

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 522 295**

51 Int. Cl.:

G01J 5/00 (2006.01)

G01J 5/06 (2006.01)

G01J 5/52 (2006.01)

G01J 5/60 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.10.2007 E 07839663 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.09.2014 EP 2082202**

54 Título: **Estimación de temperatura de superficie de pala máxima para turbinas de gas estacionarias avanzadas en el infrarrojo cercano (con reflexión)**

30 Prioridad:

20.10.2006 US 853484 P

16.10.2007 US 872758

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

14.11.2014

73 Titular/es:

SIEMENS CORPORATION (50.0%)

170 Wood Avenue South

Iselin, NJ 08830, US y

SIEMENS ENERGY, INC. (50.0%)

72 Inventor/es:

JONNALAGADDA, VINAY;

LEMIEUX, DENNIS H.;

RAMESH, VISVANATHAN y

VOIGT, MATTHIAS

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 522 295 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

Estimación de temperatura de superficie de pala máxima para turbinas de gas estacionarias avanzadas en el infrarrojo cercano (con reflexión).

Referencia cruzada a solicitudes relacionadas

- 5 Esta solicitud reivindica el beneficio de la solicitud estadounidense provisional n.º 60/853.484, presentada el 20 de octubre de 2006.

Antecedentes de la invención

10 La presente invención se refiere a la estimación de temperatura de superficie para palas con propiedades de superficie reflectantes en turbinas de gas estacionarias avanzadas. Más específicamente se refiere a estimación de temperatura en una banda de longitudes de ondas mediante formación de imágenes a alta velocidad para radiación en el infrarrojo cercano. Se describen dispositivos de pirometría y formación de imágenes térmicas en los documentos US 2006/0081777, XP 010350191, WO 2005/015143, XP 010660410, XP00909101 y XP 009099099.

15 La formación de imágenes de infrarrojos a alta velocidad proporcionada por un sistema de monitorización en línea usando una matriz de plano focal (FPA) para monitorización en el infrarrojo cercano puede usarse durante el tiempo de funcionamiento del motor hasta la carga básica para la estimación de temperatura de palas de turbina con propiedades de superficie reflectantes. El método de una banda de longitudes de onda para la estimación de temperatura puede suponerse como punto de partida. Sin embargo, una emisividad de superficie inferior y una reflectancia de superficie superior de los recubrimientos de barrera térmica (TBC) en el infrarrojo cercano pueden provocar errores de estimación sistemáticos.

20 Por consiguiente se requieren métodos y sistemas relacionados de formación de imágenes en el infrarrojo cercano de una banda de longitudes de onda nuevos y mejorados para la estimación de temperatura que reduzcan los errores de estimación.

Sumario de la invención

25 La presente invención proporciona una estimación de temperatura mejorada para turbinas de gas y otros cuerpos, según el método de la reivindicación 1.

Según aspectos adicionales de la presente invención, el método también incluye la realización de una transformación de colores falsos.

Según otro aspecto de la presente invención, el cuerpo puede formar parte del trayecto de gas caliente de una turbina de gas con propiedades de superficie reflectantes.

30 Según otro aspecto de la presente invención, la banda de longitudes de onda de longitudes de onda de λ_1 a λ_2 puede situarse dentro de la banda de longitudes de onda de la radiación infrarroja.

Según aspectos adicionales de la presente invención, λ_1 es esencialmente 900 nm y λ_2 es esencialmente 1700 nm.

Descripción de los dibujos

La figura 1 ilustra un sistema de monitorización de palas en un motor de turbina de gas.

35 La figura 2 ilustra un trayecto de señal según un aspecto de la presente invención.

La figura 3 es un diagrama de bloques de la estimación de temperatura directa en una banda de longitudes de onda según un aspecto de la presente invención.

La figura 4 es una gráfica que ilustra una respuesta de cámara de media simulada según un aspecto de la presente invención.

40 La figura 5 es una gráfica que ilustra respuestas de cámara de media medidas según un aspecto de la presente invención.

La figura 6 es una imagen en escala de grises de una pala de turbina.

La figura 7 es un diagrama isotérmico con colores falsos de una pala de turbina.

La figura 8 es una gráfica que ilustra la potencia de radiación observada en función de la temperatura según un aspecto de la presente invención.

La figura 9 es una gráfica que compara temperaturas estimadas con una temperatura real.

5 La figura 10 es una gráfica que compara errores de temperatura estimada.

La figura 11 es un ejemplo de estimación de temperatura según un aspecto de la presente invención.

La figura 12 ilustra un sistema informático que se usa para realizar las etapas descritas en el presente documento según un aspecto de la presente invención.

Descripción de una realización preferida

10 Un método para la estimación de temperatura de superficie de pala con TBC de turbina de gas máxima que constituye un aspecto de la presente invención incluye utilizar un sistema de monitorización de palas por infrarrojos en línea (OLM) existente tal como se ilustra en la figura 1. El sistema de monitorización en línea tiene la capacidad de obtener imágenes de infrarrojos de palas individuales durante el funcionamiento del motor. Las palas están expuestas al trayecto de gas caliente con temperaturas de aproximadamente 1400°C y una presión de 15 bares. La rotación de las palas de 3000 ó 3600 rpm provoca una velocidad de punta de pala de aproximadamente 390 m/s.

15 La figura 1 muestra la instalación del sistema de monitorización de palas en un motor de prueba SGT6-5000F. La radiación infrarroja procedente de la superficie de una pala se transmite por el tubo 101 de lente hasta el sensor 102 de FPA ubicado en el recinto 103 de la cámara. El sistema de monitorización en línea usa un tubo de lente, una ventana de acceso, una fase de alineación, una lente de enfoque y filtros para proyectar potencia radiante desde la superficie de la pala hasta el sensor de matriz de plano focal ubicado en el recinto refrigerado de la cámara. El tiempo de adquisición del sensor es suficientemente corto, entre 1-3 μ s para evitar desenfoque de movimiento provocado por la alta velocidad de la pala. El trayecto de señal para la estimación de temperatura de la pala y el parámetro de sistema relevante se muestran en la figura 2. La figura 2 muestra el trayecto de señal y el parámetro característico relevante para la estimación de temperatura.

20
25
30 Diversos factores tales como reflexión de superficie, absorción, emisión de gas, atenuación de lente, oscurecimiento de lente, deriva del sensor, aproximaciones numéricas u otros efectos pueden tener un impacto sobre la precisión de la estimación de temperatura. Son de esperar errores sistemáticos en la estimación de temperatura, si no se tienen en cuenta por ejemplo cambios de emisividad o la radiación reflejada. Son relevantes para la estimación de temperatura de superficie de pala dos materiales de superficie: el recubrimiento de barrera térmica (TBC) y el material de base. Se sabe que la emisividad, la reflectancia y la transmitancia del TBC puede cambiar en función de la longitud de onda, la temperatura y la antigüedad. Las palas sin revestimiento tienen propiedades de superficie diferentes a las de las palas con revestimiento. Es posible que las propiedades de superficie también puedan cambiar debido a depósitos sobre la pala.

35 La potencia radiada desde la pala es en general una mezcla de componentes emitidas, reflejadas y transmitidas. Los gases calientes entre la superficie de la pala y el tubo de lente pueden absorber y emitir radiación. La condensación de agua o depósitos sobre la superficie de la lente, el oscurecimiento de la lente o absorción, reflexión o captación de lente limitada, o filtros ópticos provocarán pérdida de señal y, en última instancia, radiación dispersa. La matriz de plano focal de InGaAs tiene una sensibilidad espectral específica en el dominio del infrarrojo cercano de desde 0,9 μ m hasta 1,6 μ m y puede captar potencia radiante dentro de este intervalo. La señal eléctrica generada a partir de la carga captada en cada elemento sensor también es una función del parámetro de cámara. La señal puede distorsionarse por ruido del sensor y faltas de uniformidad espaciales.

