

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 587 435**

21 Número de solicitud: 201530546

51 Int. Cl.:

**G01J 5/08** (2006.01)

**G01J 5/48** (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION

B1

22 Fecha de presentación:

**22.04.2015**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**24.10.2016**

Fecha de modificación de las reivindicaciones:

**14.06.2017**

Fecha de concesión:

**21.07.2017**

45 Fecha de publicación de la concesión:

**28.07.2017**

73 Titular/es:

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID (100.0%)**  
**Av. Gregorio Peces Barba, 1**  
**28919 Leganés (Madrid) ES**

72 Inventor/es:

**VÁZQUEZ GARCÍA, María Del Carmen;**  
**TAPETADO MORALEDA, Alberto;**  
**MIGUÉLEZ GARRIDO, María Henar y**  
**DÍAZ ÁLVAREZ, José**

54 Título: **PIRÓMETRO DE FIBRA ÓPTICA A DOS COLORES**

57 Resumen:

La invención describe un pirómetro (1) de fibra óptica a dos colores para la medida de la temperatura de la superficie radiante de una pieza (100) que comprende: un tramo (2) de fibra óptica multimodo simple que tiene un extremo delantero orientado hacia la pieza (100); un demultiplexor (3) conectado al extremo posterior del tramo (2) de fibra óptica para dividir la radiación térmica recibida en dos canales correspondientes a dos bandas estrechas de longitudes de onda cercanas; un par de fotodetectores (4a, 4b) similares respectivamente conectados a dichos canales para transformar la radiación térmica de dichas bandas en sendas señales eléctricas analógicas; un par de amplificadores (5a, 5b) que amplifican las señales eléctricas analógicas anteriores; y un convertidor analógico (6) digital que recibe dichas señales eléctricas analógicas y las convierte en señales digitales para su análisis por un procesador (7).

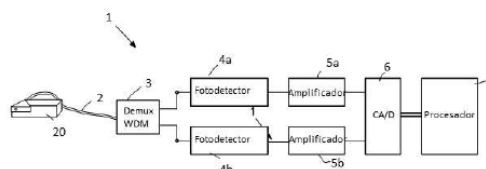


Fig. 1

ES 2 587 435 B1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 37.3.8 LP 11/1986.

## **DESCRIPCIÓN**

Pirómetro de fibra óptica a dos colores

### **5 OBJETO DE LA INVENCION**

La presente invención pertenece al campo de la medición de altas temperaturas que tiene elevado interés en distintas aplicaciones industriales. La medida de temperatura en el campo de máquina herramienta presenta elevado interés, sin embargo está escasamente desarrollada por las dificultades que plantea.

El objeto de la presente invención es un nuevo pirómetro de fibra óptica a dos colores más simple, preciso, y robusto que los pirómetros conocidos hasta el momento, para su uso en medida de temperatura durante el proceso de mecanizado de piezas en máquina herramienta.

### **ANTECEDENTES DE LA INVENCION**

Actualmente existe una tendencia creciente en la industria aeronáutica dirigida hacia la reducción de peso de la estructura de la turbina. Ello implica que los requisitos de calidad del mecanizado de las piezas que la conforman son cada vez más exigentes y difíciles de cumplir, por lo que es cada vez más necesario un control preciso del proceso de mecanizado. Uno de los factores más limitantes en la productividad y rendimiento de un equipo de mecanizado es el desgaste de la herramienta de corte, parámetro que está fuertemente influenciado por la temperatura. Asimismo es preciso controlar la temperatura en la pieza para evitar daño térmico en la misma que repercute de forma negativa en la vida en servicio del componente. Por ello, en este contexto resulta crítico realizar con precisión la medida de la temperatura local en la zona de corte y en la superficie mecanizada.

Algunos métodos conocidos de medida de la temperatura de corte en procesos de mecanizado incluyen termopares (F. E. Kennedy, D. Frusescu, and J. Li, "*Thin film thermocouple arrays for sliding surface temperature measurement*" *Wear*, vol. 207, pp. 46-54, 1997) y cámaras infrarrojas (S. Jeelani, "*Measurement of temperature distribution in machining using IR photography*" *Wear*, vol. 68, pp. 191-202, 1981). Sin embargo, debido a diversos factores, entre ellos que es un método no invasivo, actualmente uno de los métodos bajo estudio se basa en la medida a través de una fibra óptica de la radiación

emitida por el cuerpo a medida que aumenta la temperatura. Para evitar los errores asociados a posibles cambios de la emisividad con la temperatura, se propone la medida en dos bandas espectrales distintas. Es decir, la radiación transmitida por la fibra óptica se divide en dos señales correspondientes a dos bandas de longitud de onda diferentes que se envían a dos fotodetectores. Por último, se obtiene la temperatura basándose en la relación entre las intensidades de las señales de los dos fotodetectores. Este método, habitualmente denominado "*pirometría con fibra óptica a dos colores*", es descrito por diversos autores. A modo de ejemplo, se pueden mencionar los siguientes artículos representativos de esta técnica:

10

B. Müller and U. Renz, "*Development of a fast fiber-optic two-color pyrometer for the temperature measurement of surfaces with varying emissivities*," Review of Scientific Instruments, vol. 72, pp. 3366-3374, 2001.

15

T. Beno, U. Hulling, "*Measurement of Cutting Edge Temperature in Drilling*," Procedia Conference on Manufacturing Systems CIRP 3, pp.531-536, 2012.

20

F.J. Madruga, D.A.G. Fernandez, J.M. Lopez-Higuera, "*Error estimation in a fiber-optic dual waveband ratio pyrometer*", IEEE Sensors Journal, vol.4, no.3, pp. 288-293, June 2004

25

Un inconveniente de los sistemas actuales de medida de la temperatura mediante pirometría con fibra óptica a dos colores está relacionado con el uso de dos fotodetectores de características diferentes para cada uno de los dos canales del pirómetro (véase E. Suarez-Gonzalez and R. L. Oqlukian, "*Triple spectral área pyrometer*": US5125739A, 1992), lo cual puede introducir errores que en función de las condiciones concretas pueden terminar afectando gravemente a la medida de temperatura final. En efecto, el uso de fotodetectores fabricados con materiales diferentes y por tanto con distintas sensibilidades para cada rango de longitudes de onda ofrece una conversión entre el dominio óptico y eléctrico desigual en ambos canales, pudiendo alterar el valor de temperatura medido.

