

# Trabajo Fin de Master

Medida de la temperatura superficial del carbonizado  
en combustión mediante pirometría con cámara digital

*(Measurement of the surface temperature of char in  
combustion in a fluidized bed by pyrometry with digital  
camera)*

by

Jesús Salinero González

Tutor: Alberto Gómez Barea



Departamento de Ingeniería Química y Ambiental  
Escuela Superior de Ingenieros  
Universidad de Sevilla  
Sevilla (España)  
Junio 2015



*A mis padres*



## Resumen

Debido a las características propias de la combustión en reactores de lecho fluido es muy difícil medir la temperatura superficial del carbonizado durante su conversión. Aunque hay numerosos trabajos en la literatura que han abordado esta cuestión los resultados presentan una amplia dispersión o incluso la temperatura medida no es la superficial. En este Trabajo Fin de Master se presentan algunas modificaciones en la forma tradicional de utilizar pirometría mediante dos colores que permiten medir la temperatura superficial del char en dichos equipos. Para ello, se trabaja en una planta experimental diseñada y construida con este fin. La aplicación de la técnica con las modificaciones propuestas, mejora la precisión de la temperatura calculada y aumenta el rango de temperaturas que pueden ser medidas, incluso a temperaturas inferiores a las del lecho. Además, esta técnica puede revelar detalles que escapan a otras, como la existencia de gradientes térmicos superficiales. La aplicación pirométrica aquí propuesta requiere conocer la emisividad del carbonizado. Sin embargo, esto no es un hándicap ya que, tal y como muestra el análisis del efecto de ésta variable sobre la precisión de la temperatura calculada, una variación del 15 % en su valor (0.85-1) produce errores inferiores al 1 % para temperaturas superiores a la de fondo, y una buena estimación de este parámetro permite medir temperaturas de combustión muy inferiores.



## Abstract

Due to the characteristics of combustion in fluidized bed reactors it is very difficult to measure the surface temperature of char during its conversion. Although, there are many papers in the literature which have dealt with this question, the results show a wide distribution and in some cases the measured temperature is not the surface temperature. In this Master Thesis some modifications to the traditional way of using Two-Color Pyrometry (P2C) has been proposed (One Color Pyrometry, P1C), in order to measure the surface temperature of char in such reactor. For doing that, a pilot-scale fluidized bed combustor has been designed and constructed. This design provides the opportunity to visually observe inside the reactor. According to the results, the accuracy of temperature measurement has been improved by P1C. This method is applicable for wider range of temperature and it is even possible to measure temperature lower than the bed temperature. Using P1C, different details such as surface thermal gradients, which cannot be measured by other techniques, are got. In order to use P1C the char emissivity should be known. However, the sensitivity analysis of the measurements in different char emissivity shows that a variation of 15% in emissivity value (0.85 to 1) gives an error lower than 1% when the temperature is higher than that background, while for lower temperature a good estimate of the char emissivity is needed.





## Tabla de contenido

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Tabla de contenido</b>	<b>V</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>Publicaciones y presentaciones</b>	<b>IX</b>
<b>Resumen capitular</b>	<b>XI</b>
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. El futuro de la combustión de los combustibles fósiles sólidos: El carbón	
1.2. Captura y almacenamiento de CO <sub>2</sub> en oxi-combustión: Una solución para reducir las emisiones de efecto invernadero	
1.2.1. Oxi-combustión en reactores de lecho fluido	
1.3. Temperatura de combustión en el desarrollo de las tecnologías de conversión	
1.3.1. Medida de la temperatura de combustión en reactores de lecho fluido	
1.4. Objetivo y alcance de este trabajo	
<b>Capítulo 2. Metodología y montaje experimental</b>	<b>7</b>
2.1. Temperatura superficial de combustión mediante pirometría con cámara digital	

## 2.2. Montaje experimental

2.2.1. Calibración y validación de la temperatura pirométrica del carbonizado con cámara digital

2.2.2. Medida de la temperatura pirométrica del carbonizado durante su combustión en lecho fluido

## **Capítulo 3. Resultados y discusión 13**

3.1. Calibración y validación de la temperatura pirométrica del carbonizado con cámara digital

3.1.1. Estudio del efecto del valor de la emisividad sobre la temperatura pirométrica

3.2. Aplicación para la medida de temperatura pirométrica del carbonizado en lecho fluido

## **Capítulo 4. conclusiones 23**

**Nomenclatura 27**

**Referencias 29**

**Anexo I. revisión de las técnicas de medida de la temperatura de las partículas de combustible sólido durante su conversión en reactores de lecho fluido 33**

**Anexo II. Modelo de la temperatura superficial determinada mediante pirometría con cámara digital 41**

## Agradecimientos

Como personas individuales vivimos todos juntos, y por tanto ni estamos ni hacemos las cosas solos. Este trabajo no iba a ser diferente, y en el tiempo en que fue desarrollado he contado con la ayuda y consejo de familiares y amigos. Por ello, quiero dar mi más sincero agradecimiento a los que forman mis circunstancias y me acompañan siempre.

De manera explícita, quiero agradecer a Alberto Gómez Barea no solo el haberme dado la oportunidad de investigar y de guiarme en el camino, sino además el haberme permitido descubrir la utilidad de trabajar una idea, aunque ésta sea equivocada.

También quiero agradecer a Bo Leckner, un genio con una asombrosa capacidad de escuchar, sus correcciones y consejos. A David Fernández su afecto puro y desinteresado, prestándome su ayuda siempre que lo he necesitado. A mis compañeros de trabajo, en especial a María Tripijana, su disposición a discutir cualquier idea. A Manuel Luna, Eva Sánchez, e Israel Pardo, la ayuda en la puesta a punto y realización de los ensayos.

Asimismo me gustaría agradecer a todos los miembros del departamento de Ingeniería Química y Ambiental su colaboración y apoyo. Y a la Universidad de Sevilla su labor en nuestra formación académica y personal.

Por último, y no por ello menos importante, quiero agradecer al MINECO su ayuda y apoyo económico financiando el proyecto del plan nacional OXICOGAS 2G, sin el cual, este trabajo no se hubiese podido realizar cumpliendo uno de los principales objetivos fijados en el proyecto mencionado.

*“1% inspiración, 99 % traspiración”*

*(Thomas Alva Edíson)*

*“Cuando sientas que no puedes más, tu corazón hará el resto”*

*(Mickey Goldmill)*

*“La felicidad no está al final del trabajo, sino en él”*

*(Alberto Gómez Barea)*

*“Puedes equivocarte mil veces, pero siempre en cosas diferentes”*

*(Leonor Asensio Aguerri)*

## Publicaciones y presentaciones

Este Trabajo Fin de Master recoge y completa el trabajo realizado durante dos años, parte del cual ha sido publicado y presentado en conferencia, symposium y workshops:

- J. Salinero, A. Gómez-Barea, B. Leckner, M. Tripiana, C. Bu, E. Gómez-González.: Improving char temperature measurement by pyrometry with digital camera. Proceedings of 22<sup>nd</sup> International Conference on Fluidized Bed Conversion. June (14-17), 2015, Turku (Finland)
- J. Salinero, A. Gómez-Barea, M. Tripiana, B. Leckner. Improving char temperature measurement during Oxy-combustion by pyrometry with digital camera. Poster of Symposium on Renewable Energy and Products from Biomass and Waste, May (12-13), 2015, CIUDEN (Cubillos del Sil, Leon, Spain)
- J. Salinero, A. Gómez-Barea, B. Leckner, C. Bu. “Application of one-color pyrometry with digital camera for the measurement of fuel temperature in fluidized bed combustion”. 4<sup>th</sup> International Workshop on Oxy-fuel FBC Technology, October (04-05), 2014, Nanjing (China)
- J. Salinero. “Progress on the experimental device to measure the temperature of char particles during oxycombustion in fluidized bed based on visual observations and pyrometry”. 1<sup>th</sup> International Workshop on Fluidized-Bed Oxycombustion, March (26-27) 2014, Sevilla (Spain)

El autor ha participado en otros trabajos que aun estando relacionados con el tipo de reactor que en esta Master Thesis se opera, no son fruto directo de este trabajo

- M. Tripiana, A. Gómez-Barea, J. Salinero, B. Leckner. Study of Gas and Solid Flow Behavior in CFB: Measurements in a Cold Unit and Comparison With a Theoretical Model. Poster of Symposium on Renewable Energy and Products from Biomass and Waste, May (12-13), 2015, CIUDEN (Cubillos del Sil, Leon, Spain)
- J.Salinero. “Modeling of char combustion in an FB in N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmospheres: results from shrinking core model and further model improvements”.

- 1<sup>th</sup> International Workshop on Fluidized-Bed Oxycombustion, March (26-27) 2014, Sevilla (Spain)

Durante el desarrollo de este trabajo el autor ha estado contratado por los proyectos:

- Oxi-Combustión y Oxi-Gasificación en Lecho Fluidizado: Estudio de la Conversión del Carbonizado para el Diseño y Optimización de Equipos de Captura de CO<sub>2</sub> de Segunda Generación

Plan Nacional. ENE2012-37999.2012-2015

Investigados Principal: Alberto Gómez Barea

- Fletgas2

Proyecto de excelencia de la Junta de Andalucía. P12-TEP-1633. 2014-2017

Investigados Principal: Pedro Ollero de Castro

## Resumen capitular

Este trabajo Fin de Master comienza con un primer capítulo de introducción donde se justifica la necesidad de desarrollar la tecnología de combustión de carbón en orden a reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$ . Dentro de las tecnologías candidatas, se destaca la oxicomustión en reactores de lecho fluido. Donde uno de los principales retos está relacionado con el conocimiento y determinación de la temperatura superficial de combustión del carbonizado durante su conversión. La revisión bibliográfica presentada muestra el potencial de una de las técnicas de medida de temperatura, y ésta establece el objetivo principal de este Trabajo Final de Master.

Tras el primer capítulo donde se localiza la falta de conocimiento que motiva la realización de este trabajo. En el segundo capítulo se presenta el modelo matemático sobre el que descansa la medida pirométrica de la temperatura con cámara digital, el montaje experimental empleado para que se cumpla las simplificaciones y necesidades del modelo, y en último lugar, se muestra el procedimiento experimental seguido para cumplir los objetivos planteados en éste trabajo.

El tercer capítulo corresponde a la presentación de los resultados y su discusión. En él, de forma sistemática, se realiza la calibración de la técnica de medida de temperatura, y se valida mediante la combustión aislada del carbonizado situada en el centro de un horno eléctrico. Tras el análisis de las simplificaciones utilizadas, se muestra su aplicación en reactor de lecho fluido. El último capítulo corresponde a las conclusiones. Se resume el camino recorrido, desde el estado del arte del cual se partió hasta los principales resultados, pasando por las cuestiones que motivaron la realización de este trabajo. Este capítulo se cierra con una propuesta de trabajo futuro, donde se insta a emplear la técnica presentada para identificar la máxima concentración de  $\text{O}_2$  que es posible alimentar al reactor manteniendo el correcto funcionamiento del mismo y evitando la fusión de las partículas de combustible, permitiendo así avanzar en el estudio del efecto que el cambio de la atmósfera de combustión ( $\text{N}_2\text{-O}_2$  vs  $\text{O}_2\text{-CO}_2$ ) tiene sobre el proceso de conversión.

El trabajo se cierra con dos anexos que recogen la revisión bibliográfica (Anexo I), y el modelo físico completo sobre el que descansa la medida de la temperatura pirométrica mediante cámara digital.



# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. El futuro de la combustión de los combustibles fósiles sólidos: El carbón

En la actualidad, más del 75 % de la demanda energética mundial se abastece mediante la conversión de combustibles fósiles, donde la combustión del carbón cubre alrededor del 25 % [1, 2]. Cambiar el modelo energético actual (Fig. 1.1) es un trabajo que llevará varias décadas de esfuerzo por la rigidez característica del sistema de producción y abastecimiento de energía primaria del mundo, que hace que los cambios en el mix energético sean lentos. Un ejemplo de ello es la variación en el consumo mundial de petróleo acontecido desde su primera crisis (1973) hasta nuestros días, donde apenas ha caído un 13 % [2]. Esta propiedad es efecto de las pérdidas económicas de empresas y países que abastecen la demanda energética si se produjese un cambio a corto plazo del mix. Por ello, la creciente demanda energética mundial será abastecida en gran medida mediante la combustión de los combustibles fósiles. En especial la combustión del carbón, que incluso podría aumentar su presencia en el mix energético actual (principal fuente de energía primaria de los países en desarrollo como China) dado su coste y distribución geográfica (mayor seguridad de suministro), [1, 2].

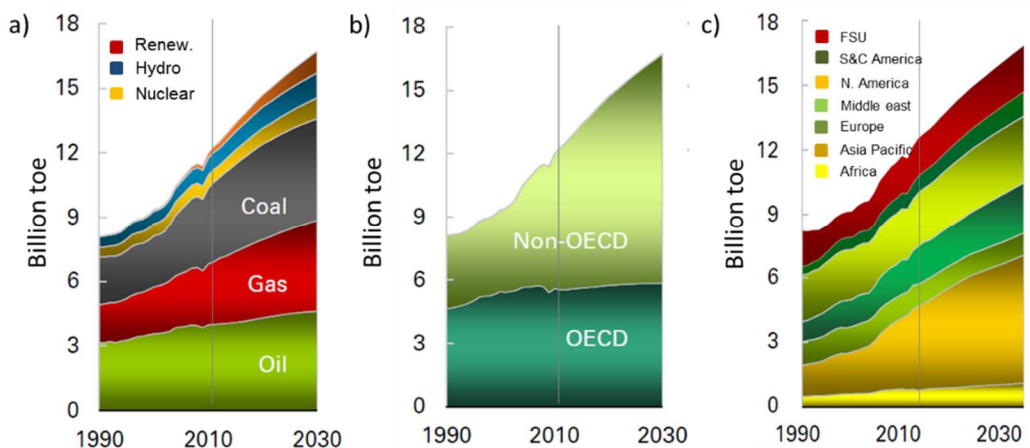


Figura 1.1. Producción por fuentes (a), regiones (b), y demanda (c) de la energía primaria mundial [1, 2]

## 1.2. Captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> en oxi-combustión: Una solución para reducir las emisiones de efecto invernadero

Las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al modelo energético actual han aumentado a lo largo de los años (Fig. 1.2. a), y continuarán haciéndolo a menos que se tomen medidas y emprendan acciones que la reduzcan de manera inmediata. Sin ellas, no será posible estabilizar la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférica en los niveles recomendados por los especialistas de 450 ppm, con las repercusiones medioambientales y económicas nefastas a nivel mundial [2, 3]. Las medidas para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> pasan por mejorar la eficiencia de la planta y la separación del CO<sub>2</sub> de los gases de combustión o combustible. La Captura y Almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CAC) es una tecnología clave para reducir las emisiones atmosféricas de CO<sub>2</sub> de los principales focos de emisión, como son las plantas de producción de energía eléctrica e instalaciones industriales [2]. Dentro de las tecnologías de captura desarrolladas específicamente para el secuestro y almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> destaca la oxi-combustión (Fig. 1.2. b), proceso de conversión del carbón con una corriente de O<sub>2</sub> puro mezclada con parte de los gases de combustión recirculados (evitando así diluir el CO<sub>2</sub> con el N<sub>2</sub> del aire) que genera una corriente de gases a la salida de la caldera con una alta concentración de CO<sub>2</sub> lista para su secuestro sin necesidad de equipo de captura [4, 5]. La oxi-combustión es una de las propuestas con mayor aumento de la eficiencia neta del proceso (21-35) % gracias a su baja penalización energética (7-13) %, reduciendo la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera, y permitiendo la disminución del volumen del reactor dado el menor flujo de gases en el interior de la caldera [4-7].

