

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 637 440**

51 Int. Cl.:

F23N 5/08 (2006.01)

F23N 1/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.11.2010** **E 10191958 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.06.2017** **EP 2325562**

54 Título: **Método de funcionamiento de un horno de reformador**

30 Prioridad:

19.11.2009 US 621807

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

13.10.2017

73 Titular/es:

**AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, INC. (100.0%)
7201 HAMILTON BOULEVARD
Allentown, PA 18195-1501, US**

72 Inventor/es:

**ESMAILI, ALI;
LICHT, WILLIAM ROBERT;
LI, XIANMING JIMMY y
SMITH IV, OLIVER J.**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 637 440 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 de funcionamiento de un horno de reformador

5 ANTECEDENTES

La presente descripción está dirigida al funcionamiento de un horno que tiene una pluralidad de quemadores y que contiene una pluralidad de tubos de proceso. En particular, la presente descripción está dirigida al funcionamiento de un horno, que tiene una pluralidad de quemadores y que contiene una pluralidad de tubos de proceso, con eficiencia mejorada.

10 Los reformadores de hidrocarburo con vapor (metano con vapor) son hornos que contienen numerosos tubos de proceso (que incluyen configuraciones con más de 400 tubos de reactor), en los que cada tubo contiene un catalizador (por ejemplo, un catalizador de reformado) para el transporte de un fluido de proceso (por ejemplo, vapor y un hidrocarburo). El horno, por ejemplo, puede incluir tubos de proceso que se extienden verticalmente situados en hileras paralelas con 30 a 60 tubos en cada hilera. La distancia entre dos hileras de tubos puede ser de 2 a 3 metros. Los tubos se pueden extender verticalmente 12 metros y pueden tener un diámetro exterior de 100 a 150 milímetros. Los tubos pueden estar situados en la hilera con una separación de centro a centro de 250 a 500 mm. De 10 a 20 quemadores pueden estar situados entre cada conjunto de dos hileras de tubos. Se puede incluir un total de ocho o más hileras de tubos y nueve o más hileras de quemadores en un horno.

20 En general, la eficiencia energética para los procesos industriales está adquiriendo mayor importancia. Para muchos procesos, tales como la producción de hidrógeno, la eficiencia del proceso está relacionada con la capacidad de monitorizar y regular determinadas temperaturas. La medición de las temperaturas de los tubos de reformador en un horno de reformador puede presentar varios retos. Por ejemplo, cuando se miden las temperaturas en lugares específicos en los tubos de reformador, la inconsistencia en la toma de las mediciones en el lugar específico del tubo de reformador puede dar lugar a mediciones con mayor incertidumbre. La monitorización más precisa de la temperatura en el lugar específico en el tubo de reformador puede permitir una eficiencia energética mejorada posibilitando que se utilicen datos más precisos para el control de proceso.

30 Las temperaturas de tubo de horno pueden variar a lo largo de la longitud. Los tubos se pueden calentar más en la dirección del flujo de proceso a medida que la corriente de proceso recoge calor del horno. Los tubos de proceso se pueden enfriar debido a la reacción endotérmica incluso cuando se añade calor desde el horno. Esta variación axial forma parte del proceso. Los métodos tradicionales de control de horno requieren una medida de temperatura. Esta puede ser una temperatura de pared de tubo, una temperatura de gas de proceso o una temperatura de gas de combustión (o alguna combinación). En los métodos tradicionales de control de horno, el flujo general de combustible (o, en algunos casos, oxidantes o materiales inertes) se ajusta para controlar la temperatura como se describe en la Publicación de Patente de EE. UU. 2007/0104641. También se pueden realizar ajustes para controlar el perfil de temperatura axial.

40 La temperatura de tubo también puede variar de un tubo a otro. Si hay variación axial, es necesario comparar los tubos en la misma posición axial para determinar la variabilidad de tubo a tubo. Puede haber beneficios de funcionamiento al reducir la variabilidad de tubo a tubo o al controlar la variabilidad. Los métodos aquí descritos están destinados a abordar la cuestión de la variabilidad de tubo a tubo o el balance de horno. Se realiza esto además de los métodos de control tradicionales que ajustan el flujo total de combustible (u otra corriente) para controlar la temperatura.

50 La regulación de las temperaturas en un horno que tiene tubos de proceso y una pluralidad de quemadores para calentar los tubos de proceso también puede presentar varios retos. La compleja interacción del calentamiento por llama desde la pluralidad de quemadores sumada a la incertidumbre de las mediciones de temperatura ha limitado hasta ahora el aumento de eficiencia.

Una manera de mejorar la eficiencia de un horno de reformador consiste en mantener una uniformidad de temperatura entre los tubos de proceso en una elevación predeterminada en el horno. De este modo, se puede necesitar la medición o la monitorización de la temperatura de cada uno de los tubos de proceso en un lugar o elevación predeterminados para obtener la mejora de eficiencia deseada. Además, los tubos de proceso de un horno pueden estar bajo presiones internas muy altas (por ejemplo, hasta 50 atmósferas) y a temperaturas muy altas (por ejemplo, hasta 950° C). De este modo, un ligero cambio de temperatura puede reducir la vida útil de un tubo de reactor. Por ejemplo, el funcionamiento a aproximadamente 10° C por encima de la temperatura de diseño para el tubo puede reducir la vida útil del tubo en tanto como la mitad. El coste de la reparación y/o la sustitución de los tubos puede ser alto debido a la utilización de aleaciones especiales en los tubos que son necesarias para permitir que los tubos sobrevivan a las condiciones de funcionamiento del horno. Como tales, los operarios de hornos también miden/monitorizan las temperaturas de tubo para evitar que se exceda la temperatura de diseño de tubo además de tratar de obtener mejoras en la eficiencia.

65 La industria desea hacer funcionar hornos que contienen tubos de proceso con una uniformidad de temperatura entre los tubos de proceso en una elevación predeterminada en el horno.

BREVE SUMARIO

La presente invención se refiere a un método de funcionamiento de un horno que tiene una pluralidad de quemadores, en el que cada uno de la pluralidad de quemadores tiene caudales asociados con los mismos, en donde el horno contiene una pluralidad de tubos de proceso. El método comprende:

- (a) seleccionar un criterio de temperatura objetivo para la pluralidad de tubos de proceso;
- (b) medir la primera información de temperatura que comprende datos para cada uno de la pluralidad de tubos de proceso en una primera condición de funcionamiento;
- (c) proporcionar una estimación de una función matemática que caracterice una relación entre los cambios de caudal de quemador para dos o más de la pluralidad de quemadores y los cambios de temperatura individuales para al menos una parte de la pluralidad de tubos de proceso;
- (d) calcular un primer conjunto de disolución de caudal objetivo que tiene disoluciones para los dos o más de la pluralidad de quemadores consistentes con el ajuste de las temperaturas de la pluralidad de tubos de proceso al criterio de temperatura objetivo para la pluralidad de tubos de proceso utilizando la estimación de la función matemática y la primera información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso; y
- (e) ajustar una primera válvula situada más arriba de al menos uno de los dos o más de la pluralidad de quemadores para cambiar al menos uno de los caudales de los dos o más de la pluralidad de quemadores de acuerdo con el primer conjunto de disolución de caudal objetivo en el que la primera válvula no está situada más arriba de todos los quemadores del horno.

La estimación de la función matemática se puede representar como

$$\underline{\Delta T} = \underline{G} \underline{\Delta u}$$

donde $\underline{\Delta T}$ representa los cambios de temperatura individuales para la al menos una parte de la pluralidad de tubos de proceso, $\underline{\Delta u}$ representa los cambios de caudal de quemador para los dos o más de la pluralidad de quemadores y \underline{G} es una matriz de ganancia.

En el método, la primera información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso se puede medir:

- capturando una primera pluralidad de imágenes de una zona interior del horno, donde al menos algunas imágenes de la primera pluralidad de imágenes están asociadas con diferentes partes de la zona interior del horno, en las que cada imagen de la primera pluralidad de imágenes comprende unos primeros datos de píxeles asociados con una parte respectiva de la pluralidad de tubos de proceso; y
- procesando una parte de los primeros datos de píxeles para obtener la primera información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso.

El método puede comprender además:

- medir la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso en una segunda condición de funcionamiento diferente de la primera condición de funcionamiento; y
- en el que la estimación de la función matemática proporcionada en la etapa (c) se calcula utilizando la primera información de temperatura y la segunda información de temperatura.

La segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso se puede medir:

- capturando una segunda pluralidad de imágenes de la zona interior del horno de reformador, donde al menos algunas imágenes de la segunda pluralidad de imágenes están asociadas con diferentes partes de la zona interior del horno de reformador, en las que cada imagen de la segunda pluralidad de imágenes comprende unos segundos datos de píxeles asociados con una parte respectiva de la pluralidad de tubos de proceso; y
- procesando una parte de los segundos datos de píxeles para obtener la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso.

La primera información de temperatura puede incluir valores de incertidumbre y la segunda información de temperatura puede incluir valores de incertidumbre; y la estimación de la función matemática y/o la estimación actualizada de la función matemática se pueden calcular por medio de la utilización de los valores de incertidumbre de la primera información de temperatura y los valores de incertidumbre de la segunda información de temperatura.

El método puede comprender además:

- medir la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso en una segunda

condición de funcionamiento diferente de la primera condición de funcionamiento y posterior a la primera condición de funcionamiento;

calcular un segundo conjunto de disolución de caudal objetivo que tiene disoluciones para los dos o más de la pluralidad de quemadores consistentes con el ajuste de las temperaturas de la pluralidad de tubos de proceso al criterio de temperatura objetivo utilizando la estimación o una estimación actualizada de la función matemática y utilizando la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso; y ajustar la primera válvula o una segunda válvula situada más arriba de al menos uno de los dos o más de la pluralidad de quemadores para cambiar al menos uno de los caudales de los dos o más de la pluralidad de quemadores de acuerdo con el segundo conjunto de disolución de caudal objetivo en los que la segunda válvula no está situada más arriba de todos los quemadores del horno.

La segunda condición de funcionamiento puede resultar de la realización de la etapa (e).

El método puede comprender además:

actualizar la estimación de la función matemática a partir de la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso, formando de esta manera la estimación actualizada de la función matemática; y la etapa de cálculo del segundo conjunto de disolución de caudal objetivo puede utilizar entonces la estimación actualizada de la función matemática.

La estimación de la función matemática puede comprender valores calculados a partir de elementos funcionales en la que cada uno de los elementos funcionales comprende una forma funcional que comprende un primer parámetro funcional, un segundo parámetro funcional y un parámetro geométrico que caracteriza las distancias entre cada uno de la pluralidad de tubos de proceso y cada uno de la pluralidad de quemadores; en la que el primer parámetro funcional de un primer elemento funcional de los elementos funcionales tiene el mismo valor que el primer parámetro funcional de un segundo elemento funcional de los elementos funcionales; y en la que el segundo parámetro funcional de un primer elemento funcional de los elementos funcionales tiene el mismo valor que el segundo parámetro funcional de un segundo elemento funcional de los elementos funcionales.

El primer parámetro funcional puede tener un valor que es el mismo para cada uno de los elementos funcionales y el segundo parámetro funcional puede tener un valor que es el mismo para cada uno de los elementos funcionales.

La pluralidad de quemadores puede comprender dos o más hileras de quemadores y la primera válvula puede estar situada más arriba de una primera hilera de quemadores. El método puede entonces comprender además:

medir una segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso en una segunda condición de funcionamiento diferente de la primera condición de funcionamiento y posterior a la primera condición de funcionamiento; calcular un segundo conjunto de disolución de caudal objetivo que tiene disoluciones para los dos o más de la pluralidad de quemadores consistentes con el ajuste de las temperaturas de la pluralidad de tubos de proceso al criterio de temperatura objetivo utilizando la estimación o una estimación actualizada de la función matemática y utilizando la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso; y ajustar una segunda válvula situada más arriba de un único quemador de los dos o más de la pluralidad de quemadores para cambiar al menos uno de los caudales del único quemador de acuerdo con el segundo conjunto de disolución de caudal objetivo en el que la segunda válvula no está situada más arriba de ningún quemador aparte del único quemador.

La primera válvula puede estar situada más arriba de un primer quemador suelto de los dos o más de la pluralidad de quemadores. El método puede entonces comprender además:

medir la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso en una segunda condición de funcionamiento en la que la segunda condición de funcionamiento resulta de la etapa (e); ajustar una segunda válvula de acuerdo con el primer conjunto de disolución de caudal objetivo en el que la segunda válvula está situada más arriba de un solo segundo quemador de los dos o más de la pluralidad de quemadores; medir la tercera información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso en una tercera condición de funcionamiento en la que la tercera condición de funcionamiento resulta del ajuste de la segunda válvula de acuerdo con el primer conjunto de disolución de caudal objetivo; actualizar la estimación de la función matemática a partir de la segunda información de temperatura y la tercera información de temperatura, formando de esta manera la estimación actualizada de la función matemática; calcular un segundo conjunto de disolución de caudal objetivo que tiene disoluciones para los dos o más de la pluralidad de quemadores consistentes con el ajuste de las temperaturas de la pluralidad de tubos de proceso al criterio de temperatura objetivo utilizando la estimación actualizada de la función matemática; y ajustar al menos una de la primera válvula, la segunda válvula o una tercera válvula situada más arriba de los

dos o más de la pluralidad de quemadores para cambiar al menos uno de los caudales de los dos o más de la pluralidad de quemadores de acuerdo con el segundo conjunto de disolución de caudal objetivo en el que la tercera válvula no está situada más arriba de todos los quemadores en el horno.