30

35

Por otra parte, los sistemas actuales suelen utilizar un sistema de lentes o divisores del haz para la demultiplexación de la señal en dos longitudes de onda diferentes (véase D. A. Kahn, "*Pyrometer system using separated spectral components from a heat source*": US4326798, 1982). Esto no sólo aumenta la complejidad y coste del dispositivo, sino que además introduce pérdidas de potencia provocadas por el filtrado del haz en el espacio libre

y el elevado número de elementos empleados (ver R. R. Dils and A. K. Winslow, "*Method and apparatus for determining temperature in a blackbody radiation sensing system*": US4845647, 1989). Además, dichas pérdidas suelen ser no uniformes en los distintos canales, agravando la asimetría anteriormente comentada y el error asociado a la misma.

5

Otro inconveniente es que, para aumentar el área de captación de la radiación térmica, en ocasiones se utilizan fibras ópticas formadas por varios núcleos, con elevados diámetros de fibra, o agrupaciones de múltiples fibras (véase A. S. Dostoomian and J. S. Lord, "*Band-ratio radiometer*": US4225230, 1980). También se suelen utilizar lentes de colimación en el extremo delantero de la fibra óptica (véase J. R. Gebhart, B. E. Kinchen and R. R. Strange, "*Optical pyrometer and technique for temperature measurement*": US4222663, 1980). La utilización de este tipo de técnicas provoca un aumento de tamaño considerable del extremo del sensor cercano a la superficie radiante, aumentando la dificultad de introducirlo y posicionarlo a escasa distancia del punto de sensado. Además de esta desventaja, un aumento del área de captación provoca una limitación en el tamaño del área a medir, imposibilitando el sensado de áreas muy localizadas y de pequeño tamaño como por ejemplo es la interfaz entre la herramienta de corte y la superficie mecanizada.

10  
15

## DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

20

Los inventores de la presente solicitud han resuelto los problemas anteriores gracias a un nuevo pirómetro de fibra óptica a dos colores para la medida de la temperatura de una superficie radiante que presenta fundamentalmente las siguientes características novedosas con relación a los sistemas conocidos hasta ahora:

25

- Se emplea una única fibra óptica para recoger y canalizar la radiación emitida por la superficie radiante.

30

- La radiación recogida por la fibra óptica se divide en dos canales de longitudes de onda diferentes utilizando un demultiplexor basado en multiplexación por longitud de onda (WDM).

35

- La radiación transmitida a través de estos dos canales se convierte en una señal eléctrica analógica utilizando un par de fotodetectores de características similares.

- Se eligen cuidadosamente las longitudes de onda correspondientes a los dos

canales en que el demultiplexor divide la radiación transmitida por la fibra óptica para maximizar la precisión de la medida final de temperatura.

La combinación de estas características permite obtener un pirómetro de fibra óptica a dos  
5 colores adecuado para su uso en entornos industriales. A modo de ejemplo, en una  
realización particular de la presente invención para el mecanizado de una pieza de Inconel  
718 (cuya emisividad se puede ver en el documento D. Basak, R. A. Overfelt, and D.  
Wang, "*Measurement of Specific Heat Capacity and Electrical Resistivity of Industrial Alloys  
Using Pulse Heating Techniques*", International Journal of Thermophysics, vol. 24, pp. 1721-  
10 1733, 2003) y si se emplean las longitudes de onda de 1,31  $\mu\text{m}$  y 1,55  $\mu\text{m}$ , la relación de  
emisividades (a partir de las expresiones de la dependencia de la emisividad con la longitud  
de onda y temperatura que se muestran en K. G. Ramanathan and S. H. Yen, "*High-  
temperature emissivities of copper, aluminum, and silver*," Journal of the Optical Society of  
America, vol. 67, pp. 32-38, 1977) para una variación de temperatura de 300K a 1000K es  
15 del orden de 1.069. Con una adecuada selección de los elementos del pirómetro esta  
relación de emisividades distinta de la unidad, provocaría un error de temperatura por  
debajo del 0,2%. Por el contrario, diversos autores proponen la utilización de longitudes de  
onda en el rango de 1,7 y 2,0  $\mu\text{m}$ , como por ejemplo B. Muller and U. Renz, "*Development of  
a fast fiber-optic two-color pyrometer for the temperature measurement of surfaces with  
20 varying emissivities*," Review of Scientific Instruments, vol. 72, pp. 3366-3374, 2001. Estas  
longitudes de onda supondrían errores de temperatura del orden del 5% si se considera sólo  
la variación de emisividad con la temperatura y la longitud de onda. El ejemplo anterior  
muestra la importancia de la adecuada selección de las longitudes de onda del pirómetro.  
De esta selección, junto con la respuesta de cada uno de los elementos del pirómetro a  
25 estas longitudes de onda, vendrá determinado el error de temperatura final. Además, las  
pérdidas en las dos longitudes de onda cercanas son iguales o muy próximas.

Así, la presente invención describe un pirómetro de fibra óptica a dos colores para la medida  
de la temperatura de una superficie radiante. Se trata de un pirómetro que tiene un coste  
30 sensiblemente menor que el de los pirómetro utilizados actualmente que además posee una  
alta robustez. El pirómetro de la invención comprende fundamentalmente los siguientes  
elementos: un tramo de fibra óptica, un demultiplexor, un par de fotodetectores, un par de  
amplificadores, y un convertidor analógico-digital conectado a un procesador. A  
continuación, se describe cada uno de estos elementos con mayor detalle.

35

a) Tramo de fibra óptica

5 Se trata de un tramo de fibra óptica multimodo simple que tiene un extremo delantero y un extremo posterior. El extremo delantero es aquel que está orientado hacia la superficie radiante con el propósito de recoger la radiación térmica emitida por la misma, mientras que el extremo posterior es aquel hacia el que se canaliza la radiación térmica recibida para su tratamiento y análisis.

10 Las medidas de la fibra óptica son variables con diámetros típicamente en el rango de las decenas o centenas de micras, por ejemplo entre 10  $\mu\text{m}$  y 500  $\mu\text{m}$ .

15 En este contexto, la superficie radiante hace referencia a la superficie cuya temperatura se va a medir. En principio puede tratarse de la superficie de cualquier cuerpo sólido. Sin embargo, como se verá a lo largo de la descripción este dispositivo de medida de temperatura está especialmente diseñado para su uso en una máquina-herramienta de control numérico, por lo que la superficie radiante corresponde a la zona de la pieza a mecanizar donde se produce el contacto con la herramienta de corte o próxima a ella.

#### 20 b) Demultiplexor

25 Se trata de un demultiplexor basado en multiplexación por longitud de onda que está conectado al extremo posterior del tramo de fibra óptica para dividir la radiación térmica recibida en dos canales correspondientes a dos bandas estrechas de longitudes de onda cercanas. Este demultiplexor presenta un bajo nivel de crosstalk entre canales, bajas pérdidas de inserción y baja dependencia de la respuesta de salida a pequeñas variaciones de temperatura.