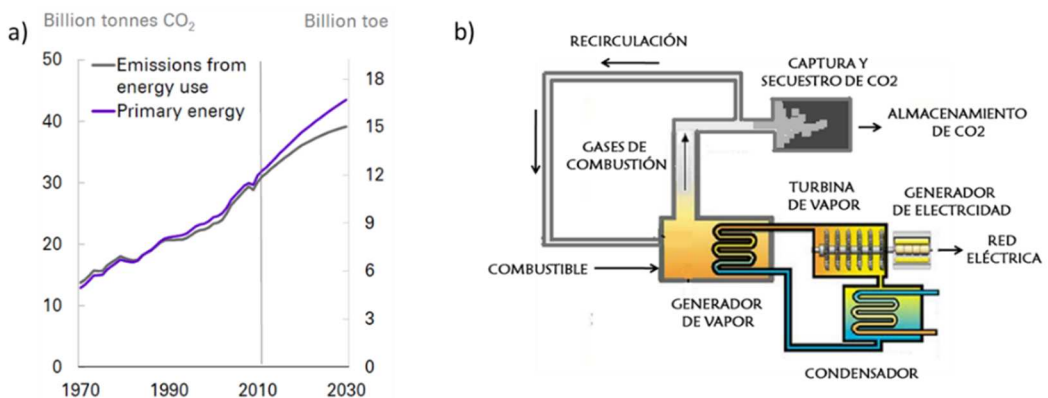


Figura 1.2. a) Emisión de CO<sub>2</sub> asociada a la demanda de energía primaria [1, 2], b) representación de la captura de CO<sub>2</sub> mediante oxi-combustión

### 1.2.1. Oxi-combustión en reactores de lecho fluido

La tecnología de oxi-combustión puede instalarse en plantas de producción de energía eléctrica construidas y diseñadas para trabajar en combustión con aire mediante la recirculación de parte de los gases de combustión que al diluir el  $O_2$  mantienen condiciones parecidas a las de combustión en la caldera (1ª generación). Aunque el desarrollo de la 1ª generación de oxi-conversores es un avance importante en la reducción de las emisiones de  $CO_2$ , se plantea el reto de aprovechar el potencial de esta tecnología alimentando una mayor concentración de  $O_2$  (2ª generación), mejorando la eficiencia térmica (mayor calor volumétrico generado) y de conversión (mayor concentración de  $O_2$ ), y reduciendo volumen de gases presente en la cámara de combustión. Sin embargo, y pese a los proyectos internacionales que buscan la comercialización de ésta tecnología [8], existen una serie de desafíos que deben ser investigados y resueltos antes de aventurarse a construir una oxi-caldera de 2ª generación. Entre estos retos se encuentra aclarar el efecto que sobre la cinética y el modo de conversión de la partícula de combustible sólido tiene el cambio de la atmósfera de combustión. Además de pensar en cómo extraer una mayor cantidad de energía (calor generado por unidad de volumen) del interior de una caldera con menor volumen que la equivalente en combustión (menor espacio para poner elementos de intercambio de calor como banco de tubos o aletas) [6, 7], o como controlar la temperatura de combustión (la temperatura adiabática de combustión aumenta cuando la conversión se realiza en una atmósfera enriquecida con  $O_2$ ) y transferencia de calor, que son los principales problemas a los que se enfrenta esta tecnología. Aunque los primeros trabajos realizados en este campo se centraron en reactores de carbón pulverizado (caldera común en la mayoría de las plantas de producción de energía eléctrica) [4, 5], en la pasada década se comenzó el análisis de la aplicación en reactores de lecho fluido de planta piloto mostrando la viabilidad (no existen barreras particulares) en la implementación de la oxi-combustión en dichos reactores [9, 10]. Además una característica especialmente positiva en calderas de lecho fluido es la posibilidad de utilizar combustibles de bajo poder calorífico que aparte del beneficio económico y medioambiental (caso de usar residuos o biomasa), presentan una menor temperatura adiabática de combustión, que junto con el mejor control de la temperatura de combustión que brindan la recirculación de sólidos permiten aumentar la concentración de  $O_2$  alimentado, reduciendo la recirculación de los gases de combustión [7].

### 1.3. Temperatura de combustión en el desarrollo de las tecnologías de conversión

El desarrollo de la tecnología de combustión pasa por conocer y controlar los parámetros de los que depende. Uno de los más importantes durante la combustión es la

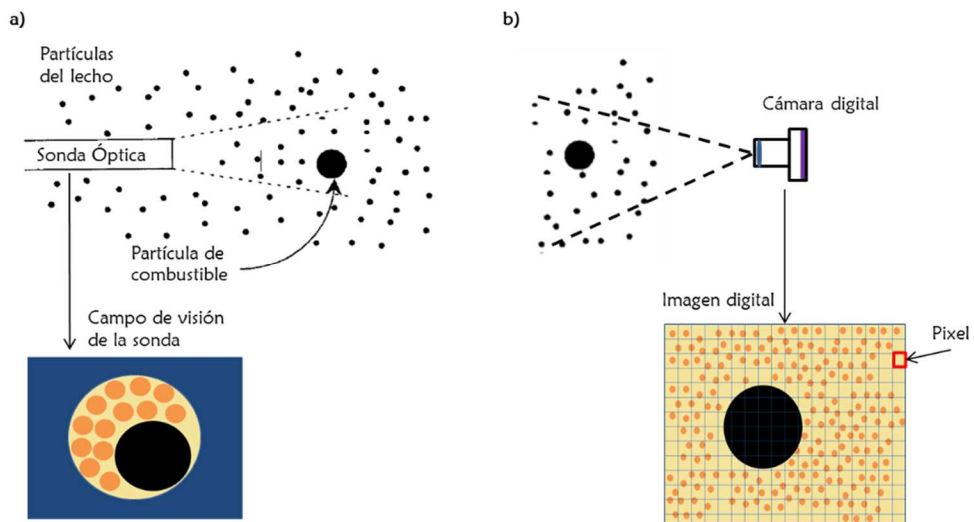
temperatura de la partícula de combustible sólido durante su conversión, que afecta a la eficiencia de equipos, influye en la conversión del combustible, tasa CO-CO<sub>2</sub> producida y emisiones, es uno de los principales parámetros en la transferencia de calor y es clave en los problemas de operación de las calderas por formación de escorias y ensuciamiento [9-12]. En oxi-combustión la concentración de O<sub>2</sub> presente en la atmósfera de conversión puede dar lugar a velocidades de conversión que hagan que la temperatura de las partículas de carbonizado alcancen niveles inadmisibles produciéndose su fusión [13-15], además de poder producirse aglomeraciones que afecten a la correcta fluidización del reactor [16]. Por ello es clave disponer de medidas precisas y fiables de la temperatura superficial de las partículas de combustible sólido durante su oxi-conversión.

### 1.3.1. Medida de la temperatura de combustión en reactores de lecho fluido

Dada la importancia de la temperatura de combustión sobre el desarrollo, control y conocimiento de las tecnologías de combustión (conversión) existen numerosos trabajos en la literatura y métodos (técnicas) de medida desarrolladas hasta la actualidad (Anexo I). Dentro del campo de la combustión en reactores de lecho fluido se han utilizado técnicas de contacto como pueden ser los termopares para conocer la temperatura de la partícula de combustible durante su conversión [13-20]. Sin embargo, debido a la naturaleza intrusiva, la degradación que pueden sufrir en ambientes duros de reacción, y las medidas puntuales que presentan los métodos de contacto, se utilizan técnicas ópticas para evitar dichas desventajas dando lugar a las tecnologías de no-contacto basadas exclusivamente en la captura e interpretación de la radiación térmica.

Una de las técnicas de no-contacto más utilizadas es conocida como pirometría óptica [21-28]. La captura de la radiación térmica puede realizarse bien mediante sonda óptica [21-25] o cámara digital [26-28]. Mediante la utilización de una sonda inmersa en un lecho fluido se ha medido el exceso de la temperatura de partículas de char o carbón sobre la del lecho, e incluso se ha estimado el tamaño de la partícula de combustible [23-25]. Sin embargo, es una técnica con resultados dispersos que los hace difícil de interpretar. Ello es debido a la dependencia del resultado con la fracción del campo de visión de la sonda ocupado por el combustible (función de la distancia entre ambas, y del tamaño de la partícula en cada instante), y la frecuencia con que son observadas las partículas de combustible (solo cuando atraviesan en campo de visión). Además, la temperatura calculada es la media de los cuerpos presentes en el campo de visión (Fig. 1.3. a). El uso de un equipo digital para capturar e interpretar la radiación salva este inconveniente, ya que la radiosidad de una región del espacio que irradia un pixel, se ve afectada de forma despreciable por la radiosidad de las regiones adyacentes (Fig. 1.3. b). Mediante pirometría

con cámara digital se ha medido el campo de temperatura del interior de un reactor de lecho fluido generado durante la fluidización y combustión de una mezcla aire-propano [28]. Recientemente, también se ha aplicado esta técnica para analizar el efecto que el cambio en la atmósfera de conversión de la oxi-combustión produce sobre la temperatura de llama (combustión de los volátiles) [15]. Incluso se han empleado cámaras térmicas infrarrojas para estudiar la transferencia de calor y los perfiles de temperaturas existentes entre las partículas sólidas del lecho y el gas de fluidización [29-31]. Estos trabajos muestran el potencial que tiene la captura mediante equipo digital para revelar detalles que escapan a otras técnicas como por ejemplo la existencia de gradientes térmicos superficiales en el carbonizado (combustión superficial no uniforme) o revelar detalles sobre la transferencia de calor entre las partículas, reactor, y agente de fluidización.



**Figura 1.3. Campo de visión asociado a una sonda óptica (a) [23], y cámara digital (b)**

#### 1.4. Objetivo y alcance de este trabajo

Este Trabajo Fin de Master (TFM) se desarrolla dentro del proyecto del plan nacional OXICOGAS 2G cuyo objetivo general es generar el conocimiento necesario para el desarrollo de oxi-conversores de 2ª generación en lecho fluido [32]. En particular, éste proyecto busca identificar la máxima concentración de  $O_2$  que es posible alimentar al equipo manteniendo niveles admisibles en la temperatura del lecho y del carbonizado durante su conversión. Por ello, es vital disponer de medidas fiables y precisas de la temperatura de combustión de la partícula de char durante su conversión.

La precisión de la temperatura calculada mediante pirometría no solo es función de las simplificaciones e hipótesis de la física del problema, sino además de los parámetros ópticos y electrónicos del equipo de captura e interpretación de la radiación [15, 25, 33]. En la

literatura pueden encontrarse trabajos que analizan dicha precisión cuando la radiación es capturada mediante sonda óptica [25, 33-35]. Sin embargo, se ha publicado poco cuando la captura se realiza mediante un equipo digital [27]. Por otro lado, los trabajos analizados en la literatura que utilizan pirométrica aplican la técnica mediante dos o más bandas espectrales (colores) debido a que el uso de más de un color permite obtener la temperatura de la superficie emisora bajo la suposición de comportamiento gris, mientras que el uso de un único color necesita el valor de la emisividad. Y el estudio de la literatura revisado en el punto anterior (desarrollado en detalle en el Anexo I) muestra que aún no se ha medido de manera precisa y fiable la temperatura superficial de partículas de carbonizado durante su conversión en un reactor de lecho fluido. Por ello el principal objetivo de este trabajo es presentar la aplicación de la técnica pirométrica con cámara digital para determinar la temperatura superficial del carbonizado durante su conversión en un reactor de lecho fluido. Para ello:

1) Se analiza como la mínima y máxima radiación que es capaz de detectar el sensor afecta a la precisión de la temperatura pirométrica calculada.

2) Se valida la técnica utilizando una única banda espectral (color) comparando la temperatura superficial pirométrica frente a la medida por un termopar en partículas de carbonizado de madera de Haya durante su combustión en el interior de un horno eléctrico. Además, se analiza la sensibilidad del resultado respecto la emisividad asumida en el cálculo.

3) Se presenta la aplicación de la técnica pirométrica midiendo la temperatura de las partículas de char durante su combustión en un reactor de lecho fluido

## Capítulo 2. Metodología y montaje experimental

### 2.1. Temperatura superficial de combustión mediante pirometría con cámara digital

La medida de la temperatura mediante pirometría se basa en la captura e interpretación de la radiación térmica emitida por el cuerpo cuya temperatura se quiere conocer. Dicha captura e interpretación puede realizarse mediante un equipo digital, como una video cámara o una cámara fotográfica, donde cada uno de los pixeles del sensor proporcionan tres valores función de la radiación térmica que reciben de la escena visualizada pertenecientes a las bandas espectrales (colores) roja, verde y azul [27]. Esos números son conocidos como números digitales ( $DN_k$ ), y se accede a ellos con un programa de tratamiento de imágenes, como por ejemplo MATLAB, que genera tres matrices, donde cada elemento (m,n) contiene el número digital asociado a la radiación que recibe de la escena visualizada el pixel (m,n).

Los trabajos encontrados en la literatura que miden la temperatura mediante pirometría, utilizan simultáneamente la información contenida en dos colores o bandas espectrales (Pirometría en dos colores, P2C) [21-28, 33-36]. Éste uso simultaneo permite determinar la temperatura con la única hipótesis de comportamiento gris para el combustible, y siempre que la temperatura sea superior a la de alrededor (ec. 2.1, y Anexo II). Sin embargo, utilizando un color (Pirometría en un color, PIC) también es posible calcularla, incluso cuando la temperatura es inferior a la de alrededor, si la emisividad es conocida (ec. 2.2, y Anexo II).

