



Departamento de Ingeniería Química y Ambiental

PROYECTO FINAL DE CARRERA

**“MEDIDA DE LA TEMPERATURA MEDIANTE
PIROMETRÍA CON CÁMARA DIGITAL Y APLICACIÓN
EN COMBUSTIÓN EN LECHO FLUIDIZADO”**

Presentado por Manuel Luna Muñoz para la obtención del título
de Ingeniero Industrial.

Director del Proyecto:

Dr. D. Alberto Gómez Barea

MEDIDA DE LA TEMPERATURA MEDIANTE PIROMETRÍA CON CÁMARA DIGITAL
Y APLICACIÓN EN COMBUSTIÓN EN LECHO FLUIDIZADO

ABSTRACT (Español)

La medición de la temperatura de partículas de combustible y de char en un reactor de lecho fluidizado presenta inconvenientes cuando se trata de llevar a cabo mediante termopares o pirometría con fibra óptica. Los termopares limitan la fluidodinámica natural de las partículas, al encontrarse anexados a ellas, y el campo de visión de la sonda óptica es altamente restringido. Frente a ello, la pirometría con cámara digital ofrece ventajas considerables: el campo de visión es adaptable a toda la escena visible, que puede ser capturada, almacenada y tratada para conocer el campo de temperaturas de los elementos en combustión que la componen.

Por otra parte, las partículas de char, cuya emisividad se cifra aproximadamente en 0.9, sufren acusados desplazamientos y cambios de trayectoria al ser introducidas en un lecho fluidizado, lo que provoca dificultades insalvables en la elaboración de una curva de calibración válida. Este impedimento radica en la importancia de la localización permanente de la zona superficial cuya temperatura es medida por el termopar, que se relaciona con la medida de radiación que recibe la cámara digital de dicha superficie. Por esa razón, se propone una metodología de ensayos para validar una primera aproximación del objetivo: la obtención de la temperatura de un cuerpo negro estático mediante pirometría con cámara digital, que permitirá establecer una pauta que seguir en la resolución futura del problema con partículas en movimiento.

Una vez comprobada la bondad de la metodología de ensayos elaborada para el fin propuesto y, por tanto, realizada la calibración de la curva pirométrica, se concluye que la pirometría en dos colores (P2C), tradicionalmente utilizada en este tipo de ensayos, carece de la precisión derivada de emplear pirometría en un color (P1C) en las bandas de color rojo y verde secuencialmente. Asimismo, se muestra una primera aproximación a los ensayos de oxi-combustión planeados en experiencias futuras.

ABSTRACT (English)

Monitoring the temperature of fuel and char particles in fluidized bed combustors entails obvious difficulties when performed using thermocouples or optical probes. The natural motion of the particles is drastically diminished when they are attached to thermocouples, and the field of view captured by optical probes is highly restricted. On the contrary, pyrometry using a digital camera grants considerable advantages. The field of view is adaptable to the whole visualized scene, which can be captured, stored and processed to determine the temperature of the combusting elements appearing within its margins.

Char particles, whose emissivity is approximately 0.9, suffer pronounced path deviations when introduced in a fluidized bed reactor, causing insurmountable difficulties in developing a valid calibration curve. This difficulty relies on the necessity of defining a permanent location for the surface whose temperature is to be measured by the thermocouple, which is then related to the extent of radiation received by the digital camera. Therefore, a testing methodology is proposed to validate a simplification: obtaining the temperature of a static black body using pyrometry with a digital camera, which will set a pattern for solving the initial problem –char particles in motion- completely.

After checking the methodology's reliability, and thus, the calibration curved is obtained, it is concluded that two-colour pyrometry (P2C), traditionally employed in these sorts of experiments, lacks the accuracy issued from the use of one-colour pyrometry using both the red and green bands sequentially. A first approach to the further scheduled oxi-combustion tests using char particles is also detailed.