30 En este contexto, el término “*estrecho*” relativo a las mencionadas “*bandas estrechas*” hace referencia a que demultiplexa dos longitudes de onda que puedan ser detectadas por un mismo fotodetector. A modo de ejemplo se pueden considerar 1,31  $\mu\text{m}$  y 1,55  $\mu\text{m}$  si se trabaja con fotodetectores de InGaAs.

35 Por otra parte, las bandas de longitud de onda correspondientes a estos dos canales deben ser cercanas como para suponer la variación de la emisividad del cuerpo constante o casi despreciable entre ambos canales. Por el contrario, la separación de canales deberá de ser lo suficientemente amplia como para obtener

un error de temperatura por debajo del error de temperatura máximo fijado. Concretamente, de acuerdo con una realización preferida de la invención las longitudes de onda de los dos canales están separadas como máximo 5  $\mu\text{m}$ .

5 Además, preferentemente las longitudes de onda de los dos canales deben ser bajas debido a que a menores longitudes de onda, el error de temperatura como consecuencia de las asimetrías y variaciones de emisividad con la temperatura entre otras, disminuye. Al trabajar con longitudes de onda menores la variación del error de temperatura en función de la relación de emisividades entre los dos  
10 canales es menor, provocando que medidas de temperatura en materiales con relaciones de emisividad fuertemente cambiantes sean medibles por debajo del error máximo de temperatura fijado. De acuerdo con la Ley de Planck, un mayor nivel de energía se consigue a longitudes de onda mayores, sin embargo a partir de una cierta longitud límite, ese nivel de energía disminuye (véase R. G. Driggers, Encyclopedia of optical engineering vol. 2: CRC press, 2003). Una de las premisas  
15 en la elección de las longitudes de onda de trabajo del pirómetro es fijarlas lo más cercanas posibles al nivel máximo de energía. En concreto, para una temperatura de 773K, la longitud de onda correspondiente al máximo de radiación térmica radiada por un cuerpo es de 3,7  $\mu\text{m}$ . Fijando unas longitudes de onda de trabajo en  
20 niveles de energía elevados se consigue evitar el límite de sensibilidad de los fotodetectores que pueda limitar la mínima temperatura que es capaz de medir el pirómetro. Concretamente, de acuerdo con una realización preferida de la invención las dos longitudes de onda son menores de 2  $\mu\text{m}$ .

25 En definitiva, teniendo en cuenta estas restricciones, de acuerdo con otra realización preferida de la invención las longitudes de onda están respectivamente entre 0,85  $\mu\text{m}$  y 1,4  $\mu\text{m}$  y entre 1,4  $\mu\text{m}$  y 1,7  $\mu\text{m}$ . Específicamente, más adelante en el presente documento se describe un ejemplo concreto de pirómetro de acuerdo con la invención donde las longitudes de onda de las dos bandas son  
30 respectivamente 1,31  $\mu\text{m}$  y 1,55  $\mu\text{m}$ .

En una realización preferida, el demultiplexor está fabricado en fibra óptica multimodo.

35 c) Fotodetectores

Se trata de un par de fotodetectores similares que están respectivamente conectados a dichos canales para transformar la radiación térmica de dichas bandas en sendas señales eléctricas analógicas de corriente.

5 En este contexto, el término “similares” hace referencia al menos a que tienen tamaño, ancho de banda y sensibilidad parecidos para los rangos de longitudes de onda empleados en los dos canales a analizar. Se evita así que la conversión entre el dominio óptico y el dominio eléctrico sea desigual en ambos canales, provocando errores en el resultado final de la temperatura.

10 Más concretamente, en una realización preferida de la invención se utilizan dos fotodetectores iguales. A modo de ejemplo, se puede considerar la utilización de dos fotodetectores de InGaAs para ambos canales.

15 d) Amplificadores

Las señales eléctricas procedentes de los fotodetectores son amplificadas por medio de dos amplificadores eléctricos conectados a la salida de ambos fotodetectores. Típicamente serán amplificadores de transimpedancia de bajo ruido, siendo el mismo responsable junto con la sensibilidad del fotodetector de la mínima temperatura que se puede medir.

20

d) Convertidor analógico-digital

25 Se trata de un convertidor analógico-/digital que recibe dichas señales eléctricas analógicas y las convierte en señales digitales para su posterior análisis por un procesador con el objeto de determinar la temperatura de la superficie radiante.

Este nuevo pirómetro de fibra óptica a dos colores puede utilizarse para la medida de la temperatura en diferentes entornos, aunque se ha mostrado especialmente adecuado para su uso en procesos de mecanizado cuando está instalado en una máquina-herramienta de control numérico. En ese caso, una porción delantera del tramo de fibra óptica está alojada en un orificio practicado en el porta herramientas de la máquina-herramienta. El extremo delantero de la fibra óptica queda así muy cerca de la superficie radiante de la pieza, lo que permite recoger una cantidad suficiente de radiación térmica sin necesidad de utilizar lentes o similares. En particular, la distancia entre el extremo delantero del tramo de fibra óptica y

35



la superficie radiante de la pieza instalada en la máquina-herramienta puede ser de entre 0,1 mm hasta 1,5 mm.

5 Por último, la presente invención está dirigida también a una máquina-herramienta de control numérico que comprende un pirómetro de fibra óptica a dos colores como el descrito en los párrafos anteriores.

### **BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS**

10 La Fig. 1 muestra un esquema simplificado del pirómetro de la presente invención.

La Fig. 2a muestra la vista lateral de la fibra óptica colocada en el portaherramientas durante el proceso de mecanizado

15 La Fig. 2b muestra la vista frontal de la fibra óptica colocada en el portaherramientas durante el proceso de mecanizado.

La Fig. 2c muestra la vista superior de la fibra óptica colocada en el portaherramientas durante el proceso de mecanizado.

20

La Fig. 3 muestra la respuesta de salida del demultiplexor WDM y la curva de responsividad del fotodetector de InGaAs.

25 La Fig. 4 muestra el error de temperatura como una función de la relación de emisividades para un pirómetro midiendo a una temperatura de 773K, y diferentes longitudes de onda de medida.

30 La Fig. 5 muestra el error de temperatura en función de la relación de emisividades para diversos coeficientes de pérdidas del sistema a una temperatura de 773K, y diferentes longitudes de onda de medida.

### **REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION**

35 Se describe a continuación un ejemplo de pirómetro (1) de acuerdo con la presente invención haciendo referencia a las figuras adjuntas.