5 Los aspectos de la invención incluyen, por consiguiente, lo que sigue:

#1. Un método de funcionamiento de un horno que tiene una pluralidad de quemadores, en el que cada uno de la pluralidad de quemadores tiene caudales asociados con los mismos, en el que el horno contiene una pluralidad de tubos de proceso, en el que el método comprende:

10 (a) seleccionar el criterio de temperatura objetivo para la pluralidad de tubos de proceso;
(b) medir la primera información de temperatura que comprende los datos para cada uno de la pluralidad de tubos de proceso en una primera condición de funcionamiento en la que la primera información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso se mide:

15 capturando una primera pluralidad de imágenes de una zona interior del horno, en las que al menos algunas imágenes de la primera pluralidad de imágenes están asociadas con diferentes partes de la zona interior del horno, en las que cada imagen de la primera pluralidad de imágenes comprende los primeros datos de píxeles asociados con una parte de la pluralidad de tubos de proceso; y
20 procesando una parte de los primeros datos de píxeles para obtener la primera información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso;

(c) proporcionar una estimación de una función matemática que caracteriza una relación entre los cambios de caudal de quemador para dos o más de la pluralidad de quemadores y los cambios de temperatura individuales para al menos una parte de la pluralidad de tubos de proceso;

25 (d) calcular un primer conjunto de disolución de caudal objetivo que tiene disoluciones para los dos o más de la pluralidad de quemadores consistentes con el ajuste de las temperaturas de la pluralidad de tubos de proceso al criterio de temperatura objetivo para la pluralidad de tubos de proceso utilizando la estimación de la función matemática y la primera información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso; y

30 (e) ajustar una primera válvula situada más arriba de al menos uno de los dos o más de la pluralidad de quemadores para cambiar al menos uno de los caudales de los dos o más de la pluralidad de quemadores de acuerdo con el primer conjunto de disolución de caudal objetivo en el que la primera válvula no está situada más arriba de todos los quemadores del horno.

35 #2. Un método según #1 que comprende además:

medir la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso en una segunda condición de funcionamiento diferente de la primera condición de funcionamiento; y
40 en el que la estimación de la función matemática proporcionada en la etapa (c) se calcula utilizando la primera información de temperatura y la segunda información de temperatura.

#3. Un método según #2 en el que la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso se mide:

45 capturando una segunda pluralidad de imágenes de la zona interior del horno, donde al menos algunas imágenes de la segunda pluralidad de imágenes están asociadas con diferentes partes de la zona interior del horno,
en el que cada imagen de la segunda pluralidad de imágenes comprende los segundos datos de píxeles asociados con una parte de la pluralidad de tubos de proceso; y
50 procesando una parte de los segundos datos de píxeles para obtener la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso.

#4. Un método según #3 en el que la primera información de temperatura incluye valores de incertidumbre y la segunda información de temperatura incluye valores de incertidumbre; y
55 en el que la estimación de la función matemática y/o la estimación actualizada de la función matemática se calculan utilizando los valores de incertidumbre de la primera información de temperatura y los valores de incertidumbre de la segunda información de temperatura.

60 #5. Un método según #1 que comprende además:

medir la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso en una segunda condición de funcionamiento diferente de la primera condición de funcionamiento y posterior a la primera condición de funcionamiento;
65 calcular un segundo conjunto de disolución de caudal objetivo que tiene disoluciones para los dos o más de la pluralidad de quemadores consistentes con el ajuste de las temperaturas de la pluralidad de tubos de proceso al criterio de temperatura objetivo utilizando la estimación o una estimación actualizada de la función

matemática y utilizando la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso; y ajustar la primera válvula o una segunda válvula situada más arriba de al menos uno de los dos o más de la pluralidad de quemadores para cambiar al menos uno de los caudales de los dos o más de la pluralidad de quemadores de acuerdo con el segundo conjunto de disolución de caudal objetivo en el que la segunda válvula no está situada más arriba de todos los quemadores del horno.

#6. Un método según #5 en el que la segunda condición de funcionamiento resulta de la etapa (e).

#7. Un método según #5 que comprende además:

actualizar la estimación de la función matemática a partir de la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso, formando de esta manera la estimación actualizada de la función matemática; y en el que la etapa de cálculo del segundo conjunto de disolución de caudal objetivo utiliza la estimación actualizada de la función matemática.

#8. Un método según #1 en el que la estimación de la función matemática comprende los valores calculados a partir de los elementos funcionales en la que cada uno de los elementos funcionales comprende una forma funcional que comprende un primer parámetro funcional, un segundo parámetro funcional y un parámetro geométrico que caracteriza las distancias entre cada uno de la pluralidad de tubos de proceso y cada uno de la pluralidad de quemadores;

en el que el primer parámetro funcional de un primer elemento funcional de los elementos funcionales tiene el mismo valor que el primer parámetro funcional de un segundo elemento funcional de los elementos funcionales; y

en el que el segundo parámetro funcional de un primer elemento funcional de los elementos funcionales tiene el mismo valor que el segundo parámetro funcional de un segundo elemento funcional de los elementos funcionales.

#9. Un método según #8 en el que el primer parámetro funcional tiene un valor que es el mismo para cada uno de los elementos funcionales y en el que el segundo parámetro funcional tiene un valor que es el mismo para cada uno de los elementos funcionales.

#10. Un método según #1 en el que la pluralidad de quemadores comprende dos o más hileras de quemadores y en el que la primera válvula está situada más arriba de una primera hilera de quemadores, en el que el método comprende además:

medir la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso en una segunda condición de funcionamiento diferente de la primera condición de funcionamiento y posterior a la primera condición de funcionamiento;

calcular un segundo conjunto de disolución de caudal objetivo que tiene disoluciones para los dos o más de la pluralidad de quemadores consistentes con el ajuste de las temperaturas de la pluralidad de tubos de proceso al criterio de temperatura objetivo utilizando la estimación o una estimación actualizada de la función matemática y utilizando la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso; y ajustar una segunda válvula situada más arriba de un único quemador de los dos o más de la pluralidad de quemadores para cambiar al menos uno de los caudales del único quemador de acuerdo con el segundo conjunto de disolución de caudal objetivo en el que la segunda válvula no está situada más arriba de ningún quemador aparte del único quemador.

#11. Un método según #1 en el que la primera válvula está situada más arriba de un solo primer quemador de los dos o más de la pluralidad de quemadores, en el que el método comprende además:

medir la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso en una segunda condición de funcionamiento en la que la segunda condición de funcionamiento resulta de la etapa (e); ajustar una segunda válvula de acuerdo con el primer conjunto de disolución de caudal objetivo en la que la segunda válvula está situada más arriba de un solo segundo quemador de los dos o más de la pluralidad de quemadores;

medir la tercera información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso en una tercera condición de funcionamiento en la que la tercera condición de funcionamiento resulta del ajuste de la segunda válvula de acuerdo con el primer conjunto de disolución de caudal objetivo;

actualizar la estimación de la función matemática a partir de la segunda información de temperatura y la tercera información de temperatura formando de esta manera la estimación actualizada de la función matemática;

calcular un segundo conjunto de disolución de caudal objetivo que tiene disoluciones para los dos o más de la pluralidad de quemadores consistentes con el ajuste de las temperaturas de la pluralidad de tubos de proceso al criterio de temperatura objetivo utilizando la estimación actualizada de la función matemática; y

ajustar al menos una de la primera válvula, la segunda válvula o una tercera válvula situada más arriba de los dos o más de la pluralidad de quemadores para cambiar al menos uno de los caudales de los dos o más de la pluralidad de quemadores de acuerdo con el segundo conjunto de disolución de caudal objetivo en el que la

tercera válvula no está situada más arriba de todos los quemadores en el horno.

#12. Un método según #1 en el que la estimación de la función matemática se representa como

$$\underline{\Delta T} = \underline{G} \underline{\Delta u}$$

5 donde $\underline{\Delta T}$ representa los cambios de temperatura individuales para la al menos una parte de la pluralidad de tubos de proceso, $\underline{\Delta u}$ representa los cambios de caudal de quemador para los dos o más de la pluralidad de quemadores y \underline{G} es una matriz de ganancia.

10 BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS DIVERSAS VISTAS DE LOS DIBUJOS

La Figura 1 muestra una vista en sección transversal de un horno.

La Figura 2 muestra una representación de los campos de visión de una cámara utilizada para adquirir datos de imagen del horno.

15 La Figura 3 muestra un gráfico de contorno ejemplar de las diferencias de temperatura para una elevación predeterminada de un horno.

La Figura 4 es un gráfico de una función de ejemplo.

Siempre que sea posible, se utilizarán los mismos números de referencia en todos los dibujos para representar las mismas partes.

20 DESCRIPCIÓN DETALLADA

La presente invención se describirá de forma más completa en lo sucesivo con referencia a los dibujos adjuntos, en los que se muestra una realización ejemplar de la descripción. Esta descripción, sin embargo, se puede materializar en muchas formas diferentes y no se debería interpretar como limitada a las realizaciones expuestas en la presente memoria.

25 Los artículos "un" y "una" tal como se utilizan en la presente memoria significan uno o más cuando se aplican a una característica cualquiera en las realizaciones de la presente invención descritas en la memoria descriptiva y las reivindicaciones. El uso de "un" y "una" no limita el significado a una única característica a no ser que tal límite se indique específicamente. Los artículos "el", "la", "los" y "las" que preceden a nombres o sintagmas nominales singulares o plurales denotan una característica especificada particular o unas características especificadas particulares y pueden tener una connotación singular o plural dependiendo del contexto en el que se utilicen. Los adjetivos "cualquier" y "cualquiera" significan uno, algunos, o todos indistintamente de cualquier cantidad.

35 Tal como se utiliza en la presente memoria, "pluralidad" significa "al menos dos".

La presente invención se refiere a un método de funcionamiento de un horno en el que el horno tiene una pluralidad de quemadores y contiene una pluralidad de tubos de proceso. El horno puede tener al menos 10 quemadores, típicamente entre 20 y 500 quemadores. Los quemadores están dispuestos típicamente en hileras. El horno puede 40 contener al menos 20 tubos de proceso, típicamente entre 40 y 1000 tubos de proceso. Los tubos de proceso están dispuestos típicamente en hileras. Las temperaturas en el horno, especialmente las temperaturas de tubo de reactor, se regulan mediante el ajuste de los caudales de combustible y/o oxidante a través de los quemadores.

45 El presente método proporciona un enfoque sistemático y cuantitativo para determinar cómo ajustar los caudales de quemador para dar como resultado las temperaturas de pared de tubo deseadas, por ejemplo, para minimizar la desviación de temperatura entre las temperaturas de pared de tubo en una elevación predeterminada en el horno.

50 La Figura 1 muestra una representación en sección transversal de un horno 102 con una pluralidad de tubos de proceso 104 situados dentro de una zona interior 106 del horno 102. El horno 102 puede ser un reformador de metano con vapor, un reformador de metanol, un craqueador de etileno, un horno de recalentamiento de reformador al platino, una recámara de calor radiante, u otro tipo similar de horno, reformador o cámara. Los tubos de proceso pueden contener un catalizador, por ejemplo, un catalizador de reformado. El catalizador puede ser de cualquier forma conocida en la técnica, por ejemplo, gránulos y un relleno estructurado. Los tubos de proceso 104 pueden estar situados en una pluralidad de hileras 112 separados por los quemadores 108. Los tubos de proceso 104 se 55 pueden extender ya sea verticalmente u horizontalmente en el horno 102. Una pluralidad de quemadores 108 pueden estar dispuestos en hileras y ser utilizados para elevar la temperatura de la zona interior 106 del horno 102 a una temperatura deseada para lograr el proceso o actividad que se va a llevar a cabo en el interior del horno 102. Las hileras de los tubos 104 y las hileras de los quemadores 108 pueden ser sustancialmente paralelas. A lo largo del perímetro del horno 102 están los puertos de visualización 110 que permiten que los tubos 104, los quemadores 108 y cualquier otra estructura o característica del interior del horno 102 se visualicen y/o analicen desde un punto exterior al horno 102. Los pares de puertos de visualización 110 pueden estar situados en el perímetro del horno 102 en extremos opuestos de una hilera de quemadores 108.

Los caudales de gas oxidante y los caudales de combustible están asociados con cada uno de la pluralidad de quemadores. Se puede utilizar cualquier combustible o combinación de combustibles que se conozca, por ejemplo, gas natural o una corriente de subproducto que contenga metano y monóxido de carbono de un aparato de adsorción por oscilación de presión utilizado para separar el hidrógeno de un efluente de reformador. Los gases oxidantes incluyen aire, oxígeno de calidad industrial, aire enriquecido en oxígeno, y aire empobrecido en oxígeno tal como gas de escape de turbina de gas.

Este método comprende la selección del criterio de temperatura objetivo (a veces denominado en la técnica como un objetivo de optimización) para la pluralidad de tubos de proceso. Esto significa que es necesario especificar (matemáticamente) cuáles constituyen las temperaturas más preferidas para la pluralidad de tubos de proceso. Este objetivo se aplica a la variabilidad de tubo a tubo (el balance del horno) no a lo largo de la longitud de tubo o alrededor del diámetro de tubo. Las temperaturas más preferidas son una idealización que no se puede hacer realidad de forma exacta. Así que el criterio de temperatura objetivo es una expresión matemática de cuáles de las variaciones de temperatura prácticas son las más preferidas. La pluralidad de tubos de proceso considerados en el método no necesita incluir todos los tubos de proceso del horno.

Puede ser preferible que no haya variabilidad entre las temperaturas de tubo. Esto equivale a decir que la temperatura medida de cada tubo es igual a la temperatura media de todos los tubos. El control de horno tradicional permite que la temperatura media se ajuste hacia arriba o hacia abajo para coincidir con un objetivo de temperatura fijado y este control tradicional se puede superponer por encima del balance del horno, pero no constituye la base para el criterio de temperatura objetivo.

El criterio de temperatura objetivo se formula en base a una medida de variabilidad. Hay muchas medidas de variabilidad de uso común, incluidas la varianza y la desviación típica, y se pueden utilizar otras medidas de variabilidad (por ejemplo, el valor medido máximo menos el valor medido medio). Se pueden crear combinaciones que incluyan estas diferentes medidas (por ejemplo, un factor de ponderación multiplicado por la varianza más otro factor de ponderación multiplicado por la diferencia entre la temperatura medida máxima y la media).

