

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Química

Medida de la temperatura superficial del carbonizado  
de Haya en un reactor de lecho fluido mediante  
pirometría para aclarar el efecto del CO<sub>2</sub> en oxi-  
combustión

Autor: Ana Berdugo Vilches

Tutor: Alberto Gómez Barea

Dep. de Ingeniería Química y Ambiental  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016





Trabajo fin de grado  
Grado en Ingeniería Química

Medida de la temperatura superficial del carbonizado  
de Haya en un reactor de lecho fluido mediante  
pirometría para aclarar el efecto del CO<sub>2</sub> en oxi-  
combustión

Autor:

Ana Berdugo Vilches

Tutor:

Alberto Gómez Barea

Profesor titular

Departamento de Ingeniería Química y Ambiental  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado: Medida de la temperatura superficial del carbonizado de Haya en un reactor de lecho fluido mediante pirometría para aclarar el efecto del CO<sub>2</sub> en oxi-combustión

Autor: Ana Berdugo Vilches

Tutor: Alberto Gómez Barea

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*





# Agradecimientos

---

Este trabajo representa para mí una de las metas más importantes alcanzadas hasta día de hoy, y una de los factores más importantes a la hora de cumplir nuestros objetivos es contar con el apoyo de la gente que nos rodea en el camino. Durante este trabajo he tenido la suerte de tener a mi lado a grandes personas. Entre ellas están las que siempre me han acompañado y confiado en mí hasta día de hoy. Por esto, en primer lugar me gustaría agradecer a mis padres todo el apoyo y la confianza que han depositado en mí durante este trayecto y, por supuesto, a mi hermana, persona clave en este trabajo y en mi vida, por su disposición a ayudarme en cualquier momento. Al resto de familiares y amigos, y en particular, a Alba Valderrama, por sus motivadoras charlas diarias y a Manuel Raga por su contagioso espíritu luchador.

También quiero dar las gracias a Alberto Gómez Barea por darme la oportunidad de realizar este trabajo y a todos mis compañeros, por la ayuda brindada durante todos estos meses.

Por último, quiero dar mi más sincero agradecimiento a Jesús Salinero, una persona que ha sido clave para el desarrollo y la elaboración de este trabajo, por su infinita paciencia e implicación, y por enseñarme y guiarme en el camino.



Debido a la necesidad de reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$ , causantes de la intensificación del efecto invernadero y el calentamiento global, surge como solución la técnica de captura de  $\text{CO}_2$  mediante oxi-combustión. Esta tecnología consiste en realizar el proceso de combustión en presencia de oxígeno puro parcialmente diluido con  $\text{CO}_2$  procedente de la recirculación de los gases. De esta manera los productos de la combustión tienen una alta concentración de  $\text{CO}_2$  lista para su secuestro sin necesidad de equipo de captura. La tecnología de oxi-combustión puede instalarse en plantas de producción de energía eléctrica diseñadas para trabajar en combustión con aire (1ª generación), aunque se plantea mejorar esta técnica alimentando mayores concentraciones de oxígeno a la caldera (2ª generación) consiguiendo reducir el tamaño de esta con respecto a las convencionales. Sin embargo, aún existen una serie de factores que deben ser investigados antes de construir una caldera de 2ª generación. Uno de los factores más importantes es la temperatura de las partículas de combustible, ya que, debido a las altas concentraciones de  $\text{O}_2$  en la caldera la velocidad de conversión de las partículas es muy alta pudiendo estas llegar a un nivel de temperatura inadmisibles. En este Trabajo Fin de Grado se busca estudiar el efecto que el  $\text{CO}_2$  tiene sobre la temperatura de las partículas de carbonizado durante su combustión. Para ello se trabaja en un reactor de lecho fluido, a escala de laboratorio, que permite medir la temperatura del carbonizado por pirometría con cámara digital. Se emplea como combustible carbonizado de haya (biomasa) generado en un horno, y se opera a dos temperaturas de operación ( $800^\circ\text{C}$  y  $850^\circ\text{C}$ ) con dos tamaños de partícula diferentes (6 mm y 10 mm). Una de las principales conclusiones es que la menor difusividad del  $\text{O}_2$  en  $\text{CO}_2$  comparada con la de  $\text{O}_2$  en  $\text{N}_2$  es la responsable de la diferencia con los resultados en combustión con aire o mezcla de  $\text{O}_2/\text{N}_2$  y que la velocidad de gasificación con  $\text{CO}_2$  debe tenerse en cuenta para el combustible utilizado y para las condiciones empleadas en este trabajo.



# Abstract

---

In the energy sector, carbon capture has emerged as a technical solution for reducing CO<sub>2</sub> emissions, which are responsible for the greenhouse gas effect and global warming. Oxy-fuel combustion is one of the options for implementing carbon capture. The technology consists of combustion of a fuel with pure oxygen (partially diluted with CO<sub>2</sub>), which results in a flue gas stream rich in CO<sub>2</sub> that is suitable for storage. Oxy-fuel may be applied in existing power plants which are designed to operate with traditional air combustion (i.e. 1<sup>st</sup> generation). Alternatively, the design of new boilers operate with higher concentrations of oxygen, would allow to reduce reducing the size of the units as compared to the conventional boilers (i.e. 2<sup>nd</sup> generation). However, the construction of such oxy-fuel combustors requires further knowledge of the fuel conversion process in oxygen-rich environment. An important aspect is the temperature of the fuel particles, as the high O<sub>2</sub> concentrations in the combustor leads to fast conversion of the fuel, which might result in intolerable temperatures. In this work, the effect of CO<sub>2</sub> on the temperature of the char particles during the combustion process is investigated. A lab-scale fluidized bed reactor is used and the evolution of temperature of burning char particles during combustion is quantified by means of a digital camera. The results show that the main difference in the temperature of the fuel particle between oxy-fuel and air combustion relates to the lower diffusivity of O<sub>2</sub> in CO<sub>2</sub> as compared to that of O<sub>2</sub> in N<sub>2</sub>. It is proposed that the rate of char gasification should be taken into account under the conditions tested in this work.



# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xviii</b>
<b>Resumen Capítular</b>	<b>1</b>
<b>1 Introducción</b>	¡Error! Marcador no definido.
1.1 <i>Las emisiones de CO<sub>2</sub>: Principal fuente del calentamiento global</i>	5
1.2 <i>Captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>: Una solución para reducir las emisiones de GEI</i>	7
1.3 <i>Oxi-combustión en lecho fluidizado</i>	7
1.3.1 <i>Medida de la temperatura de la partícula de carbonizado en reactores de lecho fluido</i>	8
1.4 <i>Objetivos</i>	10
<b>2 Metodología Experimental</b>	¡Error! Marcador no definido.
2.1 <i>Medida de la temperatura superficial del carbonizado mediante pirtometría con cámara digital</i>	13
2.2 <i>Montaje experimental</i>	14
2.3 <i>Metodología experimental</i>	16
<b>3 Análisis y selección de las imágenes de combustión</b>	<b>19</b>
3.1 <i>Selección de las imágenes</i>	19
3.2 <i>Interpretación de las imágenes</i>	20
<b>4 Matriz experimental de ensayos</b>	<b>21</b>
4.1 <i>Selección y discusión de las variables de operación del reactor de lecho fluido para analizar el efecto del CO<sub>2</sub> en la conversión</i>	21
<b>5 Resultados</b>	<b>25</b>
5.1 <i>Valoración de la repetitividad</i>	25
5.2 <i>Resultados del modo de conversión de partículas de carbonizado durante su combustión</i>	26
5.3 <i>Temperatura superficial de combustión del carbonizado medida por pirometría</i>	26
<b>Capítulo 6. Resumen y Conclusiones</b>	¡Error! Marcador no definido.
<b>Nomenclatura</b>	<b>34</b>
<b>Referencias</b>	<b>37</b>
<b>Anexo I. Descripción de equipos y dispositivos</b>	<b>41</b>
<i>Horno eléctrico</i>	41
<i>Chapa metálicas</i>	42
<i>Distribuidor</i>	42

<i>Reactor de acero con ventana de cuarzo</i>	43
<i>Colector</i>	44
<i>Videocámara digital</i>	44
<i>Termopares</i>	45
<i>Registrador de datos</i>	45
<i>Rotámetros</i>	46
<b>Anexo II. Modelo teórico</b>	<b>47</b>
<i>AIII. 1. Ecuaciones de conservación</i>	47
1.1. Conservación de la materia	47



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2.1 Equipos experimentales	15
Tabla 2.2 Propiedades de la madera de haya	16
Tabla 4.1 Condiciones de operación para los ensayos experimentales	23

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Efecto invernadero [5]	6
Figura 1.2 a) Emisiones de CO <sub>2</sub> por región desde 1990 hasta las esperadas para 2030, b) Aumento de la población desde 1935 a 2035, c) consumo energético desde 1965 hasta el que se espera para 2035 [6, 7]	6
Figura 1.3 Representación de la captura de CO <sub>2</sub> mediante oxi-combustión [8]	7
Figura 1.4 Diagrama del mecanismo de oscilación del termopar y la partícula de carbón [13]	9
Figura 1.5 Equipo de captura de radiación electromagnética [14]	9
Figura 1.6 . Campo de visión asociado a una sonda óptica (a), y cámara digital (b) [8].	10
Figura 2.1 Valores de DN <sub>k</sub> correspondientes un pixel seleccionado de la imagen	14
Figura 2.2 Equipos experimentales	14
Figura 2.3 Carbonizado generado a partir de madera de Haya	15
Figura 2.4 Montaje experimental para los ensayos de temperatura superficial del carbonizado.	16
Figura 2.5 Posiciones de la partícula durante el ensayo de conversión: a) partícula en combustión sumergida en el lecho, b) partícula extraída del reactor bañada por la corriente de N <sub>2</sub>	17
Figura 3.1. Imágenes de la combustión de una partícula de 6 mm de carbonizado de haya durante su combustión en aire a una velocidad de fluidización de 2,2U <sub>mf</sub>	19
Figura 3.2. Imágenes donde el carbonizado aparece a) borroso, b) con estela, y c) doble.	20
Figura 3.3. Oscilación en la luminosidad (temperatura) en décimas de segundo: efecto burbuja	20
Figura 3.4. Regiones hexagonales y rectangulares que delimitan la superficie del char y la temperatura superficial media asociada	20
Figura 4.1 Imágenes de la combustión de una partícula de carbonizado de haya al 10% O <sub>2</sub> para distintos instantes de tiempo: a) d <sub>p</sub> =6 mm; T <sub>b</sub> =800°C, b) d <sub>p</sub> =6 mm; T <sub>b</sub> =850°C	22
Figura 5.1 Resultados de repetitividad para una velocidad de fluidización de 2 U <sub>mf</sub> para partículas de: a) d <sub>p</sub> =10 mm, b) d <sub>p</sub> =6 mm	25
Figura 5.2 Partículas de carbonizado de haya recuperadas a varios tiempos de combustión, T <sub>b</sub> =800°C: a)21% O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> y b)21% O <sub>2</sub> /CO	26
Figura 5.3 Evolución de la temperatura con el tiempo para una partícula de carbonizado de Haya de 10 mm de diámetro en O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> para distintas concentraciones de O <sub>2</sub> : a),b) T <sub>b</sub> =800°C; c),d) T <sub>b</sub> =850°C	27
Figura 5.4 Efecto relativo de aumentar las diferentes variables de operación del lecho y parámetros del combustible [22]	28
Figura 5.5 Evolución de la temperatura con el tiempo para una partícula de carbonizado de Haya de 10 mm a T <sub>b</sub> =800°C: a) 10% O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> , b) 30% O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> ; y conversión: c) 10% O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> , d) 30% O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	29
Figura 5.6 Evolución de la temperatura con el tiempo para una partícula de carbonizado de Haya de 10 mm a T <sub>b</sub> =800°C: a) 10% O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> , b) 30% O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> ; y conversión: c) 10% O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> , d) 30% O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	29
Figura 5.7 Tiempos de combustión experimental y teórica para una partícula de carbonizado de Haya de 10 mm de diámetro a distintas concentraciones de O <sub>2</sub>	30

Figura 5.8 Tasa de gasificación frente a la temperatura calculada según varios autores [23]. 30

El colector se sitúa en la parte superior del horno y es el encargado de recoger los gases de reacción. En la Figura AI.1 se puede ver que en la parte superior izquierda se asienta un tubo de alimentación a través del cual se introducen las partículas de carbonizado para su estudio. Igualmente, en la parte superior derecha se dispone de tres tubos para la instalación de tomas de presión o termopares. 44

Figura AI.2. Colector y tubería de expulsión de gases 44



## RESUMEN CAPITULAR

---

Este Trabajo Fin de Grado comienza con un primer capítulo de introducción donde se justifica la necesidad de desarrollar la tecnología de combustión de carbón en aras de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Dentro de las tecnologías candidatas, se destaca la oxi-combustión 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.

En el segundo capítulo se presentan los equipos utilizados en este Trabajo Fin de Grado y su disposición para la realización de los ensayos. Asimismo, se detalla el procedimiento, tanto para la realización de las pruebas experimentales de medida de la temperatura durante la combustión, como para los ensayos de análisis del modo de conversión del carbonizado de haya en condiciones de combustión y oxi-combustión.

Una vez expuestos los equipos y el modo de realización de las pruebas, en el Capítulo 3 se describe el método de análisis para la obtención de los resultados, explicándose los criterios para la selección de las imágenes y su interpretación.

A continuación, en el Capítulo 4, se expone la matriz de ensayos experimentales propuesta. La cual, se establece dentro las condiciones de operación en las que se aplica esta técnica en la industria, seleccionándose estas condiciones partir de un análisis de los resultados de la literatura, y por otra parte, teniendo en cuenta algunas de las limitaciones que la técnica de medida empleada presenta (velocidad de mínima fluidización, concentraciones máximas y mínimas posibles de analizar, diámetro de partícula).

Una vez que ya se conoce la forma de ejecución del ensayo y las condiciones en las que se va a operar, se presentan los resultados obtenidos tras la realización de las pruebas experimentales. Estos son discutidos y comparados con un modelo teórico de partícula decreciente, lo cual, junto con las observaciones sobre el modo de conversión y la evolución de la temperatura en distintas condiciones de operación permiten concluir con una serie de ideas se resumen en el Capítulo 6. En este último capítulo, además, se resumen las razones que motivaron la realización de este trabajo y se cierra con una propuesta de trabajo futuro, donde se insta a emplear la técnica presentada para identificar la máxima concentración de O<sub>2</sub> que es posible alimentar al reactor manteniendo el correcto funcionamiento del mismo, permitiendo así avanzar en el estudio del efecto que el cambio de la atmósfera de combustión (N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> vs O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>) tiene sobre el proceso de conversión.

El trabajo finaliza con dos anexos que recogen los detalles e imágenes de los equipos empleados (Anexo I), y el desarrollo de un modelo teórico de partícula decreciente (Anexo II).









# 1 INTRODUCCIÓN

---

En este capítulo se realiza una breve descripción sobre la situación energética actual y los problemas derivados de ella. Se presenta la necesidad de desarrollar técnicas que puedan ser implantadas durante el tiempo de estudio y desarrollo de las energías renovables, como es el caso de la captura de CO<sub>2</sub> mediante oxi-combustión el lecho fluido. A continuación, se describe esta técnica y se justifica la necesidad de estudiar la temperatura de las partículas de combustible como parámetro clave para su desarrollo.

## 1.1 Las emisiones de CO<sub>2</sub>: Principal fuente del calentamiento global

Las actividades humanas, tales como el uso de combustibles fósiles para la producción de energía, están generando grandes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como dióxido de carbono, monóxido de carbono, clorofluorocarbonados, óxidos de nitrógeno y metano, principalmente, siendo el CO<sub>2</sub> uno de los GEI más importantes por las grandes cantidades en las que se emite [1]. Las emisiones de CO<sub>2</sub> se compensan de manera natural por diversos mecanismos llamados sumideros, como los océanos o los bosques. La vegetación tiene la capacidad de asimilar el carbono e incorporarlo a su estructura, es decir, lo fija y lo mantiene almacenado por largos periodos, a través de la fotosíntesis. Debido a esto, las especies fotosintéticas se convierten en sumideros temporales de dióxido de carbono [2]. Sin embargo, la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida actualmente por el hombre no llega a ser compensada mediante estos mecanismos naturales provocando un aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Este es el principal factor responsable de la intensificación del efecto invernadero y el cambio climático resultante.