## Descripción del pirómetro

La Fig. 1 muestra un esquema del pirómetro (1) de la presente invención instalado en el portaherramientas (20) de una máquina-herramienta de control numérico que está mecanizando una pieza. El tramo (2) de fibra óptica está hecho de fibra óptica multimodo estándar de silicio con unos diámetros respectivamente interior y del revestimiento de 62,5/125µm. El tramo (2) de fibra óptica tiene un primer extremo de detección situado junto a la superficie de la pieza (100) a mecanizar y un segundo extremo posterior hacia donde se canaliza la radiación para su conversión y análisis. Para que el primer extremo de detección pueda soportar altas temperaturas, no tiene recubrimiento protector. La longitud del tramo (2) de fibra óptica utilizado en este ejemplo concreto es de 3 metros.

El segundo extremo más posterior del tramo (2) de fibra óptica está conectado a un filtro demultiplexor (3) basado en multiplexación por longitud de onda (WDM) con bajo nivel de crosstalk entre canales, bajas pérdidas de inserción y baja dependencia de la respuesta de salida a pequeñas variaciones de la temperatura. Este demultiplexor (3) está configurado para separar la radiación térmica transmitida por la fibra óptica en dos componentes o bandas espectrales estrechas que tienen respectivamente una longitud de onda central de 1,31 µm y 1,55 µm.

Estos componentes espectrales o canales se envían respectivamente a continuación a un par de fotodetectores (4a, 4b) de características similares configurados para recibir las respectivas componentes de radiación térmica. En este ejemplo, se trata de dos fotodetectores (4a, 4b) de InGaAs con una sensibilidad casi constante en ambas bandas de longitud de onda (véase la Fig.3). Las salidas de los fotodetectores (4a, 4b) son amplificadas por sendos amplificadores (5a, 5b) y por último convertidas en una señal digital mediante un convertidor analógico/digital (6) previo a su envío final a través de un bus de comunicaciones a un procesador u ordenador (7) que realiza el análisis necesario para la obtención de la temperatura de la superficie radiante de la pieza (100).

Las Figs. 2a-2c muestran respectivamente vistas lateral, frontal y superior de la colocación del extremo delantero del tramo (2) de fibra óptica en la herramienta de corte (21). Durante el proceso de mecanizado la superficie de la pieza radiante (100) gira en el sentido de las agujas del reloj, como se aprecia en la Fig. 2a, y a medida que la porción (22) de corte de la herramienta de corte (21) corta la pieza (100) se incrementa la temperatura de la superficie. Como consecuencia, la superficie de la pieza (100) emite una energía que es recogida por la

fibra óptica pelada situada dentro de un tubo de plástico protector (23). La superficie (24) de asiento de la herramienta dispone de agujeros pasantes (25a, 25b) que atraviesan la herramienta de corte (21) horizontalmente. Además, para reforzar la porción del tramo (2) de fibra óptica que está en contacto con los agujeros pasantes (25a, 25b), se coloca un tubo de acero (26) de diámetro ligeramente superior al plástico protector (23) que protege la fibra óptica (2) fibra óptica. La Fig. 2b muestra una vista frontal de dicha sujeción. En cuanto a la herramienta de corte (21) en su conjunto, en la figura 2c se puede apreciar que está compuesta por el portaherramientas (20), la tuerca (27) de fijación del portaherramientas (20), la porción de corte (22) en forma de plaquita, y la superficie de asiento (24) de la herramienta. La superficie de asiento (24) de la herramienta en el porta-herramientas (20) dispone de uno (25a) o múltiples (25b) agujeros pasantes que permiten comunicar la parte trasera y delantera de la herramienta de corte (21). Estos agujeros permiten introducir la fibra óptica (2) y posicionarla a escasa distancia de la superficie de la pieza (100) que se va a mecanizar.

15

La Fig. 3 muestra el comportamiento simétrico de las pérdidas totales introducidas en cada canal de medida si se tiene en cuenta el efecto conjunto de los fotodetectores y el demultiplexor.

## 20 **Análisis teórico**

Para una mejor comprensión de la invención, se describe a continuación la base teórica subyacente tras el pirómetro de fibra óptica a dos colores de la presente invención.

25 La radiancia (L) de un cuerpo negro viene dada por la Ley de Planck:

$$L_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \left[ \frac{W}{\text{Sr} \cdot \text{m}^2 \cdot \mu\text{m}} \right] \quad (1)$$

30 donde  $C_1$  y  $C_2$  son las constantes de Planck y cuyos valores son  $1.191 \cdot 10^8 \text{W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$  y  $1,439 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ,  $\lambda$  es la longitud de onda, y T es la temperatura absoluta del cuerpo.

Resulta de especial interés para el análisis del comportamiento teórico del pirómetro el estudio de la función de Planck para longitudes de onda largas. Asumiendo que  $C_2 \cdot \lambda^{-1} \cdot T^{-1} \gg 1$ , la ley de Planck puede simplificarse dando lugar a la Aproximación de Wien (ver D. P.

DeWitt and G. D. Nutter, "Theory and practice of radiation thermometry": Wiley Online Library, 198):

$$L_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} \right)} \left[ \frac{W}{Sr \cdot m^2 \cdot \mu m} \right] \quad (2)$$

- 5 A partir de la aproximación de Wien se puede deducir una expresión representativa de la señal de intensidad (I) medida por un fotodetector para la banda de longitudes de onda de operación del pirómetro:

$$I(T, \lambda, \Omega, A) = \iint \int_{\lambda_A}^{\lambda_B} \frac{C_1 \cdot \delta(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda)}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} \right)} \cdot d\lambda \cdot d\Omega \cdot dA \quad (3)$$

10

donde  $\varepsilon(\lambda)$  es la función de emisividad de la superficie a medir,  $\lambda_A$  y  $\lambda_B$  son respectivamente los límites inferior y superior de la banda de longitudes de onda en las que opera el pirómetro.  $\delta(\lambda)$  es el coeficiente de pérdidas de la energía radiada para cada longitud de onda en el sistema. Este coeficiente dependerá de la atenuación de la fibra, del cono de aceptación, de las pérdidas de inserción del demultiplexor y de la responsividad del fotodetector. A es el área de la superficie de medida cubierta por la apertura numérica de la fibra.  $\Omega$  es el ángulo sólido del cono truncado formado por la superficie de la fibra óptica y un punto de la superficie de medida.

15

- 20 Un importante problema para determinar con exactitud la temperatura a partir de la señal de intensidad medida es el desconocimiento de la emisividad. La emisividad depende de diversos factores tales como la temperatura, el ángulo de emisión, la longitud de onda, y las propiedades mecánicas de la superficie de medida.