La temperatura del tubo j se puede denominar T_j y la temperatura media puede ser proporcionada por $\bar{T} = \frac{\sum_j T_j}{N \text{ tubos}}$. Un objetivo de optimización se puede definir por la norma euclídea, también denominada norma L_2 , asociada con la diferencia entre todos los T_j y \bar{T} que escribimos simbólicamente como $\|T - \bar{T}\|_2$ donde el guion inferior se utiliza

para designar una magnitud vectorial. Aquí el vector de las temperaturas de tubo y $\|X\|_p = \sqrt[p]{\sum_j (T_j - \bar{T})^p}$

definen la norma-p general y para la que $p=2$ da la norma euclídea. Otro criterio de temperatura objetivo se puede definir como $w\|T - \bar{T}\|_2 + (1-w)\|T - \bar{T}\|_\infty$ donde w es un factor de ponderación con un valor entre 0 y 1. Con $w = 1$, esta función de optimización se reduce a la función de optimización mostrada en primer lugar (la norma euclídea) y con $w = 0$ esta función de optimización se reduce a la diferencia entre el tubo más caliente y el tubo medio. La optimización se llevará a cabo para minimizar el objetivo de optimización elegido.

El criterio de temperatura objetivo también se puede combinar con una compensación de temperatura que se especifica para los tubos individuales (θ_j y con $\underline{\theta}$ el vector que designa el conjunto de todas las compensaciones y $\bar{\theta}$ la compensación media). Simbólicamente, esto sería $\|T - \bar{T} + (\bar{\theta} - \underline{\theta})\|_2$. Esto permitiría, por ejemplo, fijar como objetivos las temperaturas uniformes dentro de una región del horno que sean diferentes de las temperaturas uniformes en otra región. En esta forma, la especificación de una compensación para incluso un único tubo ajusta la temperatura objetivo de todos los tubos a través del término de compensación media y la compensación se aplica al balance dentro del horno sin referencia a una temperatura media específica que se controla por métodos tradicionales.

Puede ser deseable que se especifiquen cotas superiores o inferiores en las temperaturas de tubo. Se puede especificar el objetivo de optimización para minimizar la varianza y se puede configurar un dispositivo de control tradicional para elevar o reducir la temperatura media para cumplir la condición delimitadora.

El método comprende además la medición de una primera información de temperatura que comprende los datos para cada uno de la pluralidad de tubos de proceso en una primera condición de funcionamiento. Las condiciones de funcionamiento incluyen los caudales de oxidante, los caudales de combustible, las velocidades de suministro de gas reactivo, la velocidad de producción de hidrógeno, la presión del horno, etc.

El horno 102 puede tener puertos de visualización 110 en uno o más niveles o elevaciones. La disposición de puertos de visualización 110 en más de un nivel permite una mayor capacidad de visualización de los tubos 104.

La primera información de temperatura de la pluralidad de tubos de proceso se puede medir capturando una primera pluralidad de imágenes de una zona interior del horno de reformador, donde al menos algunas imágenes de la primera pluralidad de imágenes están asociadas con diferentes partes de la zona interior del horno de reformador, en las que cada imagen de la primera pluralidad de imágenes comprende los primeros datos de píxeles asociados con una parte respectiva de la pluralidad de tubos de proceso, y procesando una parte de los primeros datos de píxeles para obtener la primera información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso.

Se puede obtener la información de temperatura tomando una serie de imágenes digitales de los tubos 104 en un horno 102 a través de los puertos de visualización 110. Las imágenes digitales pueden ser tomadas mediante una cámara digital o cualquier otro dispositivo capaz de capturar información de imagen digital. Las imágenes digitales pueden ser imágenes digitales "fijas" de una cámara de vídeo (es decir, una imagen fija de un dispositivo de imagen continua), o imágenes digitales promedio de una cámara de vídeo (es decir, una imagen "promediada" a lo largo de algún intervalo de tiempo y no de una sola "instantánea" en un punto). Las imágenes digitales se pueden obtener apuntando la cámara digital a través de cada puerto de visualización 110 y a continuación capturando la información de imagen correspondiente, es decir, "sacando una foto" de la parte correspondiente de la zona interior.

La cámara digital puede estar situada sobre un monopié u otro dispositivo similar para tratar de mantener los ángulos de cabeceo, guiñada y balanceo deseados en las imágenes digitales y para ayudar a posicionar la lente de la cámara en el centro del puerto de visualización 110. Además, la cámara se puede ajustar a un modo manual para mantener una velocidad de apertura más consistente y el enfoque se puede ajustar al infinito.

Para obtener una imagen de la zona interior 106 del horno 102, que incluya los tubos 104, la cámara se puede colocar brevemente a un puerto de visualización 110 con el operario apuntando la cámara a través del puerto de visualización 110 y, posteriormente, apretando el botón de disparo para capturar la imagen y después retirando la cámara del puerto de visualización 110. La Figura 2 muestra los campos de visión 120 de la cámara cuando se toman imágenes desde varios puertos de visualización 110. Como se puede observar en la Figura 2, cada campo de visión de la cámara incluye una parte de una o más hileras de tubos 104. El período de tiempo durante el que la cámara está apuntando a través del puerto de visualización 110 debería minimizarse para proteger la cámara y al operario de la exposición excesiva al calor radiante; sin embargo, la cámara no debería estar en movimiento cuando se está apretando el botón de disparo para asegurar que la imagen no sea borrosa. El procedimiento se puede repetir para cada puerto de visualización 110 en el perímetro del horno 102.

La cámara puede capturar una imagen (o múltiples imágenes) a través del puerto de visualización de una parte de la zona interior 106 del horno 102. La imagen puede incluir una hilera de tubos 104 situados a lo largo del lado izquierdo de la imagen y otra hilera de tubos 104 situados a lo largo del lado derecho de la imagen. Además, la imagen puede incluir un puerto de visualización opuesto. El puerto de visualización opuesto se puede utilizar para capturar una imagen desde la pared opuesta del horno 102. La imagen puede incluir otras estructuras y/o características de la zona interior 106 del horno 102 que están dentro del campo de visión de la cámara.

La parte de la zona interior 106 capturada en una imagen puede superponerse o incluir partes similares de la zona interior 106 capturadas en otras imágenes. Dicho de otra forma, la parte de la zona interior 106 mostrada en una imagen puede incluir estructuras o características que también se muestran en otras imágenes. Por ejemplo, las imágenes tomadas desde los puertos de visualización 110 adyacentes pueden mostrar lados opuestos del mismo tubo 104. De forma similar, las imágenes tomadas desde puertos de visualización 110 opuestos pueden mostrar el mismo tubo 104 desde diferentes ángulos. Asimismo, no se requiere que las imágenes correspondan o se apliquen a regiones específicas o exclusivas de la zona interior 106 y estas pueden mostrar regiones o partes sustancialmente similares de la zona interior 106. Una imagen muestra una parte diferente de la zona interior 106, si la imagen incluye una estructura o característica que no se muestra en otra imagen o muestra las mismas estructuras o características con ángulos o perspectivas diferentes de las otras imágenes.

Se pueden capturar imágenes de la zona interior 106 y de los tubos 104 desde cada puerto de visualización 110 en función de una secuencia predeterminada o a lo largo de una trayectoria 202 predeterminada alrededor del perímetro del horno 102 como se muestra en la Figura 2. La trayectoria 202 predeterminada se puede extender ya sea en una dirección en el sentido de las agujas del reloj o en una dirección en sentido contrario a las agujas del reloj. Mediante la captura de las imágenes en una secuencia predeterminada, la posterior identificación de la parte de la zona interior 106 capturada en cada imagen se puede lograr rápidamente dado que cada etapa de la secuencia o trayectoria corresponde a una parte conocida de la zona interior 106. Las imágenes de la zona interior 106 y los tubos 104 se pueden tomar en cualquier orden o secuencia deseados con el requisito adicional de que la parte correspondiente de la zona interior 106 esté correlacionada con la imagen capturada. Dado que el horno 102 puede incluir puertos de visualización 110 en los lados opuestos del horno 102 y en cada lado de una hilera de tubos 104, todos los tubos 104 pueden estar incluidos en al menos dos imágenes y muchos de los tubos 104 pueden estar incluidos en al menos cuatro imágenes.

Se puede utilizar una única cámara para capturar todas las imágenes de la zona interior 106 del horno 102. La utilización de la única cámara para capturar todas las imágenes puede aumentar la consistencia del procesamiento y

análisis posteriores de los datos de imagen porque las imágenes son capturadas en condiciones de cámara uniformes tales como una señal uniforme a niveles de ruido y sensibilidades uniformes a longitudes de onda diferentes. Sin embargo, se puede utilizar una pluralidad de cámaras para capturar imágenes, pero el procesamiento y el análisis posteriores de los datos de imagen deberían representar las diferencias en las condiciones de cámara tales como diferencias en las sensibilidades a las diferentes longitudes de onda y las diferencias de señal a las relaciones de ruido como resultado de las diferencias de condiciones entre cámaras y/o modelos de cámaras. La representación de las diferencias en las condiciones de cámara se necesita para hacer que los datos de imagen adquiridos de una cámara se correspondan con los datos de imagen adquiridos desde otra cámara.

Cuando se captura una imagen de la zona interior 106 del horno 102, la cámara puede incluir uno o más filtros para impedir que ciertas longitudes de onda de luz alcancen el generador de imágenes o el sensor o reducirlos. El generador de imágenes o el sensor pueden incluir dispositivos de carga acoplada (CCD) y/o dispositivos de semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS). El filtro puede estar diseñado para permitir que el 50 % de la luz en una longitud de onda predeterminada pase a través del filtro y alcance el sensor. El filtro puede estar diseñado además para permitir que menos luz, es decir, menos del 50 % de la luz, pase a través del filtro en longitudes de onda que son menores que la longitud de onda predeterminada, y para permitir que más luz, es decir, más del 50 % de la luz, pase a través del filtro en longitudes de onda que son mayores que la longitud de onda predeterminada. La longitud de onda predeterminada puede ser de aproximadamente 715 nm o la longitud de onda predeterminada puede ser de entre 300 nm o menos y/o 1000 nm o más.

El generador de imágenes o el sensor que está incorporado en la cámara puede incluir píxeles que registran la intensidad de la luz recibida en el píxel. El número de píxeles de la cámara corresponde a la resolución de la cámara. La cámara puede tener una resolución de entre 1 megapíxel (aproximadamente 1 millón de píxeles) y 10 megapíxeles (aproximadamente 10 millones de píxeles) o más. Cada píxel en el generador de imágenes o el sensor puede tener uno o más componentes o canales que registran la intensidad de la luz. Cada píxel del generador de imágenes o el sensor puede tener tres componentes o canales, que pueden corresponder a los colores rojo (R), verde (G) y azul (B). Los canales o componentes del píxel se pueden configurar para ser más receptivos a la luz en ciertas frecuencias predeterminadas y menos receptivos a la luz en otras frecuencias predeterminadas cuando registran la intensidad de la luz. En otras palabras, la luz en ciertas frecuencias predeterminadas puede contribuir más a la medición de la intensidad total que la luz en otras frecuencias predeterminadas. Cuando se captura una imagen, las intensidades registradas para cada canal o componente de cada píxel se almacenan como datos de imagen o datos de píxeles. Los píxeles pueden estar configurados para medir la intensidad de la luz en el espectro visible.

Después de que se obtengan las imágenes del horno 102, los datos de imagen correspondientes para cada una de las imágenes se pueden cargar en un ordenador u otro dispositivo de procesamiento para el procesamiento y análisis adicionales. Se puede procesar cada una de las imágenes utilizando el ordenador para corregir, es decir, reducir o eliminar, cualquier distorsión en la imagen. Antes de que cada imagen pueda ser procesada para corregir la distorsión en la imagen, se puede construir o crear un modelo de transformación para representar cada combinación de lente y cámara utilizada para capturar imágenes. Para crear un modelo de transformación, se pueden crear una serie de modelos de distorsión radial para la combinación de lente y cámara. Un modelo de distorsión radial determina la cantidad de distorsión radial que puede ser introducida por una combinación de lente calibrada y cámara para una longitud focal seleccionada (que representa la posibilidad de una lente de zoom) y la distancia focal seleccionada. Una vez que se ha creado el modelo de transformación para una combinación de lente y cámara, se puede aplicar el modelo de transformación a las imágenes capturadas por esa combinación de lente y cámara para corregir cualquier distorsión. Se conocen métodos para la corrección de distorsiones en la técnica. Se puede utilizar cualquier método adecuado para la corrección de distorsiones en relación con la obtención de información de temperatura.

Además de la corrección de distorsiones, se puede procesar cada una de las imágenes utilizando el ordenador para corregir cualquier rotación o desviación ("corrección de rotación") desde una posición específica, por ejemplo, una "posición centrada". La corrección de rotación se puede llevar a cabo para corregir la orientación vertical de la imagen ("ángulo de balanceo"), para corregir el ángulo de "arriba y abajo" ("cabeceo") y el ángulo de "izquierda y derecha" ("guiñada"). El ángulo de balanceo y el cabeceo se pueden corregir mediante la detección del borde o bordes del último tubo 104 o los últimos tubos 104 en la imagen y la posición de los puertos de visualización 110 opuestos y luego ajustar la imagen de modo que el borde o los bordes del último tubo 104 o tubos 104 en la imagen sean verticales. La guiñada se puede corregir utilizando la información de geometría del horno. Los métodos para la corrección de la rotación son conocidos en la técnica. Se puede utilizar cualquier método adecuado para la corrección de rotación en relación con la obtención de información de temperatura.

Las imágenes "corregidas" se pueden procesar utilizando el ordenador para detectar o determinar los bordes de los tubos 104 y/o cualquier otra característica deseable, por ejemplo, los puertos de visualización 110 opuestos, en la imagen. Los bordes detectados de los tubos 104 y las características detectadas a partir de la imagen se pueden ajustar o modificar en vista de un modelo geométrico del horno 102. Un modelo geométrico es una representación de la posición en el espacio de cada característica en el horno (típicamente representada por las coordenadas x, y, z y un punto de referencia). En base a las especificaciones del diseño tales como la separación entre hileras, la

separación de tubo a tubo y la distancia entre la pared y el primer tubo, se puede desarrollar un modelo geométrico "según construcción". Debido a las tolerancias de fabricación y el movimiento del tubo resultante de la expansión térmica, puede que los tubos y las otras características del horno no estén situados precisamente en la misma posición que en el modelo geométrico "según construcción". Este modelo se puede modificar posteriormente para coincidir con las condiciones de funcionamiento reales del horno mediante la comparación de los bordes detectados en las imágenes con el modelo geométrico. Esto permite que se identifiquen los tubos u otras características.

El modelo geométrico se utiliza como el punto de partida para identificar cada tubo. La detección de bordes se utiliza para realizar un ajuste fino de la ubicación de la característica, porque los tubos pueden inclinarse o moverse en un entorno de altas temperaturas.