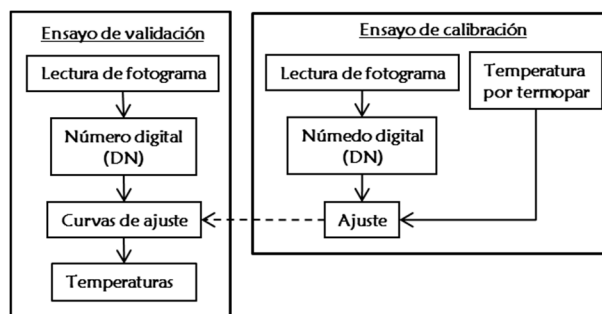


Figura 2.1. Diagrama de bloques del algoritmo que permite determinar la temperatura pirométrica.

$$(ec. 2.1) \quad T_{P2C,ij} = \frac{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_j} - \frac{1}{\lambda_i} \right)}{\left( \ln \left( \frac{DN_i}{DN_j} \right) + \ln(\beta_{P2C,ij}) \right) - 5 \ln \left( \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)}$$

$$(ec. 2.2) \quad T_{P1C,k} = \frac{C_2}{\lambda_k \left[ \ln \left( \Phi_k \varepsilon_c \frac{C_1}{\lambda_k^5} \right) - \left( \ln(\beta_{P1C,k} DN_k - (1 - \varepsilon_c) E(\Delta\lambda_k, T_w)) \right) \right]}$$

Tanto para aplicar P2C (ec. 2.1), como PIC (ec. 2.2), y obtener la temperatura de la escena visualizada cuya radiación se captura, irradia e interpreta cada pixel del sensor del equipo digital mediante los números digitales de cada fotograma, es necesario conocer el valor del parámetro de calibración  $\beta$  ( $\beta_{P2C, ij}$  y  $\beta_{PIC, k}$ ). Éste parámetro se puede estimar mediante curvas de ajuste obtenidas mediante ensayos previos de calibración. En estos ensayos se ajustan los puntos:  $[\ln(DN_i/DN_j) - \ln(\beta_{P2C,ij})]$  para P2C, y  $[\ln(DN_k) - \ln(\beta_{PIC,k})]$  para PIC, obtenidos al sustituir en las ec. 2.3 y ec. 2.4 la temperatura asociada a la región superficial cuya radiación miden los píxeles asociados a ésta mediante los números digitales (ver p<sup>to</sup> 2.2.1). De esta manera las curvas obtenidas (polinomios) almacenan la relación existente entre los números digitales y el parámetro de calibración dentro del intervalo de temperatura de interés (Anexo II, punto AII 4) [15]. En la figura 2.1 aparece el diagrama de bloques del proceso que permite medir la temperatura por P2C, y PIC.

$$(ec. 2.3) \quad \ln(\beta_{P2C,ij}) = \frac{C_2}{T} \left( \frac{1}{\lambda_j} - \frac{1}{\lambda_i} \right) + 5 * \ln \left( \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right) - \ln \left( \frac{DN_i}{DN_j} \right)$$

$$(ec. 2.4) \quad \ln(\beta_{P1C,k}) = \ln \left( \Phi_k \varepsilon_c \frac{C_1}{\lambda_k^5} \exp \left( - \frac{C_2}{\lambda_k T} \right) + (1 - \varepsilon_c) E(\Delta\lambda_k, T_w) \right) - \ln(DN_k)$$

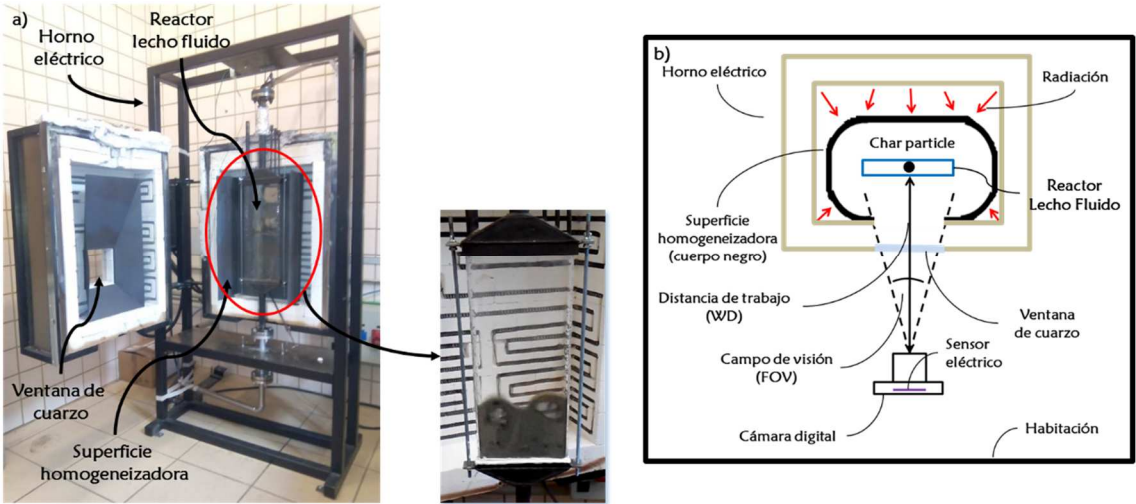


Figura 2.2. Equipos experimentales (a), y montaje (b) para la realización de los ensayos de combustión del carbonizado



## 2.2. Montaje experimental

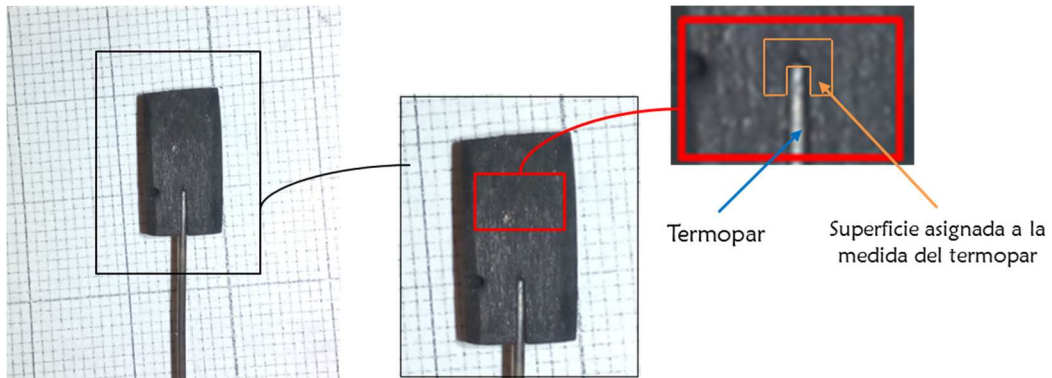
El montaje experimental utilizado para calibrar y validar la temperatura pirométrica con cámara digital, así como para mostrar su aplicabilidad en combustión en lecho fluido, se muestra en la Fig. 2.2. Consiste en un horno eléctrico, con una cámara de alta temperatura (50 cm x 70 cm x 30 cm) equipada con una superficie que homogeneiza la temperatura y la radiación procedente de las resistencias eléctricas (11 KW). La superficie homogeneizadora es una chapa metálica de acero 310 con comportamiento ideal negro (pintada con pintura negra resistente a 1050 °C). A su vez, el horno dispone de una ventana de cuarzo (195 mm x 195 mm) que permite observar y realizar medidas ópticas de su interior. La combustión en lecho fluido se realiza en un reactor con paredes de cuarzo (transparente a la radiación térmica en la banda espectral visible) en la zona correspondiente al bottom y freeboard. Éste se sitúa en el centro del horno eléctrico rodeado por la superficie negra homogeneizante. La geometría del reactor es de carácter bidimensional (18 cm x 50 cm x 1.8 cm) en aras de obtener el mayor número de imágenes de la partícula de carbonizado posible. El equipo de captura e interpretación de la radiación térmica empleado es una video cámara JVC Everio HD equipada con un sensor CMOS de 2 Megapíxeles de resolución, situada a una distancia de trabajo (WD) de 100 cm, con ángulo de visión (FOV) de 24° que se mantuvieron constantes en todos los ensayos. Los equipos se situaron en una habitación oscura para asegurar que la única radiación que alcanza el sensor es la radiada por la superficie del carbonizado durante su combustión y el fondo (Fig. 2.2 b). La tabla 2.1 recoge las principales características de los equipos que componen el montaje experimental descrito.

Equipo	Características
Horno eléctrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Potencia eléctrica: 11 KW</li> <li>- Cámara de alta temperatura: 50 cm x 70 cm x 30 cm</li> <li>- Ventana de cuarzo: 19.5 cm x 19.5 cm</li> </ul>
Reactor de lecho fluido	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 18 cm x 50 cm x 1.8 cm</li> <li>- Fabricado en cuarzo</li> </ul>
Cámara digital	<ul style="list-style-type: none"> <li>- JVC Everio HD</li> <li>- 2 Megapíxeles</li> <li>- WD (100 cm), FOV (24°)</li> </ul>

### 2.2.1. Calibración y validación de la temperatura pirométrica con cámara digital

En cada ensayo de calibración y validación se llevó a cabo la combustión aislada (sin reactor de lecho fluido) de una partícula de char de madera de haya (12 mm de diámetro

equivalente aproximadamente) en el centro del horno a una temperatura de operación de  $800 \pm 6$  °C. Para analizar la precisión de la temperatura superficial pirométrica, se situó un termopar tipo-K fino y flexible ( $750 \mu\text{m}$  de diámetro de vaina) en el interior de una cavidad realizada en la superficie del carbonizado ( $4 \text{ mm} \times 500 \mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$ ) mediante un drémel con broca de  $500 \mu\text{m}$  (Fig. 2.3). De esta forma, la temperatura media por el termopar es la temperatura de la superficie del carbonizado que rodea al termopar durante la combustión (Fig. 2.3).



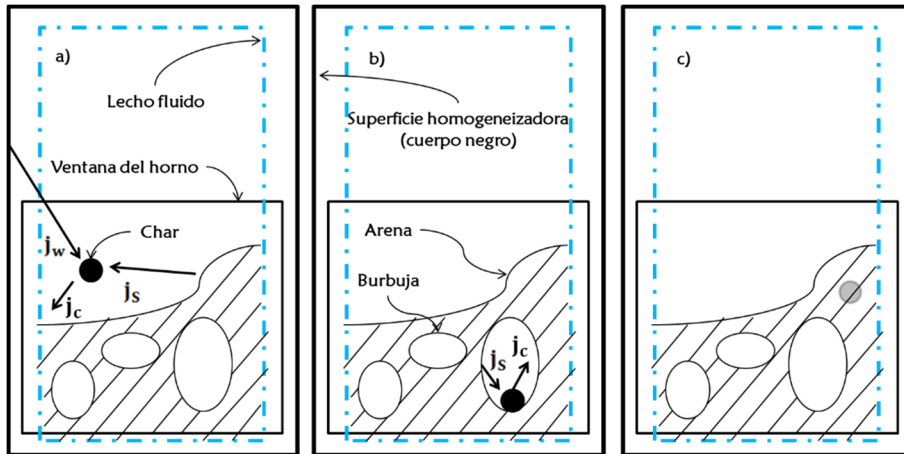
**Figura 2.3. Termopar insertado en la superficie del carbonizado de Haya y superficie asignada a la medida del termopar**

La calibración de la cámara digital se realizó mediante el análisis de las imágenes de 10 ensayos de combustión, considerados válidos mientras el termopar estuviese dentro de la cavidad realizada (las imágenes analizadas corresponden al periodo desde el inicio de la combustión hasta que el termopar se sale de la cavidad). Un total de 1277 fotogramas permitieron obtener las curvas de ajuste que almacenan la relación  $T_c - DN_k - \beta_k$  [15]. En cada fotograma se identificó la zona superficial del carbonizado cuya temperatura mide el termopar y se le asignó el número digital medio de los píxeles que la componen. Las curvas de ajuste obtenidas para P2C y PIC se utilizaron en otros tres ensayos de validación (429 fotogramas), realizados en las mismas condiciones que los de calibración, para obtener la temperatura pirométrica asociada al número digital medio de los píxeles de la zona superficial del carbonizado cuya temperatura mide el termopar, y mediante su comparación analizar la precisión y fiabilidad de la técnica.

### **2.2.2. Medida de la temperatura pirométrica del carbonizado durante su combustión en lecho fluido**

Para medir la temperatura pirométrica del carbonizado durante su conversión en el reactor de lecho fluido, es necesario que la configuración experimental (descrita arriba) verifique las hipótesis que permiten obtener el modelo matemático presentado en 2.1, y desarrollado en el Anexo II. Una de las principales hipótesis es que la radiación recibida

por el carbonizado se modela como la radiación que recibiría de una superficie negra. Sin embargo, como muestra la Fig. 2.4, además de la radiación procedente del fondo ( $j_w$ ), recibe la radiación procedente del lecho de arena ( $j_s$ ). Para aplicar el modelo, se asume que la emisividad del lecho es 1 [23, 37], y se alimenta una masa de combustible menor al 1 % de la masa del lecho de forma que se asegure que la temperatura del lecho se mantiene constante e igual a la de operación (800 °C). Por su parte, al ser de cuarzo las paredes del reactor, la radiación procedente de la superficie homogeneizante irradia el char de manera difusa, y sin verse afectada. Las relaciones entre áreas cumplen; (i)  $A_w \gg A_c$ , (ii)  $A_s \gg A_c$ , y (iii)  $A_w \gg A_{wnd}$ , y la partícula alimentada es convexa.

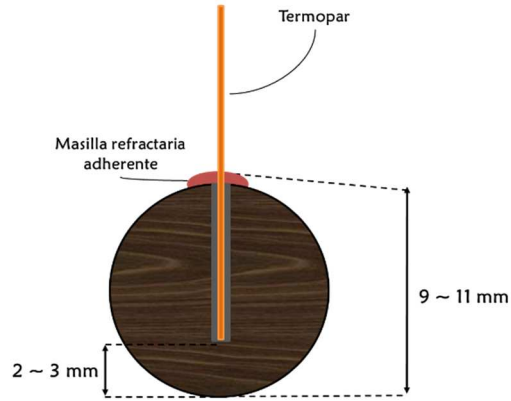


**Figura 2.4. Localización del char durante su combustión en lecho fluido: sobre el lecho (a), inmersa en una burbuja (b), y cubierta por el lecho (c)**

<b>Tabla 2.1 Tipos de ensayos (Pruebas de combustión del carbonizado de Haya)</b>			
	Nº de tests	T combustión	Objetivo
Combustión aislada	13 (1706 imágenes)	800 ± 6 °C (Cámara de alta temperatura del horno eléctrico)	Calibración y validación de la técnica
Combustión en lecho fluido	1 (620 imágenes)	800 ± 6 °C (lecho de arena)	Aplicación sobre lecho fluido

La combustión en el reactor de lecho fluido se realizó en un lecho de arena de 15 cm de altura (250-500  $\mu\text{m}$ , 3100  $\text{Kg}/\text{m}^3$ ,  $U_{mf} = 0.2 \text{ m/s}$ ) a 800 ± 6 °C (controlada eléctricamente mediante el horno), y con aire precalentado como agente de fluidización ( $U_f = 0.22 \text{ m/s}$ ). Se alimentó una partícula esférica de carbonizado de haya (10 mm de diámetro) con un termopar tipo-k de 0.75  $\mu\text{m}$  de diámetro insertado en su interior para medir la temperatura de un punto interno situado a unos mm de su superficie (Fig.2.5). La

partícula se suspendió sobre la superficie del lecho, y las temperaturas medidas por el termopar se compararon con la temperatura superficial medida, máxima y mínima medidas mediante pirometría. La tabla 2.1 muestra un resumen de los ensayos realizados y de su objetivo.