Resumen de algunos efectos que pueden comprometer la estimación de temperatura:

- Incertidumbre en la emisividad objetivo (debido a depósitos, antigüedad, sensibilidad a la temperatura y longitud de onda)
- 45 - Radiación reflejada desde los alrededores
- Radiación transmitida desde el revestimiento adhesivo
- Emisión o absorción desde el punto de vista del trayecto de gas caliente

- Depósitos sobre la superficie de la lente
- Oscurecimiento de la lente
- Sensibilidad del sensor y ruido del sensor con un tiempo de integración de 1-3 μ s

ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE DE PALA DE UNA BANDA DE LONGITUDES DE ONDA DIRECTA

El método de estimación de temperatura de superficie de pala de una banda de longitudes de onda directa se basa en la relación entre la temperatura de la superficie de la pala y la potencia radiante emitida tal como se describe por la ley de Planck.

$$Planck(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5 \exp(c_2 / \lambda T) - 1} \quad (2-1)$$

10 donde:

$Planck(\lambda)$ – Emitancia radiante espectral, $W\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}$

λ - Longitud de onda

$c_1 = 2\pi h c_2 = 3,7414E4$ – Primera constante de radiación

$c_2 = ch / k = 1,43879E4$ - Segunda constante de radiación

15 T - Temperatura absoluta del material en K

ϵ_λ - Emisividad espectral del material

Se supone que la potencia radiante emitida térmica es una función de la temperatura de superficie T y la emisividad de superficie ϵ . Una lente dirigida hacia el objetivo desde una distancia d con una característica de transferencia espectral $Lente(\lambda, d)$ capta y proyecta radiación desde el objetivo sobre la matriz de sensor de FPA. Cada elemento sensor en la matriz puede acumular radiación incidente dependiendo de la sensibilidad espectral del sensor $Sensor(\lambda)$ durante un tiempo de integración dado Δt . La carga acumulada en cada elemento sensor se amplifica entonces y se convierte a una representación digital descrita por la función de respuesta de cámara $Cam()$.

$$Valor_{\text{píxel}} = Cam \left(\int_{\lambda=900nm}^{+\Delta t} \int_{\lambda=1700nm}^{+\Delta t} Sensor(\lambda) Lente(\lambda, d) Planck(T, \lambda) \epsilon d \lambda dt \right) \quad (2-2)$$

El método de estimación de temperatura directa en una banda de longitud de onda supone que la relación entre temperatura de superficie T y valor de píxel de sensor, ecuación (2-2) puede registrarse experimentalmente e invertirse. En la práctica, el sistema sensor de estimación de temperatura se calibra antes de la prueba registrando la relación entre temperatura de superficie de TBC y valor de recuento de píxeles observados desde el sensor usando una muestra de TBC en un horno con temperatura controlada. Es importante que la configuración de la calibración, la geometría de configuración, el sistema de lente, los ajustes de cámara y los filtros sean en principio idénticos a la configuración de prueba.

Durante la prueba, una vez obtenida una nueva imagen de la escena, se usa la correspondencia inversa para recuperar temperaturas de superficie a partir de valores de recuento de píxeles del sensor. Un diagrama de bloques del método directo de una banda de longitudes de onda se muestra en la figura 3. La figura 3 muestra un diagrama de bloques para la estimación de temperatura de una banda de longitudes de onda directa: en primer lugar se corrige una imagen de entrada para eliminar las faltas de uniformidad espacial de la imagen. Se han dado a conocer métodos para corregir la imagen de entrada en cuanto a faltas de uniformidad en la solicitud de patente estadounidense 11/122.568 presentada el 5 de mayo de 2005. El resultado es una imagen corregida en cuanto a la falta de uniformidad (NUC). Una imagen NUC se transforma entonces en un mapa de temperatura usando una curva de calibración inversa. El mapa de temperatura puede transformarse entonces en una representación de temperatura de colores falsos para una mejor visualización.

En este proceso se supone que la configuración de hardware entre calibración y prueba son en principio idénticas y que la emisividad objeto no cambia con el tiempo. No se tienen en cuenta explícitamente distorsiones de señal debidas a señales adicionales reflejadas o transmitidas. Es importante que los parámetros de sensor se mantengan idénticos entre calibración y medición.

- 5 La relación entre temperatura de superficie y valores de respuesta de píxel se registra en dos transformaciones. La primera transformación es una corrección de falta de uniformidad (NUC) específica del sensor. La finalidad de la NUC es reducir variaciones entre elementos sensores (píxeles). Estas variaciones pueden incluir faltas de uniformidad dependientes del píxel provocadas por la matriz de sensor o atenuación de lente no uniforme espacial. La corrección de lente es por ejemplo un efecto de oscurecimiento de lente no uniforme espacial.
- 10 La transformación NUC requiere una transformación individual para cada elemento sensor en el FPA. Se representan funciones NUC individuales para elementos sensores (x,y) en la matriz de plano focal (FPA) mediante polinomios de orden inferior:

$$NUC(x, y, I(x, y)) \approx \sum_{k=0}^n b_k(x, y) I^k(x, y) \quad (2-3)$$

- 15 La estimación de los numerosos parámetros $b_k(x,y)$ es el resultado de un procedimiento de calibración de NUC de cámara fuera de línea usando una esfera de integración o una calibración de NUC basada en la escena en línea usando datos en línea. La finalidad principal de una transformación NUC es eliminar el ruido de patrón fijo de la imagen. Una vez eliminadas las faltas de uniformidad de imagen espaciales sistemáticas, la señal restante puede transformarse a valores de temperatura. En la figura 4 y la figura 5 se muestran una curva teórica y una experimental de la relación entre temperatura de superficie de TBC y valores de recuento de píxeles de cámara corregidos. La
- 20 la curva de calibración inversa, aproximada de nuevo por una función polinómica de orden inferior, ecuación (2-4), se usa como transformación para mapear los valores de recuento de píxeles medidos con temperaturas.

$$T(I) \approx \sum_{k=0}^m c_k I^k \quad (2-4)$$

- 25 La figura 4 muestra una respuesta de cámara de media simulada para una fuente puntual de TBC en el intervalo de temperaturas de desde 800 hasta 1400 K usando una función de respuesta de cámara lineal y la sensibilidad espectral del detector de InGaAs en la cámara Alpha de FLIR/Indigo. La figura 5 muestra la respuesta de cámara de media medida usando una muestra de botón de TBC ubicada en un horno de ladrillo. Se usó una cámara Alpha con un FPA de InGaAs de FLIR como sensor.

- 30 Los parámetros c_k de la curva de estimación de temperatura en la ecuación (2-4) se estiman minimizando el error cuadrático medio ponderado, ecuación (2-5), entre la temperatura objetivo de calibración medida T y la respuesta de sensor corregida en cuanto a la falta de uniformidad observada I , usando n muestras ($i = 1 \dots n$).

$$Q = \sum_{i=1..n} w_i \left(T_i - \sum_{k=0}^m c_k I_i^k \right)^2 \quad (2-5)$$

- 35 Una pequeña diferencia en la forma de la curva entre el resultado teórico y el experimental en las figuras 4 y 5 puede explicarse por la curva de respuesta de sensor no lineal de la cámara de InGaAs real. El resultado teórico considera una curva de respuesta de sensor lineal solo. Puede obtenerse más información sobre la calibración a partir del informe técnico TR-05178 de Siemens Power Generation, Orlando. El sistema de monitorización de palas en línea se usó para la estimación de temperatura de superficie directa de palas de una turbina de gas estacionaria en funcionamiento. Las imágenes se corrigen en primer lugar en cuanto a la falta de uniformidad usando conjuntos de parámetros específicos de los ajustes de cámara $b_k(x, y)$. Las imágenes NUC se transforman entonces a valores de temperatura usando la curva de calibración inversa, ecuación (2- 4). Una curva de calibración es válida para ajustes
- 40 de sistema específicos, tales como tipo de filtro y parámetro de sensor, incluyendo el tiempo de integración. Los mapas de temperatura se convierten entonces a colores falsos para una mejor visualización. Las figuras 6 y 7 muestran imágenes de la temperatura de superficie de pala. La figura 6 es una imagen en escala de grises y la figura 7 un diagrama isotérmico correspondiente en colores falsos.

ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA DE ESCENA MÁXIMA USANDO UNA BANDA DE LONGITUDES DE ONDA

- 45 La estimación de temperatura de escena máxima descrita se deriva de un límite de temperatura superior. Se consideran tres modelos de formación de imágenes diferentes: fuente puntual de cuerpo negro, fuente puntual de

cuerpo gris, fuente puntual de cuerpo gris con reflexión. El más realista es el modelo de cuerpo gris con reflexión. El análisis muestra en qué medida se aproxima un modelo de fuente puntual de cuerpo gris al modelo de fuente puntual de cuerpo gris con reflexión si son de interés las temperaturas máximas en la escena. Los errores de aproximación para el modelo de fuente puntual de cuerpo gris y para el modelo de cuerpo negro se comparan en detalle. Si se usa la curva de calibración de cuerpo negro en NIR para estimación de temperatura de pala con TBC, las temperaturas máximas se subestimarán significativamente en más de 100 Kelvin. El uso de una curva de calibración de cuerpo gris en NIR sobreestimarán sistemáticamente las temperaturas, pero el error de estimación disminuye a medida que aumentan las temperaturas máximas de la escena en comparación con la temperatura promedio del entorno.

5

10 LÍMITE SUPERIOR DE ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA

Si $B(T, \lambda)$ es la radiancia espectral de la ley de Planck y $S(\lambda)$ es la captación y sensibilidad espectral de un sensor y la lente según se describe en Richard D. Hudson, Jr. "Infrared System Engineering" John Wiley & Sons, Nueva York, 1996, la radiación de cuerpo negro observada (emisividad = 1) en el infrarrojo cercano viene dada por:

$$E_{\text{Cuerponegro}} = \int_{\lambda=900nm}^{\lambda=1700nm} S(\lambda)B(T, \lambda)d\lambda \quad (3-1)$$

15 La temperatura de superficie (en la ecuación 3-1) se describe por T y la longitud de onda se indica mediante λ . En la ecuación (3-1) y para la siguiente argumentación se supone que puede ignorarse el efecto de la dirección de visión del sensor con respecto a la superficie normal. Se trata de una aproximación justificada para TBC, donde la radiación observada es casi invariable con respecto a la dirección de visión.

20 La radiación observada desde una fuente puntual de cuerpo gris, aislada del entorno, con una emitancia de superficie espectral $\epsilon(\lambda)$ viene dada por:

$$E_{\text{FuentePuntual}} = \int_{\lambda=900nm}^{\lambda=1700nm} S(\lambda)\epsilon(\lambda)B(T, \lambda)d\lambda \quad (3-2)$$

Si el entorno no puede ignorarse, la radiación observada desde una zona de superficie con radiación incidente $E_i(\lambda)$ viene dada por:

$$E = \int_{\lambda=900nm}^{\lambda=1700nm} S(\lambda)\epsilon(\lambda)B(T, \lambda)d\lambda + \int_{\lambda=900nm}^{\lambda=1700nm} S(\lambda)(1 - \epsilon(\lambda))E_i(\lambda)d\lambda \quad (3-3)$$

25 La integral derecha en la ecuación 3-3 es la potencia radiada observada debida a la reflexión. En el presente documento, el término $(1 - \epsilon(\lambda))$ es la reflectancia basada en la suposición de que no hay transmitancia implicada. Se supone que la radiación incidente es uniforme o invariable con respecto a la orientación normal de la superficie y la reflectancia de superficie es lambertiana o invariable con respecto a la dirección de visión. Se trata de suposiciones de modelo justificadas para TBC debido a la característica de microestructura de superficie rugosa del TBC, y a que las palas de la fila 1 tienen un entorno de TBC. Puesto que la radiación reflejada nunca es negativa, un límite inferior de la radiación observada viene dado, si se ignora el término izquierdo en la ecuación (3-3), por:

30

$$E \geq \int_{\lambda=900nm}^{\lambda=1700nm} S(\lambda)\epsilon(\lambda)B(T, \lambda)d\lambda = E_{\text{FuentePuntual}} \quad (3-5)$$

El límite inferior en la radiación medida proporciona un límite superior de la estimación de temperatura de superficie. El error provocado, al ignorar la radiación incidente, depende de la intensidad de la radiación incidente en comparación con la emitancia térmica para la zona. Un modelo de la radiación incidente tendría que tener en cuenta la geometría del entorno, la temperatura del entorno y las propiedades de superficie del entorno.

35

MODELO DE IRRADIANCIA DE ZONA DEBIDA A LA REFLEXIÓN

La radiancia promedio de la escena E_0 desde una zona de superficie arbitraria puede aproximarse usando el

equilibrio, en el que en promedio la radiancia de superficie es igual a la mezcla de la emitancia térmica (de cuerpo gris) ϵB_0 y la irradiancia procedente del entorno gE_0 multiplicada por la reflectancia de superficie r . La temperatura aproximada promedio de la escena se indica mediante T_0 .

Señal de zona promedio en la escena:

$$E_0 = \epsilon B_0 + grE_0 \quad (3-6)$$

5

$$E_0 = \frac{\epsilon}{1 - rg} B_0 \quad (3-7)$$

Sustituir reflectancia $r = 1 - \epsilon$,

$$E_0 = \frac{\epsilon}{1 - g(1 - \epsilon)} B_0 \quad (3-8)$$

La radiación incidente $E(\lambda)$ viene dada entonces por:

$$E_1(\lambda) = gE_0 = g \frac{\epsilon(\lambda)}{1 - g(1 - \epsilon(\lambda))} B(T_0, \lambda) \quad (3-9)$$

10

La ecuación (3-8) ignora la transmitancia del material. La ecuación (3-6) requiere un factor geométrico g que se define como la razón del área de la cavidad que contribuye a la irradiancia ($A_{total} - A_{abierta}$) con respecto al área circundante total A_{total} .

$$g = \frac{A_{Total} - A_{abierta}}{A_{Total}} \quad (3-10)$$

15 La radiación observada desde una zona descrita mediante la ecuación (3-3) se transforma con la sustitución de la ecuación (3-9) en:

$$E = \int_{\lambda=900nm}^{\lambda=1700nm} S(\lambda)\epsilon(\lambda)B(T, \lambda)d\lambda + \int_{\lambda=900nm}^{\lambda=1700nm} S(\lambda)(1 - \epsilon(\lambda)) \frac{g\epsilon(\lambda)}{1 - g(1 - \epsilon(\lambda))} B(T_0, \lambda)d\lambda \quad (3-$$

12)

20 La ecuación (3-12) describe la radiación observada desde una zona de superficie con temperatura T y emisividad $\epsilon(\lambda)$ en un entorno con una temperatura promedio de la escena T_0 y una emisividad de $\epsilon(\lambda)$, con un área circundante visible efectiva promedio definida por el parámetro g .