El efecto invernadero (Figura 1.1) es un proceso natural que hace que el planeta sea habitable, siempre y cuando los valores de concentración de estos gases se mantengan entre unos límites determinados. La radiación solar atraviesa la atmósfera llegando a la superficie terrestre y provocando su calentamiento. Esta energía absorbida por el suelo es emitida desde la superficie siendo absorbida, una parte, por los GEI los que, a su vez, reirradian mucha de esta energía a la superficie. Por último, la cantidad restante vuelve a salir. Debido al aumento de los gases en la atmósfera, gran parte de estos rayos no pueden escapar al espacio permaneciendo en nuestra atmósfera y aumentando la temperatura de la superficie terrestre. Este calentamiento podría, si alcanzara niveles críticos fundir parte de los casquetes polares, lo que elevaría el nivel de los mares, provocando inundaciones de algunas zonas costeras donde se concentra una parte muy importante de la población humana en el planeta. Además de la desaparición de especies vegetales y animales susceptibles a cambios de temperatura.

En la época preindustrial la concentración de CO<sub>2</sub> era de 280 ppm y ha alcanzado, en 2005, un valor de 379 ppm, sobrepasando los 400 ppm en 2013 [3]. El ritmo de aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera era de 0,5 ppm/año en 1965 llegando actualmente a una tasa de 2 ppm/año. En los últimos 1000 años la temperatura media global de la atmósfera terrestre varió entre 1,5 y 2°C, mientras que en las últimas cuatro décadas ha aumentado más de 0,5 °C [4].



Figura 1.1 Efecto invernadero [5]

Las emisiones de CO<sub>2</sub> mundiales han experimentado un fuerte crecimiento desde 1990, llegando a emitir actualmente alrededor de 30 billones de toneladas de CO<sub>2</sub> (Figura 1.2 a). Todo ello viene provocado por un importante aumento de la población mundial, la cual se ha duplicado respecto a 1965 y se prevé que aumente en 1,5 billones de personas para llegar a cerca de 8,8 billones de personas para 2035. Esto unido al crecimiento de la economía mundial supone una mayor energía requerida conduciendo a un aumento en el consumo del 34% entre 2014 y 2035, ver Figura 1.2.

Debe tenerse en cuenta que si se continúan las actuales políticas y modelos energéticos los combustibles fósiles continuarán teniendo la presencia más significativa en el balance energético y las aportaciones de otro tipo de recursos, como las energías renovables no llegarán a alcanzar cotas especialmente relevantes, las emisiones crecerán tal como apuntan los estudios realizados intensificándose el efecto invernadero.

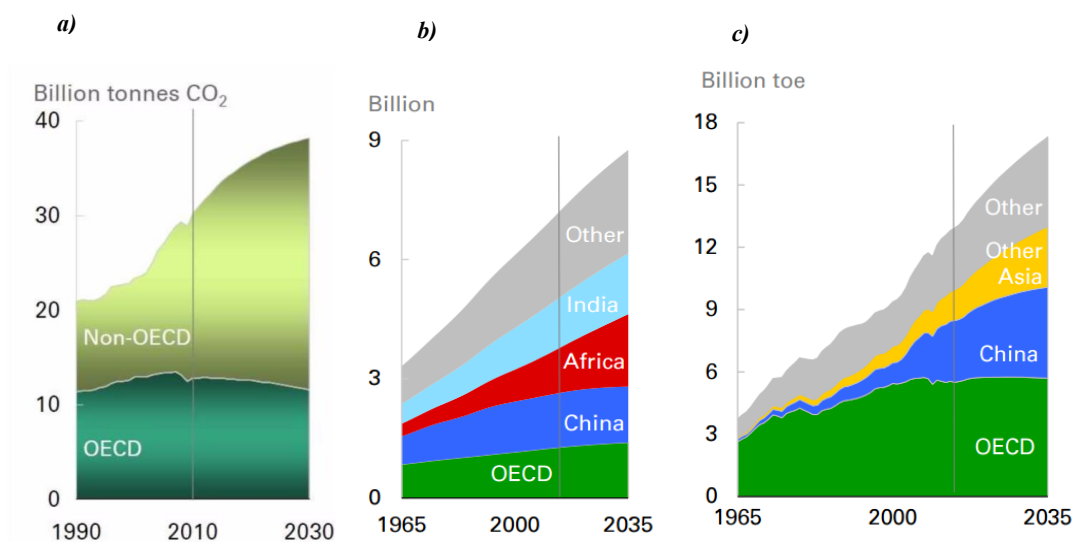


Figura 1.2 a) Emisiones de CO<sub>2</sub> por región desde 1990 hasta las esperadas para 2030, b) Aumento de la población desde 1965 a 2035, c) consumo energético desde 1965 hasta el que se espera para 2035 [6, 7]

## 1.2 Captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>: Una solución para reducir las emisiones de GEI

Ante la situación actual urge desarrollar nuevas tecnologías basadas en fuentes de energías económicas, sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Sin embargo, la transición energética hacia las energías renovables es un proceso lento ya que estas tecnologías aun requieren años de investigación, desarrollo e implementación, lo que obliga a buscar alternativas que permitan reducir las emisiones durante el tiempo de desarrollo de las mismas.

El desarrollo de los sistemas de combustión, actualmente, apunta a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la generación de energía a partir de combustibles fósiles y se centran en actuaciones directas sobre el proceso de generación de las mismas o a posteriori, para en uno u otro caso poder proceder a su captura.

La utilización futura de combustibles fósiles está dirigida a instalaciones con emisión "cero", lo que supone la integración de procesos de captura y almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> en las instalaciones de generación de energía. Esta tecnología de captura puede aplicarse en diferentes etapas. Es posible implantarla en las etapas finales (etapa de post-combustión), donde el CO<sub>2</sub> debe separarse del resto de gases de combustión o en las etapas de pre-combustión. Asimismo, otra de las alternativas es el uso de la tecnología de oxi-combustión (Figura 1.3).

Esta tecnología consiste en realizar la combustión del combustible fósil en presencia de oxígeno puro parcialmente diluido con CO<sub>2</sub>. De esta manera los productos de la combustión tienen una alta concentración de CO<sub>2</sub> lista para su secuestro sin necesidad de equipo de captura.

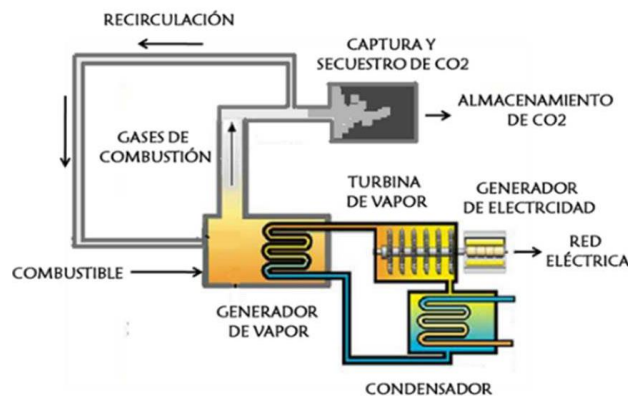


Figura 1.3 Representación de la captura de CO<sub>2</sub> mediante oxi-combustión [8]

## 1.3 Oxi-combustión en lecho fluidizado

La tecnología de oxi-combustión puede instalarse en plantas de producción de energía eléctrica diseñadas para trabajar en combustión con aire, mediante la recirculación de parte de los gases de combustión consiguiendo diluir el oxígeno introducido hasta concentraciones similares a las empleadas en las calderas convencionales (1ª generación). Aunque el desarrollo de la primera generación de calderas de oxi-combustión es un gran avance como método de captura de CO<sub>2</sub>, se plantea el reto de mejorar esta técnica alimentando mayores concentraciones de oxígeno a la caldera (2ª generación). De esta forma se consigue disminuir el tamaño de la caldera con respecto a las convencionales (mayor eficiencia térmica) [9].

Los reactores de carbón pulverizado son los más usados en las plantas de producción eléctrica, es por esto, que los primeros estudios realizados en oxi-combustión se realizaron en este tipo de reactores. Sin embargo, hace unos años se mostraron análisis sobre la aplicación de esta tecnología en reactores de lecho fluido mostrando resultados viables [10]. Estos reactores presentan varias ventajas, incluyendo la baja temperatura de operación en comparación con los reactores de carbón pulverizado, lo cual conduce a una menor producción de

NO<sub>x</sub> [11]. Asimismo, esta tecnología es muy flexible en cuanto a utilización de diversos tipos de combustibles, pudiéndose emplear combustibles con más del 70% de humedad y entre el 70-80% en ceniza con muy buenos resultados. Por otro lado, la alta concentración de sólidos en movimiento que conforman el lecho fluido hace que la temperatura sea muy uniforme y permite una excelente transferencia de calor, además, las partículas de combustible se encuentran bien mezcladas, asegurando una buena eficiencia de la combustión, incluso en combustibles muy poco reactivos, a pesar de las relativamente bajas (en comparación con los reactores de carbón pulverizado) temperaturas empleadas (menores de 1000°C) [11].

Sin embargo, aún existen una serie de factores que deben ser investigados antes de construir una caldera de 2ª generación, como la capacidad de transferencia de calor. Es necesario estudiar cómo extraer la mayor cantidad de calor del interior de la caldera ya que esta tiene un menor volumen (menor espacio para colocar tubos y aletas) que las de combustión convencional. Por otro lado, es importante estudiar la temperatura de las partículas de combustible, ya que, debido a las altas concentraciones de O<sub>2</sub> en la caldera la velocidad de conversión de las partículas es muy alta pudiendo éstas llegar a un nivel de temperatura inadmisibles, dando lugar a la posible formación de aglomeraciones, es decir, a alta temperatura, las partículas del lecho se adhieren unas con otras formando entidades de mayor tamaño (aglomerados) [12], impidiendo una correcta fluidización del lecho.

### 1.3.1 Medida de la temperatura de la partícula de carbonizado en reactores de lecho fluido

Como ya se ha mencionado, la temperatura de las partículas de carbonizado es un parámetro clave en la combustión en lecho fluido por varias razones:

- La cinética de conversión de la partícula de carbonizado es sensible a la temperatura que presenta, así medidas de la temperatura son necesarias para determinar la tasa de conversión.
- Es uno de los parámetros importantes en la transferencia de calor por convección y radiación de la partícula.
- Juega un importante papel en los problemas técnicos de operación de las calderas por formación de escorias y ensuciamiento.

Muchos trabajos se han desarrollado apuntando a este objetivo, donde la medida de la temperatura de partículas en lecho fluido se ha ejecutado con diferentes métodos. La mayoría de investigaciones se han realizado midiendo la temperatura de partículas de combustible en lecho fluido mediante termopares insertados en la misma. Para llevar a cabo esta técnica es necesario practicar un orificio en la superficie de la partícula para introducir el termopar y sellar la unión por medio de una resina adhesiva (resistente a alta temperatura). Una vez fijada, el conjunto termopar-partícula es introducido en el reactor. La mayor ventaja de esta medida es que el histórico de la temperatura se obtiene y puede almacenarse mediante un programa registrador de datos. Sin embargo, como inconveniente cabe destacar que la medida que se obtiene no es la temperatura de la superficie, si no la temperatura interna de la partícula, además de que con esta técnica el movimiento de la partícula queda restringido por el termopar, es decir, el termopar restringe el movimiento natural que tendría la partícula libremente en el interior del reactor. Asimismo, es importante que la partícula cumpla unos requisitos estructurales que permitan que ésta sea perforada sin fracturarse, es decir, este método no es aplicable a todos los combustibles. Por otro lado, durante la ejecución de la prueba es posible que se produzca el desprendimiento de la partícula resultado de la degradación de la resina adhesiva o de la fragmentación de la propia partícula durante su conversión, invalidando el ensayo en cuestión.

J.F. Stubington [13] desarrolló una nueva técnica de medida de temperatura con “termopar oscilatorio” en aras de eliminar las restricciones del movimiento de la partícula en el lecho. Esta técnica consistía en un accionamiento excéntrico instalado en la parte superior del reactor. La Figura 1.4 muestra este accionamiento y la vuela utilizada para hacer oscilar el termopar verticalmente. El movimiento relativo entre el carbonizado y el lecho se controla variando la frecuencia y la carrera de la oscilación. El montaje partícula-termopar es el descrito anteriormente. Uno de los principales inconvenientes de este método es la elección de estas variables para una adecuada simulación del movimiento que tendría la partícula libre en el reactor, además de los problemas intrínsecos de emplear termopares para medida de temperatura superficial del carbonizado que se han expuesto anteriormente (desprendimiento de la partícula, medida interior de la temperatura y no de la superficie, y necesidad de emplear combustibles que permitan perforación).

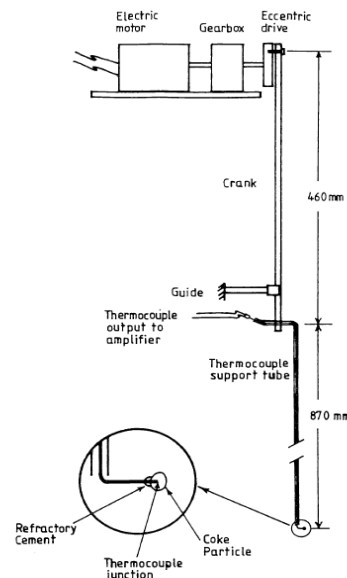


Figura 1.4 Diagrama del mecanismo de oscilación del termopar y la partícula de carbón [13]

Macek y Bulik [14] desarrollaron la técnica de medida de temperatura mediante fibra óptica. Esta técnica consta de un equipo de captura de radiación electromagnética infrarroja. Un esquema del equipo utilizado se puede observar en la Figura 1.5. La sonda óptica que sale del reactor transmite la radiación desde el interior del lecho hacia el exterior, y ésta es conducida, a través de la fibra óptica, hacia una unidad radiométrica, donde por medio de selectores de longitud de onda, se divide la radiación en un número de bandas, que incidirán sobre los detectores generando una señal eléctrica. El problema de esta técnica radica en que solo puede medirse la temperatura de las partículas que se encuentren en el campo de visión de la sonda inmersa en el lecho. Además, la temperatura medida por la fibra es la media de la temperatura de los diferentes cuerpos incluidos en el campo de visión, por lo que los obstáculos que la fibra pueda observar corrompen las medidas y por tanto, se obtienen resultados difíciles de interpretar.

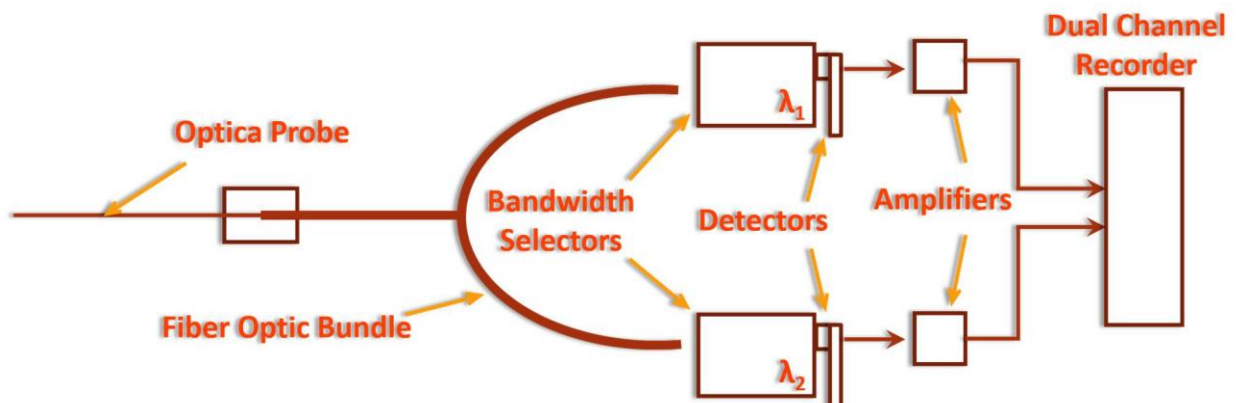


Figura 1.5 Equipo de captura de radiación electromagnética [14]

Existen otras técnicas de medida que J. Subington describió y evaluó como la técnica de anillos de aleación de oro y plata insertados en partículas fabricadas a partir de carbón en polvo y aglutinante [15]. El problema de esta técnica es que no se puede estar seguro de que la temperatura medida es verdaderamente representativa, ya que una partícula fabricada tendrá una reactividad y una energía específica diferente a la del carbón original, lo que provoca que la temperatura medida de la partícula fabricada pueda ser diferente a la que alcanza una partícula de carbonizado original [13]. Asimismo, encontró que el método fotográfico, basado en la comparación de la densidad de una imagen (con una imagen calibrada) obtenida tras tomar fotografías desde la parte superior del reactor de lecho fluido [16], asumía que la temperatura de las partículas en la superficie del lecho es la misma

que dentro de él [13]. Sin embargo, cuando la partícula se encuentra en la superficie debe experimentar un aumento de la temperatura superficial que se debe, por un lado, a la mayor disponibilidad de oxígeno en la superficie debido a que las partículas de coadyuvante ya no rodean la superficie del carbonizado, además de la menor transferencia de calor desde la partícula cuando la superficie de la misma no está en contacto con las partículas inertes del lecho (se elimina el efecto “quench”).