**Figura 2.5. Medida de la temperatura interior del centro y de la superficie mediante termopar**

## Capítulo 3. Resultados y discusión

### 3.1. Calibración y validación de la temperatura pirométrica con cámara digital

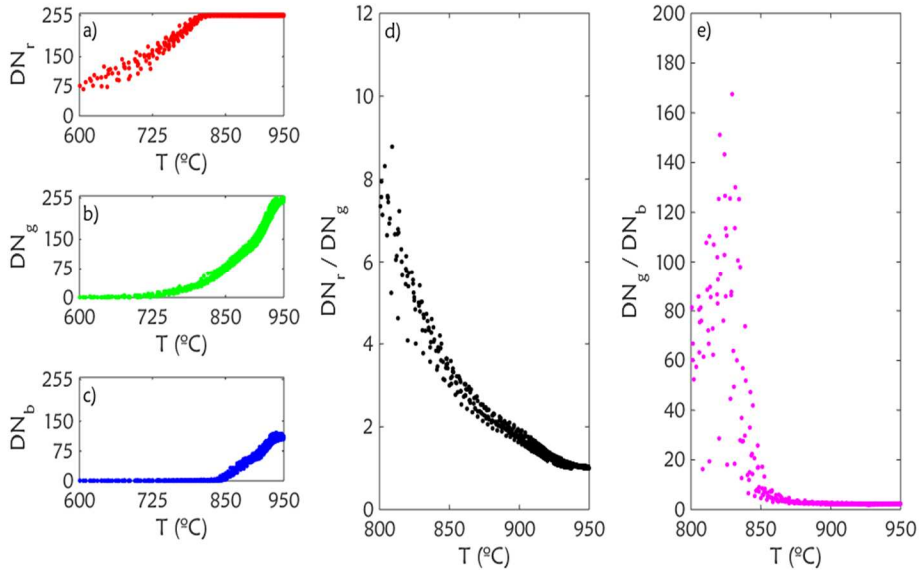
Como se discute en el capítulo anterior y se representa en la figura 2.1, para determinar la temperatura superficial del carbonizado durante su combustión mediante pirometría con cámara digital se necesitan las curvas de ajuste que proporcionan el valor del parámetro de calibración en función de los números digitales, es decir, el ajuste que almacena la relación  $DN_k - T_c - \beta_k$ . El primer paso es obtener los números digitales de la superficie del carbonizado cuya temperatura mide el termopar. Para ello se analizaron las imágenes de 10 ensayos de combustión (1277 fotogramas). El resultado (Fig. 3.1 a-c) muestra: (i) la temperatura (radiación) que el sensor es capaz de detectar en cada banda espectral o color, (ii) el aumento de los números digitales ( $DN_k$ ) a medida que aumenta la temperatura, y (iii) la menor temperatura de saturación (máximo valor para  $DN_k$ ) para las bandas espectrales con menores longitudes de ondas asociadas (la radiación emitida y/o recibida aumenta con la temperatura y longitud de onda [39]). En la Fig. 3.1 d-e, se muestra la relación existente entre la temperatura de la superficie y el cociente de números digitales rojo-verde ( $DN_r/DN_g$ ), verde-azul ( $DN_g/DN_b$ ) para temperaturas superficiales del carbonizado mayores a la de fondo (800 °C).

El siguiente paso, consiste en obtener los puntos  $[\ln(DN_i/DN_j) - \ln(\beta_{P2C,ij})]$  y  $[\ln(DN_k) - \ln(\beta_{P1C,k})]$  haciendo uso del resultado mostrado en la Fig. 3.1, y las expresiones (ec. 2.3-2.4). Para ello se necesita conocer la emisividad del char que se supone 0.85 [18] (el análisis de esta asunción se realiza abajo, punto 3.1.1). Con ello se obtienen los puntos mostrados en la Fig. 3.2, cuyo ajuste mediante los polinomios

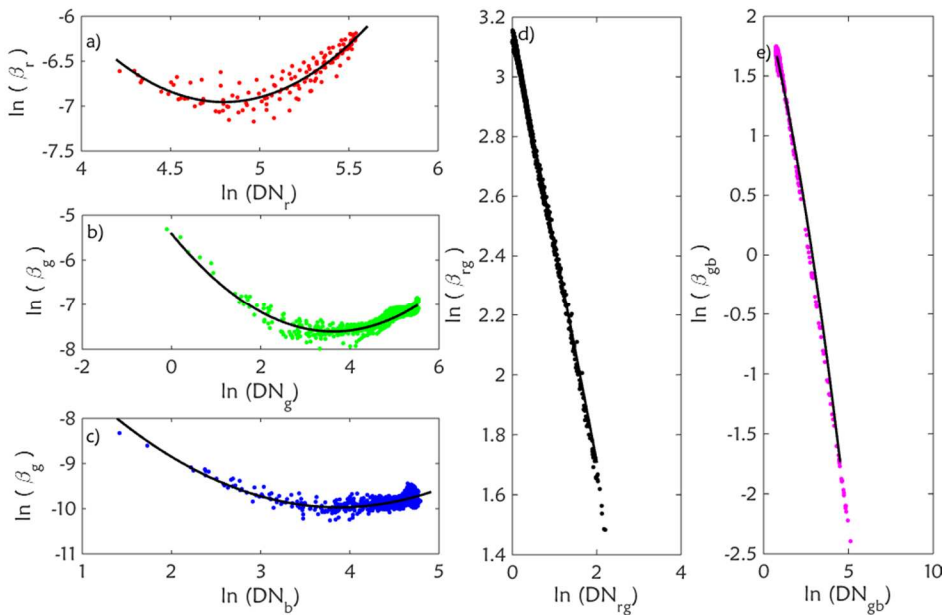
$$(ec. 3.1) \quad \ln(\beta_{P2C,ij}) = \alpha_{P2C,ij} \ln\left(\frac{DN_i}{DN_j}\right)^2 + \gamma_{P2C,ij} \ln\left(\frac{DN_i}{DN_j}\right) + \delta_{P2C,ij}$$

$$(ec. 3.2) \quad \ln(\beta_{P1C,k}) = \alpha_{P1C,k} \ln(DN_k)^2 + \gamma_{P1C,k} \ln(DN_k) + \delta_{P1C,k}$$

proporcionan las curvas de calibración necesarias para determinar la temperatura superficial del carbonizado mediante pirometría en uno (PIC), o dos colores (P2C) respectivamente. Los coeficientes del ajuste se muestran en la tabla 3.1.



**Figura 3.1.** Números digitales rojos  $DN_r$  (a), verdes  $DN_g$  (b), y azules  $DN_b$  (c), y cocientes  $DN_r/DN_g$  (d), y  $DN_g/DN_b$  (e), frente a la temperatura superficial medida con termopar



**Figura 3.2.** Puntos  $\ln(DN_r)-\ln(\beta_{PIC,r})$  (a), Puntos  $\ln(DN_g)-\ln(\beta_{PIC,g})$  (b), Puntos  $\ln(DN_b)-\ln(\beta_{PIC,b})$  (c),  $\ln(DN_r/DN_g)-\ln(\beta_{P2C,rg})$  (d), y  $\ln(DN_g/DN_b)-\ln(\beta_{P2C,gb})$  (e)

Tabla 3.1. Coeficientes de las curvas de calibración				
	$\alpha$	$\gamma$	$\delta$	$R^2$
<b>P2C RG</b>	- 0.0098	- 0.6949	3.1392	0.9969
<b>P2C GB</b>	- 0.071	- 0.5377	2.132	0.9954
<b>PIC-R</b>	1.2998	- 12.475	22.978	0.828
<b>PIC-G</b>	0.1665	- 1.2089	- 5.4118	0.8178
<b>PIC-B</b>	0.3177	- 2.4637	- 5.193	0.4567

El análisis de las imágenes de los ensayos de validación (429 fotogramas) mediante las curvas de calibración asociadas a las bandas espectrales roja y verde, permiten calcular la temperatura superficial del char por pirometría, y compararla con la medida del termopar evaluando su precisión (Fig. 3.3-3.4).

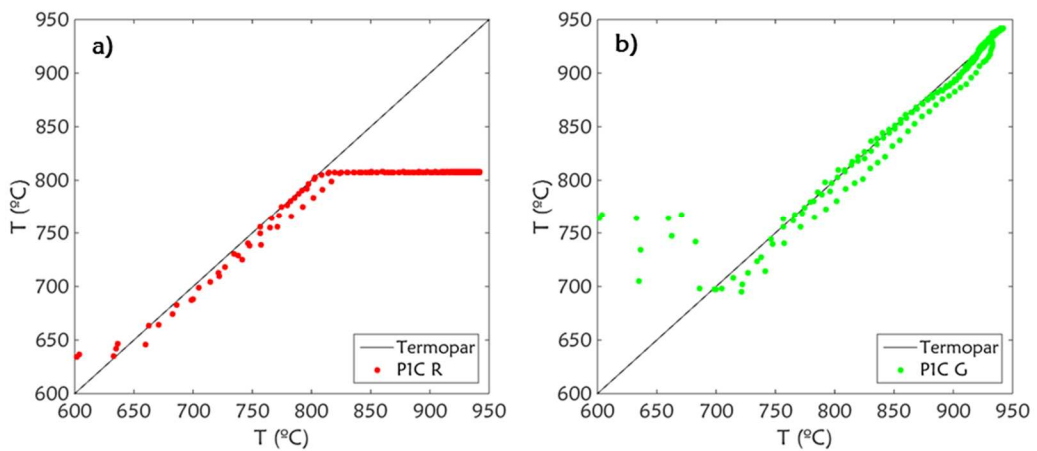


Figura 3.3. Temperatura pirométrica usando el color (a) rojo (PIC R) y (b) verde (PIC G)

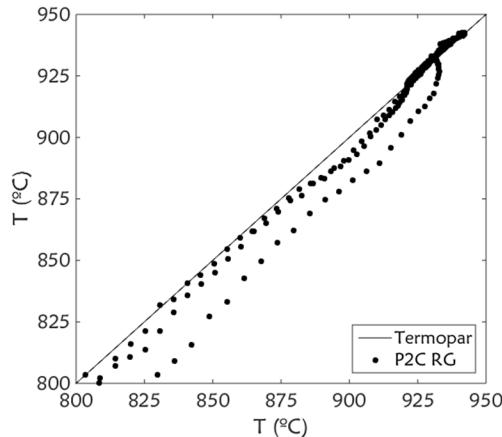
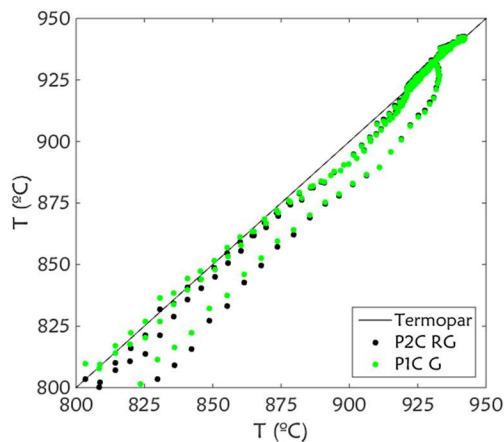


Figura 3.4. Temperatura pirométrica usando simultáneamente los colores rojo y verde (P2C RG)

El resultado muestra que la información contenida en la banda espectral roja (PIC R) proporciona medidas precisas para temperaturas superficiales del carbonizado entre (600-800) °C. Para temperaturas superiores a los 800 °C, los píxeles se saturan en ese color (DN,

a su máximo valor, Fig. 3.1 a), y PIC R no puede mensurar una temperatura (radiación) mayor a esa (mínima que satura los píxeles). La temperatura medida mediante la banda espectral verde (PIC G), presenta un límite inferior en 700 °C debido a la debilidad de la radiación capturada e interpretada en ese color ( $DN_g < 1$ ) a esas temperaturas e inferiores. Es a partir de esa temperatura (radiación) cuando PIC G presenta una buena precisión hasta los 950 °C, donde se produce la saturación en ese color. La temperatura medida usando simultáneamente los colores rojo y verde (P2C RG, Fig. 3.4) tiene limitada su aplicación a temperaturas mayores a la de fondo (Anexo II) y permite medir con precisión hasta la temperatura (radiación) que produce la saturación del verde (950 °C, Fig. 3.1. b). Por otro lado, si se compara las medidas por PIC G y P2C RG (Fig. 3.5) se observa la similitud entre ellas. Este comportamiento es debido a la saturación producida por la radiación perteneciente a al rojo ( $DN_r$  a su máximo valor) mientras que los números digitales asociados al verde ( $DN_g$ ) continúan mensurando la radiación. Es decir, aunque la técnica pirométrica en dos colores relaciona las medidas de la radiación perteneciente a dos bandas espectrales, una vez la radiación perteneciente a la banda espectral de mayores longitudes de onda satura los números digitales asociados, los número digitales de la banda de menores longitudes de onda son los que asumen la responsabilidad de la medida.

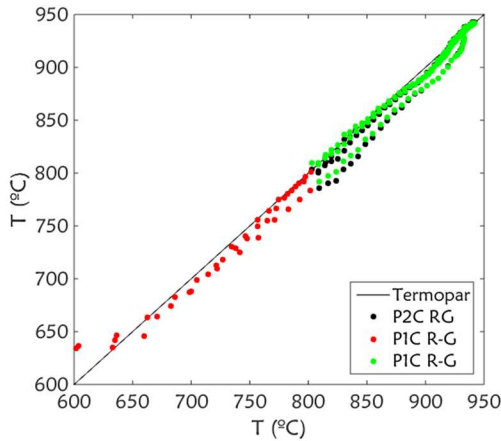


**Figura 3.5. Temperatura pirométrica usando simultáneamente el color rojo y verde (P2C RG), y su comparación con el uso exclusivo del verde (PIC G)**

Si se combinan las medidas de temperaturas obtenidas mediante PIC R y PIC G se aumenta la precisión y el rango de temperaturas que puede ser medido mediante pirometría con cámara digital respecto del obtenido mediante P2C. El resultado se muestra en la Fig. 3.6, donde se ha utilizado la curva de calibración de PIC R hasta que  $DN_r$  indica que la radiación recibida en la banda espectral roja está cerca de la de saturación ( $DN_r \sim 245$ ). Una vez alcanzado éste valor, el algoritmo calcula la temperatura haciendo uso de



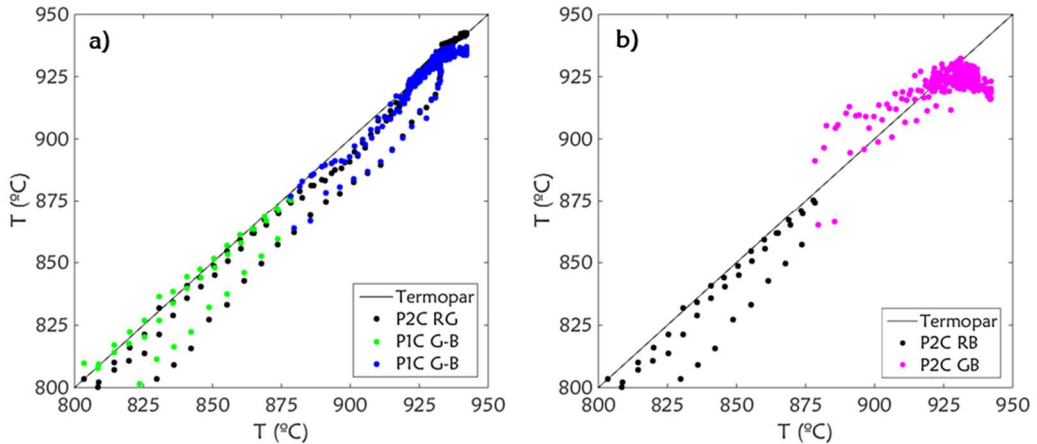
la curva de ajuste de PIC G. Es decir, mientras P2C utiliza de forma simultanea la información contenida en las bandas espectrales roja y verde, el algoritmo propuesto en este trabajo (PIC R-G) las emplea de forma secuencial en función del valor  $DN_r$ .



**Figura 3.6. Temperatura pirométrica usando secuencialmente los colores rojo y verde (PIC R-G) o simultáneamente (P2C RG)**

La precisión de ambos métodos (PIC R-G y P2C RG) es muy similar dentro del rango de temperatura más interesante durante la combustión en lecho fluido (800-950) °C. Sin embargo, la temperatura superficial del carbonizado durante su oxi-conversión podría ser superior a la máxima temperatura medida en este trabajo 950 °C (función de las características ópticas y electrónicas de la cámara digital, y de las condiciones de trabajo empleadas (WD, FOV)). Una solución podría ser utilizar la información contenida en los números digitales azules (PIC B), que mensuran la radiación perteneciente a dicha banda espectral. La Fig. 3.7 a, muestra el resultado de usar la información contenida en el azul, incluso sin estar el verde saturado, validando la solución propuesta por su buena precisión en la medida. Otra solución sería usar simultáneamente los colores verde y azul (P2C GB) de forma que el algoritmo de cálculo cambiase de P2C RG a P2C GB en función del valor  $DN_r/DN_g$ . Aunque como muestra la Fig. 3.7 b, el cambio se debe hacer cuando  $DN_r/DN_g$  esté cerca de su mínimo valor (saturación en ambas bandas espectrales), ya que si se realiza el cambio a valores superiores, el sensor apenas detecta la radiación perteneciente al color azul y el valor correspondiente a  $DN_g/DN_b$  no llega a reflejarse en  $\beta_{P2C, gb}$  (ec. 3.3) disminuyendo la precisión del resultado.