El borde de los bancos de tubos y la ubicación del puerto de visualización se estiman en base a un esquema de modelado que incorpora tanto la información geométrica como el resultado de la detección de bordes a partir de la imagen. Se hace cuadrar la información de la detección de bordes a partir del procesamiento de imágenes con los datos geométricos.

El algoritmo o proceso de detección de bordes estima la ubicación posible de los bordes y proporciona una distribución de probabilidad de dónde puede estar situado cada borde. La distribución de probabilidad de la ubicación del borde se compara con el modelo geométrico. Dado que hay múltiples bordes que se localizan al mismo tiempo, los errores entre la información geométrica y la densidad de probabilidad de la ubicación de los bordes se minimizan para obtener la ubicación final de los bordes.

Utilizando el modelo geométrico y los bordes de tubo identificados y otras características, se puede identificar y segmentar cada tubo 104 en cada imagen. Comenzando por el borde detectado del último tubo 104 en una hilera, se puede superponer una cuadrícula sobre una parte de la imagen correspondiente a la hilera de tubo. La cuadrícula puede estar separada de manera desigual y puede estar basada en las dimensiones y la configuración del modelo geométrico tales como la separación de hileras de tubo y la distancia de centro de tubo. Las líneas verticales de la cuadrícula superpuesta corresponden a los bordes de los tubos 104 en base a las posiciones conocidas de los tubos 104 a partir del modelo geométrico. La separación entre las líneas de la cuadrícula puede variar de 1 píxel a 100 o más píxeles dependiendo de la resolución de la cámara utilizada. La cuadrícula puede incluir una hilera de segmentos que tienen una longitud y/o altura predeterminadas. Los segmentos se pueden centrar sobre una elevación predeterminada.

Cada segmento de la hilera de segmentos se puede comprobar entonces para determinar si el segmento es parte de un tubo 104 o es otra parte de la zona interior 106 como parte del valor atípico o la detección de defectos. Si un segmento no forma parte de un tubo 104, el segmento se descarta. Los segmentos restantes, que corresponden a los tubos 104 en el horno 102, se utilizan después en el análisis para determinar una temperatura de cada uno de los tubos 104 en la imagen correspondiente. El método utilizado para determinar los valores atípicos o si un segmento forma parte de un tubo se basa en un árbol de clasificación. El árbol de clasificación se desarrolla utilizando la información del modelo geométrico. Se prueban una serie de estadísticas diferentes para un segmento y en base al resultado de los ensayos, se determina si un segmento es bueno (parte de un tubo) o malo (no es un tubo).

La temperatura de los tubos 104 se puede determinar en base a los datos de píxeles de todas las imágenes. Para determinar un valor de temperatura para un tubo 104 en una imagen, los datos de píxeles en el segmento del tubo 104 correspondiente se procesan para determinar un valor que represente una medida de tendencia central, que luego se correlaciona a una temperatura. La temperatura o el valor de temperatura es un valor representativo para un tubo. La temperatura de tubo varía a lo largo de su longitud y se miden una o más elevaciones seleccionadas para proporcionar el valor o los valores de temperatura representativos para un tubo. El procesamiento de los datos de píxeles, por ejemplo, los valores de intensidad, comienza con la obtención de un valor que representa una medida de la tendencia central, para cada canal o componente, a partir de los datos de píxeles de los píxeles en el segmento. El valor que representa una medida de la tendencia central puede ser una mediana de los datos de píxeles. Sin embargo, en otras realizaciones, el valor que representa una medida de tendencia central puede ser una media, una media robusta, un modo u otra medida estadística derivada de los datos de píxeles. El valor que representa una medida de tendencia central para cada canal o componente puede entonces estar correlacionada con un valor de temperatura. Al valor de temperatura para un segmento determinado a partir del valor que representa una medida de tendencia central también se le puede asignar un valor de incertidumbre. El valor de incertidumbre puede cuantificar la confianza en el valor de temperatura determinado. Numerosos factores tales como la distancia del tubo desde la cámara (la longitud de la trayectoria, "d"), el ángulo de la cámara (formado por una línea central de la cámara y la posición del tubo 104, "α"), el número de píxeles en el segmento que representa al tubo, pueden afectar la confianza de una determinación de valor de temperatura. Si los datos de píxeles incluyen múltiples canales o componentes, el valor de temperatura para cada uno de los canales o componentes se puede promediar mediante la utilización de una técnica de promedio estadístico, por ejemplo, la media, la media ponderada, etc., para obtener un único valor de temperatura para el segmento, que corresponde a un tubo 104.

Para obtener una correlación entre los valores de temperatura y los datos de píxeles, se puede formar y almacenar

una relación entre las temperaturas conocidas y los datos de píxeles en una base de datos u otro dispositivo de memoria para su accesibilidad en el futuro. Una técnica para obtener la relación entre los datos de píxeles y las temperaturas conlleva la captura de una imagen de la zona interior 106 y entonces, poco después, tras la captura de imagen, la adquisición de las mediciones de temperatura de los tubos en la parte de la zona interior correspondiente a la imagen. Las mediciones de temperatura de los tubos pueden llevarse a cabo con un pirómetro óptico u otro dispositivo adecuado. Los valores que representan una medida de la tendencia central de la imagen, que corresponden a los tubos 104, se comparan entonces con las mediciones de temperatura para establecer una correlación o relación entre la temperatura y el valor de píxel. Otras técnicas para la obtención de información de temperatura en los tubos 104 también se pueden utilizar para establecer la relación o correlación con los valores de píxeles. Una vez que se establece una relación o correlación entre las temperaturas y los valores de píxeles, se puede utilizar la correlación para el posterior procesamiento de las imágenes.

Una vez que se determinan los valores de temperatura para cada tubo 104 en cada imagen, los valores de temperatura de las imágenes se pueden combinar entre sí para proporcionar información de temperatura en todos los tubos 104 en el horno 102. El valor de temperatura de cada tubo 104 en cada imagen se extrae y se utiliza para generar una representación de la información de temperatura para todos los tubos 104 del horno 102. Cuando un tubo 104 concreto tiene varios valores de temperatura como resultado de que el tubo 104 esté en más de una imagen, los valores de temperatura se pueden promediar utilizando una técnica de promedio estadístico, por ejemplo, la media, la media ponderada, etc. La incertidumbre de los valores de temperatura se puede incluir como un factor a la hora de calcular una media ponderada. Una vez que se completan la extracción y el procesamiento de los valores de temperatura de las imágenes, se puede mostrar un valor de temperatura para cada tubo 104 en el horno 102.

En lugar de determinar un valor de temperatura para cada tubo 104 en cada imagen, los datos de píxeles de segmento o los valores que representan una medida de la tendencia central se pueden continuar para ser procesados de una manera similar a aquella anteriormente expuesta (incluida la aplicación de los valores de incertidumbre) para generar una representación del horno 102 en datos de píxeles o valores estadísticos. Los datos o valores de píxeles que representen una medida de tendencia central en la representación del horno se pueden convertir entonces a temperaturas utilizando la relación o correlación anteriormente expuestas para obtener una representación del horno basada en los valores de temperatura.

Se puede utilizar un método de regresión multivariante (tal como los mínimos cuadrados parciales) para establecer una correlación entre la temperatura de los tubos específicos para los que están disponibles las mediciones de temperatura independientes y los datos de píxeles de una imagen. La correlación puede incorporar variables que incluyen, pero no se limitan a, los valores de píxeles de los canales, por ejemplo, los valores R, G, B, d, α , otras mediciones cuantificables adecuadas, y/o combinaciones de los mismos. Por ejemplo, el valor correlacionado de la temperatura de tubo se puede representar como \hat{T}_j (para el tubo j) y las variables independientes como x_{ij} donde i

denota la i ésima variable, de una lista parcial de variables donde $x \in \{R, G, B, 1/d, \frac{1}{d^2}, \alpha, \dots\}$. Otras variables asociadas con la temperatura de tubo pueden incluir los R, G, B de los tubos previos y siguientes. La temperatura de tubo 104 en una ubicación predeterminada se puede representar como una combinación lineal de estas variables con coeficientes desconocidos A_i de manera que $\hat{T}_j = \sum_i A_i X_{ij}$. Dado un conjunto de mediciones de temperatura independientes, T_j , donde $j = 1, 2, \dots, n$, que puede proceder de un pirómetro, los coeficientes desconocidos se pueden determinar mediante la minimización de los errores entre los datos reales y la predicción en el sentido de los mínimos cuadrados:

$$\text{Min}_{j=1..n} \{(T_j - \hat{T}_j)^2\} = \text{Min}_{j=1..n} \left\{ \left(T_j - \sum_i A_i X_{ij} \right)^2 \right\}$$

Estas valoraciones se pueden llevar a cabo sistemáticamente con la ayuda de las herramientas de software estadístico y matemático estándar (por ejemplo, Matlab®). El resultado final de las valoraciones puede generar una correlación entre los datos de la imagen y las temperaturas de los tubos 104 en el sentido de los mínimos cuadrados $\hat{T} = \sum_i A_i x_{ij}$ | permitiendo las estimaciones de temperatura para todos los tubos de las imágenes (no solo aquellos para los que están disponibles las mediciones de temperatura independientes).

Con referencia a la Figura 3, se puede mostrar la información de temperatura relativa a los tubos 104 del horno 102 como un gráfico de contorno u otra representación gráfica (en color) apropiada. La Figura 3 muestra un gráfico de contorno ejemplar de la información de diferencia de temperatura para los tubos 104 de un horno 102 en una elevación predeterminada. El gráfico puede identificar tubos de proceso e hileras individuales. Como se muestra, el gráfico ilustra que el horno incluye regiones de temperatura por encima de la media 502, regiones de temperatura por debajo de la media 504, y regiones de temperatura media 506.

El proceso para la obtención de información de temperatura descrito en la presente memoria se puede aplicar a una pluralidad de elevaciones dentro del horno 102 y se puede utilizar para generar una vista o representación tridimensional de los datos de temperatura. Los puertos de visualización 110 pueden estar situados en las partes superiores e inferiores del horno 102. La realización del proceso anteriormente expuesto con ambos puertos de visualización en las partes superiores e inferiores del horno 102 permite la generación de un gráfico para la parte superior y la parte inferior del horno 102. Se pueden incorporar cálculos adicionales que incorporen diferencias anticipadas de temperatura en las diversas elevaciones a un gráfico tridimensional. La incorporación de las diferencias anticipadas de temperaturas permite que el gráfico represente las anomalías de tubos 104 específicos. Se pueden analizar múltiples hileras de segmentos en diferentes elevaciones a partir de las imágenes. El uso de múltiples segmentos en diferentes elevaciones también se puede utilizar para generar una representación tridimensional de la información de temperatura.

Las realizaciones dentro del alcance de la presente solicitud incluyen productos de programa que comprenden medios legibles por máquina para transportar o almacenar instrucciones ejecutables por máquina o estructuras de datos almacenadas en los mismos. Tales medios legibles por máquina pueden ser cualquier medio disponible al que se pueda acceder mediante un ordenador de propósito general o propósito especial u otra máquina con un procesador. A modo de ejemplo, tales medios legibles por máquina pueden comprender una RAM, una ROM, una EPROM, una EEPROM, un CD-ROM u otro almacenamiento de disco óptico, almacenamiento de disco magnético u otros dispositivos de almacenamiento magnéticos, o cualquier otro medio que se pueda utilizar para transportar o almacenar el código de programa deseado en forma de instrucciones ejecutables por máquina o estructuras de datos y a los que se pueda acceder mediante un ordenador de propósito general o propósito especial u otra máquina con un procesador. Cuando la información es transferida o proporcionada a través de una red u otra conexión de comunicaciones (ya sea cableada, inalámbrica, o una combinación de cableada o inalámbrica) a una máquina, la máquina visualiza apropiadamente la conexión como un medio legible por máquina. De este modo, cualquier conexión de este tipo se denomina adecuadamente un "medio legible por máquina". Las combinaciones de los medios anteriores también están incluidas dentro del alcance de los medios legibles por máquina. Las instrucciones ejecutables por máquina comprenden, por ejemplo, instrucciones y datos que provocan que un ordenador de propósito general, un ordenador de propósito especial, o máquinas de procesamiento de propósito especial lleven a cabo una determinada función o grupo de funciones.

El método de funcionamiento del horno comprende además proporcionar una estimación de una función matemática que caracterice una relación entre los cambios de caudal de quemador para dos o más de la pluralidad de quemadores y los cambios de temperatura individuales para al menos una parte de la pluralidad de tubos de proceso. Cada quemador puede tener varios flujos que pasen a través del mismo. Estos incluyen ambas las corrientes de combustible y las corrientes de oxidante y puede resultar posible controlar los flujos de estas corrientes hacia los quemadores individuales o hacia subconjuntos apropiados de quemadores (tales como una única hilera de quemadores). La alteración del flujo de una de estas corrientes (por ejemplo, aumentando o reduciendo la apertura fraccionaria de una válvula en la trayectoria de flujo) afectará a las temperaturas de uno o más tubos en el horno. Tal cambio no está destinado a afectar a los flujos generales de combustibles y oxidantes hacia el horno en su conjunto, solo a la distribución de tales flujos dentro del horno. En términos generales, la relación entre un cambio de caudal único (Δu_i para la corriente i , donde i es un índice que especifica cada corriente en la pluralidad de corrientes que afectan a la distribución del combustible o de los oxidantes dentro del horno; el número total de tales corrientes se designa $N_{corriente}$) y el cambio en las temperaturas de los tubos (ΔT_j para todos los j donde j es un índice que especifica cada uno de los tubos en la pluralidad de tubos en el horno que son considerados en el cálculo) se representa como

$$\underline{\Delta T} = \underline{f}(\underline{\Delta u}_i) ,$$

donde se utiliza el guion inferior para indicar una magnitud vectorial. En este caso, un vector de longitud N_{tubo} , el número de tubos de la parte de la pluralidad de tubos en el horno que se controlan (y que puede, pero no tiene que, ser igual al número total de tubos en el horno). Así que esta ecuación vectorial representa las relaciones funcionales generales individuales de N_{tubo} entre el cambio de caudal de una única corriente de combustible u oxidante y la temperatura de los tubos N_{tubo} .