En este trabajo se emplea, para la medida de temperatura superficial de la partícula, la técnica de pirometría con cámara digital, en la que este dispositivo captura e interpreta la radiación emitida por un cuerpo cuya temperatura se desea conocer. La energía radiante emitida por una escena observada incide sobre la videocámara y es interpretada por ésta generando para cada píxel del sensor tres valores, función de la radiación recibida en las bandas espectrales pertenecientes al rojo, verde y azul. De esta forma, y utilizando las ecuaciones de transferencia de calor por radiación es posible conocer la temperatura del cuerpo que irradió el sensor de la cámara. Este método consigue salvar los inconvenientes presentados anteriormente ya que, es una técnica de no-contacto, por lo que no restringe el movimiento de la partícula además de que la radiosidad de una región del espacio que irradia un píxel es separada de la radiosidad de las regiones adyacentes (Figura 1.6), por lo que solventa el problema asociado a la pirometría con fibra óptica, en la que la temperatura calculada es la media de la temperatura de los cuerpos presentes en el campo de visión.

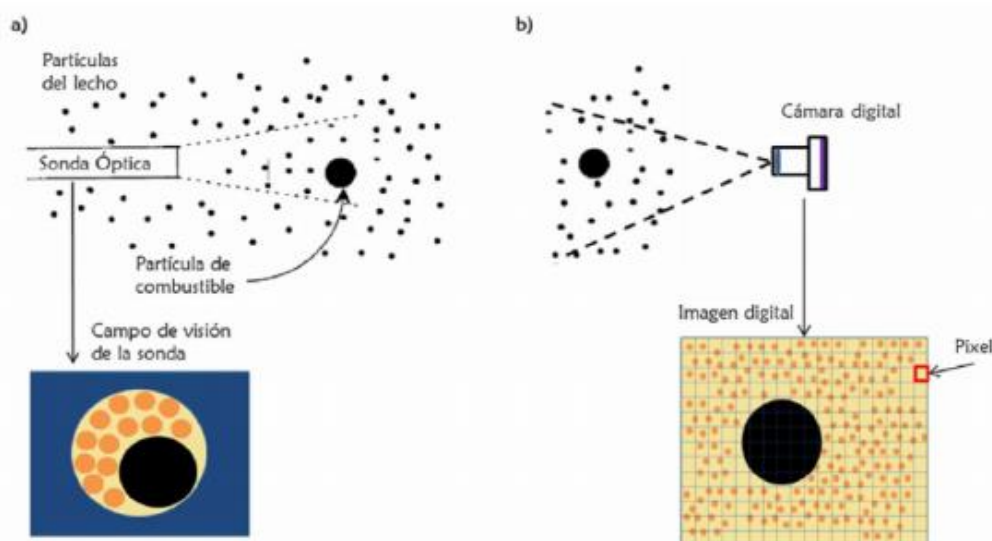


Figura 1.6. Campo de visión asociado a una sonda óptica (a), y cámara digital (b) [8].

## 1.4 Objetivos

Una vez justificada la necesidad de conocer la temperatura del carbonizado durante su combustión, en este capítulo se describen brevemente los objetivos marcados por este Trabajo Fin de Grado y se detallan las tareas llevadas a cabo para alcanzarlos.

Este trabajo tiene como objetivo entender el efecto del  $\text{CO}_2$  en las calderas de oxi-combustión mediante la medida de la temperatura superficial del carbonizado de Haya en un reactor de lecho fluido bidimensional, y su comparación con los resultados obtenidos en condiciones de combustión convencional ( $\text{O}_2/\text{N}_2$ ). Para ello, la medida de temperatura de la partícula se realiza mediante pirometría con cámara digital ya que hasta la fecha no se ha utilizado técnica experimental que aporte resultados de alta calidad en condiciones de oxi-combustión en lecho fluido. Por tanto, esta técnica, es una solución a este problema, ya que obtiene medidas de temperatura fiables sin necesidad de mantener un contacto directo con la partícula y por tanto sin alterar el movimiento libre de la misma en el interior del reactor, salvando los inconvenientes ligados a los métodos antes expuestos.

Las tareas llevadas a cabo durante este trabajo son las siguientes:

- Caracterización de la técnica de medida de temperatura experimental para establecer las condiciones límites de operación en las que el método puede utilizarse; velocidad de fluidización, tamaño de partícula, y concentración de  $\text{O}_2$ .

- Discusión sobre el análisis visual de las imágenes para la medida de la temperatura superficial de combustión del carbonizado.
- Realización de los ensayos de conversión en reactor de lecho fluido de partículas de carbonizado de Haya en atmósferas enriquecidas con  $O_2$ .
- Medida experimental de la temperatura superficial y conversión por pirometría, y su análisis, discusión e interpretación mediante un modelo cinético.





## 2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo, se presentan los equipos experimentales utilizados en este Trabajo Fin de Grado y su funcionamiento. Además, se describen los ensayos realizados para determinar la temperatura superficial y modo de conversión del carbonizado de Haya en condiciones de oxi-combustión. Además, se muestran los fundamentos de la medida de temperatura por pirtometría.

### 2.1 Medida de la temperatura superficial del carbonizado mediante pirtometría con cámara digital

La medida de la temperatura pirométrica se basa en la captura e interpretación de la radiación térmica que emite un cuerpo, la cual, es función de la temperatura superficial del mismo. La radiación puede ser capturada mediante una videocámara o una cámara fotográfica, donde cada uno de los píxeles del sensor proporciona tres valores que informan sobre la radiación térmica que reciben de la imagen, que corresponden con las bandas espectrales roja, verde y azul (Figura 2.1). Estos números se denominan números digitales y se pueden conocer mediante un programa de tratamiento de imagen, en este caso MATLAB, que genera tres matrices, donde cada pixel contiene el número digital asociado a la radiación que recibe [8].

Modelando matemáticamente la radiación de la superficie del carbonizado que alcanza el sensor, utilizando los números digitales proporcionados por la cámara digital, y con una calibración previa del equipo de captura, se puede medir la temperatura superficial de combustión del carbonizado [26] según:

$$T_{P1C} = \frac{C_2}{\lambda_k \left[ \ln \left( \Phi_k \frac{\varepsilon_{rs}(\lambda, T) C_1}{\lambda_k^5} \right) - (\ln(\beta_k) + \ln(DN_k)) \right]} \quad \text{Ec. 2.1}$$

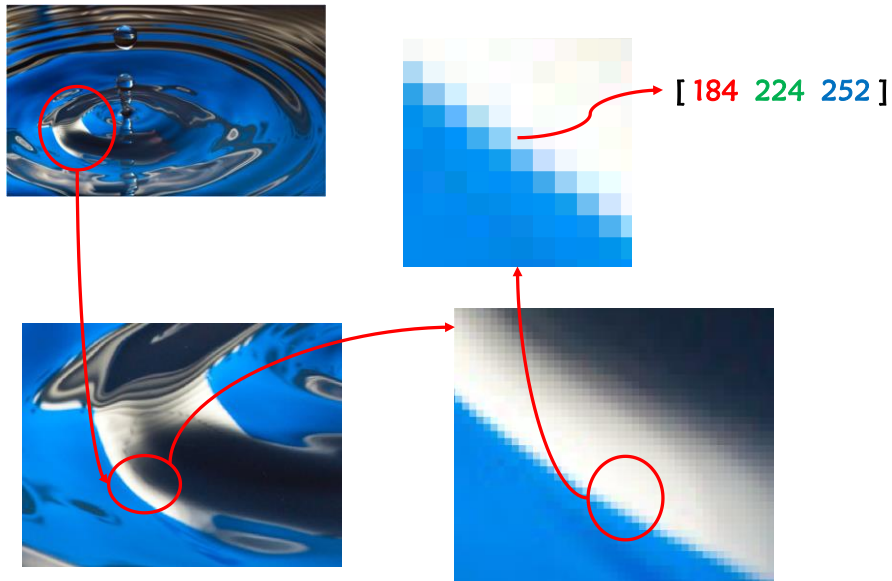


Figura 2.1 Valores de  $DN_k$  correspondientes un pixel seleccionado de la imagen

La medida pirométrica de la temperatura de combustión realizada en este trabajo requiere conocer la emisividad de las partículas de carbonizado y del lecho fluido [26]. Para la emisividad del carbonizado de haya se asume 0.85, y comportamiento de cuerpo negro para el lecho fluido [26].

## 2.2 Montaje experimental

Los equipos empleados para el desarrollo de los ensayos consisten en un horno eléctrico (Figura 2.2) 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 (11KW). Esta superficie homogeneizadora consiste en 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 x 195 mm) que permite observar y realizar medidas ópticas de su interior.

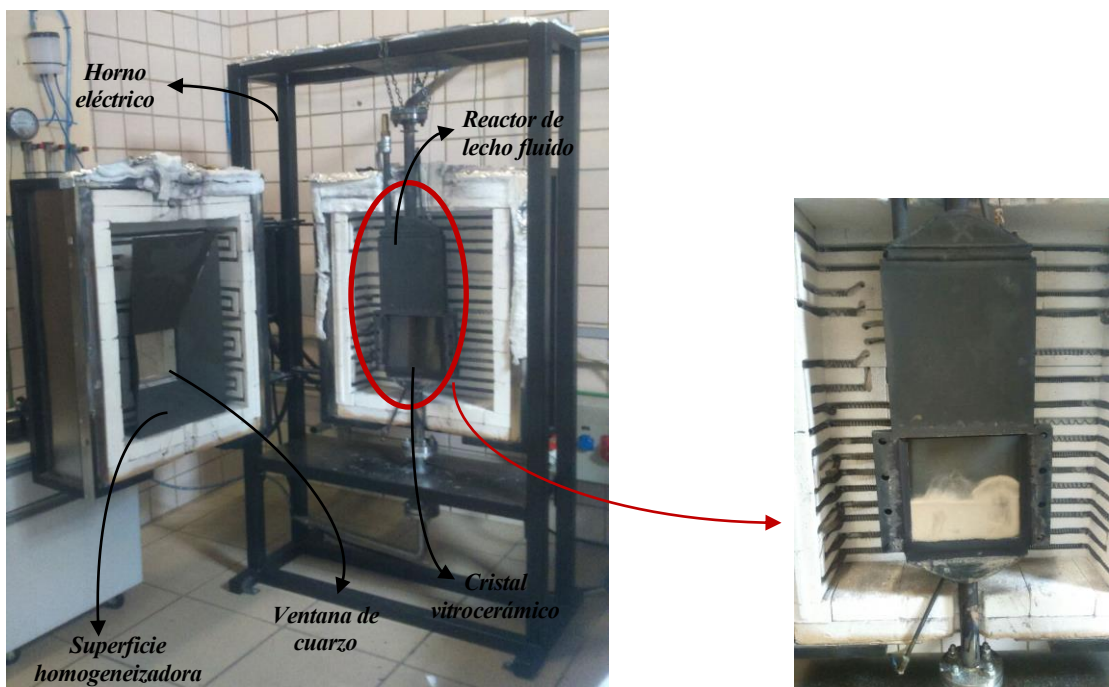


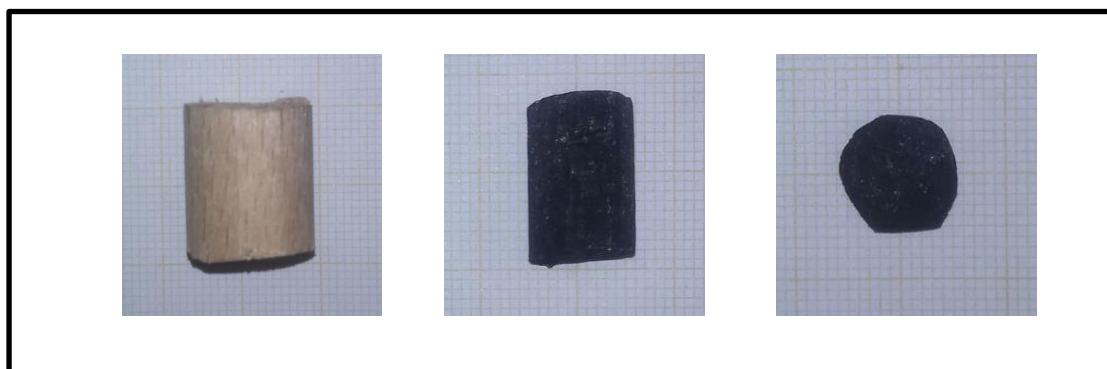
Figura 2.2 Equipos experimentales

La combustión en lecho fluido se realiza en un reactor de acero 310 situado en el centro del horno y soldado al colector, además dispone de una ventana (18 x 18 cm) en la que se instala un cristal vitrocerámico que permite la visibilidad de la partícula durante su combustión. La geometría del reactor es de carácter bidimensional (22 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 videocámara 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. La Tabla 2.1 recoge las principales características de los equipos que componen el montaje experimental descrito en detalle en el Anexo I.

Equipo	Características
<i>Horno eléctrico</i>	Potencia eléctrica: 11KW Cámara de alta temperatura: 50 cm x 70 cm x 30 cm Ventana de cuarzo: 19,5 cm x 19,5 cm
<i>Reactor de lecho fluido</i>	22 cm x 30 cm x 1,8 cm (Superior) 28 cm x 20 x 1,8 cm (Inferior) Fabricado en acero 310
<i>Cámara digital</i>	JVC Everio 2 Megapíxeles WD (100 cm), FOV (24°)

**Tabla 2.1 Equipos experimentales**

Por otro lado, la generación de las partículas de carbonizado utilizadas en este trabajo, se obtuvieron a partir de madera de Haya tras su devolatización en una atmósfera inerte, Figura 2.3. El análisis inmediato de este combustible se presenta en la Tabla 2.2. La partícula de madera de Haya se situó en el interior del horno eléctrico a temperatura ambiente y se calentó a una tasa de 10 °C/ min hasta los 800 °C. De esta forma la devolatización se produce de forma “suave” y la fragmentación de carbonizado se reduce. Para evitar el contacto del carbonizado con el oxígeno durante la devolatización, las partículas se sitúan en el interior de crisoles cerámicos cerrados y aunque puede producirse la combustión de la superficie externa de la partícula con el oxígeno existente en el interior del crisol antes de cerrarlo, esta capa es eliminada cuando se le da la forma esférica a la partícula de carbonizado.



**Figura 2.3 Carbonizado generado a partir de madera de Haya**

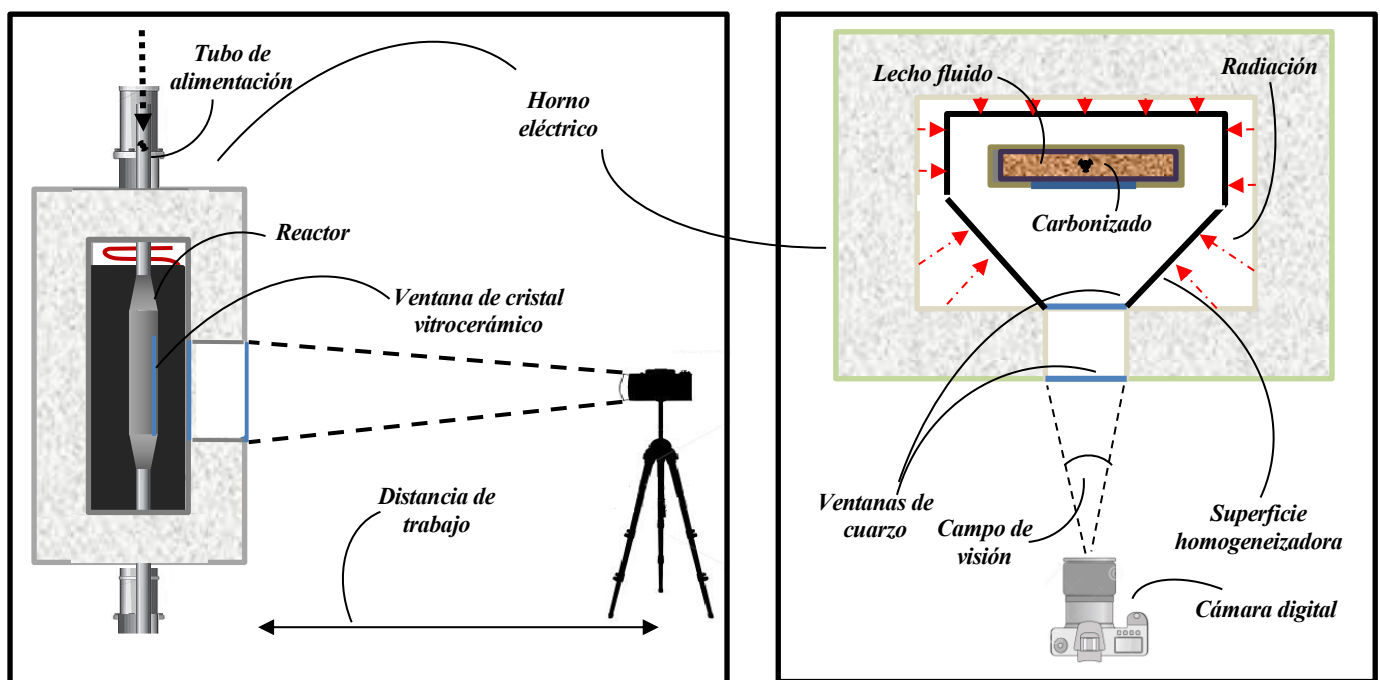
<i>Análisis inmediato, %</i>	
<i>Cble</i>	<i>MADERA DE HAYA</i>
<i>Parámetro</i>	<i>HAYA</i>
<i>Humedad</i>	8,10
<i>Cenizas</i>	0,63
<i>Volátiles</i>	84,86
<i>Carbono fijo</i>	14,52

*Tabla 2.2 Propiedades de la madera de haya*

## 2.3 Metodología experimental

La característica principal de la técnica de medida de temperatura mediante pirometría con cámara digital es la utilización de un reactor que permita la visualización de la partícula en el interior del lecho, por lo que las pruebas se realizan en un reactor que dispone de una ventana de cristal vitrocerámico que se coloca en el reactor y se sella con masilla refractaria de manera que el cristal quede fijado y sellado.