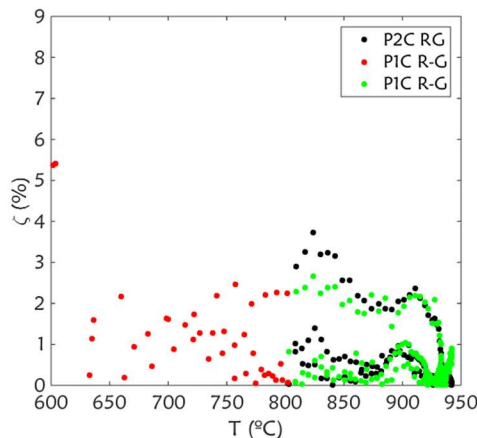
$$(ec. 3.3) \quad \left(\frac{DN_r}{DN_g}\right)_1 \sim 1000 \gg \left(\frac{DN_r}{DN_g}\right)_2 \sim 10 \rightarrow \ln\left(\frac{DN_r}{DN_g}\right)_1 \sim \ln\left(\frac{DN_r}{DN_g}\right)_2 \rightarrow \ln(\beta_{P2C,rg})_1 \sim \ln(\beta_{P2C,rg})_2$$



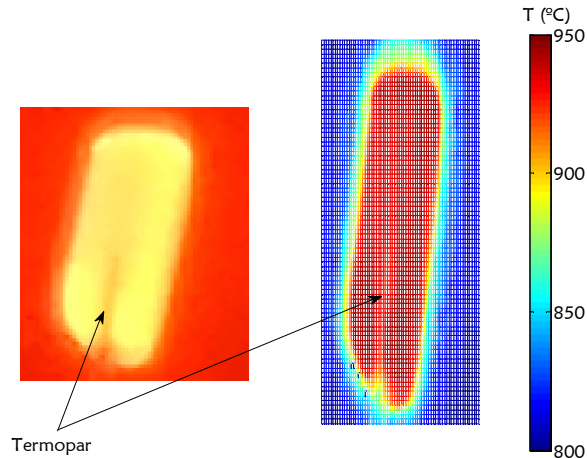
**Figura 3.7. Temperatura pirométrica (a) usando secuencialmente los colores verde y azul (PIC G-B), y (b) usando simultáneamente rojo-verde (P2C RG) y verde-azul (P2C GB)**

Como muestra el análisis del error relativo (ec. 3.4) presentado en la Fig. 3.8, el empleo secuencial de la información contenida en la banda espectral roja y verde (PIC R-G) proporciona un método más fiable y preciso para determinar la temperatura superficial durante la conversión de un combustible sólido, en detrimento del uso tradicional y simultáneo de dos colores. Además, el análisis de todos los píxeles de la imagen mediante la técnica propuesta (PIC R-G) permite detectar la existencia de gradientes térmicos superficiales que escapan a otras técnicas (Anexo I), pudiendo revelar detalles sobre la transferencia de calor entre las partículas, reactor y agente de fluidización (Fig. 3.9).

$$(ec. 3.4) \quad \zeta_{\epsilon} (\%) = 100 \frac{\|T_{Termopar} - T_{Pirometrica}(\epsilon)\|}{T_{Termopar}}$$



**Figura 3.8. Error relativo de la temperatura pirométrica mediante PIC R-G y P2C RG.**



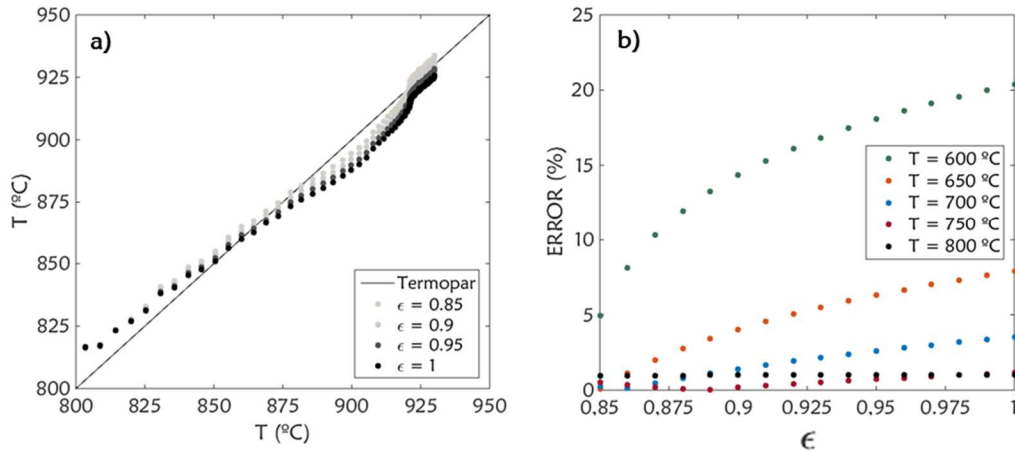
**Figura 3.9. Temperatura pirométrica del carbonizado de Haya en combustión**

### 3.1.1. Estudio del efecto del valor de la emisividad sobre la temperatura pirométrica

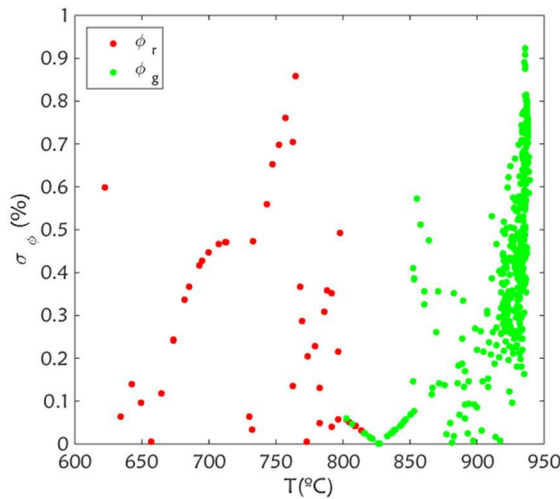
Tal y como se menciona en el Cap. 2 (ec. 2.1), para poder aplicar PIC es necesario conocer la emisividad de la superficie. La emisividad depende de la temperatura y longitud de onda [39], y suponer un valor constante dentro de la banda espectral y rango de temperaturas de trabajo puede producir una disminución inadmisibles en la precisión de la temperatura. Del estudio de la literatura [21-25, 27, 33, 40, 41], se concluye que la emisividad de una partícula sólida de char, dentro de las bandas espectrales roja-verde-azul ( $0.49\text{-}0.7\ \mu\text{m}$ ) [42], y las temperaturas manejadas durante la combustión ( $600\text{-}950\ ^\circ\text{C}$ ), oscila entre los 0.85 y 1. Para evaluar el efecto que el valor de la emisividad tiene sobre la temperatura calculada por PIC, en la Fig. 3.10 a, se muestra la temperatura pirométrica calculada variando el valor de la emisividad (0.85-1) en el algoritmo de cálculo (no en el de calibración) en uno de los ensayos de validación realizado (141 fotogramas). Como se observa en la figura, las diferencias entre la temperatura pirométrica y la medida del termopar no son significativas a temperaturas mayores a la de fondo, es decir, cuando la radiación reflejada es despreciable [43]. Sin embargo, para temperaturas superficiales del carbonizado inferior a la de fondo la radiación reflejada puede no ser despreciable y el error asociado a la emisividad puede ser inadmisibles, tal y como muestra la Fig. 3.10 b, donde se evalúa el error cometido mediante el error relativo entre la temperatura calculada por PIC R-G-B y la dada por el termopar:

$$(ec. 3.7) \quad \zeta_{\varepsilon} (\%) = 100 \frac{\|T_{\text{Termopar}} - T_{\text{PIC R-G-B}}(\varepsilon)\|}{T_{\text{Termopar}}}$$

A la luz del resultado (Fig. 3.10), y teniendo en cuenta los valores de la emisividad del carbonizado reportados por la literatura, parece razonable suponer un valor de la emisividad de 0.9-0.95, ya que permite medir temperaturas con una incertidumbre inferior al 2.5 %.



**Figura 3.10. Temperatura superficial pirométrica (PIC R-G) para diferentes valores de la emisividad del carbonizado (a), y el error a temperaturas menores a la de fondo (800 °C)**



**Figura 3.11. Desviación de la temperatura pirométrica en función del valor \$\Phi\_k\$ (ec. 3.5)**

Por otro lado, el método propuesto en este trabajo depende de la simplificación

$$(ec. 3.5) \quad \Phi_k \approx \frac{\int_{\Delta\lambda_k} \frac{C_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) d\lambda}{\frac{C_1}{\lambda_k^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_k T}\right)}$$

que asume que \$\Phi\_k\$ es independiente de la temperatura (600-950) °C y de la longitud de onda dentro de las bandas espectrales roja, verde y azul. La precisión de esta simplificación

es evaluada mediante la desviación de la temperatura pirométrica calculada mediante  $\overline{\Phi_k}$  respecto de la calculada con  $\Phi_k$  ( $T_{PIC\ R-G-B}$ )

$$(ec. 3.6) \quad \sigma_{\Phi} (\%) = 100 \frac{\|T_{PIC}(\Phi_k(T_{PIC})) - T_{PIC}(\overline{\Phi_k})\|}{T_{PIC}(\Phi_k(T_{PIC}))}$$

El resultado (Fig. 3.11) valida la simplificación realizada al ser despreciable la diferencia entre usar un valor medio para  $\Phi_k$  y su valor exacto a una temperatura dada.

### 3.2. Aplicación para la medida de temperatura pirométrica en lecho fluido

El principal objetivo del este Trabajo Final de Master es desarrollar una técnica de medida de temperaturas superficiales de combustión y mostrar su aplicabilidad sobre un reactor de lecho fluido. Una vez realizada la primera parte (desarrollo de la técnica), se mide la temperatura superficial de combustión mediante pirometría de una partícula de carbonizado alimentada y suspendida sobre el lecho fluido, y se comparan con las temperaturas del interior de la partícula medidas mediante un termopar (Fig. 2.5). El resultado (Fig. 3.12) muestra la evolución temporal de la temperatura superficial pirométrica media, máxima y mínima, e interior del carbonizado. La figura muestra como al comienzo de la combustión (primeros 40 segundos) el calor generado en el frente de reacción se emplea en calentar la partícula de combustible (aumenta su energía interna) y la temperatura superficial es superior a la interna. Después de este periodo, la temperatura interna supera la superficial alcanzando un valor máximo sobre los 950 °C en el cual se mantiene mientras el calor generado compensa las pérdidas por convección y radiación con el lecho. Hacia el final de la conversión la menor tasa de reacción ( $r_{c \rightarrow 0}$ ) y por tanto el menor calor generado, y las pérdidas por convección ( $r_{c \rightarrow 0}$ ) marcan que la diferencia de temperaturas superficiales e interiores se vayan reduciendo.

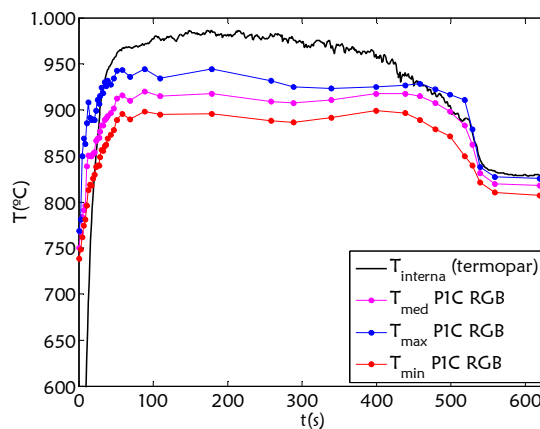


Figura 3.12. Evolución temporal de la temperatura interna y superficiales del carbonizado durante su combustión en reactor de lecho fluido

Los perfiles de temperaturas de combustión obtenidos (interna, superficial media, máxima y mínima) y mostrados en la Fig. 3.12 están fuertemente influenciados por la restricción del movimiento que produce el termopar, y no deben sacarse conclusiones sobre la combustión de la partícula. Sin embargo, los resultados muestran la aplicabilidad de la pirometría con cámara digital para determinar la temperatura superficial del carbonizado durante su combustión en lecho fluido, incluso la posibilidad de detectar gradientes térmicos superficiales si la acción del coadyuvante los produjese.

## Capítulo 4. Conclusiones

En este Trabajo Fin de Master (TFM) se ha medido la temperatura superficial del carbonizado durante su combustión en un reactor de lecho fluido mediante pirometría con cámara digital. Para ello, se trabajó en una planta experimental diseñada y construida específicamente con éste fin, en la cual se realizaron dos tipos de ensayos de combustión de partículas de carbonizado de Haya: combustión aislada en el interior de un horno eléctrico, y combustión en un reactor de lecho fluido. De los primeros ensayos se obtuvo la calibración del equipo de captura e interpretación de la radiación, y con la información obtenida se midió la temperatura superficial del char durante su combustión con la intención de validar las modificaciones sobre la aplicación tradicional de la técnica pirométrica en dos colores. En estos ensayos se puso a punto la técnica de medida que se usó en los ensayos de combustión en lecho fluido.

En todos los ensayos de combustión aislada se situó un termopar en la superficie del carbonizado, el cual permitió comparar su medida con la proporcionada por la técnica pirométrica. Gracias a éste montaje, además de la calibración de la cámara digital, se analizó como los números digitales (números que modelan la radiación térmica que recibe el sensor de la escena visualizada en las bandas espectrales roja, verde y azul) afectan a la precisión de la temperatura calculada. Se encontró que la utilización de una única banda espectral o color (P1C) está limitada a la temperatura (radiación) mínima que el sensor puede detectar, y máxima que produce la saturación en ese color. Para la configuración empleada en éste trabajo fin de master, resultaron ser de (600-800) °C para P1C R, y (725-925) °C para P1C G. Por su parte, el uso simultáneo de los colores rojo y verde (P2C) tuvo limitada su aplicación a temperaturas mayores a la de fondo (800 °C), hasta la temperatura (radiación) que produce la saturación de la banda espectral verde (950) °C. Se encontró que la aplicación tradicional en dos colores (P2C) pasa a ser controlada por la radiación perteneciente a la banda espectral verde una vez el número digital asociado al rojo alcanza su máximo valor. Es decir, aunque la técnica relaciona las medidas de la radiación perteneciente a dos bandas espectrales, una vez la radiación perteneciente a la banda espectral de mayor longitud de onda (roja) se satura, los números digitales asociados a la banda de menor longitud de onda (verde) son los que asumen la responsabilidad de la

medida. Por ello, se propuso el uso secuencial de la información contenida en las bandas espectrales roja y verde (PIC RG) para calcular la temperatura pirométrica. De esta forma, se aumenta el rango de temperatura y la precisión de la temperatura medida con pirometría, y se puede, medir temperatura superficiales inferiores a la de fondo.