ÍNDICE

NOTACIÓN.....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. ANTECEDENTES.....	10
1.2. OBJETIVO Y ALCANCE DEL PROYECTO.....	16
2. ESTUDIO Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE MEDIDA.....	19
2.1. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA.....	19
2.1.1. Métodos para la determinación de la temperatura.....	20
2.1.2. Prácticas experimentales.....	24
2.1.3. Conclusiones.....	25
2.2. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIANTE PIROMETRÍA ÓPTICA.....	27
2.3. PARÁMETROS RELEVANTES EN EL TRATAMIENTO DE REACTORES DE LECHO FLUIDO.....	29
3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	33
3.1. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y DISPOSITIVOS.....	33
3.1.1. Equipos y elementos de la planta.....	33
3.1.2. Instrumentación.....	39
3.2. DISPOSICIÓN Y METODOLOGÍA DE ENSAYO.....	43
3.2.1. Ensayos Pirométricos.....	43
3.2.2. Ensayos de Caracterización Fluidodinámica del equipo del reactor.....	50
4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN. DISCUSIÓN.....	53

4.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MÉTODO PIROMÉTRICO	53
4.2. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FLUIDODINÁMICA DEL LECHO.....	58
REFERENCIAS	66
ANEXO I: DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIANTE PIROMETRÍA DE UNO Y DOS COLORES. MÉTODO DE CALIBRACIÓN.	70
ANEXO II: SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR PID 2416 DEL HORNO TV4/50/700/11.....	73
ANEXO III: PLANOS DE LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS AISLANTES DE RADIACIÓN	75
ANEXO IV: ENSAYOS DE DETERMINACIÓN DE MEDIDA DE TERMOPARES.....	76
ANEXO V: CARACTERIZACIÓN DEL ROTÁMETRO DE LA INSTALACIÓN.....	78
ANEXO VI: PINTURA VHT DE ALTA TEMPERATURA	81
ANEXO VII: GENERACIÓN DE CHAR. TIPOLOGÍA DE CARBÓN.	82
ANEXO VIII: TRATAMIENTO DE COLUMNA DE LECHO FLUIDO EN ANSYS FLUENT. DIRECTRICES Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS BÁSICOS.....	86

NOTACIÓN

SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

- A: Área de paso [m²]
- C_D: Coeficiente de resistencia de los orificios de la placa distribuidora []
- D: Diámetro [m]
- m: masa (kg)
- N: Número de orificios de la placa distribuidora.
- Q: Caudal de operación. [m³/s]
- T: Temperatura [°C,K]
- u: Velocidad de fluidización. [m/s]
- C: Constantes de Planck; C₁ = 3.742 * 10⁸ {W * μm⁴}/m² ; C₂ = 1.439 * 10⁴ K * μm
- DN: Número digital asignado por la videocámara
- E: Energía emitida por unidad de área y longitud de onda, W/(m² * μm)
- (i,j): Indicadores de posición de píxeles
- FOV: Campo de vision del dispositivo electrónico
- P1C: Pirometría de un color
- P2C: Pirometría de dos colores
- WD: Distancia de trabajo

LETRAS GRIEGAS

- Δm: Pérdida de masa [kg]
- ΔP: Pérdida de carga [Pa]
- Ø: Esfericidad
- ρ: Densidad de fluido. [kg/m³]
- α, γ, δ, β: Coeficientes de la curva de calibración
- ε: Emisividad
- Δλ_r: Intervalo de espectro rojo, (0.62 – 0.7) μm
- Δλ_v: Intervalo de espectro verde, (0.49 – 0.58) μm
- Δλ_b: Intervalo de espectro azul, (0.45 – 0.49) μm
- λ_r: Longitud de onda central del rango de espectro rojo, 0.685 μm
- λ_g: Longitud de onda central del rango de espectro verde, 0.535 μm

- λ_b : Longitud de onda central del rango de espectro azul, 0.47 μm
- Φ Contante de proporcionalidad entre W/m^2 y $W/(\text{m}^2 * \mu\text{m})$

SUBÍNDICES

- arr: límite de arrastre.
- dist: relativo a la placa distribuidora.
- flot: relativo al flotador del rotámetro.
- lecho: magnitud relativa al lecho de bauxita empleado.
- minfl: de mínima fluidización.
- orif: relativo a los orificios de la placa distribuidora.
- ref: de referencia.
- bs : Superficie del cuerpo negro
- r,b,g,k: Índices referents a bandas roja (r), verde (g), azul (b), o cualquiera de ellas (k).
- rs: Superficie real

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realizará un exordio acerca de los aspectos fundamentales que permitirán delimitar tanto la envergadura como el alcance del Proyecto, así como un resumen capitular que sintetiza los contenidos que se tratarán en cada apartado.