El montaje experimental para los ensayos de medida de temperatura del carbonizado durante la combustión, Figura 2.4, consiste en un horno eléctrico, equipado con una ventana de cuarzo, que permite ver el interior del reactor de lecho fluido situado en su centro. Se coloca la videocámara cámara digital a 100 cm de distancia del reactor con un campo de visión de 24 °. La temperatura del lecho se controla mediante un termopar de (0.15 cm de diámetro de vaina) sumergido en la arena (agente coadyuvante) y conectado al horno eléctrico que mediante un control PID garantiza una oscilación de  $\pm 1^\circ\text{C}$ , respecto la temperatura de consigna.



*Figura 2.4 Montaje experimental para los ensayos de temperatura superficial del carbonizado.*

Las pruebas de combustión del carbonizado de Haya se realizaron con partículas de dos tamaños: 6 y 10 mm, a dos temperaturas de operación: 800 y 850 °C. El agente de fluidización utilizado fue una mezcla de  $\text{O}_2/\text{N}_2$  para las pruebas de combustión y  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  para las pruebas de oxi-combustión, a distintas concentraciones de  $\text{O}_2$ :

10%, 21%, 30%, 40% y 50%. El coadyuvante utilizado es óxido de silicio de una granulometría de 320-500  $\mu\text{m}$  a una altura de unos 8 cm (~300 g) cuando el lecho está estático. Antes de cada ensayo se chequea los parámetros ópticos y electrónicos de la videocámara, y se realizan en una habitación a oscuras, de manera que la radiación capturada por la cámara sea únicamente la emitida por la superficie del carbonizado, lecho fluido y background del reactor.

Además de los ensayos de combustión y oxi-combustión en el reactor de lecho fluido, en este trabajo se realiza un análisis del modo de conversión del carbonizado de Haya. Dado que es importante aclarar si existe una capa de ceniza en la superficie (el método de medida se basa en la captura de la radiación térmica emitida por la superficie del carbonizado, y la presencia de ceniza afecta a la emisividad de ésta), y si la densidad del carbonizado varía con la conversión. Para ello se introduce en el reactor de lecho fluido la partícula de carbonizado con un termopar (0.5 mm de vaina) situado en su centro y sumergiéndola en el lecho fluido se extrae a diferentes tiempos de combustión analizando de forma visual su superficie, y densidad. Para evitar la combustión del carbonizado desde el instante que es extraído del lecho hasta que su temperatura es inferior a los 50 °C, se utiliza el sistema de válvulas-tuberías mostrado en la Figura 2.5. Mediante una corriente de Nitrógeno a temperatura ambiente se barre la partícula de carbonizado extraída del reactor hasta que el termopar situado en su interior nos indica que su temperatura es inferior a los 50 °C. Este método ha sido aplicado anteriormente por otros autores como F. Scala et al., [17] que realizó el análisis temporal del tamaño (diámetro) y densidad de partículas de carbonizado, obtenido a partir de carbón bituminoso (Snibston), y M. A. Andrei et al [18] que estudió el mecanismo de combustión de partículas de lignito mediante la inmersión de una pequeña carga de éstas en un reactor de lecho fluido.

Finalmente, los resultados experimentales obtenidos mediante la técnica pirométrica son analizados e interpretados mediante un modelo de partícula decreciente desarrollado en el Anexo II.

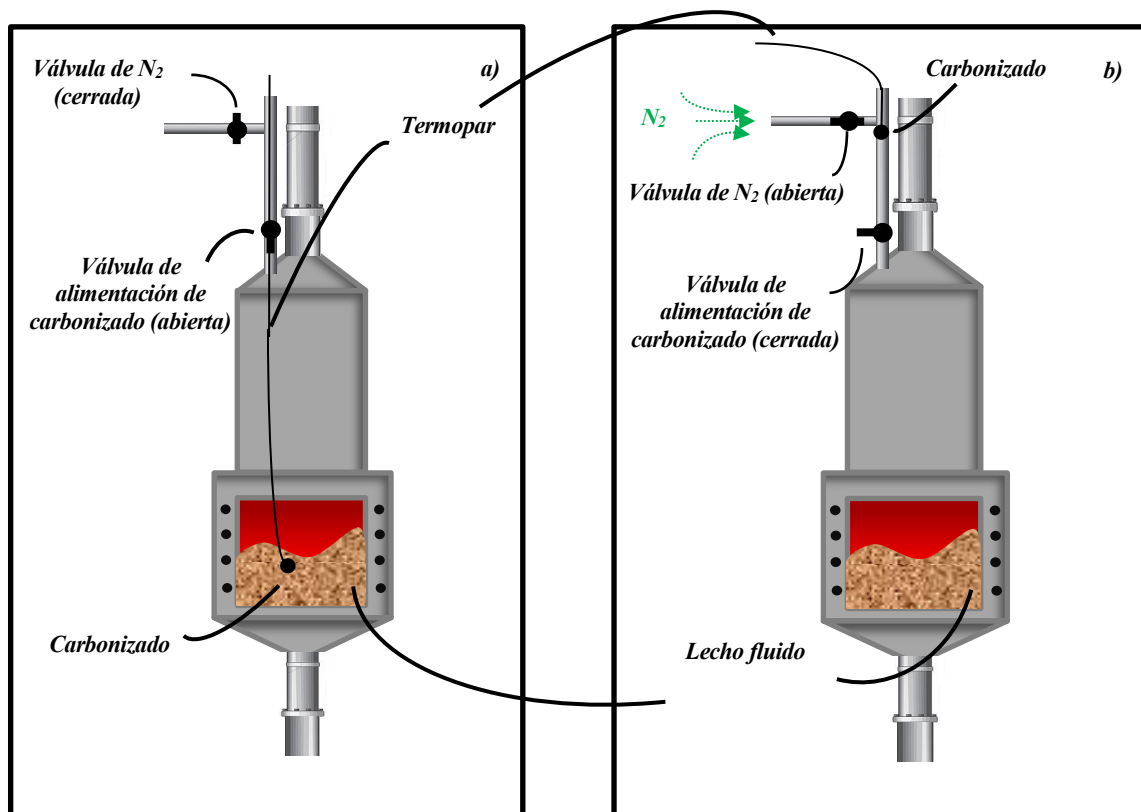


Figura 2.5 Posiciones de la partícula durante el ensayo de conversión: a) partícula en combustión sumergida en el lecho, b) partícula extraída del reactor bañada por la corriente de N<sub>2</sub>

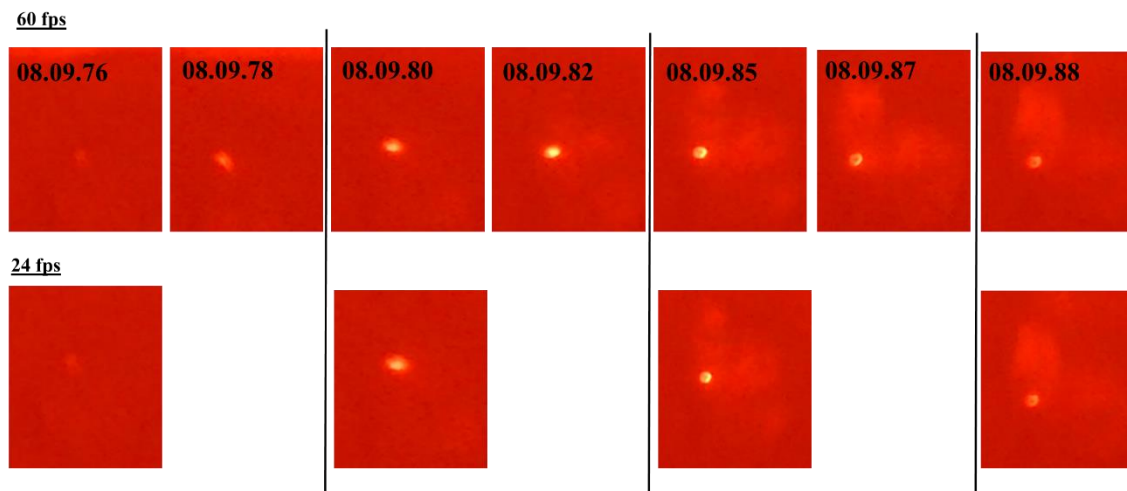


## 3 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LAS IMÁGENES DE COMBUSTIÓN

En este capítulo se sistematiza la selección e interpretación de las imágenes obtenidas de la combustión del carbonizado para determinar su temperatura superficial de combustión.

### 3.1 Selección de las imágenes

Los videos obtenidos de los ensayos de combustión se descomponen en fotogramas (imágenes) mediante un programa de tratamiento de imagen (Adobe Premier Pro SC6). En dicho proceso el número de imágenes por segundo pueden variar entre 1 y 60. Tal y como se muestra en la Figura 3.1, la tasa de 24 fps (una imagen cada 0,04 s) presenta buen compromiso entre nivel de detalle, tiempo y comodidad de análisis.



*Figura 3.1. Imágenes de la combustión de una partícula de 6 mm de carbonizado de haya durante su combustión en aire a una velocidad de fluidización de 2,2Umf*

Una vez generadas las imágenes del ensayo de combustión deben seleccionarse aquellas que permitan determinar adecuadamente la temperatura superficial del carbonizado en ese instante. Para ello, es importante que el carbonizado aparezca en la imagen de manera nítida. Existen imágenes, como las mostradas en la Figura 3.2, donde el carbonizado aparece borroso, doble, o con estela, y la temperatura medida podría verse afectada por fenómenos ópticos-electrónicos de la cámara.

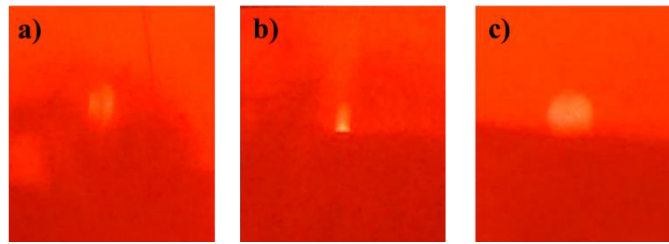


Figura 3.2. Imágenes donde el carbonizado aparece a) borroso, b) con estela, y c) doble.

Otro factor a tener en cuenta en la selección de una imagen es la “historia” del movimiento de la partícula en el lecho, esto es, los instantes anteriores y posteriores a la imagen elegida. Existen situaciones como la “explosión” de la burbuja que produce un aumento en la luminosidad de la superficie de centésimas de segundo y cuya temperatura es varias decenas de grados superior a la superficial en los instantes inmediatamente anteriores y posteriores. Este fenómeno se presenta en la Figura 3.3.

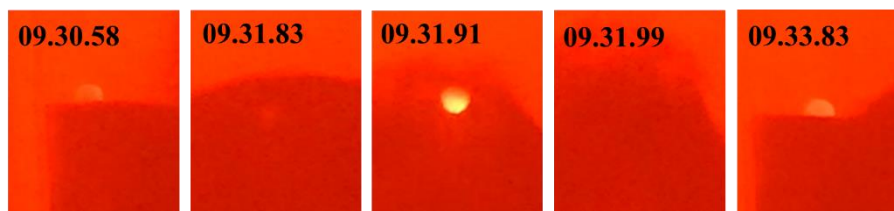


Figura 3.3. Oscilación en la luminosidad (temperatura) en décimas de segundo: efecto burbuja

## 3.2 Interpretación de las imágenes

El programa que calcula la temperatura asociada a la superficie del carbonizado necesita conocer la posición del carbonizado y los píxeles que ocupa, diferentes tanto en número como en posición en cada una de las imágenes (recordar que la imagen digital no es más que una matriz donde en cada elemento  $(i,j)$  contiene números digitales asociados a la radiación térmica procedente de la superficie en la escena visualizada asociada al pixel  $(i,j)$ ).

Como dato de entrada el programa recibe las coordenadas de los vértices de un polígono (hexágono o rectángulo) cuyos lados delimitan la superficie del carbonizado (píxeles), y devuelve la temperatura superficial media de esos píxeles (superficie) delimitados, véase Figura 3.4. Dicha región se establece evitando los píxeles asociados al borde del carbonizado, que son menos nítidos por ser la frontera entre éste y el fondo, y que sean representativos de la luminosidad de toda la superficie.

En la Figura 3.4 se muestra el resultado mediante una región hexagonal y rectangular en tres instantes de tiempo. Dado que la diferencia en la temperatura medida por ambas regiones es muy pequeña, se decide utilizar la rectangular por reducir el tiempo de pre-análisis.

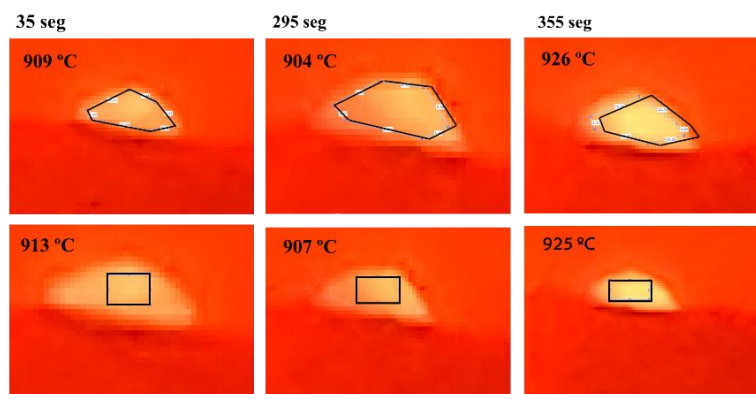


Figura 3.4. Regiones hexagonales y rectangulares que delimitan la superficie del char y la temperatura superficial media asociada



## 4 MATRIZ EXPERIMENTAL DE ENSAYOS

Una vez conocido el método de análisis de las imágenes producto de los ensayos de combustión, se establece la matriz de ensayos que se sigue en este trabajo. Esta se deriva de un análisis de los resultados de la literatura, y teniendo en cuenta algunas de las limitaciones que la técnica de medida empleada presenta.

### 4.1 Selección y discusión de las variables de operación del reactor de lecho fluido para analizar el efecto del CO<sub>2</sub> en la conversión

En este trabajo se pretende esclarecer el efecto del CO<sub>2</sub> sobre la temperatura y conversión de una partícula de carbonizado de haya para diferentes tamaños de la partícula y distintas temperaturas de operación (lecho fluido). En este trabajo se realiza una revisión de la literatura y se tienen en cuenta las limitaciones del método de medida con la intención de fijar las condiciones bajo las cuales se realizan los ensayos (concentración de oxígeno, temperatura de combustión del lecho fluido, velocidad de fluidización, y tamaño del carbonizado).

El análisis de la literatura muestra que recientemente se ha investigado el efecto del CO<sub>2</sub> en la conversión de partículas de combustibles en reactores de lecho fluido para diferentes tipos de carbones, tamaños de partículas, temperaturas de lecho, y concentraciones de oxígeno. Sin embargo, sus resultados (temperaturas de combustión y tiempos de consumo) se obtuvieron empleando termopares como equipo de medida de la temperatura y/o con bajas concentraciones de O<sub>2</sub> (< 10 %) [19, 17, 20, 21, 22]. Tal como se describe en el capítulo de introducción de este trabajo, la utilización de termopares afecta al movimiento libre de la partícula y a su fluidodinámica, además de que la partícula debe ser perforada debilitando su estructura. Estas limitaciones de los métodos de contacto pueden explicar la desviación existente entre los tiempos y temperaturas máximas de combustión medidas experimental y teóricamente [19, 23]. Por ello, algunas de las condiciones de operación empleadas en este trabajo han sido investigadas por otros autores.