- 25 El pirómetro de dos colores presenta la ventaja de que permite medir la temperatura absoluta sin conocer la emisividad de la superficie de medida. Para ello, el pirómetro de dos colores utiliza la relación entre dos señales obtenidas en diferentes bandas de longitud de onda, para luego a través de la curva de calibración convertir la relación entre las dos señales en temperatura. Si las bandas de longitud de onda son suficientemente estrechas,  
30 los factores de pérdidas, la responsividad y la emisividad pueden considerarse constantes en cada banda de longitud de onda, todo ello permitiendo la captación de energía suficiente

como para poder realizar la medida. La relación de señales de salida ( $\gamma$ ) del pirómetro de dos colores está dada por:

$$\gamma = \frac{I_1}{I_2} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \int \int \int_{\lambda_{1,A}}^{\lambda_{1,B}} \frac{\delta(\lambda)}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} \right)} \cdot d\lambda \cdot d\Omega \cdot dA}{\varepsilon_2 \cdot \int \int \int_{\lambda_{2,A}}^{\lambda_{2,B}} \frac{\delta(\lambda)}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} \right)} \cdot d\lambda \cdot d\Omega \cdot dA} \quad (4)$$

5

donde  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  son las longitudes de onda central para la banda de longitudes de onda inferior y superior, respectivamente.

10 Considerando dos longitudes de onda discretas mediante un filtrado ideal de ambos canales definiéndose  $\lambda_c$  como la longitud de onda central entre ambos canales y  $\Delta\lambda$  como el espaciado entre ambos canales, según las expresiones:

$$\lambda_c = \frac{\lambda_2 + \lambda_1}{2} \quad (5)$$

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \quad (6)$$

15

A partir de ellas puede obtenerse la relación entre la temperatura medida ( $T_R$ ) y la temperatura real ( $T$ ) a partir de la relación de señales de salida de ambos canales dada por la ecuación (4):

$$20 \quad T_R = \left( \frac{1}{T} + \frac{\ln(\varepsilon_r \cdot \delta_r)}{C_2 \cdot \left( \frac{(-4) \cdot \Delta\lambda}{4 \cdot \lambda_c^2 - (\Delta\lambda)^2} \right)} \right)^{-1} \quad (7)$$

Esto significa que la desviación entre la temperatura real y la temperatura medida dependerá de las bandas de longitud de onda elegidas, así como de la relación de emisividades ( $\varepsilon_r$ ) y coeficientes de pérdidas ( $\delta_r$ ) del sistema para cada longitud de onda.

25 Aplicando la ecuación (5), se puede estimar el error de temperatura ( $E_T$ ) como:

$$E_T = \frac{(T_R - T)}{T} \cdot 100 \quad [\%] \quad (8)$$

Utilizando las ecuaciones (7) y (8) se ha calculado el error de temperatura en función de la relación de emisividades para diferentes canales de filtrado a una temperatura de 773K, ver Fig. 4. La relación entre los coeficientes de pérdidas para cada longitud de onda en el sistema se ha mantenido constante. Con ello lo que se pretende es analizar cómo varía el error de temperatura del pirómetro en función de los canales de filtrado elegidos.

A partir de la Fig. 4 se puede deducir que el error de temperatura decrece si el espaciado entre ambos canales de filtrado se incrementa. La distancia entre canales deberá de ser lo suficientemente amplia como para minimizar el error de temperatura y garantizar un correcto filtrado sin solapamiento entre canales. Por otra parte, la distancia entre las longitudes de onda centrales de ambos canales deberá de ser lo suficientemente estrecha para asegurar constante la emisividad. De la Fig. 4 también se observa que para longitudes de onda cortas el error de temperatura disminuye. Esto significa que aunque se trate de un material con una relación de emisividades que varíe bastante, el error de temperatura permanecerá bajo comparado con el caso de trabajar con longitudes de onda más largas. Pero, por otro lado, la energía radiada por una superficie a baja temperatura es pequeña, luego la medida de la temperatura se debe de realizar tomando longitudes de onda lo más cercanas a la longitud de onda correspondiente a la máxima energía radiada por la superficie a esa temperatura. La longitud de onda que proporciona la máxima energía radiada por un cuerpo se obtiene a partir de la Ley de Desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{Max} \cdot T = 2897.8 \quad [\mu\text{m} \cdot \text{K}] \quad (9)$$

Para el caso de un cuerpo a una temperatura de 773K, la longitud de onda que proporciona el máximo de radiación es de 3,95 $\mu\text{m}$ . Además la emisividad de las superficies metálicas decrece con el decremento de la longitud de onda, como se muestra en Y. S. Touloukian and D. P. DeWitt, "*Thermal radiative properties: metallic elements and alloys*": IFI/Plenum, 1970. Por esta razón, la longitud de onda central deberá de elegirse manteniendo un compromiso entre la reducción del error de temperatura y garantizar que se reciba suficiente energía para realizar la medida.

Otro factor importante que determina el error de temperatura es la respuesta global de pérdidas, teniendo en cuenta cada uno de los dispositivos del sistema a las longitudes de onda de filtrado. La Fig. 5 muestra el error de temperatura en función de la relación de emisividades para diferentes coeficientes de pérdidas a una temperatura de 773K. La longitud de onda central entre ambos canales y su espaciado se ha mantenido en 1,43 $\mu$ m y 0,24 $\mu$ m, respetivamente. Esta figura muestra que el uso de dispositivos ópticos con diferente comportamiento en pérdidas en las dos longitudes de onda,  $\delta_r$  distinto de 1, incrementa el error de temperatura del sistema. Por este motivo, se debe de tener especial cuidado en el acondicionamiento de ambas señales, tratando de alterar en la menor medida posible las dos señales o si realmente es indispensable su tratamiento, que éste se realice de forma global por igual en ambas señales.