1.1. ANTECEDENTES

Un lecho fluidizado consiste fundamentalmente en un fluido que atraviesa en dirección ascendente un lecho de partículas sólidas soportadas por un distribuidor. De esta forma, se consigue alcanzar coeficientes de transferencia de calor elevados y un alto grado de uniformidad de temperatura, así como un contacto íntimo entre la corriente de gas y pequeñas partículas sólidas. El comportamiento del lecho está fuertemente influenciado por las propiedades del fluido y del sólido, la geometría del lecho, la velocidad de flujo, etc. En la Figura 1-1 puede observarse un lecho siendo fluidizado con aire.

La tecnología de combustión en lecho fluidizado pretende trasladar los principios de fluidización y transferencia de calor que tienen lugar en los reactores homogéneos a la combustión de combustibles en reactores heterogéneos. Este sistema fue desarrollado para las grandes calderas de las centrales termoeléctricas que por medio de la generación de vapor producían energía eléctrica.

En la combustión en lecho fluidizado el combustible se alimenta a un lecho de material refractario, por ejemplo alúmina o bauxita, y el aire necesario para la combustión, denominado gas de fluidización, se inyecta en el lecho. El principio de funcionamiento reside en una masa de partículas de material refractario a alta temperatura, que se mantiene en suspensión gracias a una corriente de fluido que la preserva en constante agitación. El combustible se introduce en el seno del lecho, de donde no saldrá si no es en forma de gas o arrastrado por una velocidad excesiva de los gases.

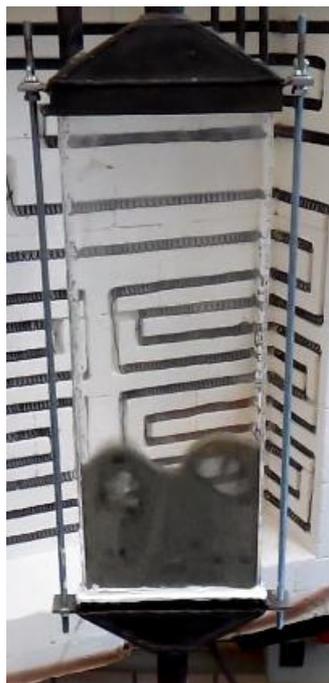


Figura 1-1: Lecho de bauxita fluidizado por aire

La combustión del carbón es un fenómeno complejo que involucra los efectos de reacciones homogéneas y heterogéneas, transferencia de calor, masa, y el flujo de diferentes fases. Sin embargo, juega hoy día y jugará en el futuro un importante papel en la obtención de energía de manera estable y segura. No obstante, su empleo debe ser compatible con el medio ambiente, socialmente aceptado y económicamente atractivo o, al menos, viable. Por ello, las técnicas de conversión deben ser desarrolladas en aras de mejorar la eficiencia de conversión, reduciendo el consumo de combustibles y minimizando las emisiones de contaminantes. El desarrollo de una nueva tecnología de combustión, la oxí-combustión, persigue este objetivo.

Es conocido que durante la combustión de los combustibles fósiles se genera dióxido de carbono -CO₂-, un gas de efecto invernadero. La reducción de la cantidad de CO₂ emitida es de vital importancia para frenar el incremento de su concentración en la atmósfera y, con ello, el efecto invernadero. Aunque se espera que a largo plazo las energías renovables sean la mejor solución para asegurar el suministro y reducir las emisiones, en el corto-medio plazo, es necesario recurrir a tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂. La captura y almacenamiento de CO₂ -CAC, CCS en nomenclatura anglosajona- consiste en la separación del dióxido de carbono presente en los gases emitidos por la industria para ser transportados

y almacenados en formaciones geológicas adecuadas, confinándolos por un tiempo indefinido. De esta forma se reduce la cantidad de CO₂ emitida a la atmósfera. Actualmente la Oxi-combustión es una tecnología que posibilita la CAC de forma prometedora.

La Oxi-combustión es el proceso de conversión del carbón en una corriente de oxígeno mezclada con una corriente recirculada de los gases de combustión. De esta forma se genera una corriente de salida rica en CO₂ lista para su secuestro y almacenamiento.