A menudo es conveniente llevar a cabo el balance del horno en etapas en las que una única corriente de combustible u oxidante se ajusta en cada etapa. Se puede designar entonces a las corrientes un orden específico en el que han de ser utilizadas para el balance. Si un quemador tiene 3 corrientes de combustible, estas podrían designarse *combustible1*, *combustible2* y *combustible3*. Si hay 2 corrientes de oxidante, se podrían designar *oxidante1* y *oxidante2*. El número total de tipos de corriente se puede designar $M_{corriente}$. Durante la primera etapa, el combustible1, por sí mismo, se puede ajustar para llevar a cabo el balance del horno. Se puede realizar todo el balance en una única etapa (es decir, utilizando solamente una corriente para llevar a cabo el balance incluso si se requieren múltiples pasos de ajuste o una iteración) o las etapas posteriores pueden utilizar las otras corrientes para mejorar aún más el balance del horno. En cualquier caso, cuando se utiliza el enfoque por etapas, las únicas

relaciones funcionales necesarias dentro de una etapa son aquellas entre el cambio de temperaturas de tubo (ΔT_j) y el cambio de un único tipo de corriente a medida que fluye a través de la pluralidad de quemadores (Δu_j). El índice de mayúscula j se utiliza para designar el quemador a través del cual fluye y recorre la corriente específica desde 1 hasta el número de la pluralidad de quemadores ($N_{quemador}$) considerados. En general, el número total de corrientes que fluyen a través de todos los quemadores es igual al producto del número de los tipos de corriente y el número de quemadores (es decir, $N_{corriente} = M_{corriente} \times N_{quemador}$). También es posible definir una correspondencia de uno a uno entre el índice i utilizado para designar cualquier corriente y un índice compuesto l_m donde l designa el quemador y el subíndice m designa el tipo de corriente. De este modo la corriente i se asocia con el quemador l y si el método se aplica de la manera por etapas, los índices son idénticos y se utilizan para identificar una corriente de quemador específica. El índice de minúscula se utilizará para designar una corriente de quemador y el índice de mayúscula, el quemador correspondiente a través del cual fluye. Las ecuaciones para el enfoque por etapas se podrían generar en una forma más explícita reemplazando la minúscula i con la mayúscula l .

Cualquier función se puede linealizar de modo que para los cambios pequeños en la variable independiente un valor constante represente con precisión el cambio en la variable dependiente. Esta es la primera derivada y en este caso se puede representar como $\frac{\partial T_j}{\partial u_i}$. Aquí el símbolo ∂ se utiliza para representar la derivada parcial dado que la temperatura de la pared de tubo se toma como una función de muchas variables independientes (las u_i , que son los flujos de corriente controlables). El símbolo g_{ij} se define en la presente memoria como la estimación de $\frac{\partial T_j}{\partial u_i}$.

La función que representa la relación entre dos o más de la pluralidad de corrientes de flujo hacia el quemador y las temperaturas de pared de tubo se representa como

$$\Delta T_j = f(\Delta u)$$

Este es el simbolismo para una serie de ecuaciones de N_{tubo} , cada una de las cuales proporciona el cambio en la temperatura de pared de tubo para un tubo específico como una función de los cambios a todas las corrientes de flujo.

Una única ecuación ejemplar se puede escribir como

$$\Delta T_j = f_j(\Delta u) = f_j(\Delta u_1, \Delta u_2, \Delta u_3, \dots, \Delta u_{N_{streams}}).$$

Después de linealizar la función, la única ecuación ejemplar se puede escribir como

$$\Delta T_j = \sum_{\forall i} \frac{\partial T_j}{\partial u_i} \Delta u_i.$$

Después de reemplazar $\frac{\partial T_j}{\partial u_i}$ con el valor estimado $g_{i,j}$, la función ejemplar única se puede escribir como

$$\Delta T_j = \sum_{\forall i} g_{ij} \Delta u_i.$$

Hay N_{tubo} de estas ecuaciones individuales, uno para cada una de las partes de la pluralidad de tubos en el horno que se controlan. Juntas, estas ecuaciones N_{tubo} se pueden escribir en simbolismo como

$$\Delta T = \underline{G} \Delta u$$

donde \underline{G} es una matriz con elementos funcionales $g_{i,j}$ y dimensiones $N_{corriente} \times N_{tubo}$.

Quedan por determinar los valores para $g_{i,j}$. Este puede resultar un trabajo arduo y repetitivo si se aborda de manera experimental. Sin embargo, hay características en un horno típico que se pueden aprovechar para simplificar la tarea. Concretamente, los tubos que están cerca de un quemador en el que el flujo de combustible se aumenta experimentan un aumento de temperatura y un aumento mayor que aquellos que están a mayor distancia. Los tubos

que están alejados del quemador que experimenta un aumento de combustible pueden no experimentar ningún cambio o incluso experimentar un descenso de temperatura a medida que los quemadores más cercanos al tubo alejado experimentan un ligero descenso de flujo de combustible (mientras el flujo de combustible total al horno permanece igual). Esto sugiere unas formas funcionales determinadas para los elementos funcionales $g_{i,j}$ que

5 proporcionan las estimaciones de $\frac{\partial T_j}{\partial u_i}$. Por ejemplo, se puede utilizar la forma funcional

$$g_{i,j} = a_1 \times \exp\left(\frac{a_2}{d_{i,j}}\right) + a_3, \text{ donde } d_{i,j} \text{ es la distancia entre el tubo } j \text{ y el quemador } i \text{ (nótese que la mayúscula } i \text{ se}$$

utiliza para designar el quemador a través del que fluye la corriente i , como se describió previamente). Esta forma tiene tres parámetros (a_1 , a_2 y a_3). En el sentido más general, se podrían determinar los parámetros para cada par de tubo/corriente y como funciones de condiciones de funcionamiento y del entorno, pero este enfoque no aprovecha la fuerza de esta metodología. Otro enfoque consiste en suponer que los parámetros (a_1 , a_2 y a_3) son válidos para cada par de tubo/corriente dentro de clases específicas. Por ejemplo, los quemadores pueden tener dos corrientes de combustible independientes y se puede determinar un conjunto de parámetros (a_1 , a_2 y a_3) para cada corriente de combustible de forma separada. Los quemadores dentro del horno pueden ser de diferentes tamaños y se puede determinar un conjunto de parámetros para cada corriente de combustible para cada tamaño de quemador. Dado que las estimaciones no necesitan ser perfectas, puede ser deseable que se limite el número de clases diferentes y se acepte un nivel de imprecisión en la respuesta estimada en lugar de dedicar trabajo adicional a la determinación de parámetros para más clases.

Por consiguiente, en el método, la estimación de la función matemática (por ejemplo, $\Delta T = \underline{G}\Delta u$) puede comprender valores calculados a partir de elementos funcionales ($g_{i,j}$) en los que cada uno de los elementos

$$g_{i,j} = a_1 \times \exp\left(\frac{a_2}{d_{i,j}}\right) + a_3$$

funcionales ($g_{i,j}$) comprende una forma funcional (por ejemplo,) que comprende un primer parámetro funcional, a_1 , un segundo parámetro funcional, a_2 , y un parámetro geométrico, $d_{i,j}$, que caracteriza las distancias entre cada una de las pluralidades de tubos de proceso y cada una de la pluralidad de quemadores; en la que el primer parámetro funcional, a_1 , de un primer elemento funcional de los elementos funcionales tiene el mismo valor que el primer parámetro funcional a_1 , de un segundo elemento funcional de los elementos funcionales y en la que el segundo parámetro funcional, a_2 , de un primer elemento funcional de los elementos funcionales tiene el mismo valor que el segundo parámetro funcional, a_2 , de un segundo elemento funcional de los elementos funcionales.

Si $g_{i,j}$ se vuelve no dimensionado al dividir entre un cambio de flujo de corriente de referencia y multiplicar por un cambio de temperatura de tubo de referencia, y $d_{i,j}$ se vuelve no dimensionado dividiendo entre una escala de longitud de horno, entonces un conjunto de valores de parámetro que tiene la forma descrita anteriormente es $a_1 = -1,1$, $a_2 = -0,05$ y $a_3 = 1$ (estos valores se han elegido como un ejemplo representativo y no están destinados a describir ningún horno específico ni a limitar el método en modo alguno). La Figura 4 es un gráfico de esta función de ejemplo con los valores de parámetro dados. Con los valores no dimensionales, se puede escoger apropiadamente a_3 para ser igual a 1. Los valores absolutos mayores de a_2 restringen el efecto directo de los cambios de flujo a unas inmediaciones más reducidas alrededor del quemador. Se puede escoger que a_1 sea menos que -1. También se pueden seleccionar formas más complejas de los elementos funcionales, por ejemplo,

40 $g_{i,j} = a_1 \tan^{-1}\left(\frac{a_2}{d_{i,j}} + \frac{a_3}{d_{i,j}^2}\right) + a_4$. Aquí, el elemento funcional $g_{i,j}$ tiene 4 parámetros y esta función puede coincidir de forma más estrecha con los datos experimentales. Se pueden elegir otras formas funcionales también.

Los valores de parámetro (α_k) utilizados para determinar el valor de los elementos funcionales para cada clase específica se pueden actualizar según se obtiene información adicional relativa al efecto de los cambios de caudal de corriente de quemador sobre los cambios de temperatura de tubo. Esto se lleva a cabo mediante la realización de la siguiente minimización:

$$\underset{\forall \alpha_k}{\text{Min}} \left\| (\Delta T - \underline{G}\Delta u) \circ \underline{\varepsilon}^{-1} \right\|$$

50 donde $\underline{\varepsilon}^{-1}$ es un vector (de dimensión N_{tubo}) en el que cada elemento es el recíproco de la incertidumbre en la medición de temperatura de tubo, el operador \circ se utiliza para el producto puntual (también conocido como el producto de Hadamard) de los dos vectores. Si la matriz \underline{G} está mal condicionada, puede ser corregida omitiendo algunos de los valores propios más pequeños.

Como se ha indicado anteriormente, la relación entre los cambios de temperatura de pared de tubo y los cambios en el flujo de quemador se puede ver afectada por las condiciones de funcionamiento (por ejemplo, la velocidad de producción) o las condiciones del entorno (por ejemplo, la temperatura ambiente). Estos efectos se pueden capturar cambiando los valores de parámetro (a_k). Sin embargo, los valores determinados para las condiciones previas proporcionan una estimación razonable y un buen punto de partida para la función matemática que relaciona los cambios de temperatura de pared de tubo con los cambios en los flujos de quemador. Cuando se realizan cambios en los flujos de corriente de quemador, se pueden actualizar los parámetros como se ha descrito anteriormente.

El método de funcionamiento de un horno comprende además el cálculo de un primer conjunto de disolución de caudal objetivo que tiene disoluciones para los dos o más de la pluralidad de quemadores consistentes con el ajuste de las temperaturas de la pluralidad de tubos de proceso a la limitación de uniformidad de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso. Matemáticamente, esto se lleva a cabo construyendo primero un vector que representa la diferencia entre las temperaturas de tubo actuales (denominadas T_j, V_j o simplemente \underline{T}) y las temperaturas objetivo (T_j^* para V_j o simplemente \underline{T}^*) de la forma $\underline{T} - \underline{T}^*$ (o $\underline{\Delta T}^*$) y determinando luego la solución ($\underline{\Delta u}$) que se ajuste a la función linealizada que estima la relación entre los cambios en las temperaturas de pared de tubo y los flujos de quemador sujeta a la restricción de que los valores determinados ($\underline{\Delta u}_i$) estén situados entre las cotas inferiores y superiores de los flujos de quemador individuales. Simbólicamente esto es

$$\begin{aligned} & \underset{\Delta u}{\text{Min}} \quad \|\underline{\Delta T}^* - \underline{G}\underline{\Delta u}\| \\ & \text{s.t. } LB_i \leq \Delta u_i \leq UB_i \forall i \end{aligned}$$

donde el símbolo genérico $\|\underline{x}\|$ se utiliza para designar cualquiera de la variedad de objetivos de optimización tales como la norma euclídea expuesta anteriormente. T_j^* puede ser igual a \bar{T} o estar relacionada con \bar{T} como se ha descrito antes. \underline{G} puede ser corregida.

La solución ($\underline{\Delta u}$) es un conjunto de cambios de flujo de quemador que minimizan la diferencia entre las temperaturas de pared de tubo estimadas y las temperaturas objetivo. Estos cambios de flujo de ajuste pueden ser implementados como ajustes de válvula. Cuando esto se lleva a cabo, aparecerá un nuevo perfil de temperatura en el horno. Las temperaturas de tubo pueden ser medidas según se ha descrito anteriormente junto con los valores de incertidumbre correspondientes. La nueva información de temperatura se puede utilizar entonces para estimar los nuevos valores para los parámetros en $g_{i,j}$, así como determinar una nueva $\underline{\Delta T}^*$ de modo que se pueda repetir el proceso para refinar aún más el perfil de temperatura.

El conjunto de disolución de caudal objetivo puede ser cualquier medida relativa a los caudales de quemador, por ejemplo, caudales de gas oxidante y/o combustible específicos, cambios en los caudales, porcentaje de apertura/cierre de las válvulas, etc. El ajuste se puede llevar a cabo mediante cualquier técnica adecuada para la disminución de la diferencia entre las temperaturas medidas y el objetivo de temperatura.

Como se ha descrito anteriormente, los valores de temperatura o la información de temperatura pueden incluir valores de incertidumbre (ϵ_j). Para incorporar la incertidumbre en la temperatura de pared de tubo, el proceso de minimización mediante el que se determinan los flujos de ajuste se modifica para incluir una ponderación de los elementos de vector individuales con los recíprocos de la incertidumbre. Esto es similar a la manera en que se utilizaba la incertidumbre para calcular los valores de parámetro en la estimación de los elementos de función individuales. Simbólicamente, esto es

$$\begin{aligned} & \underset{\Delta u}{\text{Min}} \quad \|(\underline{\Delta T}^* - \underline{G}\underline{\Delta u}) \circ \underline{\epsilon}^{-1}\| \\ & \text{s.t. } LB_i \leq \Delta u_i \leq UB_i \forall i \end{aligned}$$

La modificación engloba la diferenciación en la incertidumbre que puede o no estar presente en diferentes temperaturas de pared de tubo. La solución resultante pone más énfasis en mover las válvulas cuando la incertidumbre asociada con la temperatura relacionada es baja en comparación con casos en los que la incertidumbre es más alta.