En caso de temperatura uniforme $T = T_0$, la ecuación (3-12) se simplifica en la ecuación de cavidad:

$$E = \int_{\lambda=900nm}^{\lambda=1700nm} S(\lambda)\epsilon(\lambda) \left(1 + \frac{g(1 - \epsilon(\lambda))}{1 - g(1 - \epsilon(\lambda))} \right) B(T_0, \lambda)d\lambda \quad (3-13)$$

Para un entorno encerrado total (cavidad) con temperatura uniforme ($g = 1$), la ecuación (3-13) se reduce a una fuente de cuerpo negro con una emisividad efectiva de uno, tal como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\varepsilon(\lambda) \left(1 + \frac{1(1-\varepsilon(\lambda))}{1-1(1-\varepsilon(\lambda))} \right) = \varepsilon(\lambda) \left(1 + \frac{1-\varepsilon(\lambda)}{1-1+\varepsilon(\lambda)} \right) = \varepsilon(\lambda) + 1 - \varepsilon(\lambda) = 1 \quad (3-14)$$

Esto concuerda con los resultados para cavidades publicados por Gouffe y descritos en Richard D. Hudson, Jr. "Infrared System Engineering" John Wiley & Sons, Nueva York, 1996. Un entorno abierto, descrito por $g = 0$, transforma la ecuación (3-13) en una fuente puntual con emisividad $\varepsilon(\lambda)$:

$$\varepsilon(\lambda) \left(1 + \frac{0(1-\varepsilon(\lambda))}{1-0(1-\varepsilon(\lambda))} \right) = \varepsilon(\lambda)(1+0) = \varepsilon(\lambda) \quad (3-15)$$

5

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Una simulación basada en la ecuación de fuente puntual de cuerpo negro (3-1), la ecuación de cuerpo gris (3-2) y la ecuación de fuente puntual de cuerpo gris con reflexión (3-12) con $T_0 = 1150$ K, $g = 0,6$ (g es un factor geométrico) en el infrarrojo cercano con TBC como objetivo, e InGaAs como detector en la figura 8 muestra que la radiación observada procedente de una zona de superficie con reflectancia, según la ecuación (3-12), en la curva 801, converge con la radiación de fuente puntual de cuerpo gris con TBC (en la curva 802) con temperaturas de superficie superiores ($T > T_0$).

10

La figura 8 muestra cómo converge la radiación observada procedente de una zona de superficie con reflexión (curva 801 en la figura 8, ecuación (3-12) con la curva de radiación de fuente puntual 802 en la figura 8, ecuación (3-2) con temperaturas de zona de superficie superiores. La curva 803 en la figura 8 muestra la potencia radiada observada procedente de una fuente de cuerpo negro, ecuación (3-1).

15

Si la temperatura de zona de superficie es menor que la temperatura promedio de la escena T_0 ($T < T_0$), entonces la potencia radiada observada convergerá con la radiación promedio de la escena definida por la temperatura promedio de la escena. En este caso, la integral derecha de la ecuación (3-3) es entonces más dominante.

La tabla 1 compara la temperatura de superficie real con los valores de temperatura estimada usando una curva de calibración de cuerpo negro derivada de la ecuación (3-1) y una ecuación de curva de calibración puntual de cuerpo gris (3-2). Puede observarse que la temperatura estimada de la curva de calibración de cuerpo negro subestima la temperatura de superficie real a temperaturas significativamente más altas, en más de 100 K. El límite superior de estimación de temperatura proporciona una estimación más precisa para temperaturas más altas. Para un caso particular, en el que la temperatura máxima es aproximadamente 150 K mayor que la temperatura promedio de la escena, la temperatura estimada máxima usando la estimación de temperatura directa (de modelo de cuerpo negro) es 130 Kelvin menor. El método de estimación de temperatura de cuerpo gris sobreestima la temperatura en este caso en sólo 35 Kelvin.

20

25

Tabla 1.

	1000 K	1100 K	1200 K	1300 K	1400 K	1500 K	1600 K
Temperatura de superficie real	727 C	827 C	927 C	1027 C	1127 C	1227 C	1327 C
Temperatura aparente usando el método de una banda de longitudes de onda directo (modelo de cuerpo negro)	1020 K 748 C	1050 K 877 C	1105 K 832 C	1170 K 897 C	1235 K 962 C	1305 K 1032 C	1370 K 1097 C
Error del método de una banda de longitudes de onda directo	+20 K	-50 K	-95 K	-130 K	-165 K	-195 K	-230 K
Límite superior de la estimación de temperatura usando una fuente puntual de cuerpo gris como referencia	1159 K	1190 K	1260 K	1335 K	1425 K	1520 K	1610 K
Error del límite de temperatura superior	+150 K	+90 K	+60 K	+35 K	+25 K	+20 K	+10 K
T-T0	-150 K	-50 K	50 K	150 K	250 K	350 K	450 K

La figura 9 proporciona una comparación de las temperaturas estimadas usando el método de una banda de longitudes de onda directo (temperatura aparente) y el método de la temperatura máxima. El método de una banda de longitudes de onda directo subestima las temperaturas reales a excepción de las temperaturas más bajas en la escena. La estimación de la temperatura máxima siempre es mayor que la temperatura real con un error en disminución para temperaturas relativas de la escena superiores.

La figura 10 proporciona una comparación de errores de temperatura estimados usando el método de una banda de longitudes de onda directo (temperatura aparente) y el método de la temperatura máxima en el contexto de reflexión. El método de una banda de longitudes de onda directo subestima las temperaturas reales a excepción de las temperaturas más bajas en la escena. La estimación de la temperatura máxima siempre es mayor que la temperatura real con un error en disminución para temperaturas relativas de la escena superiores.

Resultados basados en datos reales

Se calibró el sistema sensor usando una muestra de TBC en un horno de ladrillo con temperatura controlada. La irradiancia medida en el sensor es una mezcla de la emitancia térmica procedente de la superficie de TBC $\epsilon(\lambda)P(T_0, \lambda)$ y la radiación reflejada procedente de los alrededores de ladrillo $(g(1-\epsilon(\lambda))\epsilon_{ladrillo}(\lambda))P(T_0, \lambda)$. La irradiancia medida en el sensor viene dada entonces por:

$$I = \int_{\lambda=900nm}^{\lambda=1700nm} S(\lambda)(\epsilon(\lambda) + g(1-\epsilon(\lambda))\epsilon_{ladrillo}(\lambda))P(T_0, \lambda)d\lambda \quad (3-16)$$

El factor geométrico g se define por el tamaño de la abertura en el horno de ladrillo y la distancia de la muestra de TBC a la abertura. En este caso el factor geométrico se establece en $g = 0,9$. La emisividad del TBC se establece en $e = 0,35$ y la emisividad del ladrillo se establece en $\epsilon_{ladrillo}(\lambda) = 0,92$. La emisividad efectiva $\epsilon'(\lambda)$ del TBC en el horno viene dada entonces por:

$$\epsilon'(\lambda) = \epsilon(\lambda) + g(1-\epsilon(\lambda))\epsilon_{ladrillo}(\lambda) = 0,89 \quad (3-17)$$

La curva de calibración de sensor registrada se basa en una emisividad efectiva de 0,89 y puede convertirse en la correspondiente curva de calibración de fuente puntual de TBC con emisividad 0,35 según sea necesario para la estimación de temperatura máxima usando un factor de conversión p:

$$I_{TBC_FuentePuntual} = pI, \text{ con } p = \frac{0,35}{0,89} \quad (3-18)$$

$$\begin{aligned} I_{TBC_FuentePuntual} &= \frac{0,35}{0,89} * \int_{\lambda=900nm}^{\lambda=1700nm} S(\lambda)0,89P(T_0, \lambda)d\lambda = \\ &= \int_{\lambda=900nm}^{\lambda=1700nm} S(\lambda)0,35P(T_0, \lambda)d\lambda \end{aligned}$$

El factor de conversión puede configurarse en el diálogo de estimación de temperatura del software BladeInspector con un parámetro de ganancia de radiancia:

$$\text{ganancia de radiancia} = 1/p = 2,54 \quad (3-19)$$

Un ejemplo de la temperatura medida usando el método de la temperatura máxima se proporciona en la figura 11. La figura 11 proporciona un ejemplo de estimación de temperatura usando el método de estimación de temperatura máxima. La simulación en la tabla 1 muestra que las temperaturas estimadas son todavía aproximadamente 35 K demasiado altas.