## REIVINDICACIONES

1. Pirómetro (1) de fibra óptica a dos colores para la medida de la temperatura de la superficie radiante de una pieza (100), caracterizado por que comprende:
- 5       - un tramo (2) de fibra óptica multimodo simple que tiene un extremo delantero y un extremo posterior, donde el extremo delantero está orientado hacia la superficie radiante de la pieza (100) para recoger la radiación térmica emitida por la misma;
- un demultiplexor (3) basado en multiplexación por longitud de onda conectado al extremo posterior del tramo (2) de fibra óptica para dividir la radiación térmica recibida en
- 10       dos canales correspondientes a dos bandas estrechas de longitudes de onda cercanas;
- un par de fotodetectores (4a, 4b) iguales respectivamente conectados a dichos canales para transformar la radiación térmica de dichas bandas en sendas señales eléctricas analógicas;
- un par de amplificadores (5a, 5b) que amplifican las señales eléctricas analógicas
- 15       anteriores; y
- un convertidor analógico (6) digital que recibe dichas señales eléctricas analógicas y las convierte en señales digitales para su análisis por un procesador (7) con el objeto de determinar la temperatura de la superficie radiante.
- 20       2. Pirómetro (1) de acuerdo con la reivindicación 1, donde las dos longitudes de onda cercanas están separadas menos de 5  $\mu\text{m}$ .
3. Pirómetro (1) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde las dos longitudes de onda son menores de 2  $\mu\text{m}$ .
- 25       4. Pirómetro (1) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde las longitudes de onda están respectivamente entre 0,85  $\mu\text{m}$  y 1,40  $\mu\text{m}$  y entre 1,40  $\mu\text{m}$  y 1,7  $\mu\text{m}$ .
- 30       5. Pirómetro (1) de acuerdo con la reivindicación 4, donde las longitudes de onda son respectivamente 1,31  $\mu\text{m}$  y 1,55  $\mu\text{m}$ .
6. Pirómetro (1) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el demultiplexor está fabricado en fibra óptica multimodo.
- 35       7. Pirómetro (1) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el



diámetro del tramo (2) de fibra óptica está dentro del rango de 10  $\mu\text{m}$  hasta 500  $\mu\text{m}$ .

8. Pirómetro (1) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde los fotodetectores (4a, 4b) son fotodetectores de InGaAs.

5

9. Máquina-herramienta de control numérico, caracterizada porque comprende un pirómetro (1) de fibra óptica a dos colores como el definido en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde una porción delantera del tramo (2) de fibra óptica del pirómetro (1) está alojada en un agujero (25a, 25b) practicado en el porta-herramientas (20) de la máquina-herramienta, y , donde la distancia entre el extremo delantero del tramo (2) de fibra óptica y la superficie radiante de la pieza (100) instalada en la máquina-herramienta es de entre 0,1 mm a 1,5 mm.