Tal y como se explica en el capítulo 2, la cámara digital utilizada en este trabajo necesita de una calibración previa para medir las temperaturas superficiales de combustión, Esta calibración, presentada en un trabajo posterior [8], permite utilizar el montaje experimental descrito y utilizado en este trabajo para temperatura de operación del lecho inferiores a 875 °C dado que a mayor temperatura, el brillo procedente del fondo produce un reajuste electrónico en la cámara que varía la “forma” en la que la cámara cuantifica la radiación recibida. Por otro lado, la medida de la temperatura por pirometría se basa en la captura e interpretación de la radiación térmica emitida por la superficie del carbonizado, lo que implica que la partícula debe verse, es decir, la “visibilidad” del carbonizado se debe a la diferente luminosidad que este presenta respecto del fondo y lecho, y pueden existir concentraciones de oxígeno a las cuales, o la partícula sea difícilmente visible, o la temperatura alcanza por la superficie del carbonizado satura el sensor de la cámara. La mínima concentración de O<sub>2</sub> que permite diferenciar la partícula del fondo es del 10%, tal y como se muestra en la Figura 4.1, para una temperatura de lecho fluido de 800 °C y 850 °C. Por otro lado, las concentraciones de oxígeno que impliquen temperaturas superficiales de combustión que saturan el sensor de la cámara, son un límite para la máxima concentración de oxígeno que puede utilizarse. Esta máxima temperatura superficial que la técnica es capaz de medir es de aproximadamente 1020 °C, que se superan en los últimos minutos de la conversión para concentraciones de oxígeno de 50 % cuando el lecho está a 800 °C, y de 40 % para 850 °C.

Asimismo, empleando este método, se consiguen obtener imágenes del carbonizado cuando alcanza un tamaño (diámetro) inferior a los 0,5 mm, sin embargo, no siempre estas imágenes ofrecen buena calidad, es decir, hay ocasiones en las que la partícula, cuando adquiere tamaños inferiores a 1-2 mm se encuentra en la zona de emulsión o simplemente su imagen es borrosa debido a la presencia de arena entre esta y la pared del reactor de cuarzo, lo que provoca que la luminosidad del carbonizado quede atenuada conduciendo a una temperatura medida menor que la real. Es por esto que los ensayos se analizan hasta un tamaño de 1-2 mm (tamaño de partícula mucho menor que el mínimo que mediante termopar puede alcanzarse). Para una partícula cuya conversión se produce sin capa de ceniza (Modelo de partícula decreciente) este tamaño de partícula equivale a una conversión superior al 97.5 % para partículas de 7 mm de tamaño inicial.

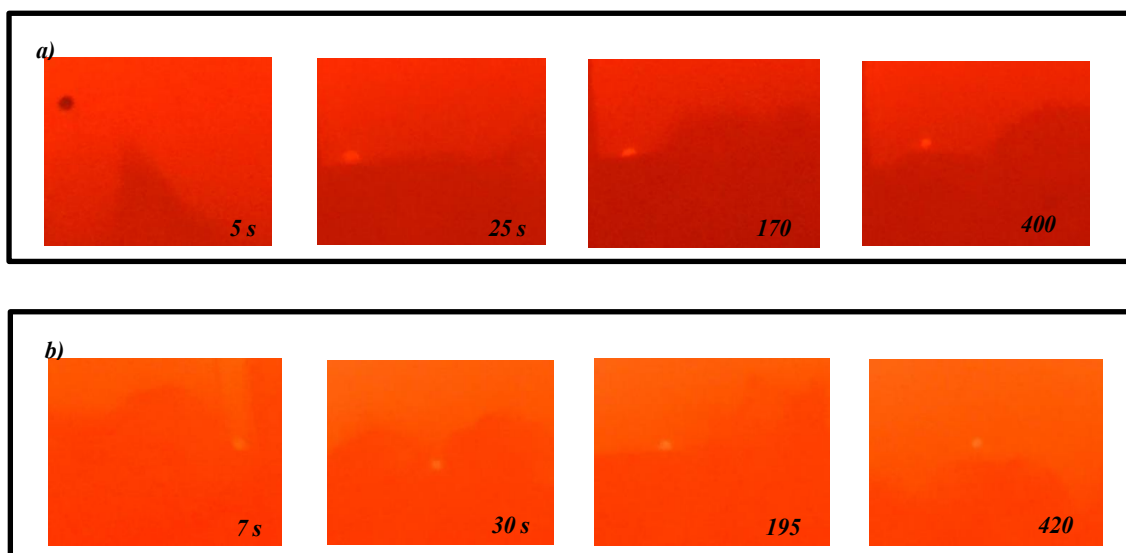


Figura 4.1 Imágenes de la combustión de una partícula de carbonizado de haya al 10%  $O_2$  para distintos instantes de tiempo: a)  $d_p=6$  mm;  $T_b=800^\circ C$ , b)  $d_p=6$  mm;  $T_b=850^\circ C$

Para establecer la velocidad de fluidización, en primer lugar se determinó la velocidad de mínima fluidización ( $U_{mf}$ ) mediante la realización de varias pruebas experimentales que consistieron en la medida de la pérdida de carga en el lecho, a diferentes caudales de fluidización y teniendo en cuenta la pérdida de carga en el plato distribuidor. Una vez conocida la  $U_{mf}$ , para seleccionar la velocidad de fluidización a la cual opera el reactor se realizaron ensayos a diferentes velocidades (1.1  $U_{mf}$ , 1.6  $U_{mf}$ , y 2,8  $U_{mf}$ ) para garantizar que tanto la fluidización del lecho, como el número de imágenes “aptas” para medir la temperatura del carbonizado son adecuadas para el análisis de la conversión. Los ensayos realizados a bajas velocidades de fluidización, mostraron que durante toda la combustión la partícula de carbonizado permanece en la superficie del lecho, nunca en la fase de emulsión y/o burbuja, ligeramente afectada por la agitación superficial de la arena tras la explosión de las burbujas al llegar a la superficie del lecho. A medida que la velocidad de fluidización se incrementa (1,6  $U_{mf}$ ), la fluidización del reactor mejora, sin embargo, a 1,6  $U_{mf}$  existen zonas del lecho estáticas, donde la partícula podía permanecer enterrada durante varios segundos. A velocidades de fluidización cercanas a los 2,8  $U_{mf}$  las imágenes de la partícula no son nítidas para la medida de la temperatura, además la probabilidad de la presencia de “nubes de arena” entre esta y la pared del reactor de cuarzo aumenta. Por lo expuesto, y teniendo en cuenta los valores típicos de esta variable en la literatura [19, 17], se fija una velocidad de fluidización de 2  $U_{mf}$ . La Tabla 4.1 presenta las condiciones de operación empleadas en las pruebas experimentales realizadas en este trabajo.

<b>Condiciones estudiadas</b>	
<i>Concentración de O<sub>2</sub></i>	10%, 21%, 30%, 40%, 50%
<i>Diámetro de partícula</i>	6 mm, 10 mm
<i>Temperatura</i>	800°C, 850°C
<b>Lecho fluidizado</b>	
<i>Diámetro de partículas del lecho</i>	320-500 µm
<i>Velocidad de fluidización</i>	2 Umf
<i>Altura del lecho (estático)</i>	8 cm
<i>Densidad del lecho</i>	2650 kg/m <sup>3</sup>
<i>Masa de lecho</i>	300 g

*Tabla 4.1 Condiciones de operación para los ensayos experimentales*



## 5 RESULTADOS

Por último, tras fijar la matriz de ensayos experimentales y las condiciones de operación adecuadas para el reactor con el que se va a operar, en este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos tras las pruebas tanto del modo de conversión, como referidos a la temperatura y conversión obtenidos tras el análisis de las imágenes adquiridas de los ensayos de combustión.

### 5.1 Valoración de la repetitividad

Para evaluar la repetitividad del método empleado, se realizaron la combustión de cinco partículas de carbonizado de Haya de dos tamaños diferentes: 6 y 10 mm. El agente de fluidización empleado fue una mezcla de  $O_2/N_2$  con una concentración del 21%  $O_2$  a una temperatura de operación de  $800^\circ C \pm 1^\circ C$ .

Los resultados obtenidos tras el análisis de las pruebas se muestran en la Figura 5.1, donde cada punto representa la medida de la temperatura en ese segundo (imagen seleccionada e interpretada en ese instante), y se obtienen valores de ésta a lo largo de toda la combustión, es decir, se eligen fotogramas desde el inicio de la combustión hasta el último segundo en el que la partícula puede ser visualizada correctamente. Los resultados visualizados en la Figura 5.1 muestran diferencias máximas de temperatura de  $\pm 20^\circ C$  y los tiempos de combustión son similares en todos los casos, por lo que se demuestra una buena repetitividad del método de medida de temperatura por pirometría con cámara digital.

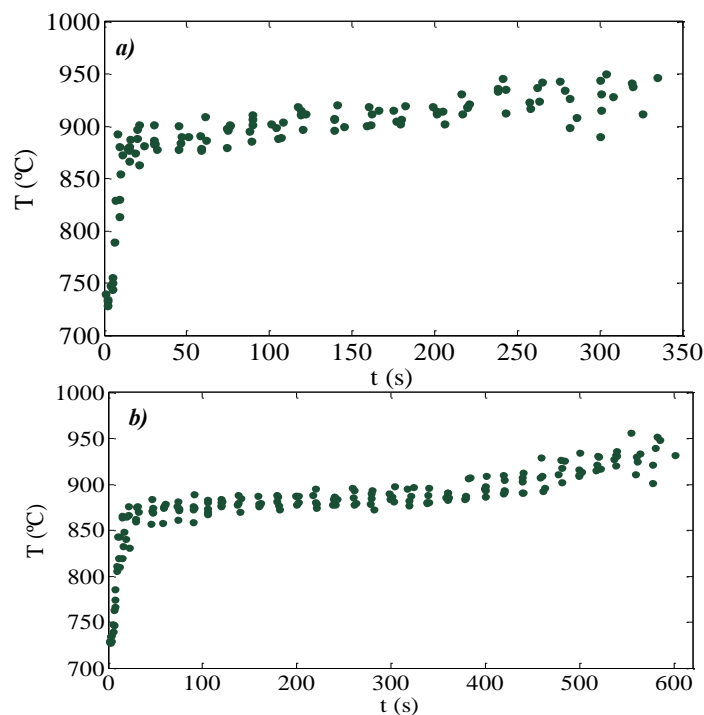


Figura 5.1 Resultados de repetitividad para una velocidad de fluidización de  $2 U_{mf}$  para partículas de: a)  $d_p=10$  mm, b)  $d_p=6$  mm

## 5.2 Resultados del modo de conversión de partículas de carbonizado durante su combustión

Después de la combustión de las partículas de carbonizado, perforadas y fijadas al termopar, en el reactor de lecho fluido y su posterior extracción tras unos minutos de reacción se obtienen unos valores para la densidad del combustible calculados como el cociente de su masa (obtenida tras pesarlas en una balanza) y su volumen (resultado del incremento de volumen experimentado por una cantidad medida de agua tras sumergir la partícula).

En las imágenes mostradas en la Figura 5.2 se puede observar la disminución de tamaño de la partícula de carbonizado con el tiempo, además se comprueba que existe una disminución mas lenta del tamaño cuando la partícula se somete a una atmósfera de  $O_2$  y  $CO_2$ . Asimismo, se puede visualizar la ausencia de capa de ceniza alrededor de la partícula. Por otro lado, de los resultados obtenidos tras la medida de la densidad de las partículas, se puede afirmar que esta se mantiene constante durante la conversión del carbonizado y que las pequeñas diferencias entre densidades son debidas a la precisión del método de medida. Tras realizar varias pruebas a las distintas atmósferas de combustión se obtuvo una densidad de  $395 \pm 25 \text{ kg/m}^3$ .

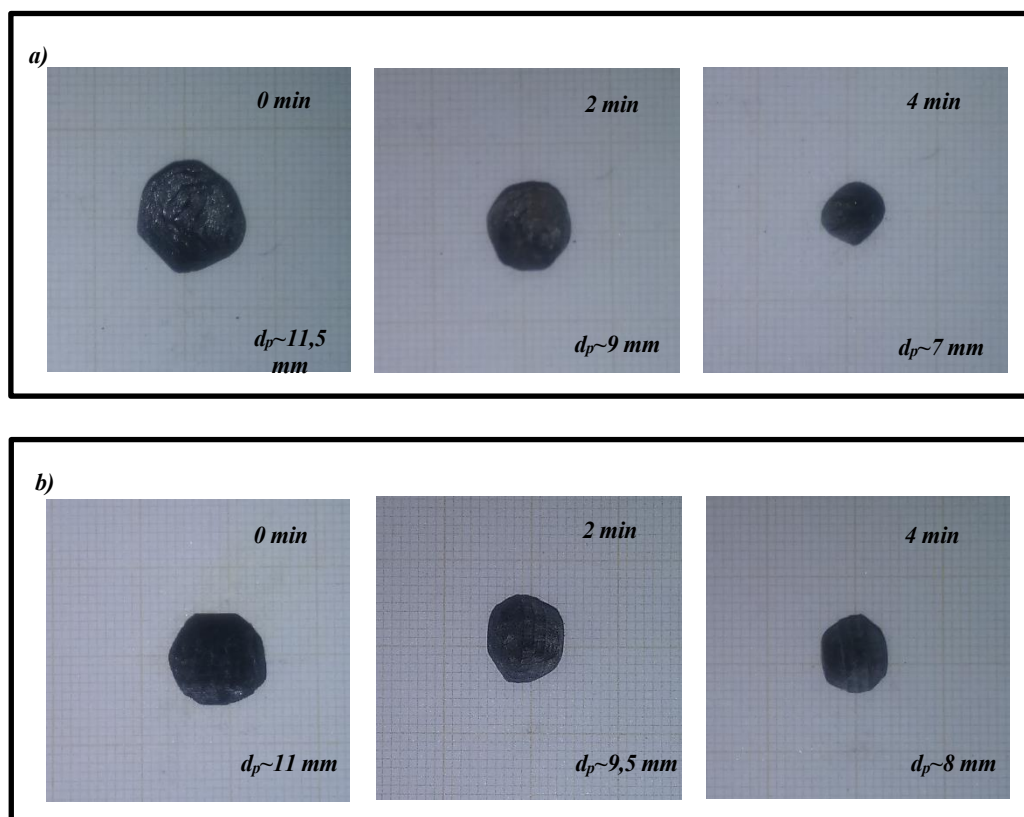


Figura 5.2 Partículas de carbonizado de haya recuperadas a varios tiempos de combustión,  $T_b=800^\circ\text{C}$ : a) 21%  $O_2/N_2$  y b) 21%  $O_2/CO$

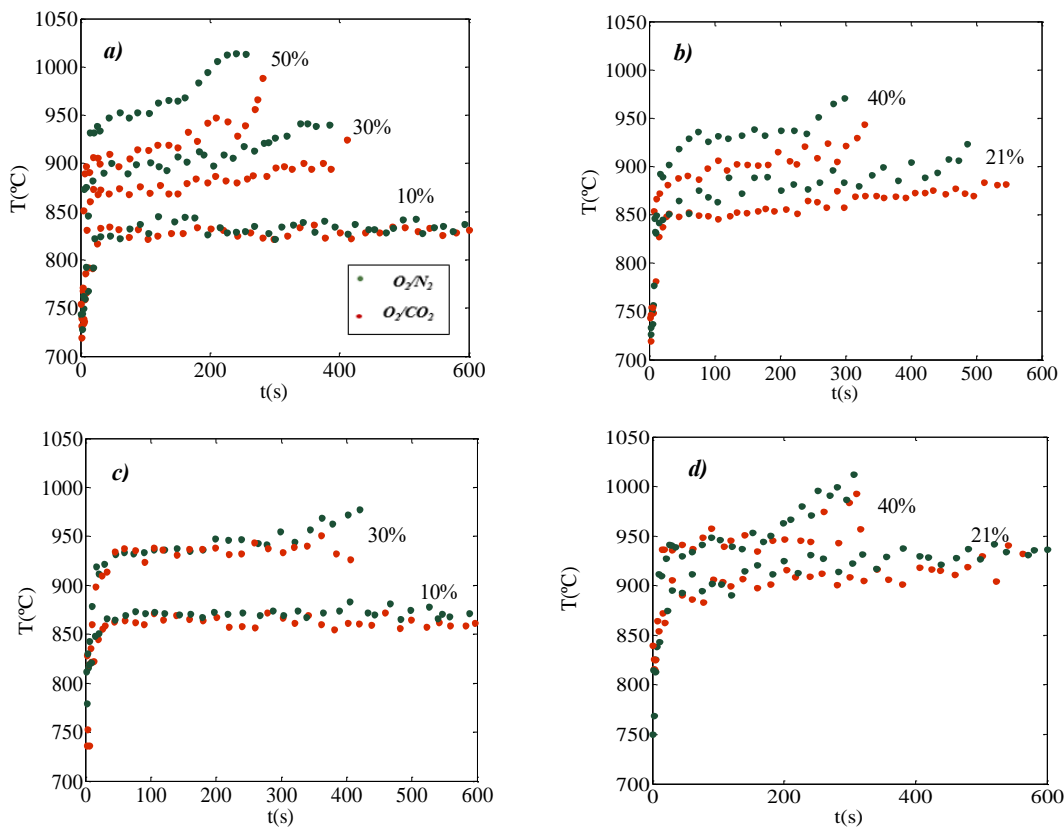
En conclusión, puede deducirse que no se producen reacciones dentro de la partícula, por lo cual, dado que no existe capa de ceniza externa, se puede decir que la conversión de este combustible obedece al “modelo de partícula decreciente” desarrollado en el Anexo II.