En este caso, la curva de calibración de cuerpo gris con TBC es apropiada para la estimación de temperatura máxima, porque la temperatura promedio de la escena es aproximadamente 150 K menor en comparación con la temperatura máxima de la escena y el área de tamaño de punto con las temperaturas más altas es pequeña en comparación con el área total. Una distribución de temperatura similar para álabes, en la que la temperatura máxima es 150 K mayor que la temperatura promedio también fue notificada por Markham en J. Markham, H. Latvakoski, D.

Marran, J. Neira, P. Kenny, P. Best "Challenges of Radiation Thermometry for Advanced Turbine Engines" Proceedings of the 46th International Instrumentation Symposium, ISA Volume 397, 2000. Puede esperarse, para este caso de estimación de temperatura particular, que la temperatura máxima estimada todavía está sobreestimada en 35 K según indica el análisis numérico. Pueden restarse los 35 Kelvin de la temperatura máxima basándose en los resultados de la simulación para aumentar la precisión.

Otro aspecto de la presente invención es ajustar una curva de calibración de temperaturas estimadas derivadas de mediciones ópticas de una banda de longitudes de onda en un factor que sea dependiente de un modelo de radiación. Se demostró cómo el modelo de radiación tal como hipótesis de cuerpo negro o de cuerpo gris puede crear errores sistemáticos de estimación en una curva de calibración. Por consiguiente es un aspecto de la presente invención corregir las temperaturas estimadas basándose en modelos de radiación aplicados al crear curvas de calibración.

Como un aspecto de la presente invención, y tal como se mostró anteriormente, puede estimarse una temperatura aplicando una calibración o una calibración inversa. Como ejemplo ilustrativo se proporcionan medios de calibración como curva de calibración. Medios de calibración, como un aspecto de la presente invención, pueden proporcionarse en diferentes formas. Por ejemplo puede proporcionarse un medio de calibración como curva, como tabla, como fórmula, como factor de calibración, como correspondencia de calibración o en cualquier otra forma que sea útil para aplicar calibración para estimar una temperatura. Un procesador, según otro aspecto de la presente invención, puede usar esta información de calibración presentada en la forma que sea para determinar temperaturas y otra información.

SISTEMA

Los métodos de estimación de temperatura y calibración de error que son aspectos de la presente invención pueden ejecutarse mediante un sistema tal como se muestra en la figura 12. Se proporcionan al sistema datos 1201 que representan datos de imagen. Los datos de imagen pueden proporcionarse en una entrada 1206. Tales datos pueden proporcionarse por ejemplo de manera continua. También pueden proporcionarse como muestras. Se proporciona un conjunto de instrucciones o programa 1202 que ejecuta los métodos de la presente invención y se combina con los datos en un procesador 1203, que puede procesar las instrucciones de 1202 aplicadas a los datos 1201. Puede emitirse una imagen o una alerta o cualquier otra señal resultante del procesador en un dispositivo 1204. Un dispositivo de este tipo puede ser por ejemplo una pantalla. Puede proporcionar por ejemplo un mapa de temperaturas con colores falsos de una pala de turbina. Sin embargo, en situación operativa tal dispositivo también puede ser un dispositivo de salida para proporcionar una alerta o por ejemplo proporcionar una entrada a un sistema de control. El procesador puede ser hardware dedicado. Sin embargo, el procesador también puede ser una CPU o cualquier otro dispositivo informático que pueda ejecutar las instrucciones de 1202. Un dispositivo 1205 de entrada como un ratón, o un *track-ball* u otro dispositivo de entrada pueden estar presentes para permitir que un usuario seleccione un objeto inicial o seleccione por ejemplo una curva de calibración preferida. El dispositivo de entrada también puede usarse para iniciar o detener instrucciones en el procesador. Sin embargo un dispositivo de entrada de este tipo también puede no estar presente. Por consiguiente el sistema tal como se muestra en la figura 12 proporciona un sistema para la estimación de temperatura usando los métodos dados a conocer en el presente documento.

Las siguientes referencias describen con carácter general los antecedentes de la presente invención y se incorporan por la presente en el presente documento como referencia: [1] Technical report: TR-05178 at Siemens Power Generation, Orlando. [2] R. M. Haralick y L. G. Shapiro. Computer and robot vision, vol. 2, Nueva York, Addison Wesley, 1993. [3] Richard D. Hudson, Jr. "Infrared System Engineering", John Wiley & Sons, Nueva York, 1996. [4] M. Voigt, M. Zarzycki, D. LeMieux, V. Ramesh, "Scene-based nonuniformity correction for focal plane arrays using a facet model", Proceedings of the SPIE "Infrared Technology and Applications XXXI, Volumen 5784, págs. 331-342 (2005). [5] T.Schulenberg, H. Bals, "Blade Temperature Measurement of Model V84.2 100MW/60Hz Gas Turbine", Gas Turbine Conference and Exhibition, Anaheim, California, 31 de mayo - 4 de junio de 1987, [6] J. Markham, H. Latvakoski, D. Marran, J. Neira, P. Kenny, P. Best "Challenges of Radiation Thermometry for Advanced Turbine Engines" Proceedings of the 46th International Instrumentation Symposium, ISA Volumen 397, 2000 [7] Beynon, T.G.R., 1981, "Turbine Pyrometry An Equipment Manufacturer's View" SME 81-GT-136.

REIVINDICACIONES

1. Método para estimar la temperatura máxima de una superficie de un cuerpo ubicado en un entorno circundante, comprendiendo el método:

utilizar un sensor de radiación para recibir calor irradiado desde la superficie;

5 crear a partir del calor irradiado recibido una imagen corregida en cuanto a la falta de uniformidad (NUC) de la superficie, comprendiendo la imagen una pluralidad de píxeles, teniendo cada píxel un valor de píxel; y

transformar cada valor de píxel en un valor de temperatura estimada correspondiente usando una correspondencia de calibración inversa de temperatura de una banda de longitudes de onda directa aproximada por una función polinómica de orden inferior, en el que la correspondencia de calibración inversa de temperatura de una banda de longitudes de onda directa se basa en el valor de píxeles observados para temperaturas conocidas de la superficie e incluye una corrección de la radiación procedente del entorno circundante reflejada por la superficie de modo que tal radiación no contribuya a la temperatura máxima estimada de la superficie, basándose la corrección en el siguiente modelo:

10

$$E = \int_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda=\lambda_2} S(\lambda)\varepsilon(\lambda)B(T, \lambda)d\lambda + \int_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda=\lambda_2} S(\lambda)(1-\varepsilon(\lambda))\frac{g\varepsilon(\lambda)}{1-g(1-\varepsilon(\lambda))} B(T_0, \lambda)d\lambda ,$$

15 donde E es la radiación recibida por el sensor de radiación, $S(\lambda)$ es la sensibilidad espectral del sensor de radiación, $\varepsilon(\lambda)$ es la emisividad espectral de la superficie, $B(T, \lambda)$ es la radiancia espectral de la ley de Planck de la superficie, g es un factor geométrico que comprende la razón del área del entorno circundante que contribuye a la radiación recibida por el sensor de radiación con respecto al área total del entorno circundante, y T_0 es la temperatura promedio del entorno circundante.