Las restricciones más obvias en los flujos de quemador son los flujos mínimos y máximos. Estos podrían especificarse para mantener algún flujo de combustible mínimo consistente con la estabilidad de quemador o un flujo de combustible máximo asociado con la combustión rica en combustible y los límites de emisiones. Estas

restricciones de flujo se pueden reestructurar en términos de restricciones de posición de válvula para ser coherentes con el caso en el que los Δu_i sean considerados cambios de posición de válvula. También hay restricciones adicionales que se pueden incluir. Por ejemplo, se podría imponer una restricción sobre el número de válvulas que se permite que sean manipuladas para cada etapa del cálculo de un conjunto de disolución de caudal objetivo.

El método de funcionamiento del horno 102 comprende además el ajuste de una primera válvula situada más arriba de al menos una de las dos o más de la pluralidad de quemadores 108 para cambiar al menos uno de los caudales de los dos o más de la pluralidad de quemadores 108 de acuerdo con el primer conjunto de disolución de caudal objetivo. La referencia a una primera válvula incluye una o más válvulas dado que el artículo "una" significa una o más cuando se aplica a cualquier característica. La primera válvula puede ser una válvula que controla el flujo de gas oxidante o una válvula que controla el flujo de gas combustible. La primera válvula puede ser una válvula accionada o una válvula manual. La primera válvula que se ajusta no es una válvula de gas oxidante principal o una válvula de combustible principal para controlar el flujo total hacia la totalidad del horno que se controla mediante métodos tradicionales, es más bien una válvula que controla el flujo hacia un subconjunto apropiado de los quemadores y por consiguiente afecta a la distribución del flujo.

El método de funcionamiento del horno 102 puede comprender además la medición de la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso en una segunda condición de funcionamiento diferente de la primera condición de funcionamiento. La segunda condición de funcionamiento es posterior (en un momento posterior) a la primera condición de funcionamiento.

La segunda información de temperatura se puede medir de una manera similar a la primera información de temperatura.

En combinación con cualquiera de las otras características, la segunda información de temperatura de la pluralidad de tubos de proceso se puede medir capturando una segunda pluralidad de imágenes de una zona interior del horno de reformador, donde al menos algunas de las imágenes de la segunda pluralidad de imágenes están asociadas con diferentes partes de la zona interior del horno de reformador, en la que cada imagen de la segunda pluralidad de imágenes comprende los segundos datos de píxeles asociados con una parte respectiva de la pluralidad de tubos de proceso, y procesando una parte de los segundos datos de píxeles para obtener la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso.

La segunda condición de funcionamiento puede ser el resultado de un ensayo de bucle abierto de la respuesta de temperatura de los caudales de gas/combustible oxidante hacia los quemadores. El ensayo de bucle abierto incluye el caso en el que una única corriente de flujo de quemador se ajusta específicamente para el propósito de determinar los parámetros utilizados para definir los elementos funcionales para una clase específica de flujos de quemador. Las estimaciones del parámetro se pueden calcular utilizando la primera información de temperatura y la segunda información de temperatura resultantes del cambio o los cambios de caudal de quemador. Si ${}_0T$ se utiliza

para designar las temperaturas medidas en la condición inicial y ${}_1T$ se utiliza para designar las temperaturas medidas en la condición posterior, entonces $\Delta T \equiv {}_1T - {}_0T$ y los parámetros se determinan a partir de

$$\text{Min}_{\text{Var}_k} \left\| \left(\Delta T - \underline{G} \Delta u \right) \circ \underline{\varepsilon}^{-1} \right\| \text{ donde los elementos de } \underline{\varepsilon}_i^{-1} \text{ se definen como } \varepsilon_i^{-1} = \frac{1}{\sqrt{{}_1\varepsilon_i^2 + {}_0\varepsilon_i^2}} \text{ y } \Delta u \text{ es un vector}$$

con solo un elemento diferente de cero (Δu_j) correspondiente a la corriente de flujo de quemador que se ajustó para el ensayo de bucle abierto. Se puede llevar a cabo cualquier número de ensayos de bucle abierto para obtener más información de temperatura (${}_2T, {}_3T, \dots$) para validar la forma del elemento funcional elegido para g_{ij} , refinar las estimaciones de parámetro, para desarrollar estimaciones de parámetro para las clases adicionales de flujos de quemador o en diferentes condiciones de funcionamiento.

De forma alternativa a los ensayos de bucle abierto, la segunda condición de funcionamiento en la que se mide la segunda información de temperatura puede ser el resultado de ajustar la primera válvula de acuerdo con el primer conjunto de disolución de caudal objetivo. Con cada ajuste de una o más válvulas, se puede medir información de temperatura adicional y se pueden utilizar los resultados para actualizar las estimaciones de parámetro.

El método de funcionamiento del horno 102 puede comprender además el cálculo de un segundo conjunto de disolución de caudal objetivo que tiene disoluciones para los dos o más de la pluralidad de quemadores consistentes con el ajuste de las temperaturas de la pluralidad de tubos de proceso al criterio de temperatura objetivo utilizando la estimación o una estimación actualizada de la función matemática y usando la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso. La estimación de la función matemática o una estimación actualizada de la función matemática se evalúa utilizando los valores proporcionados en la segunda información de temperatura para calcular el segundo conjunto de disolución de caudal objetivo. El segundo conjunto de disolución de caudal objetivo

tiene disoluciones actualizadas o segundas para los dos o más de la pluralidad de quemadores. Se podría utilizar la misma estimación de la función matemática utilizada previamente para calcular el segundo conjunto de disolución de caudal objetivo o se podría proporcionar una estimación actualizada de la función matemática en base a la nueva información de temperatura. En caso de que se utilice una estimación actualizada de la función matemática, la estimación de la función matemática se actualiza a partir de la segunda información de temperatura. La función matemática se actualiza mediante una reestimación de los parámetros del elemento funcional (\hat{a}_k) utilizando la nueva información procedente de los segundos datos de temperatura. En el caso de que haya múltiples condiciones que den lugar a múltiples lecturas de temperatura y múltiples posiciones de válvula, el resultado se combina por

$$\underset{\forall a_k}{\text{Min}} \sum_{\forall \ell} \left\| \left(\Delta_{\ell} T - \underline{G} \Delta_{\ell} u \right) \circ_{\ell} \underline{\varepsilon}^{-1} \right\|$$

donde ℓ es el índice que identifica cada una de las diferentes condiciones evaluadas.

Se pueden tener en cuenta las restricciones relacionadas con las posiciones de válvula mínimas y/o máximas permisibles para estimar la siguiente acción de control. La restricción puede ser una restricción física (es decir, una válvula completamente abierta o completamente cerrada). La restricción puede estar basada en la experiencia de que una válvula no debería estar abierta o cerrada más allá de una posición determinada. Otras restricciones pueden deberse al número total de quemadores que se permite que se muevan en cada iteración, o al número total de válvulas que se permite que se cierren, o al cambio máximo que se permite en la contrapresión.

Después de que se calcula el segundo conjunto de disolución de caudal objetivo, el método de funcionamiento de horno puede entonces comprender además el ajuste de la primera válvula o una segunda válvula situada más arriba de al menos uno de los dos o más de la pluralidad de quemadores para cambiar al menos uno de los caudales de los dos o más de la pluralidad de quemadores de acuerdo con el segundo conjunto de disolución de caudal objetivo. La primera válvula o la segunda válvula que se ajusta no es una válvula de gas oxidante principal o una válvula de combustible principal para el control del flujo total hacia la totalidad del horno que se controla mediante métodos tradicionales, es más bien una válvula que controla el flujo hacia un subconjunto apropiado de los quemadores y por consiguiente afecta a la distribución del flujo.

Se puede hacer funcionar el horno para ajustar primero las válvulas de cabecera que regulan cada hilera de quemadores y a continuación ajustar las válvulas de quemador individual que regulan cada quemador individual.

La pluralidad de quemadores puede comprender dos o más hileras de quemadores y la primera válvula que se ajusta en respuesta al primer conjunto de disolución de caudal objetivo puede estar situada más arriba de una primera hilera de quemadores. Una hilera de quemadores es una pluralidad de quemadores conectados a una cabecera común y que tienen salidas dispuestas en una línea sustancialmente recta. La segunda válvula que se ajusta en respuesta al segundo conjunto de disolución de caudal objetivo puede estar situada más arriba de un único quemador de los dos o más de la pluralidad de quemadores para cambiar al menos uno de los caudales del único quemador de acuerdo con el segundo conjunto de disolución de caudal objetivo. Dado que la segunda válvula regula solamente un único quemador, la segunda válvula no está situada más arriba de ningún quemador aparte del único quemador.

La definición de las clases de corrientes de flujo de quemador y la representación del cambio en la temperatura de pared de tubo a los cambios en las corrientes de flujo de quemador con una única expresión para cada clase constituyen una herramienta poderosa que aprovecha el patrón geométrico uniforme del horno y permite que la matriz de ganancia esté más llena por completo de relativamente pocas perturbaciones (es decir, una para cada clase). La Figura 1 muestra que los tubos 14 que rodean el quemador 16 se encuentran en una relación similar a los tubos 24 que rodean el quemador 26. Se espera que los tubos 24 respondan a los cambios en el quemador 26 de manera muy similar a como responden los tubos 14 a los cambios en el quemador 14. Esta expectativa se ha verificado de forma experimental. Del mismo modo, la definición de cada elemento de la matriz de ganancia en base a una forma funcional que esté relacionada con las consideraciones geométricas (la distancia entre el quemador y el tubo) mejora aún más la eficiencia del método. Esto asegura que los efectos relativamente menores en los tubos lejanos se tengan en consideración, aunque solo sea de forma aproximada. La suma de los efectos menores puede resultar significativa, así que ignorarlos por completo vuelve menos eficiente la solución final de este gran problema dimensional.

En una realización, después de calcular un conjunto de disolución de caudal objetivo, las válvulas situadas más arriba de cada quemador se pueden ajustar de una en una, la información de temperatura se puede medir después de cada ajuste, y la información de temperatura medida después de cada ajuste se puede utilizar para actualizar la estimación a la función matemática. La actualización a la estimación de la función matemática se puede llevar a cabo después de que se hayan realizado algunos o todos los cambios prescritos con anterioridad del conjunto de disolución de caudal objetivo previo. Este enfoque tiene la ventaja de mejorar de manera más inmediata la estimación de la función matemática.

En esta realización, la primera válvula está situada más arriba de un solo primer quemador de los dos o más de la pluralidad de quemadores. El método puede entonces comprender además la medición de la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso en una segunda condición de funcionamiento en la que la

segunda condición de funcionamiento resulta del ajuste de la primera válvula, el ajuste de una segunda válvula de acuerdo con el primer conjunto de disolución de caudal objetivo en la que la segunda válvula está situada más arriba de un solo segundo quemador de los dos o más de la pluralidad de quemadores, la medición de la tercera información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso en una tercera condición de funcionamiento en la que la tercera condición de funcionamiento resulta del ajuste de la segunda válvula de acuerdo con el primer conjunto de disolución de caudal objetivo, la actualización de la estimación de la función matemática a partir de la segunda información de temperatura y la tercera información de temperatura, formando de esta manera la estimación actualizada de la función matemática, el cálculo de un segundo conjunto de disolución de caudal objetivo que tiene disoluciones para los dos o más de la pluralidad de quemadores consistentes con el ajuste de las temperaturas de la pluralidad de tubos de proceso al criterio de temperatura objetivo utilizando la estimación actualizada de la función matemática; y el ajuste de al menos una de la primera válvula, la segunda válvula o una tercera válvula situada más arriba de los dos o más de la pluralidad de quemadores para cambiar al menos uno de los caudales de los dos o más de la pluralidad de quemadores de acuerdo con el segundo conjunto de disolución de caudal objetivo en los que la tercera válvula no está situada arriba de todos los quemadores en el horno de reformador.

La presente invención se entenderá mejor con referencia al siguiente ejemplo, que tiene por objeto ilustrar, pero no limitar el alcance de la invención.

20 EJEMPLO 1

Este ejemplo ilustra el método en la práctica.

Etapa 1. Se eligió el criterio de temperatura objetivo para las temperaturas de tubo uniformes dentro del horno, $w \|(T - \bar{T})\|_2 + (1 - w) \|(T - \bar{T})\|_\infty$. Este criterio constituye la suma ponderada de la diferencia de la norma euclídea y la norma ∞ entre la temperatura de tubo individual y la media de todas las temperaturas de tubo que están registradas.

Etapa 2. La información de temperatura en una condición inicial, T_j , que comprende los datos para cada uno de la pluralidad de tubos de proceso j se midió utilizando una cámara digital modificada, donde j es 1 en todo el número total de tubos de proceso visibles en el horno, N_{tubo} . En este caso, más del 90 % de los tubos fueron visibles en las imágenes. La información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso se midió capturando una pluralidad de imágenes (sacando una "foto") de una zona interior del horno de reformador, donde al menos algunas imágenes de la pluralidad de imágenes están asociadas con diferentes partes de la zona interior del horno de reformador, en las que cada imagen de la pluralidad de imágenes comprende datos de píxeles asociados con una parte de la pluralidad de tubos de proceso. La información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso se obtuvo entonces procesando una parte de los datos de píxeles. Se sacaron las "fotos" de los tubos y se utilizó una correlación para convertir las imágenes a un valor de temperatura y a la incertidumbre respectiva. La estimación de la incertidumbre en la temperatura de pared de tubo fue proporcionada por la desviación típica de la estimación de la temperatura de pared de tubo y designada como ϵ_j . Las temperaturas T_j juntas en la condición inicial forman un vector de temperatura que se designa \underline{T} . Las incertidumbres ϵ_j juntas en la condición inicial forman un vector de incertidumbre $\underline{\epsilon}$. Los datos de temperatura iniciales mostraron una propagación de temperatura de más de 50° C, que es coherente con la propagación de temperatura alcanzable utilizando las técnicas de la técnica anterior.