## 5.3 Temperatura superficial de combustión del carbonizado medida por pirometría

Los ensayos de combustión de partículas de carbonizado de Haya se basan, como se ha explicado en puntos anteriores, en la medida de temperatura de la partícula de carbonizado a partir de la radiación térmica emitida por la misma, la cual es capturada por la videocámara. A partir de este ensayo se genera un vídeo que se convierte en fotogramas, pudiendo analizar a partir de ellos la temperatura del combustible durante su combustión.

De manera general, en la Figura 5.3, se observa que, durante la combustión del carbonizado, la temperatura aumenta rápidamente al principio (el calor generado en la reacción se emplea en calentar la partícula) hasta un valor en el que se estabiliza (el calor liberado en la combustión y el transferido desde la partícula al lecho es muy

parecido) hasta la completa conversión y desaparición del carbonizado. Igualmente, se puede observar que, a medida que aumenta la concentración de oxígeno, por un lado, aumenta la temperatura superficial del carbonizado disminuyendo, a su vez, los tiempos de consumo. Por otro lado, se hace más evidente la diferencia de temperatura en combustión y oxi-combustión, obteniéndose una temperatura más baja para este último caso al igual que un tiempo de consumo ligeramente mayor. Esto se debe a que el transporte de  $O_2$  desde el seno del fluido hasta la superficie de la partícula se ve afectado por la menor difusividad del  $O_2$  en  $CO_2$  (aproximadamente un 18% menor en las condiciones estudiadas). Esto provoca que, en condiciones de oxi-combustión, el coeficiente de transferencia de materia sea menor haciendo que la resistencia a la transferencia externa de  $O_2$  aumente, lo que a su vez disminuye la velocidad de reacción y, por tanto, la temperatura alcanzada en la superficie de la partícula.



**Figura 5.3** Evolución de la temperatura con el tiempo para una partícula de carbonizado de Haya de 10 mm de diámetro en  $O_2/N_2$  y  $O_2/CO_2$  para distintas concentraciones de  $O_2$ : a),b)  $T_b=800^\circ C$ ; c),d)  $T_b=850^\circ C$

Las observaciones relacionadas al incremento de la temperatura superficial del carbonizado respecto del lecho al variar el diámetro de la partícula, la temperatura de operación, las concentraciones de oxígeno y la atmósfera de combustión concuerdan con las observaciones realizadas por otros autores como Changsheng et al. [20], que analizó teóricamente el efecto que algunas variables tienen sobre el tiempo de combustión o M. Öhman et al. [19], que realizó una revisión de la literatura acerca de los resultados de estudios sobre la temperatura de partículas en reactores de lecho fluido y basándose en ella determinó un modelo empírico (regresión de mínimos cuadrados parciales) de los efectos de las diferentes variables sobre dicha temperatura. Este efecto, mostrado en la Figura 5.4, muestra un buen acuerdo con el obtenido en este trabajo.

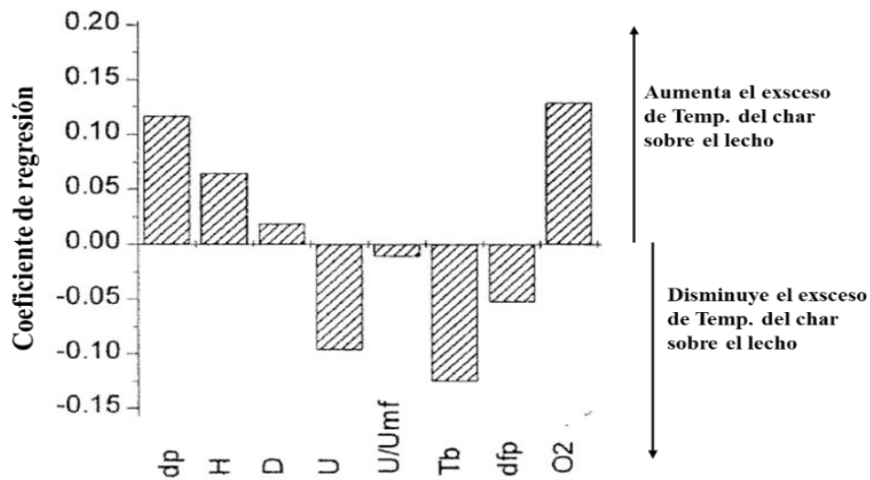


Figura 5.4 Efecto relativo de aumentar las diferentes variables de operación del lecho y parámetros del combustible [22]

En la Figura 5.5 se representa la contraposición de los datos experimentales con los teóricos calculados mediante el modelo desarrollado en el Anexo II, para la combustión de una partícula de carbonizado. Igualmente, para el caso de oxi-combustión, los resultados se muestran en la

Figura 5.6. Dado que el modo de conversión de la partícula obedece al modelo de partícula decreciente, el tamaño de la misma está relacionado con su conversión, es por esto que es posible realizar su medida por pirometría.

Se puede comprobar que los resultados experimentales coinciden con los predichos por el modelo teórico para la combustión de una partícula de carbonizado en O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> (Figura 5.5). La evolución de la temperatura experimental con el tiempo se ajusta adecuadamente durante toda la conversión presentando una desviación en cuanto a temperatura de  $\pm 15$  °C como máximo. Se puede visualizar como la curva teórica avanza sobre los puntos que constituyen los valores experimentales, dando lugar, en ocasiones a resultados idénticos a los medidos. Los tiempos de consumo son muy similares, mostrando errores máximos del 10% encontrándose en la mayoría de ensayos errores por debajo del 5%. La conversión medida experimentalmente también presenta muy buen ajuste con los resultados calculados presentando errores de alrededor del 10%.

En el caso de oxi-combustión, si se observa la Figura 5.6, se detecta, de la misma manera, un buen ajuste de la temperatura experimental en relación con la calculada mediante el modelo teórico. Los errores máximos vuelven a ser de tan solo  $\pm 15$  °C. Sin embargo los resultados experimentales muestran una tasa de conversión más rápida en comparación con los datos calculados. Esto puede visualizarse de manera claramente en la Figura 5.6 c) y d).



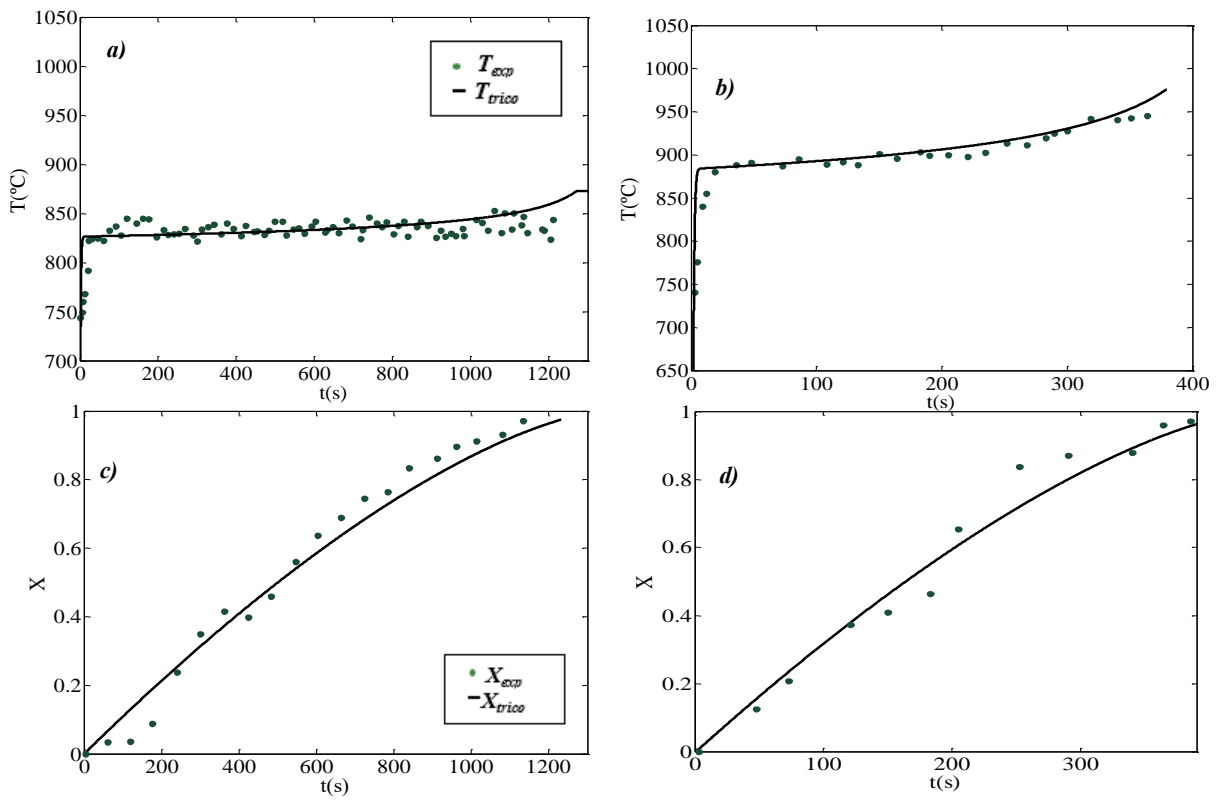


Figura 5.5 Evolución de la temperatura con el tiempo para una partícula de carbonizado de Haya de 10 mm a  $T_b=800^{\circ}\text{C}$ : a) 10%  $\text{O}_2/\text{N}_2$ , b) 30%  $\text{O}_2/\text{N}_2$ ; y conversión: c) 10%  $\text{O}_2/\text{N}_2$ , d) 30%  $\text{O}_2/\text{N}_2$

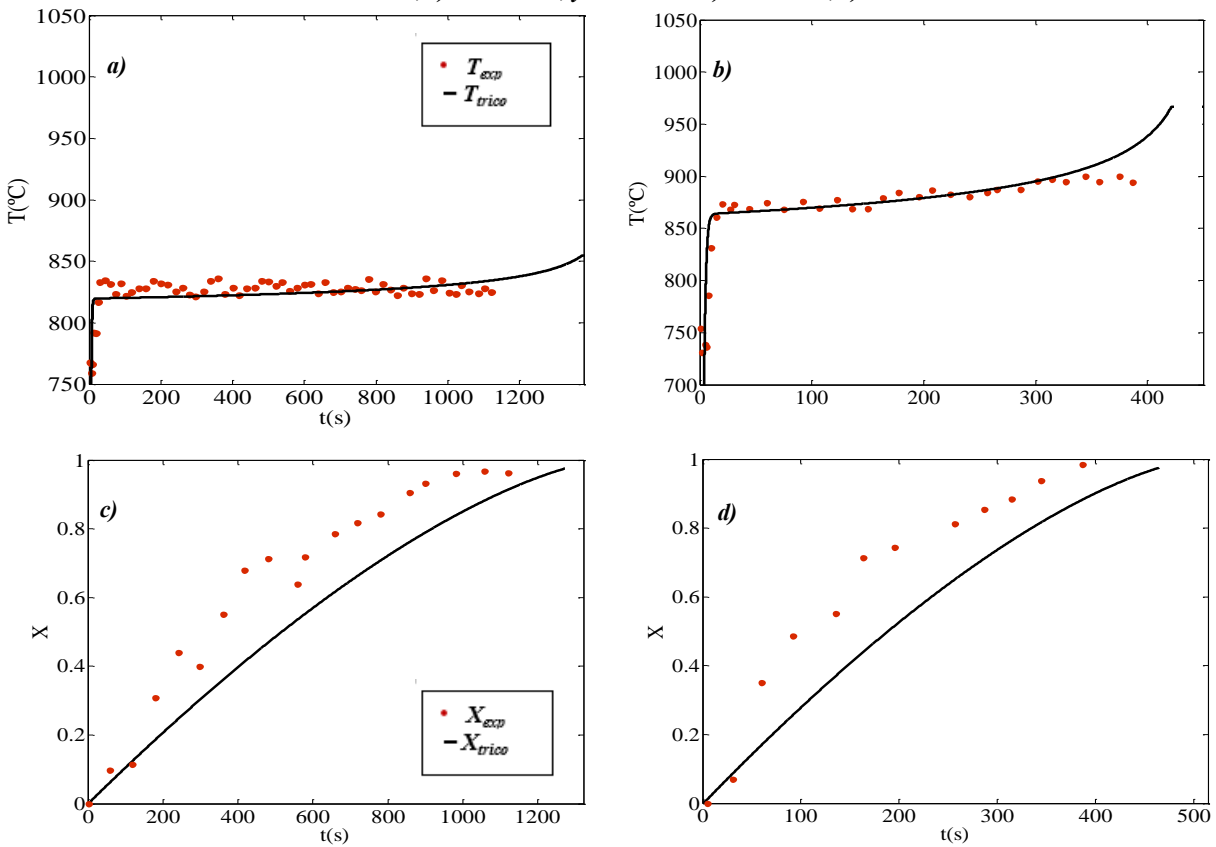


Figura 5.6 Evolución de la temperatura con el tiempo para una partícula de carbonizado de Haya de 10 mm a  $T_b=800^{\circ}\text{C}$ : a) 10%  $\text{O}_2/\text{CO}_2$ , b) 30%  $\text{O}_2/\text{CO}_2$ ; y conversión: c) 10%  $\text{O}_2/\text{CO}_2$ , d) 30%  $\text{O}_2/\text{CO}_2$

En la Figura 5.7, además, se puede comprobar que el error, calculado como:

$$error = \frac{t_{eo} - t_{exp}}{t_{teo}} \times 100 \quad Ec. 5.1$$

tiende a disminuir a medida que aumenta la concentración de O<sub>2</sub> en la mezcla O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> alimentada al reactor. Estos resultados conducen a reflexionar sobre la influencia que la reacción de gasificación pueda tener sobre el proceso de oxi-combustión.

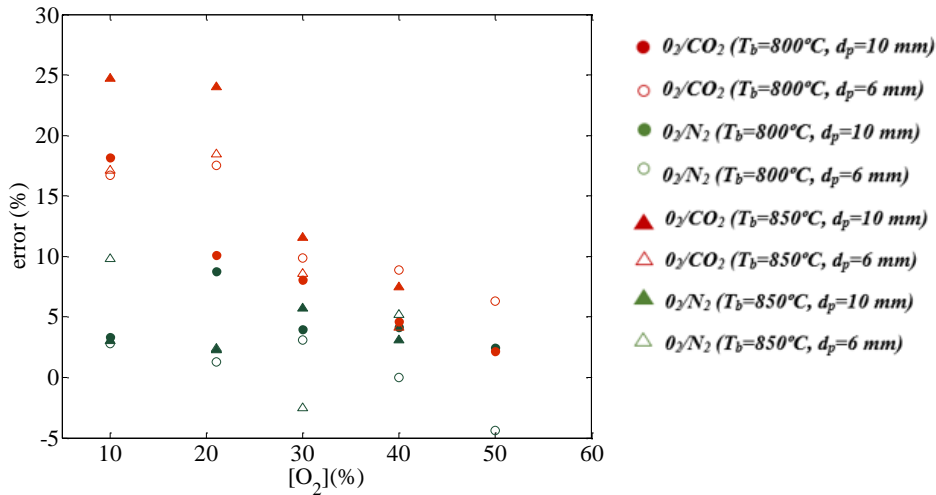


Figura 5.7 Tiempos de combustión experimental y teórica para una partícula de carbonizado de Haya de 10 mm de diámetro a distintas concentraciones de O<sub>2</sub>

Numerosos trabajos, centrados en localizar las diferencias en la combustión de partículas de carbonizado en el caso de la oxi-combustión empleando un flujo de gas a partir de O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> con respecto al caso de combustión con aire, ha sido normalmente considerada despreciable (comparada con la oxidación) en combustión, sin embargo, es posible que su contribución sea importante en oxi-combustión debido a las altas concentraciones de CO<sub>2</sub> empleadas. Esto podría producir un aumento en la tasa de consumo de la partícula, además, podría afectar a la temperatura (debido a que la reacción de gasificación es endotérmica). La mayor dificultad para considerar este fenómeno es encontrar unos parámetros cinéticos fiables para esta reacción, de hecho, para un mismo tipo de carbón, las cinéticas determinadas por distintos autores presentan tasas de consumo que pueden oscilar en varios órdenes de magnitud ( Figura 5.8).