Como una de las tres principales tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂, la tecnología de oxi-combustión experimenta un rápido desarrollo con proyectos internacionales encaminados a la comercialización. El estado actual de la oxi-combustión puede considerarse semi-comercial, en el sentido de que si surgiera una unidad económicamente viable, tanto el proveedor como el comprador compartirían riesgo técnico, ya que no se podrían garantizar la fiabilidad ni cuantificar exactamente las emisiones debido a la corta madurez y a la falta de experiencia a escala industrial. La Figura 1-2 muestra la evolución histórica de los proyectos de oxi-combustión, sus hitos y los objetivos esperados de cada investigación.

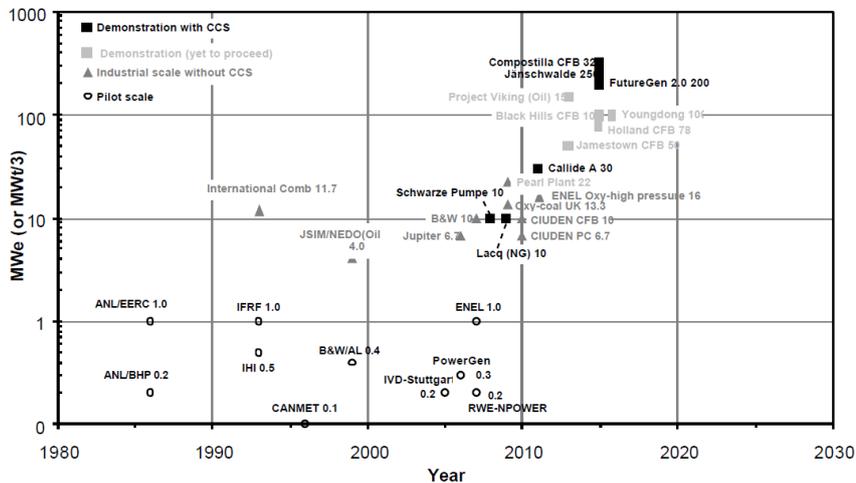


Figura 1-2 Desarrollo histórico de los proyectos de oxi-combustión, [1].

En la primera generación de plantas de oxi-combustión de carbón, la recirculación del CO₂ es tal que la concentración de O₂ a la entrada de la caldera está limitada al 25-35 %, tratando de mantener condiciones en el hogar parecidas a las calderas convencionales de aire. La principal ventaja de este procedimiento es que permite rediseñar las calderas actuales y convertirlas a oxi-combustión sin experimentar cambios drásticos.

Aunque el desarrollo de la primera generación de calderas de oxi-combustión es de por sí un avance importante como método de captura de CO₂, y en la mejora de las técnicas de conversión, se plantea ya la cuestión de aprovechar el potencial de esta tecnología alimentando mayor concentración de O₂ a la caldera, ya que ello permitiría reducir de forma drástica el tamaño de la instalación [2].

Esta nueva forma de quemar carbón debe realizarse de forma que la temperatura del lecho y de las partículas de carbonizado se mantenga en un nivel similar al de la combustión con aire (850°C). Es necesario investigar varios factores antes de construir una caldera de acuerdo a este concepto, como son la capacidad de transferencia de calor y la temperatura que alcanzan las partículas de carbonizado de varios milímetros, comúnmente encontradas en lechos fluidos -en las condiciones de CO₂ y O₂-, que existirían dentro de la caldera. En concreto, es necesario prevenir la fusión de las partículas de carbonizado en el lecho en aras de mantener la correcta fluidización del mismo.

En oxi-combustión, una alta concentración de oxígeno a la entrada puede dar lugar a velocidades de conversión tan grandes que la temperatura de estas partículas supere los niveles admisibles. Esto a su vez depende de la capacidad de mezcla del lecho y del tamaño de las partículas de carbonizado.

Es necesario estimar la velocidad de consumo de las partículas de carbonizado en una atmósfera gaseosa muy diferente a la que existen en las calderas convencionales y de primera generación en lecho fluidizado, teniendo en cuenta los flujos de gas y partículas dentro de la caldera, y establecer las bases del diseño y operación de las nuevas calderas. Todo esto se realiza para poder llevar a cabo la oxi-combustión en las condiciones más favorables, reduciendo al máximo el tamaño de los equipos y la recirculación de gas de combustión.