Etapa 3. Se realizó una estimación de una función matemática, $\Delta T = \underline{G} \Delta u$, utilizando el conocimiento anterior. La función matemática caracteriza una relación entre los cambios en la temperatura de pared de tubo y los cambios en la posición de válvula que controla el flujo del combustible1 hacia un quemador individual. \underline{G} es una matriz con elementos funcionales $g_{l,j}$ y dimensiones $N_{quemador} \times N_{tubo}$.

La forma de los elementos funcionales $g_{l,j}$ en este ejemplo fue

$$g_{l,j} = a_1 \times \exp(a_2 d_{l,j}) + a_3$$

donde los elementos funcionales $g_{l,j}$ son las ganancias para un cambio en la posición de válvula (medida en° C/porcentaje de apertura de válvula) asociadas con la corriente de combustible combustible1 en el quemador l y el tubo de reactor j , $d_{l,j}$ es la distancia desde el tubo de reactor j hasta el quemador l (medida en metros) y a_1 , a_2 y a_3 son parámetros que correlacionan la relación entre los caudales de quemador y las temperaturas de tubo de reactor. Los valores iniciales de a_1 , a_2 y a_3 fueron 45 (° C/%), $-2,3 \text{ m}^{-1}$, 0,5 (°C/%), respectivamente. Los valores iniciales de a_1 , a_2 y a_3 se proporcionaron en base a estimaciones. La posición de válvula está relacionada con el flujo de corriente de combustible a través de una curva de válvula (que describe la resistencia de la válvula), el diferencial de presión y las propiedades físicas del fluido. Matemáticamente esta conversión se consigue mediante la aplicación de la regla de cadena. En este ejemplo, no se calculó el cambio de flujo de corriente real; en lugar de eso, la variable

determinada fue el cambio en la posición de válvula que afecta al flujo.

5 Etapa 4. En este horno, hay dos quemadores de tamaños diferentes. Los quemadores de la hilera lateral (aquellos adyacentes a una pared refractaria) son solamente un 65% igual de grandes que los quemadores en el interior del horno. Un cambio de porcentaje en la posición de válvula de un quemador de hilera lateral tiene solamente un ~65% de tanto cambio en el flujo de corriente de combustible (y por consiguiente en la temperatura de pared de tubo) como un cambio similar en un quemador de hilera interior. Para representar esto, todos los elementos de ganancia asociados con los quemadores de hilera lateral se multiplican por este factor de trabajo, 0,65.

10 Entonces las ganancias modificadas, $g'_{I,j}$, para los quemadores laterales son:

$$g'_{I,j} = 0.65 g_{I,j},$$

15 para cada I que corresponde a un quemador lateral.

Etapa 5. Se utilizaron las temperaturas de tubo medidas, \underline{T} , el vector de incertidumbre $\underline{\epsilon}$, la estimación actual de \underline{G} , y una función de ponderación w para estimar los cambios en la posición de válvula que determinarán el flujo de combustible hacia cada quemador, $\Delta \underline{u}$, que mejor cumplió el criterio de temperatura objetivo. El criterio de temperatura objetivo elegido contiene un factor de ponderación, w que inicialmente se fijó en 1,0. Hemos descubierto que comenzando con $w = 1$ y terminando con $w = 0,5$ el balance de horno converge más rápidamente que con un valor constante de w . El cambio en la posición de válvula que controla el flujo de corriente de combustible a través de cada quemador se calcula tal que

$$\begin{aligned} & \underset{\Delta \underline{u}}{\text{Min}} \left(w \left\| \left(\underline{T} - \bar{T} - \underline{G} \Delta \underline{u} \right) \circ \underline{\epsilon}^{-1} \right\|_2 + (1-w) \left\| \left(\underline{T} - \bar{T} - \underline{G} \Delta \underline{u} \right) \circ \underline{\epsilon}^{-1} \right\|_{\infty} \right) \\ & \text{s.t. } LB_i \leq \Delta u_i \leq UB_i \forall i \end{aligned}$$

25 sujeto a una limitación para una cota inferior, LB_i del 20% de abertura y una cota superior, UB_i , del 100% de abertura para cada Δu_i . Hemos descubierto que incluir una restricción adicional que limite el número de cambios de válvula a 5 permite una implementación práctica más sencilla, mejora la estabilidad de la convergencia y elimina los cambios pequeños de válvula irrelevantes. Este conjunto de cambios de válvula que cumple la minimización es la solución de ajuste.

Etapa 6. Se realizan los 5 cambios de válvula asociados con la disolución de ajuste a las válvulas de quemador. Después de que tuviera lugar el efecto de los cambios de caudal de corriente de quemador sobre las temperaturas de tubo (esperamos un mínimo de 2 horas en cada iteración), se recogió información de temperatura de tubo adicional que comprende datos para cada uno de los tubos utilizando la cámara digital modificada como en la etapa 2. Se sacaron "fotos" de los tubos y se utilizó una correlación para convertir las imágenes a valores de temperatura en una segunda condición, representada como un vector, \underline{T} , con un vector de incertidumbre correspondiente $\underline{\epsilon}$ para cada uno de la pluralidad de tubos de proceso.

40 Etapa 7. Después del movimiento de válvula inicial, la variación de temperatura se redujo a menos de 50° C, pero el tubo más caliente todavía estaba por encima de la temperatura necesaria para la vida útil máxima de tubo. Así, se continuó el método actualizando en primer lugar los parámetros a_1 , a_2 y a_3 según la etapa 8.

Etapa 8. Dados los nuevos datos de temperatura, \underline{T} , con la incertidumbre correspondiente $\underline{\epsilon}$, los datos de temperatura previos \underline{T}_0 , con la incertidumbre correspondiente $\underline{\epsilon}_0$, y los cambios de válvula de quemador correspondientes, $\Delta \underline{u}$, se llevó a cabo una reestimación de los parámetros a_1 , a_2 y a_3 . La reestimación de los parámetros a_1 , a_2 y a_3 se lleva a cabo en función de

$$\underset{a_1, a_2, a_3}{\text{Min}} \left\| \left(\left(\underline{T} - \underline{T}_0 \right) - \underline{G} \times \Delta \underline{u} \right) \circ \left(\sqrt{\left(\underline{\epsilon}^2 + \underline{\epsilon}_0^2 \right)} \right)^{-1} \right\|$$

50 Para la primera actualización, solo está disponible un conjunto de datos para la reestimación de los parámetros a_1 , a_2 y a_3 como se muestra en esta ecuación. En etapas posteriores, se incluyeron todas las etapas de tiempo previas como se expuso con anterioridad.

Las etapas 3 a 8 se repiten utilizando los parámetros actualizados a_1 , a_2 y a_3 en cada iteración. Después de 3 iteraciones, la temperatura de tubo máxima era de menos de 15° C por encima de la media y la variación total era de ~40° C. Los valores finales de los parámetros a_1 , a_2 y a_3 fueron 44,4 (° C/%), -3,3 m⁻¹, -23 (° C/%), respectivamente.

5 Mientras que solo se han mostrado y descrito determinadas características y realizaciones de la invención, muchas modificaciones y cambios se les pueden ocurrir a aquellos expertos en la técnica (por ejemplo, variaciones de tamaños, dimensiones, estructuras, formas y proporciones de los varios elementos, valores de los parámetros [por ejemplo, temperaturas, presiones, etc.], disposiciones de montaje, uso de los materiales, colores, orientaciones, etc.) sin alejarse materialmente de las nuevas enseñanzas y ventajas de la materia referida en las reivindicaciones. El
10 orden o la secuencia de cualesquiera etapas de proceso o método se puede variar o secuenciar de nuevo según las realizaciones alternativas. Asimismo, en un esfuerzo por proporcionar una descripción concisa de las realizaciones ejemplares, puede que no se hayan descrito todas las características de una implementación real (es decir, aquellas no relacionadas con el mejor modo contemplado en la presente memoria de llevar a cabo la invención, o aquellas no relacionadas con la posibilidad de la invención reivindicada). Se debería comprender que en el desarrollo de una
15 implementación real tal, como en cualquier proyecto de ingeniería o diseño, se pueden tomar numerosas decisiones específicas de implementación. Un esfuerzo de desarrollo tal puede resultar complejo y requerir mucho tiempo, pero sería sin embargo una tarea rutinaria de diseño, fabricación y producción para personas con experiencia ordinaria en la técnica que tengan la ventaja de la presente descripción, sin una experimentación excesiva.

20

REIVINDICACIONES

1. Un método de funcionamiento de un horno (102) que tiene una pluralidad de quemadores (108), en el que cada uno de la pluralidad de quemadores (108) tiene caudales asociados con los mismos, en el que el horno (102) comprende una pluralidad de tubos de proceso (104), en el que el método comprende:

(a) seleccionar el criterio de temperatura objetivo para la pluralidad de tubos de proceso (104);
 (b) medir la primera información de temperatura que comprende datos para cada uno de la pluralidad de tubos de proceso (104) en una primera condición de funcionamiento en la que la primera información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso (104) se mide:

capturando una primera pluralidad de imágenes de una zona interior (106) del horno (102), en las que al menos algunas imágenes de la primera pluralidad de imágenes están asociadas con diferentes partes de la zona interior (106) del horno (102), en las que cada imagen de la primera pluralidad de imágenes comprende los primeros datos de píxeles asociados con una parte de la pluralidad de tubos de proceso (104); y
 procesando una parte de los primeros datos de píxeles para obtener la primera información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso (104);

(c) proporcionar una estimación de una función matemática que caracterice una relación entre los cambios de caudal de quemador para dos o más de la pluralidad de quemadores (108) y los cambios de temperatura individuales para al menos una parte de la pluralidad de tubos de proceso (104);

(d) calcular un primer conjunto de disolución de caudal objetivo que tiene disoluciones para los dos o más de la pluralidad de quemadores (108) consistentes con el ajuste de las temperaturas de la pluralidad de tubos de proceso (104) al criterio de temperatura objetivo para la pluralidad de tubos de proceso (104) utilizando la estimación de la función matemática y la primera información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso (104); y

(e) ajustar una primera válvula situada más arriba de al menos uno de los dos o más de la pluralidad de quemadores (108) para cambiar al menos uno de los caudales de los dos o más de la pluralidad de quemadores (108) de acuerdo con el primer conjunto de disolución de caudal objetivo en los que la primera válvula no está situada más arriba de todos los quemadores (108) del horno (102).

2. El método de la reivindicación 1 que comprende además:

medir la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso (104) en una segunda condición de funcionamiento diferente de la primera condición de funcionamiento; y
 en el que la estimación de la función matemática proporcionada en la etapa (c) se calcula utilizando la primera información de temperatura y la segunda información de temperatura.

3. El método de la reivindicación 1 que comprende además:

medir la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso (104) en una segunda condición de funcionamiento diferente de la primera condición de funcionamiento y posterior a la primera condición de funcionamiento;

calcular un segundo conjunto de disolución de caudal objetivo que tiene disoluciones para los dos o más de la pluralidad de quemadores (108) consistentes con el ajuste de las temperaturas de la pluralidad de tubos de proceso (104) al criterio de temperatura objetivo utilizando la estimación o una estimación actualizada de la función matemática y utilizando la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso (104); y

ajustar la primera válvula o una segunda válvula situada más arriba de al menos uno de los dos o más de la pluralidad de quemadores (108) para cambiar al menos uno de los caudales de los dos o más de la pluralidad de quemadores (108) de acuerdo con el segundo conjunto de disolución de caudal objetivo en el que la segunda válvula no está situada más arriba de todos los quemadores (108) del horno (102).

4. El método de la reivindicación 1 en el que la pluralidad de quemadores (108) comprende dos o más hileras de quemadores (108)

y en el que la primera válvula está situada más arriba de una primera hilera de quemadores (108), en el que el método comprende además:

medir la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso (104) en una segunda condición de funcionamiento diferente de la primera condición de funcionamiento y posterior a la primera condición de funcionamiento;

calcular un segundo conjunto de disolución de caudal objetivo que tiene disoluciones para los dos o más de la pluralidad de quemadores (108) consistentes con el ajuste de las temperaturas de la pluralidad de tubos de proceso (104) al criterio de temperatura objetivo utilizando la estimación o una estimación actualizada de la función matemática y utilizando la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso

(104); y

ajustar una segunda válvula situada más arriba de un único quemador (108) de los dos o más de la pluralidad de quemadores (108) para cambiar al menos uno de los caudales del único quemador (108) de acuerdo con el segundo conjunto de disolución de caudal objetivo en el que la segunda válvula no está situada más arriba de ningún quemador (108) aparte del único quemador (108).

5. El método de las reivindicaciones 3 o 4 en el que la segunda condición de funcionamiento resulta de la etapa (e).

6. El método de una cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5 que comprende además:

actualizar la estimación de la función matemática a partir de la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso (104), formando de esta manera la estimación actualizada de la función matemática; y

en el que la etapa del cálculo del segundo conjunto de disolución de caudal objetivo utiliza la estimación actualizada de la función matemática.

7. El método de la reivindicación 1 en el que la primera válvula está situada más arriba de un solo primer quemador (108) de los dos o más de la pluralidad de quemadores (108), en el que el método comprende además:

medir la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso (104) en una segunda condición de funcionamiento en la que la segunda condición de funcionamiento resulta de la etapa (e);

ajustar una segunda válvula de acuerdo con el primer conjunto de disolución de caudal objetivo en el que la segunda válvula está situada más arriba de un solo segundo quemador (108) de los dos o más de la pluralidad de quemadores (108);

medir la tercera información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso (104) en una tercera condición de funcionamiento en la que la tercera condición de funcionamiento resulta del ajuste de la segunda válvula de acuerdo con el primer conjunto de disolución de caudal objetivo;

actualizar la estimación de la función matemática a partir de la segunda información de temperatura y la tercera información de temperatura, formando de esta manera la estimación actualizada de la función matemática;

calcular un segundo conjunto de disolución de caudal objetivo que tiene disoluciones para los dos o más de la pluralidad de quemadores (108) consistentes con el ajuste de las temperaturas de la pluralidad de tubos de proceso (104) al criterio de temperatura objetivo utilizando la estimación actualizada de la función matemática;

y
ajustar al menos una de la primera válvula, la segunda válvula o una tercera válvula situada más arriba de los dos o más de la pluralidad de quemadores (108) para cambiar al menos uno de los caudales de los dos o más de la pluralidad de quemadores (108) de acuerdo con el segundo conjunto de disolución de caudal objetivo en los que la tercera válvula no está situada más arriba de todos los quemadores (108) en el horno (102).