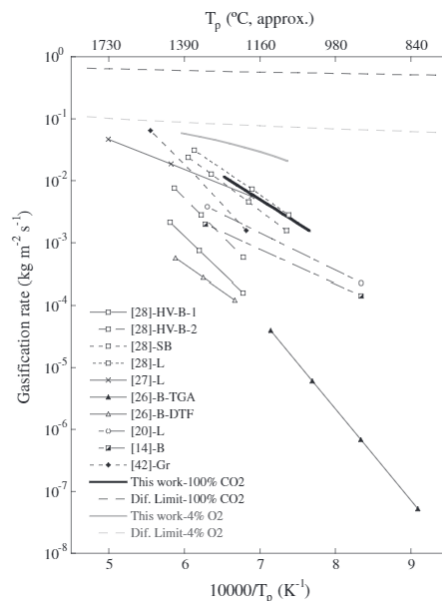


Figura 5.8 Tasa de gasificación frente a la temperatura calculada según varios autores [23].

Cristina Gonzalo-Tirado [26] realiza un estudio experimental en un reactor de lecho de arrastre utilizando como combustible antracita, carbón bituminoso y lignito y determina unos parámetros cinéticos de oxidación y gasificación que implementa en un modelo teórico, con el objetivo de evaluar la influencia que tiene el rango de carbón en la cinética de gasificación. Encuentra que, dependiendo de las condiciones, la gasificación debe ser considerada, especialmente cuando se emplean carbones de bajo rango y/o altas concentraciones de  $\text{CO}_2$ , como es el caso del proceso de oxi-combustión. Ya que el carbonizado de Haya es un combustible de bajo rango y dados los resultados obtenidos, en los que se comprueba que a bajas concentraciones de  $\text{O}_2$  (10%), el error calculado es mayor que a las concentraciones más elevadas, parece que esta suposición se ajusta con los resultados de este estudio.

En conclusión, debido al menor tiempo de consumo del carbonizado en comparación con los resultados esperados y calculados teóricamente se sostiene la posibilidad de la existencia de gasificación en las condiciones de operación empleadas para el carbonizado de Haya. Teniendo en cuenta una cinética de la gasificación en el modelo teórico se consigue disminuir el error de tiempo de combustión, resultado que aún podría mejorarse determinando una cinética de gasificación más adecuada para este caso.



## 6 RESUMEN Y CONCLUSIONES

Debido a las altas emisiones de CO<sub>2</sub> producidas en la actualidad debido al uso de los combustibles fósiles y la tendencia que presentan las emisiones futuras, surge la necesidad de buscar alternativas en aras de reducirlas. Una posible solución consiste en la captura de CO<sub>2</sub> mediante la oxi-combustión. Esta tecnología puede aplicarse a las calderas convencionales (1<sup>a</sup> generación), sin embargo, se busca mejorar esta técnica alimentando mayores concentraciones de oxígeno a la caldera (2<sup>a</sup> generación). Para ello es necesaria la investigación de una serie de factores, dentro de los cuales, uno de los más significativos es la temperatura del combustible durante la combustión.

En este Trabajo Fin de Grado se ha estudiado la influencia de la atmósfera en oxi-combustión sobre la densidad y la temperatura de partículas de carbonizado de haya y se ha desarrollado un modelo teórico para la predicción y comprensión de los resultados, en el cual se han establecido una serie de hipótesis y empleado unos parámetros cinéticos, termodinámicos y de transferencia de masa y energía, extraídos de la literatura o de distintas fuentes. Asimismo, la medida de la temperatura experimental se ha llevado a cabo con un nuevo método de pirometría óptica con cámara digital (PIC), el cual presenta grandes ventajas respecto a los métodos de medida de temperatura de partículas de combustible en reactores de lecho fluido empleados hasta la fecha. Para la aplicación de esta técnica ha sido necesaria una calibración previa de la videocámara, llevada a cabo en trabajos anteriores [20], además de la caracterización del método para establecer los límites de aplicación en este trabajo. El equipo utilizado consiste en un reactor de lecho fluido bidimensional, a escala de laboratorio, dotado de una ventana que permite la medida de la temperatura mediante pirometría. Los ensayos se realizan a dos temperaturas de operación (800°C y 850°C) y para dos tamaños de partícula diferentes (6 mm y 10 mm) empleando como gas de fluidización una mezcla de O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> a distintas concentraciones de O<sub>2</sub>.

Los resultados obtenidos tras el análisis de densidad demuestran que el carbonizado de Haya se convierte según el modelo de partícula decreciente, tanto en combustión como en oxi-combustión. Por otro lado, los resultados obtenidos en cuanto a temperatura superficial del carbonizado empleando una atmósfera de O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> en el reactor de lecho fluidizado se ajustan adecuadamente a los predichos por el modelo en las mismas condiciones. Sin embargo, los resultados experimentales en oxi-combustión se alejan ligeramente de los calculados en tiempos de combustión. Es evidente que, durante la oxi-combustión, el modelo excluye algún fenómeno que experimentalmente se produce en la realidad. Tras la revisión de la literatura, algunos autores encuentran una influencia del proceso de gasificación en la oxi-combustión del carbonizado en algunas condiciones, además, esta influencia se intensifica en combustibles de bajo rango. Como posible explicación al aumento de la velocidad de consumo del carbonizado de haya (combustible de bajo rango) en oxi-combustión, se sostiene la posibilidad de la influencia de la gasificación y se propone tenerla en cuenta en el modelado cinético.

Como trabajo futuro, además de incluir la velocidad de gasificación en el modelo cinético, para completar el estudio sobre el efecto que el cambio de atmósfera tiene sobre la conversión, se podría evaluar el efecto que sobre la temperatura superficial tiene, en combustión y oxi-combustión, la aplicación de otro tipo de combustible (Antracita, bituminoso, sub-bituminoso), y por último, encontrar la máxima concentración de O<sub>2</sub> que es posible alimentar al reactor manteniendo el correcto funcionamiento del mismo.

# Nomenclatura

C	Constantes de Planck; $C_1=3.742 \cdot 10^8 \text{ (W } \mu\text{m}^4)/\text{m}^2$ ; $C_2=1.439 \cdot 10^4 \text{ K } \mu\text{m}$
DN	Número Digital proporcionado por el software de la video cámara
e	Emitancia (Energía emitida por unidad de área y longitud de onda, $\text{W}/(\text{m}^2 \mu\text{m})$ )
FOV	Campo de visión del equipo electrónico (Field Of View)
k	Índices generales que se refiere a alguna banda espectral o color
PIC	Pirometría en color (One-color pyrometry)
P2C	Pirometría en dos colores (Two-color pyrometry)
WD	Distancia de trabajo (Working Distance)
r	Radio de la partícula de carbonizado
T	Temperatura, °C
E	Porosidad
$U_{mf}$	Velocidad de mínima fluidización, m/s
$k_g$	Coefficiente de transferencia de materia, m/s
$k_r$	Constante cinética, m/s
A	Factor de frecuencia m/sK
F	Flujo molar, mol/s
$S_{char}$	Superficie de la partícula de carbonizado, $\text{m}^2$
$T_{amb}$	Temperatura ambiente, 25°C
$Q_g$	Calor generado, W
$Q_{cv}$	Pérdidas de calor por convección, W
$Q_{rd}$	Calor transferido por radiación, W
m	Masa, kg

***Letras griegas***

$\alpha, \gamma, \delta$	Coefficientes de las curvas de calibración
$\beta$	Parámetro de calibración
$\varepsilon$	Emisividad
$\rho$	Densidad
$\mu$	Viscosidad
$\eta$	Tasa CO/CO <sub>2</sub>
$\sigma$	Número de Stefan-Boltzman

***Subíndices***

c	Carbonizado (Char)
P1C	Pirometría en un color
P2C	Pirometría en dos colores
k,i,j	Índices generales que se refiere a alguna banda espectral o color
b	Arena del lecho





# REFERENCIAS

---

- [1] O. M. José Antonio Benjamín Ordóñez, «Captura de carbono ante el cambio climático,» *Madera y Bosques*, vol. 7, pp. 3-12, 2001.
- [2] M. E. F. Clemente, Los sumideros naturales de CO<sub>2</sub>.
- [3] R. M. Velasco, *El cambio climático*.
- [4] V. Barros, El cambio climático global, 2005.
- [5] <<http://esteguieresmascom.blogspot.com.es/>,> 10/09/2016.
- [6] BP, Energy Outlook 2030, 2013.
- [7] BP, Energy Outlook, 2016.
- [8] J. S. González, Measurement of the surface temperature of char in combustion in a fluidized bed by pyrometry with digital camera, [TFG] 2015.
- [9] Bo Leckner, Alberto Gómez-Barea «Oxy-fuel combustion in circulating fluidized bed boilers,» *Applied Energy*, pp. 308-318, 2014.
- [10] T.Czakiert, Z.Bis, M.Musaka, W.Nowak «Fuel conversion from oxyfuel combustion in a circulating fluidized bed,» *Fuel process. Technol.*, pp. 531-538, 2006.
- [11] E. Anthony, «Oxy-fired fluidized bed combustion: technology, prospects and new developments,» de *Fluidized bed technologies for near-zero emission combustion and gasification*, 2013, pp. 867-894.
- [12] Malte Bartels, Weigang Lin, John Nijenhuis, Freek Kapteijn, J. Ruud van Ommen«Agglomeration in fluidized beds at high temperatures: Mechanisms, detection and prevention,» *Progress in Energy and combustion science*, 2008.
- [13] J. Stubington, «Comparison of techniques for measuring the temperature of char particles burning in a fluidized bed,» *Chemical Engineering*, vol. 63, pp. 241-249, 1985.
- [14] A. Macek, C. Bulik«Direct Measurement of Char Particle Temperatures in Fluidized Bed Combustors,» *The Combustion Institute*, pp. 1223-1230, 1984.
- [15] J. Yates y P. Walker, «Fluidization,» *Second Engineering Foundation Conference*, pp. 241-245, 1978.
- [16] J. Roscoe, A. Witkoswki y D. Harrison, «Trans I Chemical E,» pp. 83-88, 1981.
- [17] F. Scala, «Fluidized-Bed Combustion of Single Coal Char Particles: An Analysis of the Burning Rate and of the Primary CO/CO<sub>2</sub> Ratio,» *Energy Fuels*, vol. 25, pp. 1051-1059, 2011.

- [18] MA Andrei, AF Sarofim, JM Beer « Time-resolved burnout of coal particles in a fluidized bed,» *Combustion and Flame*, vol. 61, pp. 17-27, 1985.
- [19] Changsheng Bu, A Gómez-Barea, X Chen, B Leckner, D Liu, D.Pallares, P.Lu «Effect of CO<sub>2</sub> on oxy-fuel combustion of coal-char particles in a fluidized,» *Applied Energy*, pp. 247-259, 2016.
- [20] Changsheng Bu, A Gómez-Barea, X Chen, B Leckner, D Liu, D.Pallares «Devolatilization of a single fuel particle in a fluidized bed under,» *Combustion and Flame*, 2014.
- [21] Changsheng Bu, A Gómez-Barea, X Chen, B Leckner, D Liu, D.Pallares «Oxy-fuel combustion of a single fuel particle in a fluidized bed: Char combustion characteristics, an experimental study,» *Chemical Engineering Journal*, pp. 679-656, 2016.
- [22] Fabrizio Scala, *Recent research on fluidized bed oxy-fuel combustion at naples*.
- [23] H. I. Matheka, B.O. Oboirien, B.C. North «A review of oxy-fuel combustion in fluidized bed reactors,» *Energy research*, 2011.
- [24] Changsheng Bu, X.Chen. D. Liu. «Experimental and Modelling of Oxyfuel Combustion of a Single Coal Particle in a Fluidized Bed,» *5th IEAGHG International Oxyfuel Combustion Meeting*, 27-29 October 2015, China.
- [25] M. Ohmån, A. Nordin «Review of Particle, Temperature Studies in Fluidized Bed Combustion,» *Proc. Of Nordic Seminar on Thermochemical conversión*, nº Trondheim (Norge), 4-5 December 1996.
- [26] Cristina Gonzalo-Tirado, Santiago Jiménez, Javier Ballester «Gasification of a pulverized sub-bituminous coal in CO<sub>2</sub> atmospheric pressure in an entrained flow reactor,» *Combustion and Flame*, pp. 385-395, 2012.
- [27] Cristina Gonzalo-Tirado, Santiago Jiménez, Javier Ballester «Kinetics of CO<sub>2</sub> gasification for coals of different ranks under oxy-combustion conditions,» *Combustion and Flame*, pp. 411-416, 2013.
- [28] Fabrizio Scala, R. Chirone. «Combustion of single coal char particle under fluidized bed oxy-firing conditions,» *Industrial Engeenering Chemistry research*, vol. 49, pp. 11029-11036, 2010.
- [29] Vicent Alcántara Escolano, «Análisis de las emisiones de CO<sub>2</sub> y sus factores explicativos en las diferentes areas del mundo,» *Economía crítica*, vol. 4, pp. 17-37, 2005.
- [30] Teri Snow Draper, D Zeltner, DR Tree, Y Xue, R Tsiava «Two-dimensional flame temperature and emissivity measurements,» *Applied Energy*, pp. 38-44, 2012.
- [31] J. Salinero, A. Gómez-Barea, M. Tripiñana, B. Lecker, Improving char temperature measurement during oxy-combustion by pyrometry with digital camera. Proceedings of 22nd International Conference on Fluidized Bed Conversion. June (14-17), 2015, Turku (Finlan.)
- [32] W. P. Yates J.G., «Fluidization,» *2nd Engineering Foundation Conference*, pp. 241-245, 1978.





# ANEXO I. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y DISPOSITIVOS

## Horno eléctrico

La función de este equipo es suministrar y controlar la temperatura de operación para la ejecución de los distintos estudios experimentales.

Este horno, modelo TV4/50/700/11, es un equipo formado por una cámara dividida en dos cuerpos constituidos en su interior por paredes de ladrillos refractarios y fibra aislante. Estas paredes internas incluyen unos canales rectangulares donde se apoyan las bobinas calefactoras fabricadas a partir de hilos de aleaciones en base Fe-Cr. Los dos cuerpos de la cámara están sujetos por brazos articulados y soportados por una estructura principal en la que se incluye una caja de control con panel de mandos de encendido y control automático de temperatura. El sistema de control de temperatura permite la subida y bajada de temperatura en rampa, así como, un mantenimiento constante de esta durante un tiempo predeterminado. De esta manera se consigue un calentamiento uniforme, evitándose variaciones rápidas de temperatura. La variación de temperatura durante la operación es de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  sobre el punto de consigna. El sistema de control eléctrico consiste en un control de potencia con relé de estado sólido y garantiza el funcionamiento seguro del horno, así como, la seguridad de las personas que trabajen con él. Uno de los cuerpos posee una ventana frontal con el propósito de obtener la información referida a la radiación emitida por las partículas que se introducen en el equipo.



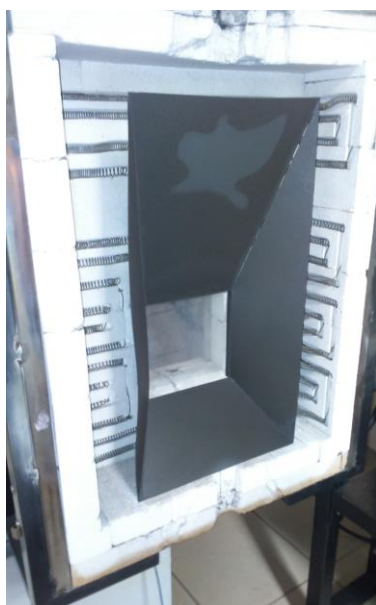
*Figura A1.1 Horno eléctrico de la instalación del laboratorio*

El horno de la instalación tiene unas dimensiones exteriores de  $138 \times 138 \times 65,7 \text{ cm}^3$  cuya cámara interna posee unas dimensiones de  $50 \times 30 \times 70 \text{ cm}^3$ , a la que se accede mediante la ventana de  $19,5 \times 19,5 \text{ cm}^2$  de área. El horno posee dos orificios, superior e inferior, para permitir la instalación de piezas necesarias para la adecuada ejecución de las operaciones planteadas, como son los elementos de sujeción, entrada de los conductos que inyectan el agente de fluidización y salida de los gases de reacción. El montaje del conjunto se ve en la Figura AI.1, donde se distinguen las partes principales que lo conforman.