Aunque existen otros asuntos, como los medioambientales y económicos, que se precisan investigar antes del desarrollo definitivo de la segunda generación de oxi-combustores, los aspectos mencionados anteriormente se consideran como la principal limitación que necesita abordarse de forma inmediata [2-5].

Los experimentos que se realicen en estas condiciones de operación generarán un valioso conocimiento sobre el nuevo proceso de combustión y su comportamiento. De esta forma se concluye que es razonable llevar a cabo investigaciones, trabajo en laboratorio y reactores a escala piloto antes de aplicar estas nuevas técnicas a conversores de gran escala.

Conocer la temperatura de la partícula de combustible es relevante por diversas causas:

- 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.
- Ya que aproximadamente el 2/3 del calor de reacción del carbón sólido se libera en la oxidación a CO, la medida de la temperatura de la partícula puede indicar la tasa de CO/CO₂, [6,7].
- Es uno de los parámetros determinantes 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, ensuciamiento, cenizas volantes y deposición.

Numerosos métodos de medida de la temperatura han sido desarrollados hasta la actualidad. El éxito en la selección de una técnica depende de las características de la aplicación en la que se vaya a usar. Métodos que requieran contacto físico como los termopares, adecuados para algunas aplicaciones, no son adecuados para situaciones en las que quiera conocerse la temperatura de pequeñas partículas en movimiento. En estos casos, el uso de métodos de “no-contacto” son los más convenientes.

Los métodos de “no-contacto” son métodos ópticos y están basados en la medida de la radiación térmica y en el hecho de que la radiación espectral que emite un cuerpo es función

de su temperatura, es decir, se basan exclusivamente en la detección de la radiación térmica emitida por la partícula y en la Ley de de Planck.

El trabajo desarrollado en este documento se encuentra enmarcado dentro del Proyecto OXICOGAS-2G. Este proyecto trata de estudiar la forma de conversión y la temperatura que se alcanza en el interior de las partículas de carbonizado en procesos de conversión en lecho fluidizado donde se alimenta una corriente con alto contenido en oxígeno.

Para la ejecución del Proyecto OXICOGAS-2G se cuenta con una planta de laboratorio consistente, principalmente, en un horno, que permite la adquisición de datos ópticos desde el exterior mediante una ventana de cuarzo, en el interior del cual es posible instalar un reactor del mismo material. Para alcanzar los objetivos del Proyecto, es indispensable comparar los resultados teóricos con medidas de temperatura fiables y de alta calidad. Se intentará, por tanto, desarrollar una serie de ensayos que permitan garantizar la adecuación y corrección de los resultados obtenidos.

1.2. OBJETIVO Y ALCANCE DEL PROYECTO

En este proyecto se propone una metodología de ensayos que permita medir la temperatura alcanzada por partículas de combustible en un reactor de lecho fluidizado mediante pirometría óptica con cámara digital, así como la caracterización fluidodinámica del lecho de dicho reactor, que posibilitará establecer un punto de partida para los posteriores ensayos de oxi-combustión.

Para ello se procede a ejecutar las siguientes tareas:

- Realizar una revisión de los métodos experimentales de medición de la temperatura de partículas en el seno de un lecho fluidizado, concretando el método que se considera más oportuno para el abordaje de los ensayos que ocupan.
- Detallar la metodología seguida en la realización de los distintos ensayos que permita llevar a la práctica el método pirométrico seleccionado.
- Caracterizar la fluidodinámica del lecho con el que se desarrollarán los ensayos de oxi-combustión.
- Exponer y comentar los resultados cosechados, además de la elaboración de las conclusiones oportunas.

En el capítulo 2, se abordará una revisión bibliográfica y del estado del arte de las técnicas experimentales de medición de la temperatura, concretando la adecuación de los métodos de contacto y de no-contacto a las tareas que se han puesto como objetivo. Asimismo, se comentará la metodología seguida por varios investigadores en la aplicación de dichas técnicas, además de realizar una breve explicación de las aplicaciones de éstas al caso de la medida de la temperatura en partículas de carbón en lecho fluidizado. Por último, se pretende exponer el método teórico de determinación de la temperatura mediante pirometría óptica y describir los parámetros más relevantes en la caracterización de un reactor de lecho fluidizado.