10

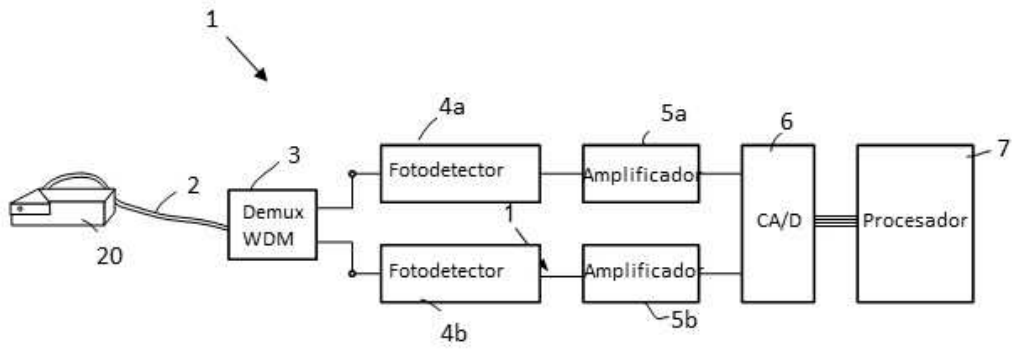


Fig. 1

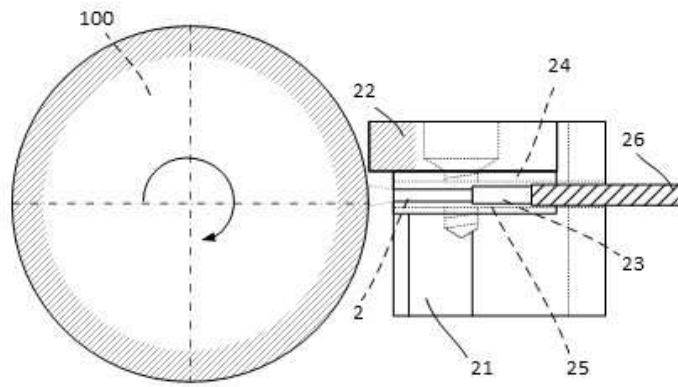


Fig. 2a

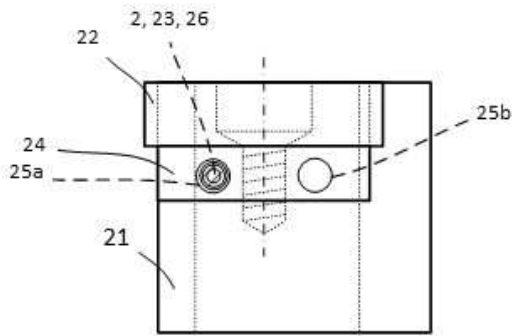


Fig. 2b

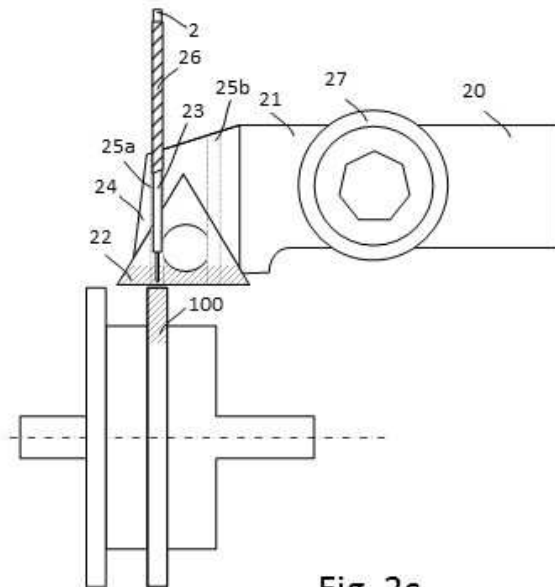


Fig. 2c

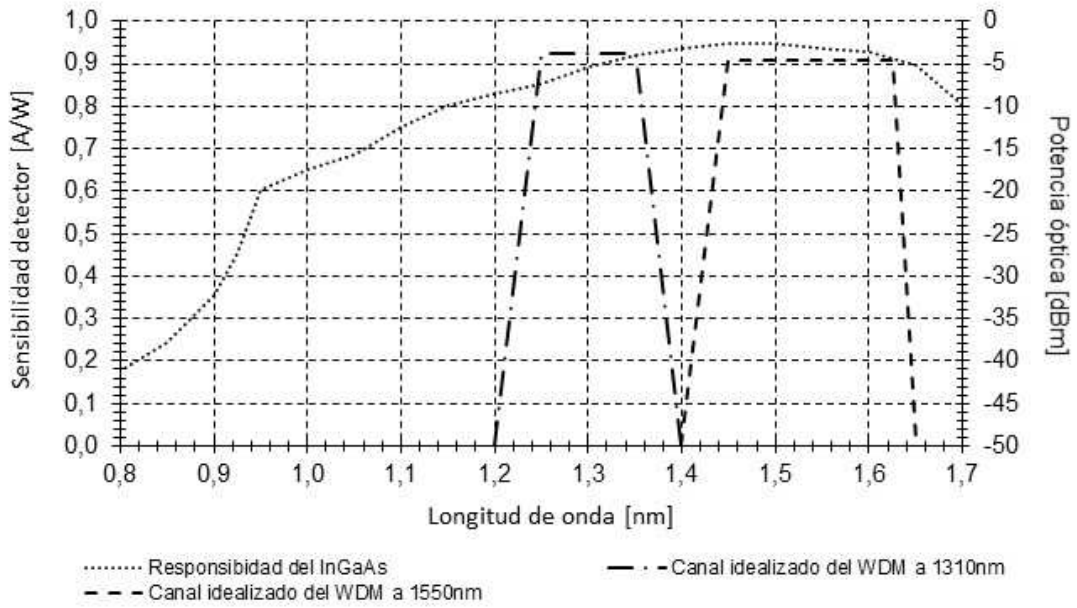


Fig. 3

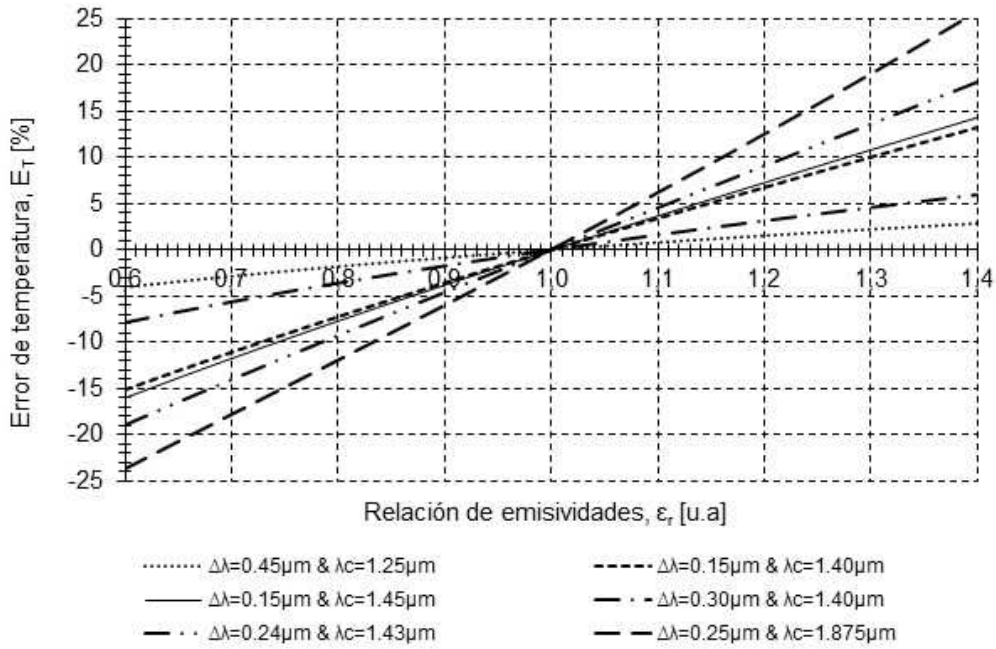


Fig. 4

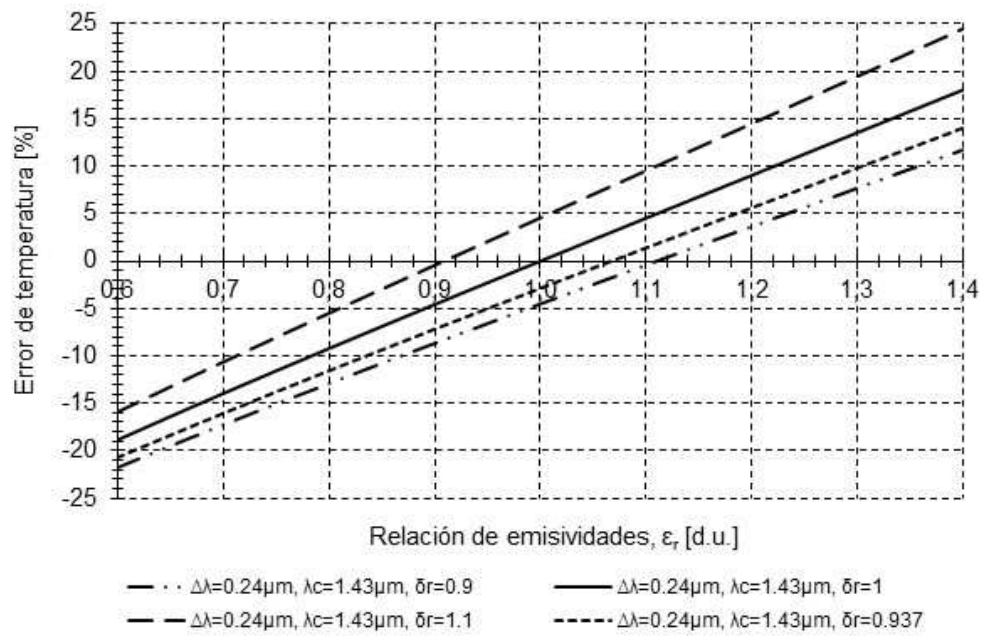


Fig. 5



- ②① N.º solicitud: 201530546  
②② Fecha de presentación de la solicitud: 22.04.2015  
③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤① Int. Cl.: **G01J5/08** (2006.01)  
**G01J5/48** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
Y	(TAPETADO et al.) "Monitoring machining temperature using optical fibers". SPIE Newsroom. 03/07/2014 DOI: 10.1117/2.1201406.005510 <a href="http://spie.org/newsroom/5510-monitoring-machining-temperature-using-optical-fibers">http://spie.org/newsroom/5510-monitoring-machining-temperature-using-optical-fibers</a>	1-12
Y	(FERNANDEZ et al.) "Error Estimation in a Fiber-Optic Dual Waveband Ratio Pyrometer". IEEE SENSORS JOURNAL, VOL: 4 No: 3 Paginas: 288 - 293. 01/06/2004 ISSN 1530-437X Doi: 10.1109/JSEN.2004.827209	1-12
Y	HAMAMATSU SELECTION GUIDE: "InGaAs Photodiodes". Marzo/2015 <a href="https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/ingaas_kird0005e.pdf">https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/ingaas_kird0005e.pdf</a>	8,9
A	(TAPETADO et al) "Temperature sensor based on fiber optic pyrometer in material removal processes". Proceedings of the SPIE 8421, 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors. 04/10/2012 Doi:10.1117/12.970276	1-12
A	(ZHOU XINXIN et al.) "An InGaAlAs-InGaAs Two-Color Photodetector for Ratio Thermometry". IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL: 61 No: 3 Paginas: 838 - 843. 01/03/2014 ISSN 0018-9383 Doi: 10.1109/TED.2013.2297409	1-10
A	(MÜLLER et al.) "Development of a fast fiber-optic two-color pyrometer for the temperature measurement of surfaces with varying emissivities". REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, VOL: 72 No: 8 Paginas: 3366 - 3374. 01/08/2001 ISSN 0034-6748 Doi: 10.1063/1.1384448	1-10

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia  
Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría  
A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita  
P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud  
E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

**El presente informe ha sido realizado**

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe  
06.07.2016

Examinador  
F. J. Olalde Sánchez

Página  
1/6



②① N.º solicitud: 201530546

②② Fecha de presentación de la solicitud: 22.04.2015

③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤① Int. Cl.: **G01J5/08** (2006.01)  
**G01J5/48** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	(BENO et al.) "Measurement of cutting edge temperature in drilling". 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems, VOL: 3 No: 1 Paginas: 531 - 536. 2012 ISSN 2212-8271 Doi: 10.1016/j.procir.2012.07.091	1-12

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe  
06.07.2016

Examinador  
F. J. Olalde Sánchez

Página  
2/6

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01J

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 06.07.2016

**Declaración**

<b>Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)</b>	Reivindicaciones 1-12	<b>SI</b>
	Reivindicaciones	<b>NO</b>
<b>Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)</b>	Reivindicaciones	<b>SI</b>
	Reivindicaciones 1-12	<b>NO</b>

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

**Base de la Opinión.-**

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.



**1. Documentos considerados.-**

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	(TAPETADO et al.) "Monitoring machining temperature using optical fibers".	03/07/2014
D02	(FERNANDEZ et al.) "Error Estimation in a Fiber-Optic Dual Waveband Ratio Pyrometer"	01.06.2004
D03	HAMAMATSU SELECTION GUIDE: InGaAs Photodiodes".	03/2015