20 2. Método según la reivindicación 1, que comprende realizar una transformación de colores falsos.

3. Método según la reivindicación 1, en el que el cuerpo forma parte del trayecto de gas caliente de una turbina de gas, teniendo el cuerpo propiedades de superficie reflectantes.

4. Método según la reivindicación 1, en el que la banda de longitudes de onda de longitudes de onda de λ_1 a λ_2 se sitúa dentro de la banda de longitudes de onda de la radiación infrarroja.

25 5. Método según la reivindicación 4, en el que λ_1 es esencialmente 900 nm y λ_2 es esencialmente 1700 nm.

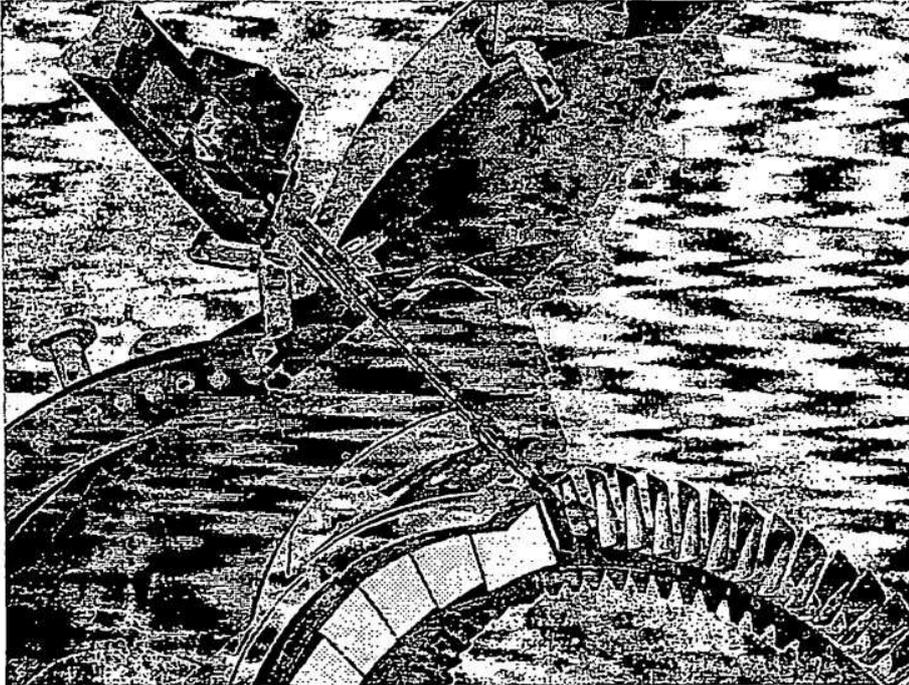


FIG. 1

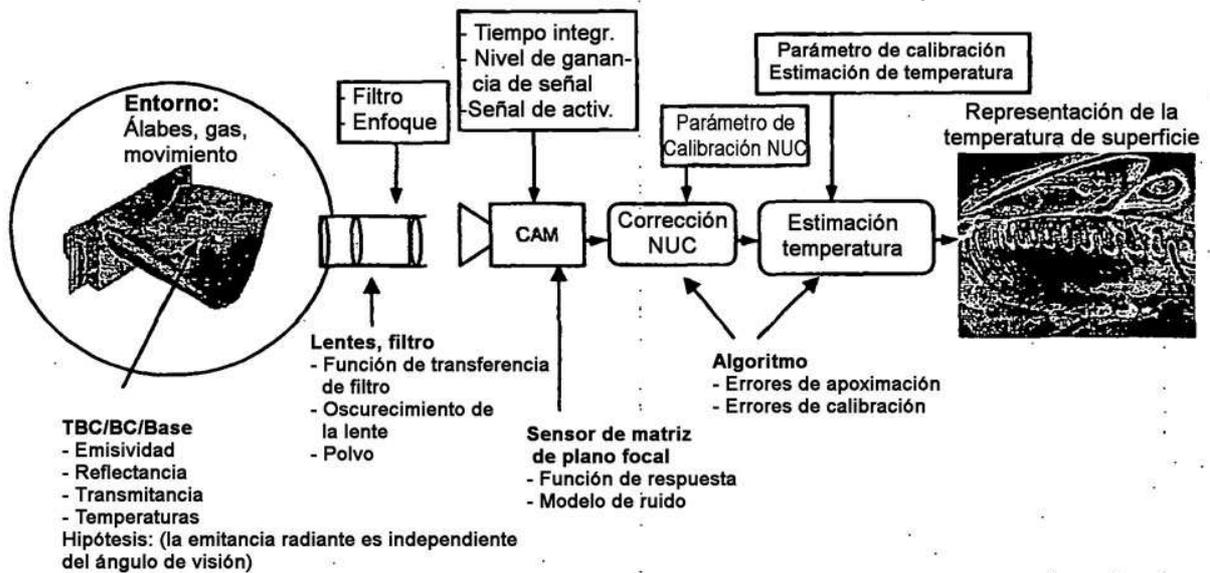


FIG. 2

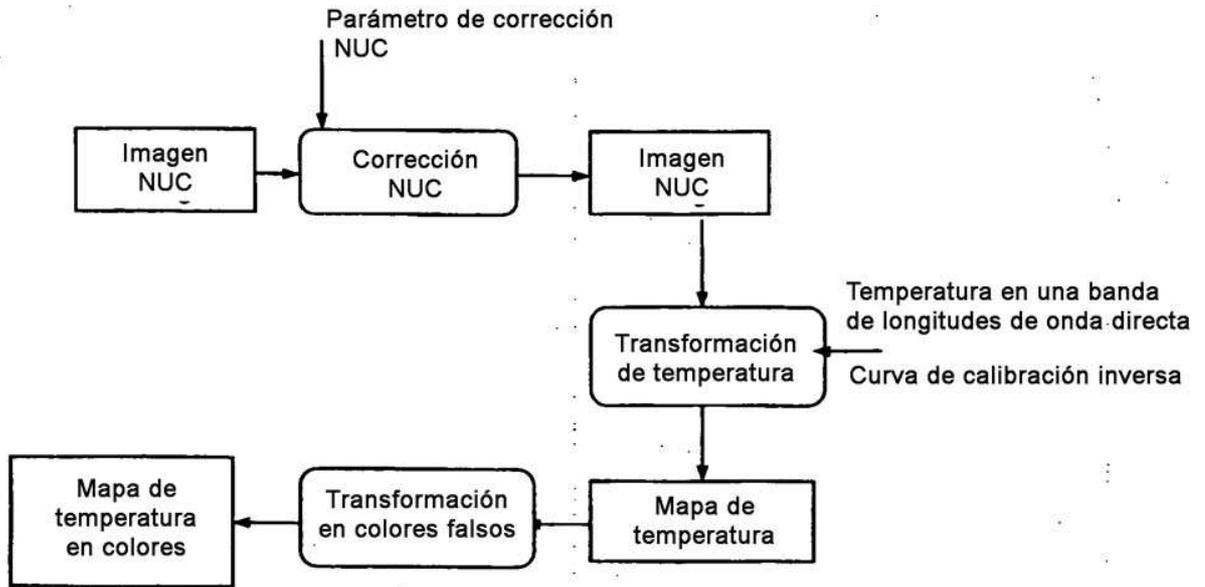


FIG. 3