## Chapa metálicas

El objetivo de este equipo consiste en homogeneizar la radiación emitida por las bobinas calefactoras del horno sobre la zona de combustión. Se trata de una chapa metálica de acero 310, pintada de negro con una pintura resistente a  $1050^\circ\text{C}$ , de forma que éstas tengan un comportamiento ideal de cuerpo negro. De esta manera se puede asumir que la radiación recibida por el carbonizado es la radiación que recibiría de una superficie negra.

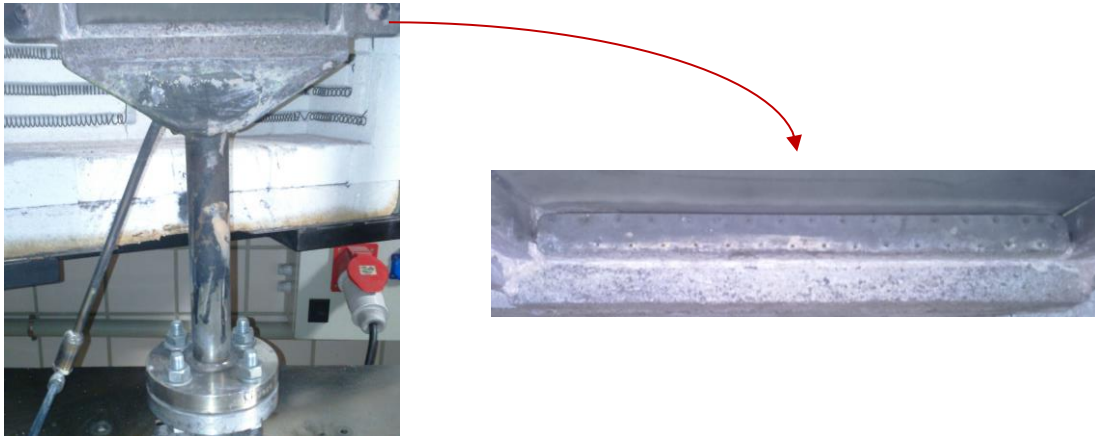
La disposición de esta chapa se puede observar en la Figura AI.2, donde se visualiza una estructura situada en la puerta delantera del horno en forma de tolva.



*Figura AI.2. Chapa de homogeneización de la radiación*

## Distribuidor

La misión de un distribuidor es, además de mantener el lecho, homogeneizar el flujo de gas de forma que salga del mismo con un perfil plano de velocidades. El distribuidor instalado está construido de acero refractario 310 con geometría rectangular de  $18 \times 180 \text{ mm}^2$  de superficie, donde se ubican 35 orificios de  $0,8 \text{ mm}$  de diámetro dispuestos al tresbolillo. Asimismo, como se puede ver en la Figura AI.3., dispone de un tubo para la posible instalación de una toma de presiones.

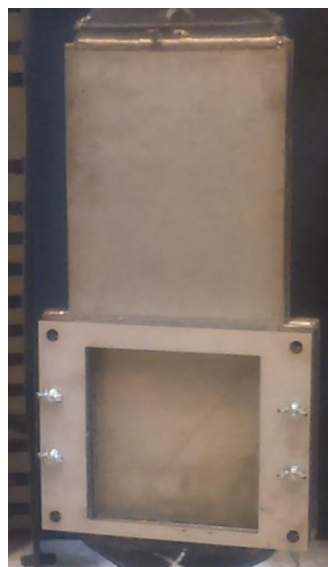


*Figura AI.3. Distribuidor*

### Reactor de acero con ventana de cuarzo

Una de las limitaciones principales a la hora de elegir el reactor es que debe permitir el paso de la radiación emitida por las partículas de estudio, sin modificarla significativamente, para que la cámara pueda capturarla. El material que establece un compromiso entre resistencia mecánica, visibilidad y coste es el cuarzo. Es por esto que, en un principio, se construyó un reactor de geometría rectangular completamente fabricado en cuarzo. Sin embargo, surgieron múltiples problemas empleando este diseño, debido a que, pese a que el cuarzo posee una buena resistencia, tanto mecánica como térmica, respecto al cristal común, los calentamientos continuados y la manipulación del mismo para su limpieza provocaron diversas grietas y posteriores roturas que condujeron a la decisión de un nuevo diseño del reactor.

Se propuso construir el cuerpo del reactor de acero refractario 310 e instalar una ventana de cuarzo ajustada en la estructura y apoyada en el distribuidor, de manera que quede visible la zona de estudio. El reactor instalado actualmente en el laboratorio L-5 de la Escuela superior de Ingenieros se puede ver en la Figura AI.4, y consiste en una parte superior con geometría rectangular, cuyas dimensiones 22 cm ancho en la parte superior, 28 cm en la inferior y 50 cm de alto, constituida de acero refractario 310 y soldado al colector. En la zona inferior se encuentra una ventana cuadrada de cuarzo de 18 mm de lado encajada en la estructura y soportada por un marco de acero atornillado al reactor. En el interior del mismo se aloja el lecho de óxido de silicio de granulometría 320-500 $\mu\text{m}$  ( $\rho=2630 \text{ kg/m}^3$ ,  $U_{mf}=0,18 \text{ m/s}$ ).



*Figura AI.4 Reactor de acero con ventana de cuarzo*

## Colector

El colector se sitúa en la parte superior del horno y es el encargado de recoger los gases de reacción. En la Figura AI.1 se puede ver que en la parte superior izquierda se asienta un tubo de alimentación a través del cual se introducen las partículas de carbonizado para su estudio. Igualmente, en la parte superior derecha se dispone de tres tubos para la instalación de tomas de presión o termopares.

Este colector se encuentra embridado a una tubería fijada que soporta la estructura del reactor. Asimismo, esta tubería conduce los gases de reacción hacia el exterior permitiendo su expulsión a la atmósfera.



*Figura AI.2. Colector y tubería de expulsión de gases*

## Videocámara digital

La videocámara empleada en los ensayos es una JVC Everio HD, Figura AI.6, que cuenta con un sensor CMOS de 2 Megapíxeles. En la configuración interna de la cámara se ha decidido trabajar sin ganancia, lo que impide un reajuste interno del dispositivo que haría más brillantes determinadas zonas de la imagen cuando se trabaja en un ambiente oscuro.

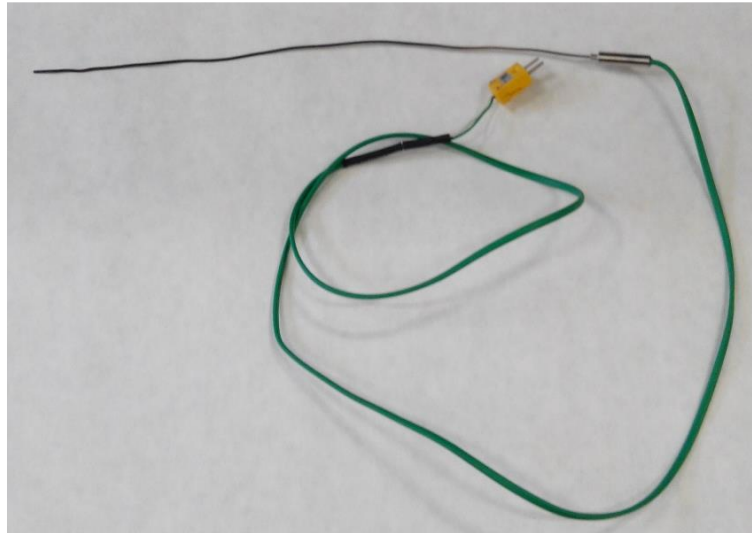


*Figura AI.6. JVC Everio HD*



## Termopares

El termopar es el dispositivo empleado para medir la temperatura del lecho en aras de controlar la temperatura de operación. Se trata de sensores de temperatura económicos e intercambiables y son capaces de medir un amplio rango de temperaturas. Existen varios tipos de termopares, de los cuales, en este trabajo se utilizan los tipo K ya que están disponibles a un bajo costo y miden temperaturas superiores a 1300°C. Los termopares empleados, Figura AI.7.



*Figura AI.7. Termopares usados para controlar la temperatura del lecho*

## Registrador de datos

El receptor de datos TC-08, Figura AI.8, consiste en una caja registradora con 8 entradas de termopar directas y puede tomar lecturas precisas y rápidas. El registrador puede medir y registrar temperaturas entre -270°C y 1820°C. Obtiene potencia del puerto USB, por lo que no necesita fuente de alimentación externa.

Mediante esta conexión USB, la salida es procesada por la aplicación PicoLog, la cual consiste en un programa de adquisición de datos diseñado para la recogida, análisis y exposición de datos. Los datos pueden visualizarse tanto durante como después de su recogida en una hoja de cálculo o en formato gráfico.



*Figura AI.8. PicoLog USB TC-08*

## Rotámetros

Los rotámetros son instrumentos utilizados para medir caudales, tanto de líquidos como de gases. Se basan en la determinación del desplazamiento vertical de un “elemento sensible”, cuya posición de equilibrio depende del caudal circulante. El principio de funcionamiento se basa en el equilibrio de fuerzas que actúan sobre dicho elemento.

Se emplean dos rotámetros distintos en el laboratorio que consisten en dos tubos de vidrio de baja conicidad en cuyo interior se ubica un flotador esférico. Se encuentran calibrados con aire a una presión de 2,5 barg y 25°C de temperatura, con un rango de medida de 10 y 20 NI/min. Ambos rotámetros se encuentran colocados en un panel donde las salidas de los mismos se conectan a un pequeño tanque de mezcla perfecta previo a la entrada del reactor Figura AI.9.

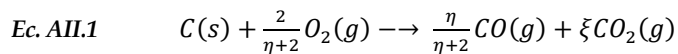


*Figura AI.9 Instalación de los rotámetros en el laboratorio*

## ANEXO II. MODELO TEÓRICO

En este anexo se modela la combustión de una partícula de combustible según el modelo de partícula decreciente. Las hipótesis sobre las que descansa este modelo son:

- Conversión del carbonizado según:



- Modelo de partícula decreciente (la capa de ceniza se desprende durante la fluidización y la reacción sucede en dos etapas en serie: difusión externa de materia al frente de reacción más la reacción sobre la superficie de la partícula, Fig. AI.1)
- Reacción superficial de primer orden (sin penetración efectiva del reactivo gaseoso,  $O_2$ )

$$\text{Ec. AII.2} \quad (-r_c)_c = k_r C_{O_2,c}$$

- Temperatura homogénea dentro de la partícula decreciente (alta conductividad térmica, no existen gradientes internos de temperaturas).

### AIII. 1. Ecuaciones de conservación

#### 1.1. Conservación de la materia

##### *Consumo de $O_2$*

El consumo de oxígeno durante la combustión del carbonizado ( $FO_2$ ) puede expresarse en función de la transferencia externa de materia (consecuencia del gradiente de concentración existente entre el seno de la fase fluida y la superficie del char, Ec. AII. 3) y en función de su consumo por reacción (Ec. AII. 4)

$$\text{Ec. AII.3} \quad F_{O_2} = S_c k_g (C_{O_2,\infty} - C_{O_2,c})$$

$$\text{Ec. AII.4} \quad F_{O_2} = \frac{1}{\xi} S_{char} k_r C_{O_2,c}$$

- La relación entre ambas ecuaciones (Ec.AII. 3-4) elimina la concentración de oxígeno en la superficie del carbonizado (frente de reacción)

$$\text{Ec. AII.5} \quad F_{O_2} = \frac{C_{O_2,\infty}}{\frac{1}{k_g} + \frac{\xi}{k_r}} S_{char}$$

### Consumo del carbonizado

El consumo de carbonizado puede expresarse según la relación estequiométrica existente entre los reactivos ( $1/\xi$  mol de  $O_2$  por mol de C, Ec.AII. 1)

$$\text{Ec. AII.6} \quad F_c = \frac{1}{1/\xi} \frac{C_{O_2,\infty}}{\frac{1}{k_g} + \frac{\xi}{k_r}} S_{char}$$

o mediante la conservación de materia

$$\text{Ec. AII.7} \quad F_c = - \frac{d(m_c / PM_c)}{dt}$$

donde

$$\text{Ec. AII.8} \quad m_c(t) = \left( \frac{4\pi}{3} r_c^3 \right) \rho_c$$

La relación entre (Ec. AII. 5-8) genera la ecuación diferencial que modela el consumo del carbonizado (variación temporal del radio de la partícula de carbonizado sin reaccionar)

$$\text{Ec. AII.9} \quad \frac{dr_c}{dt} = - \frac{\xi}{\frac{1}{k_g} + \frac{\xi}{k_r}} \frac{C_{O_2,\infty}}{\rho_{m,c}}$$

### Conservación de la energía

- Calor generado por reacción

$$\text{Ec. AII.10} \quad Q_g = F_c \Delta H_{r,c}$$

- Transferencia de calor (convección y radiación)

$$\text{Ec. AII.11} \quad Q_{cv} = S_{char} h_{cv} (T_c - T_b)$$

$$\text{Ec. AII.12} \quad Q_{rd} = S_{char} \varepsilon \sigma (T_c^4 - T_b^4)$$

- Energía interna de la partícula decreciente

$$\text{Ec. AII.14} \quad \Delta E_{PD} = \left( \frac{4\pi}{3} r_c^3 \right) \rho_{m,c} C_P \frac{dT_c}{dt}$$

El balance entre el calor generado, transferido por convección y radiación, y la variación de la energía interna de la partícula decreciente

$$\text{Ec. AII.15} \quad \Delta E_{PD} = Q_g - (Q_{cv} + Q_{rd})$$

permite modelar la variación temporal de su temperatura según

$$Ec. AII.16 \quad \frac{dT_c}{dt} = \frac{3}{\rho_{m,c} C_P} \frac{1}{r_c} \left( \frac{\xi}{\frac{1}{k_g} + \frac{\xi}{k_r}} \Delta H_{r-c} C_{O2,\infty} - \varepsilon \sigma \left( h_{cv} (T_c - T_b) + (T_c^4 - T_b^4) \right) \right)$$

Habiéndose utilizado la expresión del consumo molar de char (Ec.AII. 6)

Para cerrar el problema son necesarias las siguientes condiciones iniciales de integración:

$$Ec. AII.17 \quad r_c(t = 0) = r_{c,o}$$

$$Ec. AII.18 \quad T_c(t = 0) = T_{amb}$$

Las constantes y correlaciones empleadas en este modelo son las mostradas en la Tabla AII.1.

Constantes					
$A_r$	595	$m/s K$	[24]	$R_g$	8,314 $J/mol K$
$E_r$	17.976	$J/mol$	[24]	$\Delta H_C$	1,6412 $10^4 J/mol$ EES
$Cd_{aire}$	70,37 $10^3$	$m/s K$	EES	$\Delta H_{O_2}$	2,5261 $10^4 J/mol$ EES
$Cd_{oxy}$	70,43 $10^3$	$W/m K$	EES	$\Delta H_{CO_2}$	3,56160 $10^5 J/mol$ EES
$C_{p,aire}$	33,43	$W/m K$	EES	$\Delta H_{CO_2}$	8,6393 $10^4 J/mol$ EES
$C_{p,c}$	18	$J/mol K$	EES	$\varepsilon_c$	0,85 $x$
$C_{p,oxy}$	56,11	$J/mol K$	EES	$\rho_{c,o}$	816 $kg/m^3$
$\rho_b$	2650	$kg/m^3$		$\sigma$	5,67 $10^{-8} J/m^2 K^4 s$
$d_{pb}$	0,41	$m$		$E_{mf}$	0,4 $kg/m^3$

Correlaciones	Relaciones
$k_r = A_r T_c \exp\left(-\frac{E_r}{R_g T_c}\right)$	$\xi = \frac{2\eta + 2}{\eta + 2}$
$D_{O_2-aire} = 0,181 \cdot 10^{-4} \left(\frac{T_c}{298}\right)^{1,81}$	$Sh = \frac{2 r_c k_g}{D_{O_2-aire}}$
$D_{O_2-oxy} = 0,139 \cdot 10^{-4} \left(\frac{T_c}{298}\right)^{1,81}$	$Nu = \frac{2 r_c h_{cv}}{Cd_{aire}}$
$Nu = 6 + 0.117 Ar^{0,39} Pr^{0,33}$	$Sc = \frac{\mu}{\rho_{gas} D_g}$
$Sh = 2 E_{mf} + 0,117 Ar^{0,39} Sc^{0,33}$	$\Delta H_{r,c} = \left(\frac{2}{\eta+2}\right) \Delta H_{CO_2} + 2 \left(\frac{\eta}{\eta+2}\right) \Delta H_{CO} - (\Delta H_{O_2} + \xi \Delta H_C)$
$Ar = \frac{(\rho_b - \rho_{gas}) g \rho_{gas} d_p^3}{\mu^2}$	
$\eta = 2512 e^{\frac{-6240}{T_c}}$ [25]	

Tabla AII.1 Parámetros empleados en el modelo teórico de partícula