En el capítulo 3, se efectuará una descripción detallada tanto de los equipos como de los dispositivos y la instrumentación utilizada en los ensayos planteados. Además, se detallará minuciosamente la metodología seguida en la realización de los ensayos de calibración y de validación del método pirométrico seleccionado. Para terminar, se mostrará el procedimiento necesario para llevar a cabo los experimentos que permitirán caracterizar la fluidodinámica del lecho del reactor.

Por último, en el capítulo 4, se mostrarán los resultados obtenidos tanto para los ensayos concernientes al método pirométrico como para los enfocados a la caracterización del lecho, así como procederse a una discusión de las conclusiones cosechadas.

2. ESTUDIO Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE MEDIDA.

2.1. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA

Dada la importancia de la medida de la temperatura durante la combustión, multitud de trabajos han desarrollado este campo de trabajo, [6, 8-11]. En ellos se ha llevado a cabo la medida de la temperatura sobre partículas de carbonizado en dos tipos de circunstancias:

- Partículas micrométricas de carbón pulverizado en un reactor en suspensión.
- Partículas de combustibles inmersas en reactores de lecho fluido.

El inconveniente de la medida de temperatura en la combustión de partículas finas de carbón pulverizado en un reactor en suspensión es la existencia de una combustión en suspensión con emisión de volátiles y creación de llama, que pueden desvirtuar la medida según la técnica empleada.

En cambio, en el caso de un lecho fluido se convierten partículas gruesas de varios milímetros, donde la devolatilización tiene lugar en una etapa previa, y al final se produce la combustión del carbonizado de manera heterogénea. La emisión de volátiles, en este caso, suele generar burbujas, que se pueden quemar en el lecho si el tamaño de éstas adquiere suficiente importancia al penetrar el aire ascendente del distribuidor en las burbujas, o en el freeboard. Además, la llama de volátiles no permanece necesariamente ligada a las partículas si éstas permanecen en el lecho. El efecto “quench” de las partículas de coadyuvante dificulta la formación de llamas alrededor de las partículas.

A continuación se presentan los métodos de medición de la temperatura de partículas de carbón más significativos.

2.1.1. Métodos para la determinación de la temperatura

- **Termopares**

En la medida realizada por medio de termopares, es necesario realizar un orificio sobre la superficie de la partícula de carbón donde introducir posteriormente el termopar, siendo necesario efectuar el sellado de la unión por medio de una resina adhesiva. El conjunto termopar-partícula es luego suspendido en una localización definida dentro del lecho fluido, o se libera en él, con el inconveniente de que su movimiento natural se verá restringido, es decir, la fluidinámica natural de la partícula en el lecho se verá coartada.

El histórico de la temperatura de la partícula se obtiene, y puede ser almacenado, mediante un programa registrador de datos. La mayor ventaja de esta técnica es la medida histórica de la temperatura de una única partícula con buena precisión, incluso para pequeños excesos de temperaturas. Sin embargo, la magnitud que se está midiendo es la temperatura del núcleo –no la superficial- y la partícula ve altamente afectada su fluidodinámica. Además sólo pueden utilizarse partículas de un tamaño que garantice la representatividad de la medida proporcionada por el termopar, teniendo además que cumplir ciertos requisitos de integridad estructural para resistir la perforación; es decir, el método no es aplicable a todos los combustibles. A dichas restricciones es necesario añadir la posibilidad de la desanexión del termopar y la partícula, resultado de una probable degradación de la resina adhesiva o de la fragmentación de la propia partícula durante su conversión, con lo que la prueba en cuestión quedaría invalidada.

- **Pirometría Óptica**

Como se ha visto, los métodos que requieren contacto físico, como la medida a través de termopares, no son adecuados para aquellas situaciones en las que el objetivo sea determinar la temperatura de partículas en movimiento. En estos casos, el uso de métodos de “no-contacto” son los más convenientes.

Los métodos de “no-contacto” son métodos ópticos y están basados en la medida de la radiación térmica y en el hecho de que la radiación espectral que emite un cuerpo es

función de su temperatura, es decir, se basan exclusivamente en la detección de la radiación térmica emitida por la partícula y en la Ley de Planck, que será desarrollada con detenimiento en este mismo capítulo.

La medida de la temperatura mediante Pirometría se basa, por tanto, en la captura e interpretación de la radiación térmica emitida por el cuerpo cuya temperatura se desea conocer.

Una de las técnicas ópticas más relevantes es la Pirometría en una o varias longitudes de ondas –colores-.