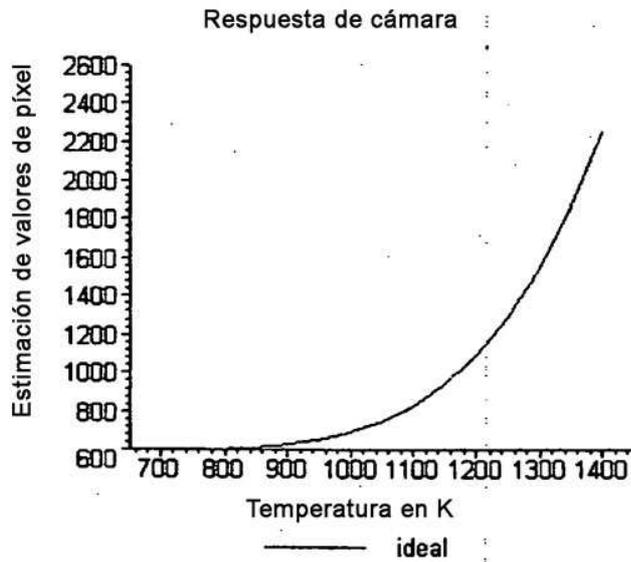


FIG. 4

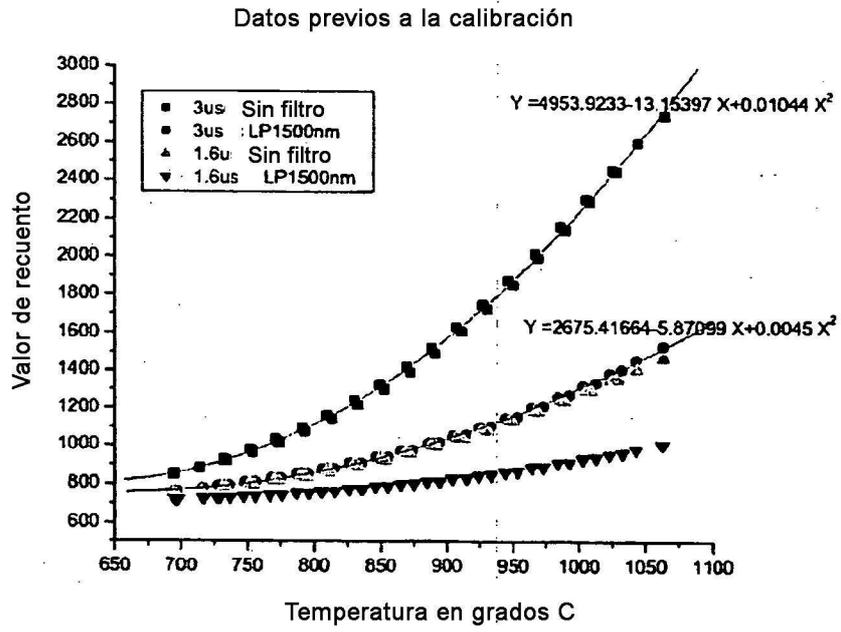


FIG. 5



FIG. 6



FIG. 7

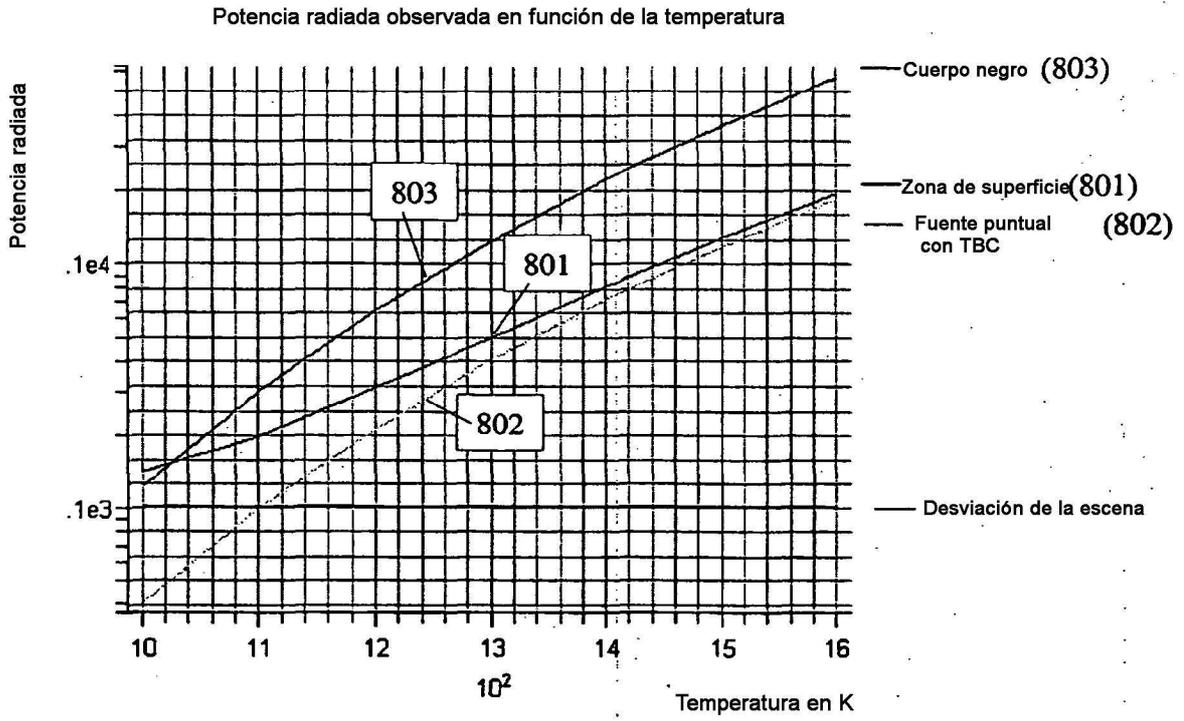


FIG. 8

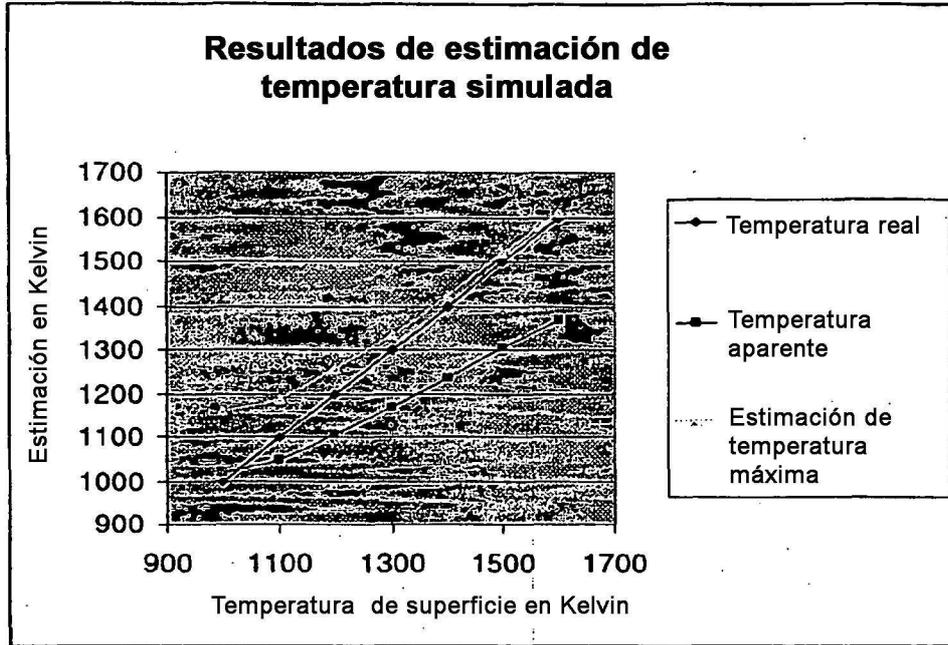


FIG. 9

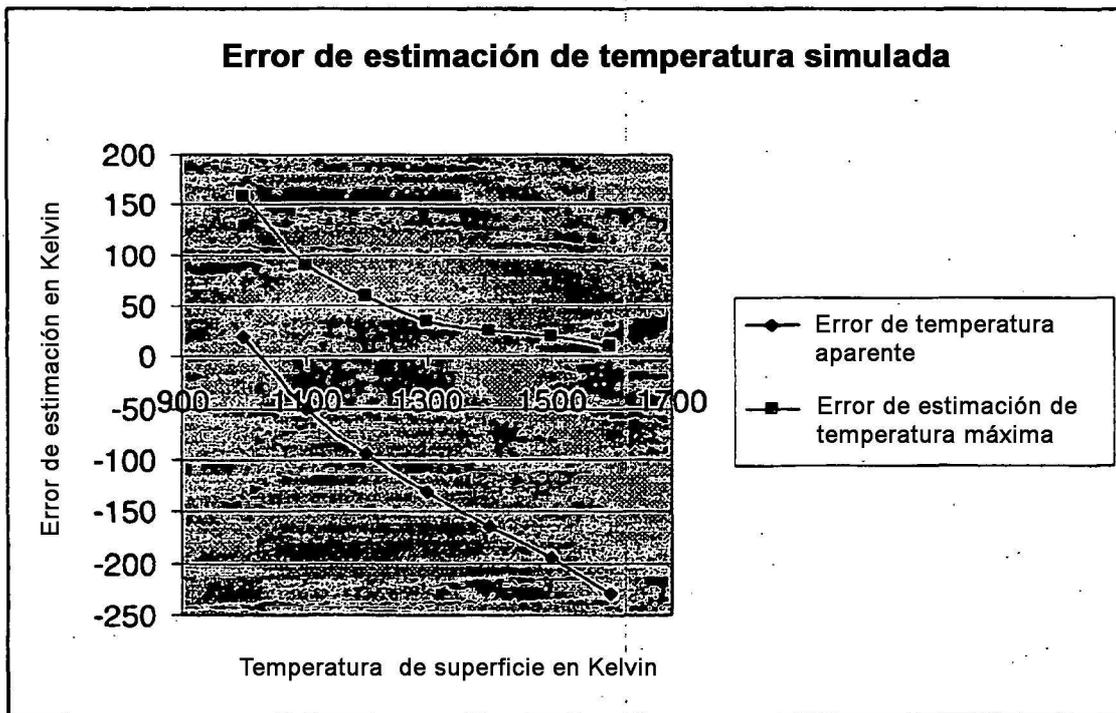


FIG. 10

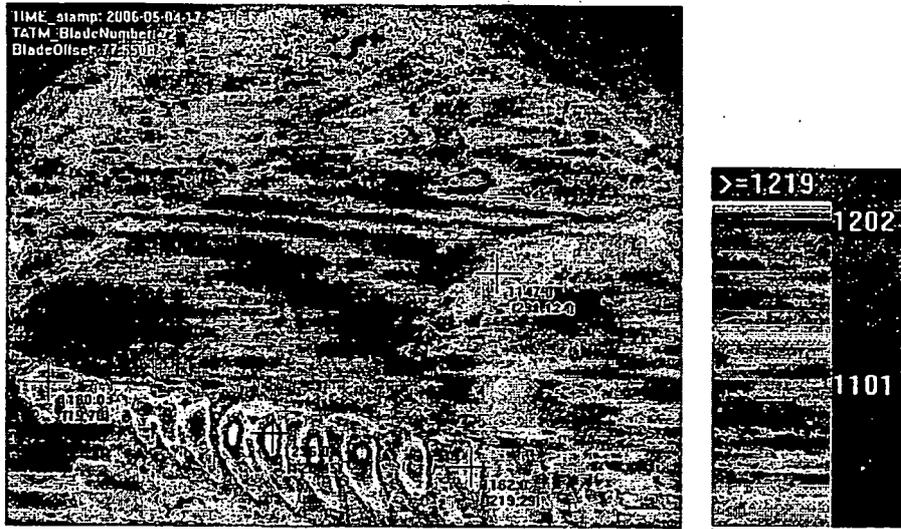


FIG. 11

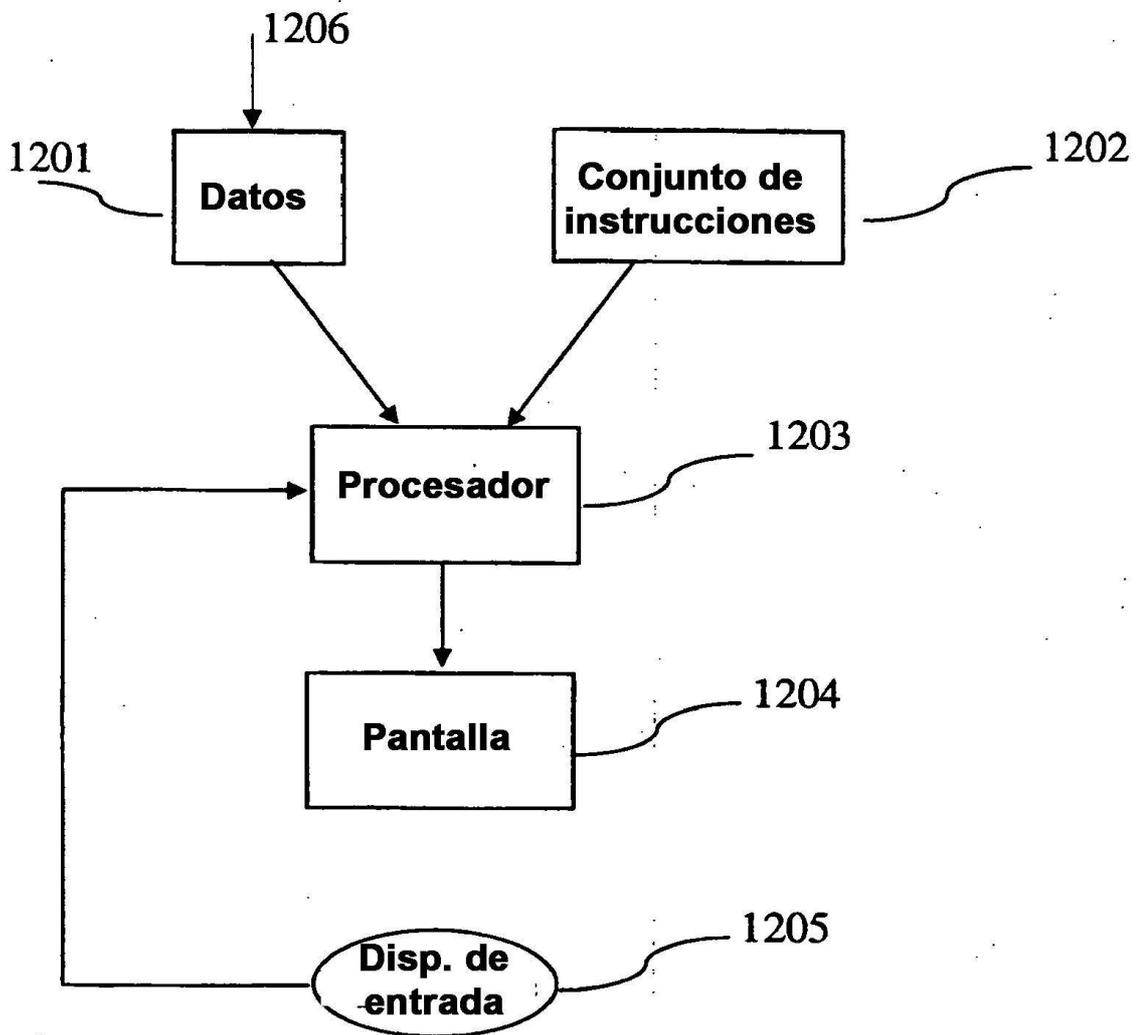


FIG. 12