D04	(TAPETADO et al) "Temperature sensor based on fiber optic pyrometer in material removal processes".	4/10/2012
D05	(ZHOU XINXIN et al.) "An InGaAlAs-InGaAs Two-Color Photodetector for Ratio Thermometry".	01.03.2014
D06	(MÜLLER et al.) "Development of a fast fiber-optic two-color pyrometer for the temperature measurement of surfaces with varying emissivities	01.08.2001
D07	(BENO et al.) "Measurement of cutting edge temperature in drilling"	2012

**2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración**

De acuerdo con el artículo 29.6 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/86 de Patentes (LP) se considera, preliminarmente y sin compromiso, que los objetos definidos por las reivindicaciones 1-12 no cumplen aparentemente el requisito de actividad inventiva en el sentido del artículo 8.1 LP, en relación con el estado de la técnica establecido por el artículo 6.2 de dicha Ley. En concreto,

La solicitud incluye dos reivindicaciones independientes que definen un pirómetro de fibra óptica a dos colores (reivindicación 1) y una máquina-herramienta provista de dicho pirómetro (reivindicación 10). La solicitud incluye adicionalmente reivindicaciones que definen pirómetros de fibra óptica a dos colores (R 2-9) dependientes de la reivindicación 1 y máquinas-herramienta provistas de dichos pirómetros (R 11, 12).

**PIRÓMETROS (reivindicaciones 1-9):**

El documento D01 divulgó (página 1, columna 2) un pirómetro de fibra óptica a dos colores para la medida de la temperatura de la superficie radiante de una pieza, que comprende:

- un tramo de fibra óptica multimodo (OM1) simple que tiene un extremo delantero y un extremo posterior, donde el extremo delantero recoge la radiación térmica; (adicionalmente divulgado en D04)
- un demultiplexor basado en multiplexación por longitud de onda conectado al extremo posterior del tramo de fibra óptica para dividir la radiación térmica recibida en dos canales correspondientes a dos bandas estrechas de longitudes de onda cercanas (1,3 y 1,55 micrómetros); (adicionalmente divulgado en D04)

D01 no divulgó explícitamente

- a) un par de fotodetectores similares respectivamente conectados a dichos canales (para transformar la radiación térmica de dichas bandas en sendas señales eléctricas analógicas)
- c) un par de amplificadores (que amplifican las señales eléctricas analógicas anteriores); y
- d) un convertidor analógico digital (que recibe dichas señales eléctricas analógicas y las convierte en señales digitales para su análisis por un procesador con el objeto de determinar la temperatura de la superficie radiante).

Estas características son de uso común en la técnica (D02, D05, D06) , p.ej D02 divulgó (Apartados II B, II C, III) pirómetros de fibra óptica a dos colores en el que se utilizan dos canales correspondientes a bandas estrechas con un par de fotodetectores similares respectivamente conectados a dichos canales, amplificadores, conversor analógico-digital y procesador.

- D01 divulgó adicionalmente la utilización de bandas de longitud de onda centradas en 1,3 y 1,55 (reivindicaciones 2-5); demultiplexor fabricado en fibra óptica multimodo (reivindicación 6); tramo de fibra óptica de diámetro comprendido entre 10 y 50 micrómetros (reivindicación 7)

- D03 divulgó diversos fotodetectores de InGaAs conocidos y de respuestas conocidas, resultando obvia la elección de fotodetectores iguales de InGaAs para los valores de longitudes de onda utilizados en el pirómetro de D01.

**MÁQUINAS-HERRAMIENTA (reivindicaciones 10-12):**

- La disposición de un pirómetro de fibra óptica a dos colores en una máquina herramienta de control numérico fue divulgada en D01, D04 y D07 (reivindicación 10);

- La disposición de la porción delantera del tramo de fibra óptica en un agujero practicado en el porta herramientas de la máquina herramienta fue divulgada en D01 y D04. (reivindicación 11);

- La elección de la distancia relativa óptima entre el extremo delantero del tramo de fibra óptica y la herramienta (superficie radiante de la pieza) resulta arbitraria y, en cualquier caso, resultado de mera experimentación no inventiva.