La máxima temperatura medida bajo las condiciones experimentales de éste trabajo (950 °C) no es una limitación al método de medida propuesto (uso secuencial de la información contenida en las bandas espectrales en lugar de simultaneo), pues el uso de la información contenida en la banda espectral azul aumenta el rango de temperatura que pueden ser medido con precisión, incluso a temperaturas de combustión superiores a las que previsiblemente se alcancen durante la oxi-combustión en lecho fluido. Ello permite disponer de una técnica (PIC RGB) que además de medir con un error inferior al 3 % el rango de temperatura más importante en aplicaciones de combustión de lecho fluido, permitirá estudiar la temperatura de oxi-combustión. Por otro lado, la aplicación de pirometría con cámara digital ha demostrado detectar detalles difícilmente identificables mediante otras técnicas, como la existencia de gradientes térmicos superficiales que revelan información sobre la forma y evolución de la combustión.

La desventaja de utilizar la información contenida en las bandas espectrales roja, verde, y azul de forma secuencial (PIC RGB) es que la emisividad superficial del carbonizado debe conocerse, y suponer un valor constante de ésta puede disminuir la precisión de la temperatura pirométrica. Sin embargo, el análisis del efecto que el valor de la emisividad tiene sobre la temperatura medida por PIC ha mostrado no ser importante cuando la temperatura superficial del carbonizado es superior a la de fondo (radiación reflejada despreciable). Sin embargo, cuando la temperatura superficial del carbonizado es inferior a la de fondo, el valor de la emisividad puede producir errores inadmisibles, y es clave una buena estimación de éste. Dentro de los valores asociados a la emisividad del carbonizado por la literatura (0.85-1), se concluye que una razonable estimación puede estar entre 0.9-0.95.

## **Trabajo futuro**

Este Trabajo Fin de Master ha presentado algunas modificaciones en la forma de utilizar pirometría que mejoran la precisión de la temperatura calculada y aumenta el rango que puede ser medido, incluso permitiendo medir temperaturas que son menores a las de fondo. Por otro lado, se ha presentado un arreglo experimental que permite medir la temperatura superficial del carbonizado durante su combustión en un reactor de lecho fluido mediante pirometría.



Este estudio constituye uno de los pasos del proyecto OXICOGAS 2G [32] que busca aclarar el efecto que el cambio de la atmósfera de combustión ( $N_2-O_2$  vs  $O_2-CO_2$ ) tiene sobre el proceso de conversión, buscando encontrar la máxima concentración de  $O_2$  que es posible alimentar al reactor manteniendo el correcto funcionamiento del mismo y evitando la fusión de las partículas de combustible. Por ello, y una vez puesto a punto la técnica de medida de temperatura el siguiente paso es realizar pruebas para cuantificar el efecto que sobre la temperatura superficial del carbonizado tiene: (i) la concentración de  $O_2$  en la corriente de fluidización, (ii) la velocidad de fluidización, (iii) la temperatura de operación (lecho de arena), (iv) el tamaño (diámetro) de la partícula alimentada, (v) el tipo de combustible (Antracita, bituminoso, sub-bituminoso, lignito o Madera), y (vi) el tamaño del batch de partículas alimentadas.



## Nomenclatura

- A Área superficial,  $m^2$
- B Banda espectral azul
- C Constantes de Planck;  $C1=3.742 \cdot 10^8 (W \mu m^4)/m^2$ ;  $C2=1.439 \cdot 10^4 K \mu m$
- DN Número Digital proporcionado por el software de la video cámara
- e Emitancia (Energía emitida por unidad de área y longitud de onda,  $W/(m^2 \mu m)$ )
- E Energía emitida por unidad de área y longitud de onda,  $W/m^2$
- f Factor de forma entre dos superficies
- FOV Campo de visión del equipo electrónico (Field Of View)
- G Banda espectral verde
- j Radiosidad (Energía que abandona una superficie,  $W/(m^2 \mu m)$ )
- k Índices generales que se refiere a alguna banda espectral o color  
(m,m) Pixel del sensor localizado en la fila “m” y columna “n”
- P1C Pirometría en color (One-color pyrometry)
- P2C Pirometría en dos colores (Two-color pyrometry)
- r Radio de la partícula de carbonizado
- R Banda espectral roja
- T Temperatura K
- WD Distancia de trabajo (Working Distance)

### Letras griegas

- $\alpha, \gamma, \delta$  Coeficientes de las curvas de calibración
- $\beta$  Parámetro de calibración
- $\epsilon$  Emisividad
- $\zeta$  Error relativo PIC R-G
- $\zeta_\epsilon$  Error relativo PIC R-G asociado al valor de la emisividad
- $\Delta\lambda_r$  Banda espectral roja, (0.62 - 0.7)  $\mu m$

- $\Delta\lambda_g$  Banda espectral verde, (0.49 - 0.58)  $\mu\text{m}$   
 $\Delta\lambda_b$  Banda espectral azul, (0.45 - 0.49)  $\mu\text{m}$   
 $\lambda_r$  Longitud de onda central del intervalo espectral rojo, 0.685  $\mu\text{m}$   
 $\lambda_g$  Longitud de onda central del intervalo espectral verde, 0.535  $\mu\text{m}$   
 $\lambda_b$  Longitud de onda central del intervalo espectral azul, 0.47  $\mu\text{m}$   
 $\Phi$  Constante de proporcionalidad entre  $W/\text{m}^2$  y  $W/(\text{m}^2 \mu\text{m})$

### **Subíndices**

- c Carbonizado (Char)  
PIC Pirometría en un color  
P2C Pirometría en dos colores  
r,b,g Índices que se refieren al rojo (r), verde (g), o azul (b)  
k,i,j Índices generales que se refiere a alguna banda espectral o color  
s Arena del lecho  
w Superficie homogeneizante (superficie de fondo)  
wnd Ventana de observación

### **Superíndices**

- Valor medio  
○ Comportamiento ideal de cuerpo negro

## Referencias

- [1] AIE-Agencia internacional de la energía (2010a): World Energy outlook 2010, OCDE/IEA, Paris
- [2] BP Energy Outlook 2030, January 2013
- [3] P. Nejat, F. Jomehzadeh, M. Mahdi Taheri, M. Gohari, M. Zaimi, A. Majid. A global review of energy consumption, CO<sub>2</sub> emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO<sub>2</sub> emitting countries). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (2015) 843–862
- [4] E.S. Rubin, H. Mantripragada, A. Marks, P. Versteeg, J. Kitchin, The outlook for improved carbon capture technology, *Progress in Energy and Combustion Science* 38 (2012) 630-671
- [5] G. Scheffknecht, L. Al-Makhadmeh, U. Schnell, J. Maier. Oxy-fuel coal combustion-A review of the current state-of-the-art. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2011;5(SUPPL. 1):S16-35
- [6] J. Saastamoinen, A. Tourunen, T. Pikkarainen, H. Hasa, J. Miettinen, T. Hyppanen, K. Myohanen. Fluidized bed combustion in high concentrations of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. *Proc. 19th Int. Conf. Fluid. Bed Combust.* 2006, No. 49
- [7] B. Leckner, A. Gómez-Barea. Oxy-fuel Combustion in Circulating Fluidized Bed boilers. *Applied Energy*, Volume 125, 15 July 2014, Pages 308-318
- [8] T. Wal, R. Stanger, S. Santos. The current state of oxy-fuel technology: demonstrations and technical barriers. In: 2<sup>nd</sup> Oxyfuel Combustion conference
- [9] L. Jia, Y. Tan, C. Wang, E. J. Anthony. Experimental study of oxy-fuel combustion and sulfur capture in a mini-CFBC. *Energy Fuels* 2007, 21, 3160– 3164
- [10] T. Czakiert, Z. Bis, W. Muskala, W. Nowak, Fuel conversion from oxy-fuel combustion in a circulating fluidized bed. *Fuel Process. Technol.* 2006, 87, 531–538
- [11] J. Broughton, J. R. Howard, Combustion of coal in fluidized beds. In: Howard JR, Elliott D editors. *Fluidized beds: Combustion and applications*, Applied Science Publishers; 1983. p. 37-77

- [12] V. Manovic, M. Komatina, S. Oka, Modeling the temperature in coal char particle during fluidized bed combustion, *Fuel* 87 (2008), p. 905-914
- [13] F. Scala, R. Chirone. Combustion of coal char particles under fluidized bed oxyfiring conditions. Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Fluidized Bed Combustion; 2009F. Scala, R. Chirone. Fluidized bed combustion of single coal char particles at high CO<sub>2</sub> concentration. *Chem Eng J.* 2010; 165(3):902-6
- [14] C. Bu, D. Liu, X. Chen, D. Pallarès, A. Gómez-Barea. Ignition behavior of single coal particle in a fluidized bed under O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> atmospheres: A combination of visual image and particle temperature. *Appl Energy.* 2014; 115:301-8
- [15] C. Bu, B. Leckner, X. Chen, D. Pallarès, D. Liu, A. Gómez-Barea. Devolatilization of a single fuel particle in a fluidized bed under oxy-combustion conditions. Part A: Experimental results. *Combust Flame.* 2015;162(3):797-808
- [16] M. Ohmån, A. Nordin. Review of Particle, Temperature Studies in Fluidized Bed Combustion. Proc. Of Nordic Seminar on Thermochemical conversión, 4-5 December 1996, Trondheim (Norge)
- [17] M. Komatina, V. Manovic, D. Dakic. An Experimental Study of Temperature of Burning Coal Particle in Fluidized Bed. *Energy Fuels*, 2006, 20 (1), pp 114–119
- [18] N. Tomé, N. Rangel, C. Pincho. Temperature of Wood Char Particles Burning in a Fluidized Bed Reactor. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICRE PQ'12), Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March, 2012
- [19] J. F. Stubington, Comparison of techniques for measuring the temperature of char particles burning in a fluidised bed, *Chem Eng Res Des*, 63(1985) p. 241-249
- [20] P. Basu, Burning rate of carbon in fluidized beds, *Fuel*, Volume 56, Issue 4, October 1977, Pages 390-392
- [21] A. Macêk, C. Bulik, Direct measurement of char-particle temperatures in fluidized bed combustors. Twentieth Symposium (Int) on Combustion, Combustion Institute, (1984) p. 1223-1230
- [22] T. M. Linjewile, A. S. Hull, P. K. Agarwal, Optical probe measurements of the temperature of burning particles in fluidized bed, *Fuel* 73 (1994) p. 1880-1888
- [23] R. Hernberg, J. Stenberg. Simultaneous in situ measurement of temperature and size of burning char particles in a fluidized bed furnace by means of fiber optic pyrometry, *Combust Flame* 95 (1993) p. 191– 205
- [24] P. Heino, R. Hernberg, J. Stenberg, Statistical pyrometric sizing of particles in fluidised bed combustion, *Combustion and Flame*, Volume 108, Issue 3, February 1997, Pages 315-326

- [25] T. Joutsenoja, P. Heino P, R. Hernberg, B. Bonn, Pyrometric temperature and size measurements of burning coal particles in a fluidized bed combustor, *Combust Flame* 118 (1999) p. 707–717
- [26] D. Li. Thermal image analysis using calibrated video imaging. Doctoral Thesis, University of Missouri-Columbia, Colombia, 2006
- [27] Lu H, I. Leong-Teng, A. Mackrory, L. Werrett, J. Scott, D. Tree, L. Baxter, Particle surface temperature measurements with multicolor band pyrometry, *AIChE Journal* 55 (2009) p. 243–255
- [28] W. Zukowski, J. Baron, E. M. Bulewicz, B. Kowarska, An optical method of measuring the temperature in a fluidized bed combustor, *Combust Flame* 156 (2009) p. 1445-1452
- [29] S. L. Brown, B. Y. Lattimer, Transient gas-to-particle heat transfer measurements in a spouted bed, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 44, January 2013, Pages 883-892
- [30] T. Tsuji, T. Miyauchi, S. Oh, T. Tanaka. Simultaneous measurement of particle motion and temperature in two-dimensional fluidized bed with heat transfer. *KONA Powder and Particle Journal*. 2010;28:167-79
- [31] A. V. Patil, E.A.J.F. Peters, V. S. Sutkar, N.G. Deen, J.A.M. Kuipers, A study of heat transfer in fluidized beds using an integrated DIA/PIV/IR technique, *Chemical Engineering Journal*, Volume 259, 1 January 2015, Pages 90-106
- [32] Oxi-Combustión y Oxi-Gasificación en Lecho Fluidizado: Estudio de la Conversión del Carbonizado para el Diseño y Optimización de Equipos de Captura de Co<sub>2</sub> de Segunda Generación ([ENE2012-37999](#))
- [33] R. Khatami, Y. A. Levendis, On the deduction of single coal particle combustion temperature from three-color optical pyrometry, *Combust Flame* 158 (2011) p.1822-1836
- [34] W. L. Grosshandler, The effect of soot on pyrometric measurements of coal particle temperature, *Combust Flame* 55 (1984) p. 59-71
- [35] S.M. Godoy, F. C. Lockwood, Development of a two-colour infrared pyrometer for coal particle temperature measurements during devolatilisation, *Fuel* 77 (1997) p.995–999
- [36] Y. Huang, Y. Yan, G. Riley, Vision-based measurement of temperature distribution in a 500-kW model furnace using the two-colour method, *Measurement*, Volume 28, Issue 3, October 2000, Pages 175-183

- 
- [37] S.S. Zabrotsky, Compound heat exchange between a high temperature gas-fluidized bed and a solid surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 16, Issue 2, February 1973, Pages 241-248
- [38] M. Planck. "Distribution of energy in the Spectrum", *Annals of Physics*, Vol. 4 No. 3, 1901, pp. 553-563
- [39] F. P. Incropera and David P. De Witt. Radiation: Properties and processes. In: Frank P. Incropera and David P. De Witt, *Fundamentals of heat and mass*. Prentice hall, México, 1999. pp, 633-716
- [40] J. C. Roscoe, A. R. Witkowski, and D. Harrison. The temperature of coke particles in a fluidized combustor. *Trans. IChemE* 58:69 (1980)
- [41] I. B. Ross, M. S. Patel, and J. F. Davidson. The temperatures of burning carbon particles in fluidized beds. *Trans. IChemE* 59:83 (1981)
- [42] E. Gómez González. *Guía para conocer las cámaras de fotografía digital*. ed. Victoria 2012, pp 503
- [43] J. Salinero, A. Gómez-Barea, B. Leckner, M. Tripiana, C. Bu, E. Gómez-González.: Improving char temperature measurement by pyrometry with digital camera. *Proceedings of 22<sup>nd</sup> International Conference on Fluidized Bed Conversion*. June (14-17), 2015, Turku (Finland)
- [44] J. G. Yates, and P. R. Walker,(1978) 'Particle temperatures in a fluidised bed combustor', *Fluidization* (eds. Davidson, J. F. and Keairns, D. L.), Cambridge University Press, Cambridge, 241–245



## Anexo I. Revisión de las técnicas de medida de la temperatura de las partículas de combustible sólido durante su conversión en reactores de lecho fluido

El desarrollo de la tecnología de combustión en reactores de lecho fluido pasa por conocer la temperatura de la partícula de combustible sólida durante su conversión. Ya que afecta directamente a la eficiencia del reactor, generación de emisiones, es clave en problemas de aglomeración del lecho y pérdida de fluidización, y permite conocer la cinética y modo de conversión de los combustibles [9-12]. Dada esta importancia, existen distintas técnicas que permiten conocer (estimar) tanto la temperatura del combustible (interior) durante su combustión, como el exceso que ésta tiene sobre la del lecho fluido. Estas técnicas pueden basarse en la utilización de termopares [13-20], anillos metálicos de temperatura de fusión conocida [44], técnicas fotográficas [40, 41], y pirometría [21-28, 33-36]. Cada una de ellas con sus ventajas e inconvenientes [19]. Los trabajos revisados en la literatura que emplean estas técnicas para analizar el modo de conversión de diferentes tipos de combustibles (partículas esféricas de varios mm de diámetro) durante su combustión en reactores de lecho fluido burbujeante con diferentes temperaturas de operación y agentes de fluidización se muestran en la tabla A1.1.