8. El método de cualquiera de las reivindicaciones 2 a 7 en el que la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso (104) se mide:

capturando una segunda pluralidad de imágenes de la zona interior (106) del horno (102), en el que al menos algunas imágenes de la segunda pluralidad de imágenes están asociadas con diferentes partes de la zona interior (106) del horno (102),

en el que cada imagen de la segunda pluralidad de imágenes comprende los segundos datos de píxeles asociados con una parte de la pluralidad de tubos de proceso (104); y

procesando una parte de los segundos datos de píxeles para obtener la segunda información de temperatura para la pluralidad de tubos de proceso (104).

9. El método de la reivindicación 8 en el que la primera información de temperatura incluye los valores de incertidumbre y la segunda información de temperatura incluye los valores de incertidumbre; y

en el que la estimación de la función matemática y/o la estimación actualizada de la función matemática se calculan utilizando los valores de incertidumbre de la primera información de temperatura y los valores de incertidumbre de la segunda información de temperatura.

10. El método de cualquier reivindicación precedente en el que la estimación de la función matemática comprende los valores calculados a partir de los elementos funcionales en los que cada uno de los elementos funcionales comprende una forma funcional que comprende un primer parámetro funcional, un segundo parámetro funcional y un parámetro geométrico que caracterizan las distancias entre cada uno de la pluralidad de tubos de proceso (104) y cada uno de la pluralidad de quemadores (108);

en el que el primer parámetro funcional de un primer elemento funcional de los elementos funcionales tiene el mismo valor que el primer parámetro funcional de un segundo elemento funcional de los elementos funcionales; y

en el que el segundo parámetro funcional de un primer elemento funcional de los elementos funcionales tiene el mismo valor que el segundo parámetro funcional de un segundo elemento funcional de los elementos funcionales.

11. El método de la reivindicación 10 en el que el primer parámetro funcional tiene un valor que es el mismo para cada uno de los elementos funcionales y en el que el segundo parámetro funcional tiene un valor que es el mismo para cada uno de los elementos funcionales.

5 12. El método de cualquier reivindicación precedente en el que la estimación de la función matemática se representa como

$$\underline{\Delta T} = \underline{G} \underline{\Delta u}$$

10 donde $\underline{\Delta T}$ representa los cambios de temperatura individuales para la al menos una parte de la pluralidad de tubos de proceso (104), $\underline{\Delta u}$ representa los cambios de caudal de quemador para los dos o más de la pluralidad de quemadores (108) y \underline{G} es una matriz de ganancia.

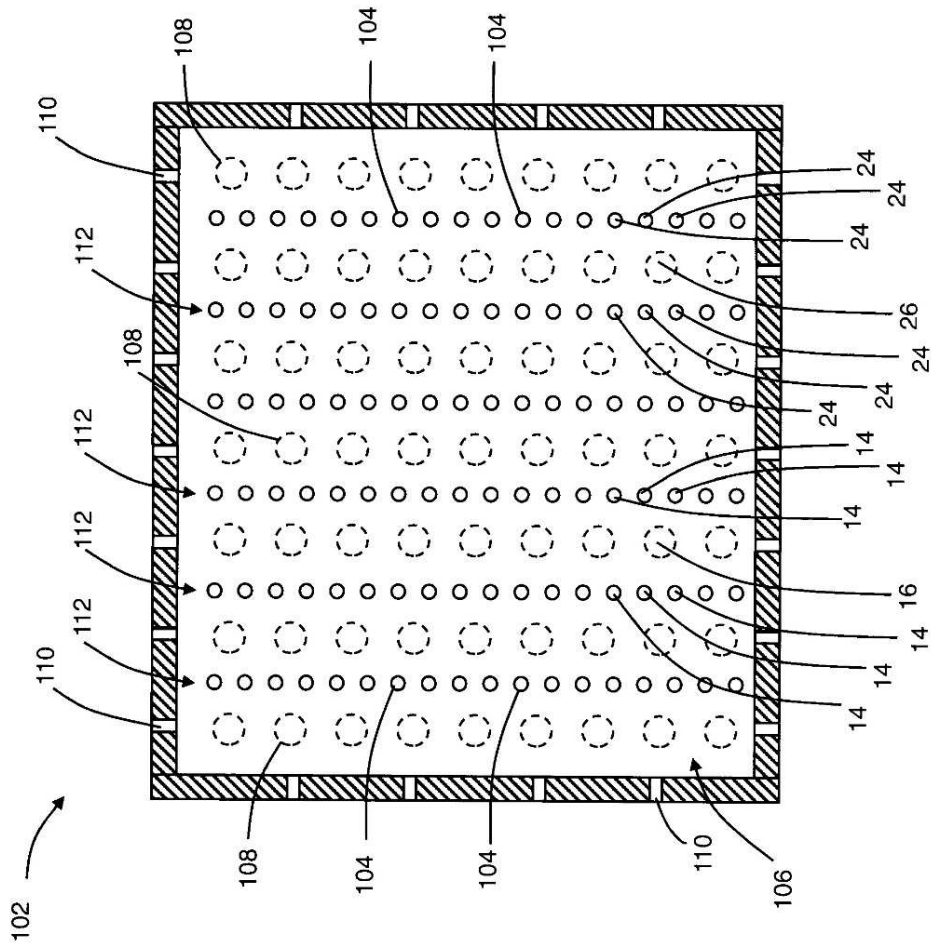


FIG. 1

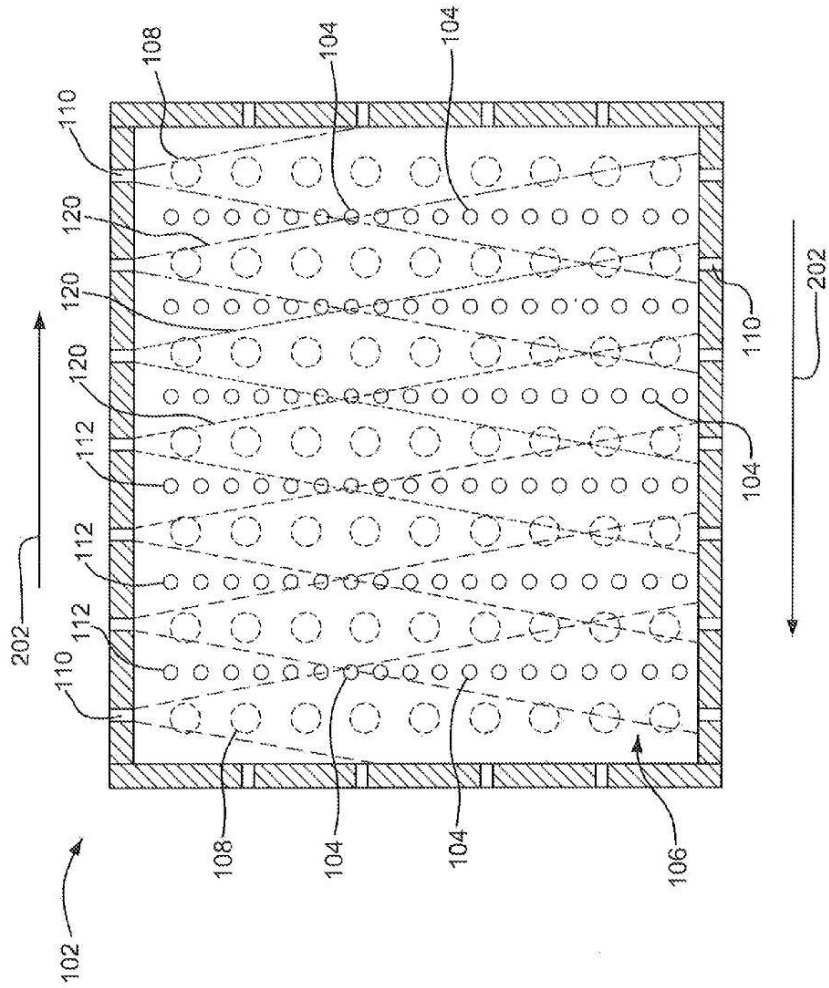
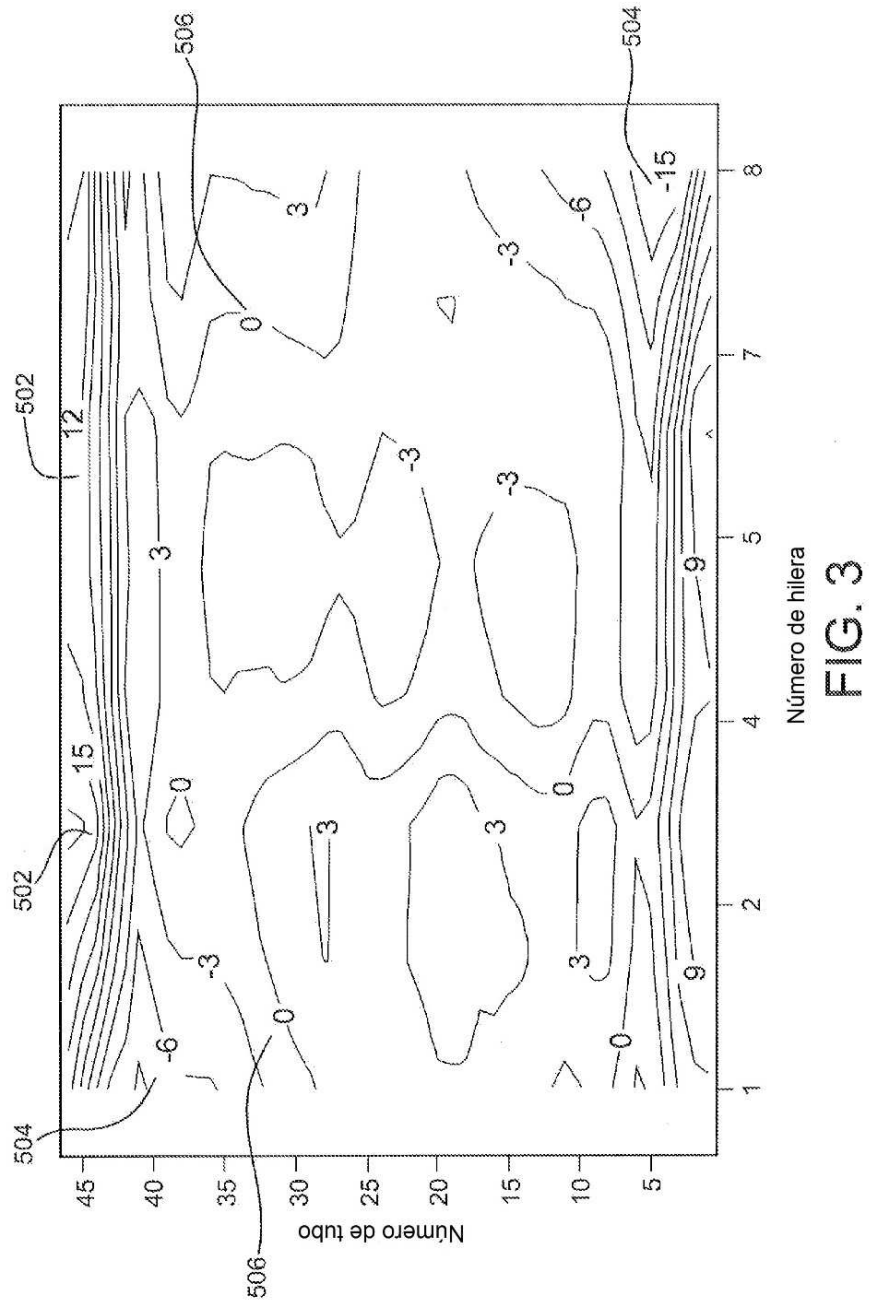


FIG. 2



Número de hilera
FIG. 3

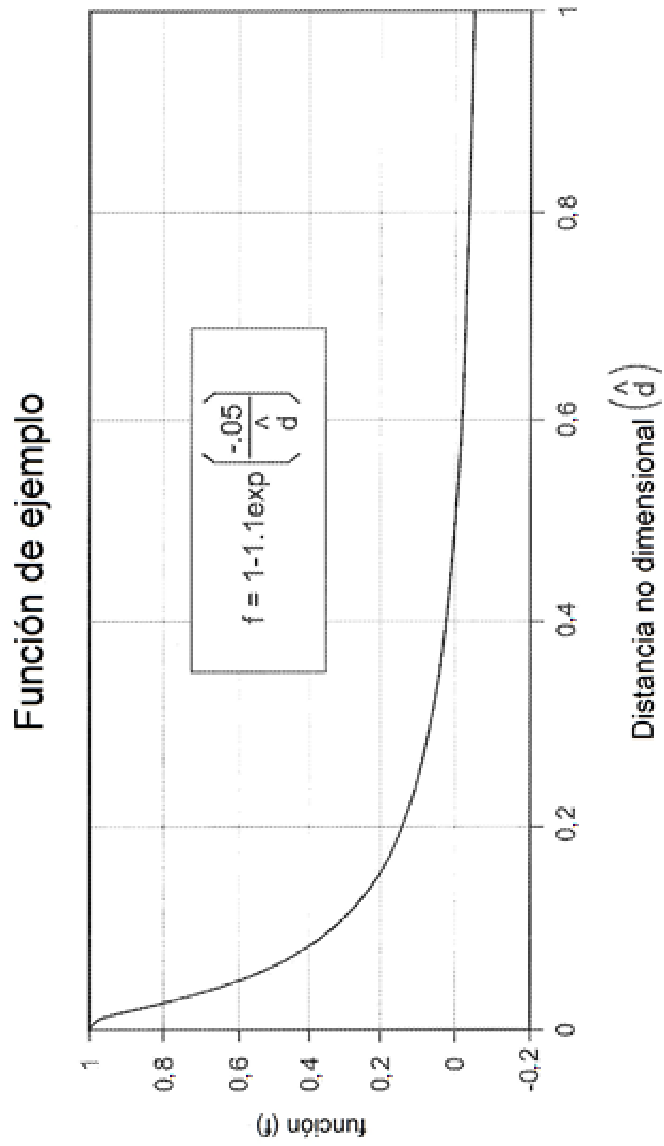


FIG. 4