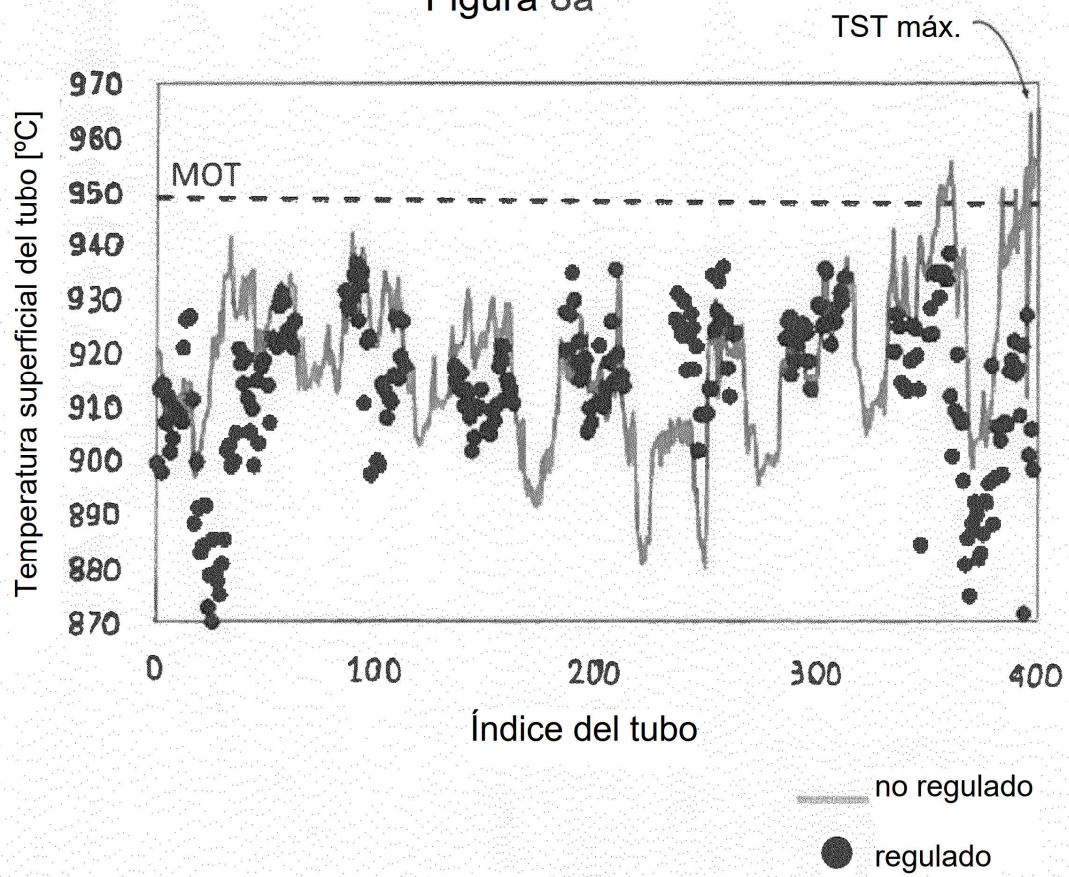


Figura 8b