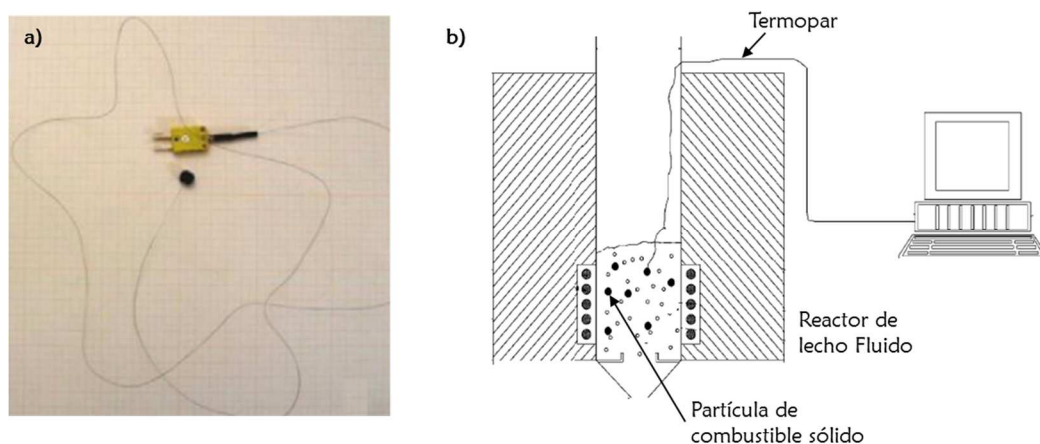
El uso de termopares (técnica más utilizada) consiste en su inserción en el interior de la partícula combustible, y fijados mediante masilla refractaria, permiten obtener medidas puntuales continuas en el tiempo hasta su desprendimiento. P. Basu [20] encontró que el exceso de temperatura del núcleo de la partícula respecto del lecho aumentaba con la disminución del tamaño del combustible, y publicó un exceso de 200 °C para partículas de carbonizado de 3 mm (tamaño mínimo aproximado para la aplicación práctica del termopar). J. F. Stubington [19] midió un exceso máximo de la temperatura del char de coque de 98 °C sobre la del lecho, y justificó su menor valor respecto del proporcionado mediante fotografía (técnica comentada abajo) por la menor transferencia de calor por

convección existente en la superficie del lecho (región donde la técnica fotográfica captura la imagen). M. Komatina et al [17] encontró que la temperatura del núcleo de la partícula dependía de su tamaño y de las propiedades del combustible (porosidad, contenido en ceniza...) lo que indicaba el peso de la transferencia de masa y calor en el perfil de temperatura. N. tomé et al [18], muestra que una manera “suave” de generar el char (tasa de calentamiento de 0.5 °C/s hasta 850 °C) reduce la fragmentación durante la combustión. Recientemente, con el objetivo de entender el efecto que sobre el modo de conversión y comportamiento del combustible tiene el cambio en la atmósfera de conversión en oxi-combustión [9, 10], F. Scala et al [13] cuantificó en (10-60) °C el exceso de la temperatura del carbonizado de carbón bituminoso con diferentes concentraciones de O<sub>2</sub> (2-8) % en una atmósfera de CO<sub>2</sub>. Además, concluyó que la gasificación del char por CO<sub>2</sub>, y la oxidación homogénea del CO no pueden despreciarse en condiciones de oxi-combustión. Por otro lado, Changsheng et al [14, 15] analizaron el efecto sobre el proceso de devolatización en distintos tipos de combustibles midiendo la temperatura del centro de la partícula y de un punto cercano a la superficie, y combinando observaciones visuales de la combustión de los volátiles mediante una cámara digital que se utilizó para el cálculo de la temperatura de llama por pirometría en dos colores (comentada abajo) [15]. Las medidas proporcionadas por los termopares (centro y superficie) les permitieron separar el proceso de devolatización y de combustión de char en función de la temperatura “superficial”, encontrando que el tiempo de devolatización disminuía con el aumento de la concentración de O<sub>2</sub>, era sensiblemente mayor en la atmósfera CO<sub>2</sub>, y que los combustibles estudiados presentan un comportamiento en la relación temperatura “superficial” y del centro similar (temperatura “superficial” mayor a la del centro hasta que el frente de reacción se adentra en la partícula).

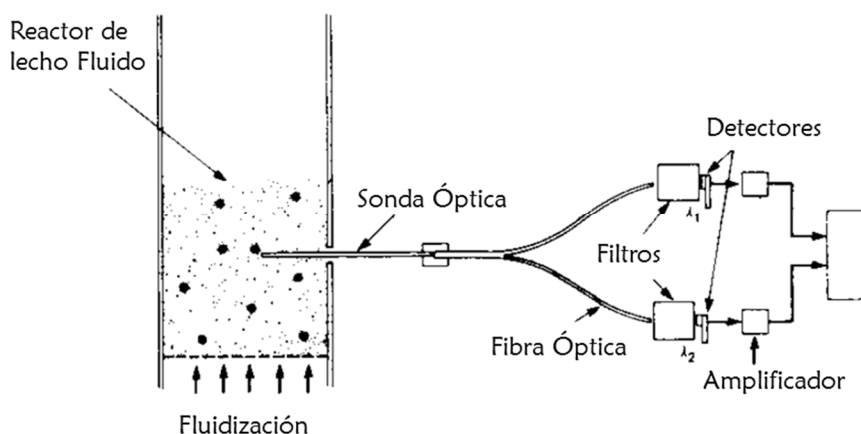
Los trabajos analizados (Tabla Al. 1), además de mostrar la capacidad del uso de termopares y el conocimiento (información) que de su uso se obtiene presentan sus inconvenientes. El movimiento de la partícula durante su fluidización se ve afectado haciendo que la transferencia de materia y calor sean diferentes a las reales (Fig. Al.1). Y aunque la propuesta basada en un termopar oscilante [19] puede solucionar este problema, el uso de termopares continua estando limitado a partículas gruesas (varios milímetros) que puedan resistir la perforación. Además, las medidas están supeditadas a la fragmentación y atrición de las partículas durante su conversión.

Con la intención de no afectar a la fluido-dinámica, J. G. Yates et al [44] fabricaron partículas de combustible a partir de polvo de antracita y resina con anillos metálicos (aleación plata-oro) en su interior. Mediante observación de los anillos después de la

combustión dedujeron que la temperatura aumentaba con la disminución del diámetro de la partícula. Aunque mediante esta técnica no se ve afectado el movimiento libre de la partícula, el combustible fabricado tiene diferente reactividad y energía de activación que el carbón del cual procede, y la aplicabilidad del método puede ponerse en duda. Por otro lado, el uso de la técnica fotográfica proporciona medidas de la temperatura superficial del combustible o su exceso sobre la del lecho mediante el análisis de imágenes (fotografías) de la parte superior del lecho tomadas desde un acceso óptico del reactor. J. C. Roscoe et al [40] midió la temperatura de un batch de partículas de Coque comparando mediante un densitómetro la densidad de la partícula en la imagen obtenida (film) con las imágenes de un cuerpo con comportamiento ideal negro a diferentes temperaturas. I. B. Ross et al [41] obtuvieron que un incremento en la concentración de  $O_2$  aumentaba la temperatura superficial de las partículas de Coque registrando en el mismo "film" la imagen de la superficie del lecho y 6 bombillas de tungsteno con sus filamentos a diferentes temperaturas (905-1400 °C). Aunque esta técnica supera los inconvenientes asociados a los termopares, solo pueden fotografiar las partículas presentes en la superficie del lecho donde existen condiciones de transferencia de calor y materia distintas a las interiores [19, 21]. Además, se comparan imágenes de partículas de carbón y carbonizado con emisividad comprendida entre (0.85-1) [18, 21-25, 27, 33, 40, 41] en el rango visible con imágenes de cuerpos con comportamiento ideal negro y filamentos de tungsteno.



**Figura A1. 1. Restricción del movimiento asociado al uso de termopares en reactores de lecho fluido [13]. b) Termopar (0.25 mm) embebido en una partícula esférica de char (6-7 mm) [17]**



**Figura A1. 2. Representación de la aplicación de la técnica pirométrica mediante sonda óptica en dos colores a un reactor de lecho fluido [21].**

A. Macêk et al [21] pensaron que mediante la señal eléctrica generada por un sensor irradiado por radiación térmica se podría determinar la temperatura superficial del cuerpo cuya radiación fue capturada, dando origen a la pirometría óptica. La aplicación de la técnica sobre lecho fluido consiste en la captura de la radiación térmica de los cuerpos (lecho y char) que atraviesan el campo de visión de la sonda óptica y su conducción mediante fibra óptica a una unidad radiométrica donde es separada en intervalos espectrales (decenas de nanómetros) antes de irradiar el sensor. De esta forma se disponen de señales eléctricas que contienen la información de la radiación térmica (Fig. A1. 2). Encontraron un resultado (aumento de la temperatura superficial del carbonizado con la concentración de  $O_2$ ) función de la proporción del campo de visión de la sonda ocupado por la partícula de combustible al pasar, y salvo para situaciones en las que sea superior al 70 % los resultados presentan una dispersión difícil de interpretar. T. M. Linjewile et al [22] eliminaron la necesidad de conocer la fracción del campo de visión de la sonda ocupado por la partícula, y obtuvieron un exceso de temperaturas asociado a un batch de partículas de coque sobre la del lecho de (60-360 °C), observaron una disminución de dicha diferencia con la concentración de  $O_2$  (control difusional de la conversión), temperaturas superficiales mayores cuando la partícula se encuentra en la fase burbuja en detrimento de la emulsión, y que la posible segregación causa por el movimiento del lecho situara las partículas más finas y con mayor temperatura a mayor altura dentro de lecho. R. Hernberg et al [23] tuvieron en cuenta la energía reflejada por la partícula y la atenuación de la radiación por el lecho, y mediante la calibración de la unidad radiométrica, suposición de cuerpo gris, y tratamiento estadístico [24] obtuvieron

información cualitativa entre la temperatura superficial del char y su tamaño. T. Joutsenoja et al [25] estudiaron el efecto de la temperatura del lecho y la concentración de  $O_2$  (5-8) % sobre el exceso de la temperatura superficial del carbonizado sobre la del lecho, encontrando su disminución con la temperatura del lecho y aumento con la de oxígeno.

El error asociado a la medida que la señal eléctrica hace de la radiación térmica (sistema de calibración, ruido eléctrico, fluctuaciones en la radiación de fondo, pérdidas de radiación...) es despreciable [25], es decir, la unidad radiométrica mensura adecuadamente la radiación que recibe. Por ello, el carácter cualitativo (alta dispersión) de los resultados obtenidos en los trabajos analizados (Tabla AI. 1) son debidos al modelo matemático que se realiza. Que obtiene temperaturas superficiales en función de un parámetro muy difícil de interpretar, el cual almacena (absorbe) el tamaño y emisividad de la partícula, y la fracción del campo de visión de la sonda ocupada por ésta. Por otro lado, existe otro inconveniente asociado al uso de una sonda como dispositivo de captura y es que la temperatura calculada es la media de los cuerpos presentes en el campo de visión (Fig. 1.3 a). Sin embargo, este inconveniente puede salvarse si la captura se realiza mediante una cámara digital que proporciona información de la radiación que llega a cada pixel del sensor en los tres intervalos espectrales asociados al rojo, verde, y azul [42], haciendo que la radiosidad de una región del espacio que irradia un pixel no se vea afectada por la radiosidad de las regiones adyacentes (Fig. 1. 3 b).

Lu H et al [27] utilizando una cámara digital como equipo de captura y medida de la radiación térmica visible obtienen el campo superficial de temperatura y emisividad del carbonizado de una partícula (11 mm) de madera de álamo durante su combustión en el centro de un horno eléctrico a 1000 °C, y de una partícula de serrín (300  $\mu$ m) en un reactor de arrastre. Este resultado (aunque no sobre reactores de lecho fluido) muestran el potencial que la captura mediante equipo digital tiene para revelar detalles que escapan a otras técnicas como la existencia de gradientes térmicos superficiales indicando combustión no uniforme. Dentro del análisis de la conversión de combustibles en reactores de lecho fluido, Bo. C et al [15] emplearon una cámara digital para cuantificar el efecto que el cambio en la atmósfera de conversión ( $N_2-O_2$  vs  $CO_2-O_2$ ) tiene en la temperatura de combustión de los volátiles de partículas (6 mm) de distintos tipos de combustibles (Lignito, Bituminoso, Sub-bituminoso, Antracita, Madera China). Encontraron que la temperatura de llama era mayor en la atmósfera  $N_2-O_2$ , especialmente cuando la concentración de  $O_2$  era baja. W. Zukowski et al [28] analizaron el campo de temperatura que se crea en un lecho de arena (0.385-0.43 mm) cuando se produce la combustión de una mezcla aire-propano en su interior. Los resultados revelaron la existencia de gradientes internos

asociados a la explosión de las burbujas y al movimiento de sólidos. El uso de cámaras térmicas que operan con longitudes de ondas pertenecientes al espectro infrarrojo (0.85-15  $\mu\text{m}$ ) también se ha utilizado para estudiar la transferencia de calor y los perfiles de temperaturas existentes entre las partículas sólidas del lecho y el gas de fluidización. Amit V. Patil et al [31] analizaron el campo de temperatura de un lecho de partículas esféricas de vidrio (0.5-1 mm) previamente calentadas en un horno eléctrico a 100 °C y fluidizadas en un reactor 2D a temperatura ambiente. Encontraron la existencia de un gradiente en el lecho de 10-20 °C, y que un aumento en la velocidad de fluidización, la disminución de la masa de inventario o del diámetro de las partículas esféricas hacía que la temperatura media de los sólidos cayese rápidamente. T. Tsuji et al [30] midieron el campo de temperaturas de un lecho 2D de partículas de aluminio pintadas de negro (2.1 mm) fluidizadas con aire para analizar el efecto que las burbujas tienen sobre el movimiento y temperatura de las partículas. Sorprendentemente encontraron una temperatura superior en la zona fluidizada respecto de las regiones estáticas donde la transferencia convectiva de calor es inferior. Justificaron el resultado asegurando que las partículas que rodean la burbuja son las que están en el interior del lecho, a mayor temperatura por no perder calor por conducción con las paredes del reactor. S. L. Brown et al [29] analizaron la variación temporal del campo de temperaturas y la transferencia de calor en un lecho de arena 2D fluidizado con aire calentado previamente en diferentes condiciones de fluidización. Cuando el lecho está estático encuentran la existencia de zonas a bajas temperaturas debida a la baja circulación del aire, y una de mayor temperatura alrededor de la zona de inyección del aire. Durante la fluidización la técnica desvela la presencia de partículas a mayor temperatura en la parte superior del lecho. Y cuando la fluidización produce la aparición de un “Spout” encuentran un mínimo y máximo para la temperatura de las partículas entre las principales regiones que se crean, y la disminución de la temperatura del gas a medida que asciende por el lecho.

ANEXO I. Revisión de las técnicas de medida de la temperatura de las partículas de combustible sólido durante su conversión en reactores de lecho fluido

**Tabla AI.1. Medida de la temperatura de partículas durante su combustión en Reactores de Lecho Fluido**

	Técnica	T <sub>b</sub> (°C)	Agente de fluidización	Lecho	d <sub>b,b</sub> (mm)	Combustible	d <sub>p,c</sub> (mm)	ΔT <sub>c,b</sub> (°C)
[20]	termopar	750, 800, 900	21 % (aire)	Arena	0.1	Carbón	9-15	40-200
[19]	termopar	900	21 % (aire)	Arena	0.46	Coque	4	98
[17]	termopar	590, 710	21 % (aire)	Arena	0.25	Lignito Brown Coal	5, 7, 8, 10	125-182 70-128
[18]	termopar	750, 820, 900	21 % (aire)	Arena	0.25-0.315	Char de madera	9-13	16-140
[13]	termopar	850	CO <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> (2-8) %	Arena	0.5-0.6	Char de carbón bituminoso	6-7	10-60
[14]	termopar	815	N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> (0-40) % CO <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> (0-40) %	Arena	0.25-0.35	Carbón bituminoso	6-13	X
[15]	termopar	815	21 % (aire)	Arena	0.25-0.35	Lignito, Bituminoso, Sub-bituminoso, Antracita, Madera China	6	X
[44]	Anillo metálico	760-960	X	Arena	0.225	Polvo de antracita y resina	2.5 4.5 7.5 ~ 60	100-143 60-100 ~ 60
[40]	fotografía	930	21 % (aire)	X	0.655	Batch de Coque	2.4-2.8	130-160
[41]	fotografía	900	21 % (aire)	Arena	0.44-0.55	Batch de Coque	1.9 2.2 2.5 3.1	135±5 127±47 127±23 110±8
[21]	Pirometría por sonda óptica	787-877	N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> (14.2-23) %	Arena	1.2-1.6	Batch de Char de Lignito y Antracita	3.7	30-150
[22]	Pirometría por sonda óptica	700-927	21 % (aire)	Arena	0.182-1.09	Batch de partículas de Coque	0.75-8.1	60-360
[23]	Pirometría por sonda óptica	856	21 % (aire)	Olivino	0.36	Batch de partículas de carbón	1-9	50-600
[25]	Pirometría por sonda óptica	857-927	O <sub>2</sub> (5-8) %	Cerámica WMS Molochite	< 1.6	Carbón bituminoso Westerhold Char de Carbón bituminoso Westerhold Carbón EBV	2 2 2.5	129±63 107±60 87±65





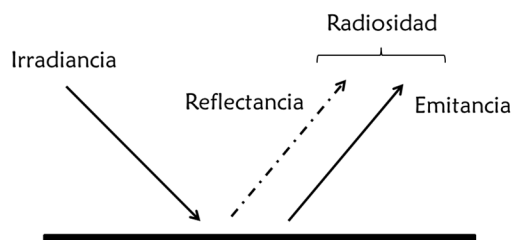
## ANEXO II. Modelo de la temperatura superficial determinada mediante pirometría con cámara digital

### All.1 Modelo matemático de la radiosidad de una partícula de carbonizado durante su combustión en un horno eléctrico

Como representa la Fig. All.1, la potencia radiante que emite, recibe, y abandona una superficie se denominan; emitancia, irradiancia, y radiosidad respectivamente, [40]. La emitancia de un cuerpo ideal (cuerpo negro) se modela matemáticamente mediante la Ley de Planck [39], y para temperaturas superficiales comprendidas entre (600-950) °C, y longitudes de onda pertenecientes a las bandas espectrales roja-verde-azul (0.45-0.7)  $\mu\text{m}$  [43], puede expresarse según (ec. All.1). Mediante la emisividad (ec. All.2) es como se expresa la emisión de los cuerpos reales.

$$\text{(ec. All.1)} \quad e^o(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right)$$

$$\text{(ec. All.2)} \quad \varepsilon(\lambda, T) = \frac{e(\lambda, T)}{e^o(\lambda, T)}$$



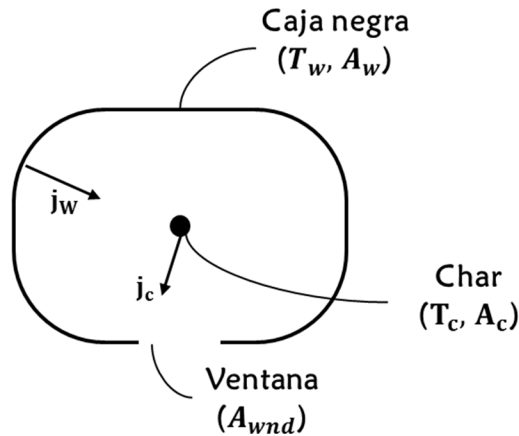
**Figura All.1. Flujos radiantes asociados a una superficie: Emitancia (E), Irradiancia (I), y Radiosidad (J)**

Para determinar la radiosidad de una partícula sólida de combustible durante su combustión en un horno eléctrico equipado con una ventana de observación (Fig. 2.2 b), se plantean las siguientes hipótesis:

- Paredes interiores del horno con comportamiento ideal como superficie negra
- Temperatura, y propiedades uniformes de las paredes interiores del horno
- La radiación es emitida y reflejada de forma difusa

- El área superficial de la pared del horno es mucho mayor a las superficies de la partícula, y ventana de observación, ( $A_w \gg A_c$ ,  $A_w \gg A_{wnd}$ ,  $A_{wnd} \gg A_c$ )
- Superficie convexa de la partícula

En la Fig. All.2, se muestra la superficie negra homogeneizante de temperatura y radiación, equipada con una “ventana” de observación que permite capturar la radiación térmica radiada por la partícula situada en el centro, y el diagrama de transferencia de calor basado en las hipótesis anteriores.



**Figura All.2. Representación del montaje experimental (a), e intercambio radiante char-caja negra (b)**

La radiosidad de la partícula de combustible es la suma de su emitancia más la radiación reflejada de la irradiancia, es decir, la suma de lo que emite debido a su temperatura (temperatura que queremos conocer), más la que refleja de toda la radiación que le llega del intercambio radiante entra las superficies que le rodea y ella misma. Según lo anterior, la expresión que modela la radiosidad de la partícula, utilizando los factores de forma [40] entre la superficie de la partícula y la pared del reactor es la (ec. All.3).

$$(ec. All.3) \quad j_c = \varepsilon_c(\lambda, T_c) e^0(\lambda, T_c) + [1 - \alpha_c(\lambda, T_c) - \tau_c(\lambda, T_c)] (f_{c,c} j_c + f_{c,w} j_w)$$

$$(ec. All.4) \quad j_w = \varepsilon_w(\lambda, T_w) e^0(\lambda, T_w) + [1 - \alpha_w(\lambda, T_w) - \tau_w(\lambda, T_w)] (f_{w,c} j_c + f_{w,w} j_w)$$

Para obtener de manera explícita la radiosidad de la partícula, es necesario tener en cuenta la radiosidad de la pared del horno (ec. All.4) y resolver el sistema de ecuaciones formado por (ec. All.3-4). Para ello, es necesario simplificarlo teniendo en cuenta: (i) el comportamiento ideal de las paredes que rodean la partícula de char, (ii) la débil dependencia de la emisividad del carbonizado con las temperaturas que se dan durante su combustión para longitudes de ondas pertenecientes al espectro visibles [33], lo que da soporte para suponer que la superficie del carbonizado se comporta como una superficie

gris [21-25, 27], (iii) la partícula de char es opaca ( $\tau_c=0$ ) y tras considerarse su superficie gris se cumple que  $\epsilon_c=\alpha_c$  [39], Con ello se simplifica el sistema a

$$(ec. AII.5) \quad j_c = \epsilon_c e^o(\lambda, T_c) + (1 - \epsilon_c) (f_{c,c} j_c + f_{c,w} j_w)$$

$$(ec. AII.6) \quad j_w = e^o(\lambda, T_w)$$

Por otro lado, la suposición de superficie convexa para la partícula hace que  $f_{c,c} = 0$ , y el uso de las relaciones entre los factores de forma ( $f_{c,c} + f_{c,w} = 1$ ) [39] permite obtener la expresión explícita para la radiosidad de la partícula (ec. AII.7).

$$(ec. AII.7) \quad j_c = \epsilon_c e^o(\lambda, T_c) + (1 - \epsilon_c) e^o(\lambda, T_w)$$

### AII.2 Pirometría con cámara digital en dos colores

Dada la variación que la emisividad superficial del carbonizado presenta (0.85-1) [19, 21-25, 27, 33, 40, 41] dentro de las bandas espectrales roja-verde-azul, y las temperaturas manejadas durante la combustión (600-950) °C, el término que modela la radiación reflejada por la superficie del carbonizado procedente de los alrededores en ec. AII.7 (segundo término en el segundo miembro) puede despreciarse para temperaturas de combustión superiores a la de fondo (ec. AII.8)

$$(ec. AII.8) \quad j_c = \epsilon_c \frac{C_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T_c}\right)$$

y particularizando ésta última expresión (ec. AII.8) para dos longitudes de onda diferentes ( $\lambda_i, \lambda_j$ ), y relacionándolas entre sí, se puede despejar el valor de la temperatura de forma explícita (ec. AII.9)

$$(ec. AII.9) \quad T_c = \frac{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_j} - \frac{1}{\lambda_i} \right)}{\ln \left( \frac{j_c(\lambda_i, T_c)}{j_c(\lambda_j, T_c)} \right) - 5 \ln \left( \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)}$$

donde se ha utilizado la hipótesis de superficie gris para el char arriba mencionada y justificada.

Formalmente, no se puede conocer el valor del cociente,  $j_c(\lambda_i, T_c)/j_c(\lambda_j, T_c)$  pero se puede estimar mediante los números digitales proporcionados por el equipo digital para esos colores [28], como muestra la relación (ec. AII.10). Donde el parámetro de calibración  $\beta_{P2C,ij}$  absorbe los parámetros ópticos y electrónicos del sistema, además de la relación entre el brillo y la temperatura.

$$(ec. AII.10) \quad \frac{j_c(\lambda_i, T_c)}{j_c(\lambda_j, T_c)} \approx \beta_{P2C,ij} \frac{DN_i}{DN_j}$$

Introduciendo (ec. AII.10) en (ec. AII.9) se obtiene (ec. AII.11), expresión que particularizada para cada pixel del sensor, determina el campo de temperatura de la escena visualizada por pirometría en dos colores (P2C).

$$(ec. All.11) \quad T_{P2C,ij} = \frac{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_j} - \frac{1}{\lambda_i} \right)}{\left( \ln \left( \frac{DN_i}{DN_j} \right) + \ln(\beta_{P2C,ij}) \right) - 5 \ln \left( \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)}$$

### All.3 Pirometría con cámara digital en un color

Integrando la ecuación (ec. All.7), que modela la radiosidad de la partícula de carbonizado representada en la Fig. All.2, entre las longitudes de ondas que limitan la banda espectral o color que se considere  $\Delta\lambda_k$ , se obtiene

$$(ec. All.12) \quad \int_{\Delta\lambda_k} j_c(\lambda_i, T_c) d\lambda = \int_{\Delta\lambda_k} \frac{C_1}{\lambda^5} \varepsilon_c \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T_c}\right) + \int_{\Delta\lambda_k} (1 - \varepsilon_c) e^o(\lambda, T_w) d\lambda$$

El primer miembro de (ec. All.12) puede estimarse mediante el número digital proporcionado por el equipo digital ( $DN_k$ ) para cada pixel. La relación (ec. All.13) contiene el parámetro de calibración  $\beta_{PIC, k}$ , que como en P2C, absorbe los parámetros ópticos y electrónicos del sistema, además de la relación entre el brillo y la temperatura. Por otro lado, el primer término del segundo miembro (ec. All.12) puede simplificarse como indica (ec. All.14), aproximación que permite despejar explícitamente la temperatura (ec. All. 15). Si se particulariza (All.15) para cada pixel del sensor se obtiene el campo de temperatura de la escena visualizada por pirometría en un color.

$$(ec. All.13) \quad \int_{\Delta\lambda_k} j_c(\lambda_i, T_c) d\lambda \approx \beta_{PIC,k} DN_k$$

$$(ec. All.14) \quad \int_{\Delta\lambda_k} \frac{C_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) d\lambda \approx \Phi_k \frac{C_1}{\lambda_k^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_k T}\right)$$

$$(ec. All.15) \quad T_{PIC,k} = \frac{C_2}{\lambda_k \left[ \ln\left(\Phi_k \frac{\varepsilon_c C_1}{\lambda_k^5}\right) - \left(\ln(\beta_{PIC,k} DN_k - (1-\varepsilon_c) E(\Delta\lambda_k, T_w))\right) \right]}$$

Tanto para aplicar P2C mediante (ec. All.11), como PIC mediante (ec. All.15), y obtener la temperatura de la región del espacio cuya radiación se captura, irradia e interpreta cada pixel del sensor mediante los números digitales en cada fotograma, es necesario conocer el valor del parámetro de calibración  $\beta$  ( $\beta_{P2C, ij}$  para el caso P2C, y  $\beta_{PIC, k}$  para PIC). Éste parámetro se puede aproximar mediante una curva de ajuste obtenida en un ensayo de calibración.

### All.4 Curva de calibración

Las expresiones (ec. All.11) y (All.15), que permiten determinar la temperatura superficial del carbonizado situado en el centro del horno eléctrico, tal y como representa la Fig. All.2, presentan un parámetro de calibración;  $\beta_{P2C,ij}$  para el caso P2C, y  $\beta_{PIC,k}$  para PIC, que debe conocerse para poder aplicar dichas ecuaciones, y obtener así el campo de temperatura de la escena visualizada. Con el objetivo de determinar dicho parámetro, se obtienen curvas que ajustan los puntos:  $[\ln(DN_i/DN_j) - \ln(\beta_{P2C,ij})]$  para P2C, y  $[\ln(DN_k) - \ln(\beta_{PIC,k})]$  para PIC, calculados al sustituir en las ec. All. 16-17 la temperatura asociada a la

región superficial cuya radiación mensuran los números digitales de los píxeles asociados a ésta superficie (Fig. 2.3). Es decir, mediante ensayos donde se obtienen los fotogramas de la superficie del carbonizado durante su combustión, y el uso de las expresiones mencionadas, se obtienen para cada una de la imágenes, un valor del parámetro de calibración mediante el valor de los números digitales producidos por los píxeles en función de la radiación que reciben, y la temperatura superficial medida por termopar. Los puntos obtenidos, respectivamente, se ajustan por medio de curvas polinómicas de segundo grado, que almacenan la relación existe entre el parámetro de calibración, y los números digitales dentro del intervalo de temperatura de combustión.

$$(ec. All.16) \quad \ln(\beta_{P2C,ij}) = \frac{C_2}{T} \left( \frac{1}{\lambda_j} - \frac{1}{\lambda_i} \right) + 5 * \ln \left( \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right) - \ln \left( \frac{DN_i}{DN_j} \right)$$

$$(ec. All.17) \quad \ln(\beta_{P1C,k}) = \ln \left( \Phi_k \varepsilon_c \frac{C_1}{\lambda_k^5} \exp \left( - \frac{C_2}{\lambda_k T} \right) + (1 - \varepsilon_c) E(\Delta\lambda_k, T_w) \right) - \ln(DN_k)$$