➤ **Pirometría con fibra óptica**

De las dos modalidades indicadas anteriormente, la pirometría de un sólo color –o una sola banda- puede ser utilizada si el tamaño de la partícula se obtiene previamente por un método independiente y si la emisividad es conocida, o puede ser determinada con suficiente precisión. Por el contrario, la mayor ventaja de la pirometría en dos colores es su independencia no sólo del tamaño, sino de la emisividad de la partícula si el comportamiento de ésta es gris. Si se utiliza pirometría de más de dos colores, se puede obtener un modelo lineal, o de orden mayor, de la emisividad de la partícula.

La técnica consta de un equipo que captura la radiación electromagnética infrarroja por medio de un sistema de lentes. La radiación es conducida por medio de una fibra óptica hacia una unidad radiométrica, donde por medio de filtros, espejos o prismas, se divide la radiación en un número de bandas, de varias decenas de nanómetros, que incidirán sobre unos sensores generando un señal eléctrica que contiene información de la radiación que irradió el detector. En la Figura 2-1, se muestra el esquema de la unidad radiométrica utilizada por Macêky Bulik [12] para determinar las temperatura de las partículas de combustible en un lecho fluido. Sin embargo, la utilización de fibra óptica inmersa en un lecho fluido es una técnica sujeta a imprecisiones con resultados difíciles de interpretar, ya que se observan las partículas ocasionalmente, sólo cuando su trayectoria es captada en el campo de visión de la fibra. Además, no puede conocerse la distancia exacta entre la

partícula de carbonizado y la fibra, y los obstáculos que se encuentren en el campo de visión de ésta desvirtúan las medidas, pues la temperatura dada por la fibra es la media de la temperatura de los diferentes cuerpos incluidos en el campo de visión. El resultado es una nube de puntos con una dispersión muy difícil de valorar.

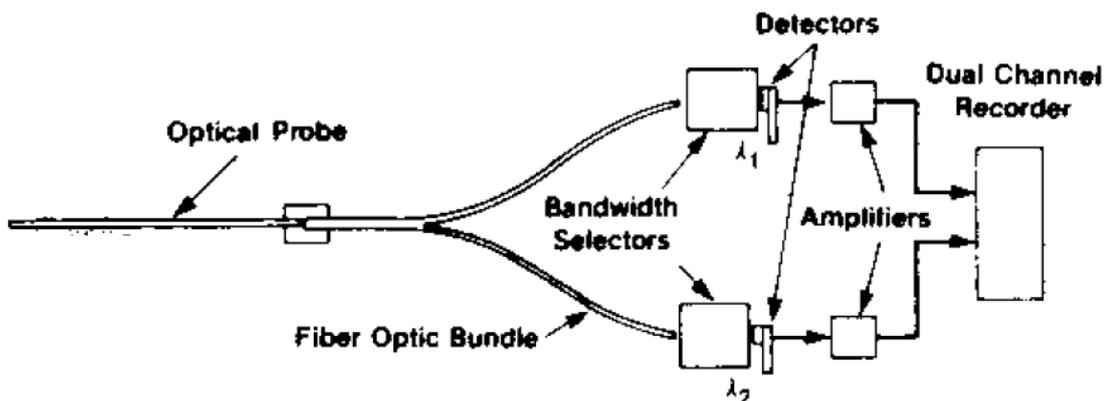


Figura 2-1: Esquema de la unidad radiométrica utilizada por para obtener la temperatura de las partículas de combustible en un reactor de lecho fluido por pirometría de dos colores en 1984.

➤ Pirometría con Cámara Digital

Una cámara digital es un equipo formado por una parte óptica, el objetivo, y una parte electrónica, el sensor, que se combinan de forma que, capturando la radiación electromagnética visible procedente de la escena visualizada, se genera una imagen de ésta.

Las cámaras digitales proporcionan información de la radiación electromagnética que le llega a cada pixel del sensor. De esta forma, y utilizando los formalismos de la transmisión de calor por radiación, se puede determinar la temperatura del cuerpo cuya radiación infrarroja irradió al sensor de la cámara.

Siempre y cuando la escena donde se desarrolla la combustión sea visible, dicha escena podrá ser capturada por la cámara y posteriormente tratada para conocer el campo de temperaturas de los elementos que la componen.

Dicha captura e interpretación se realiza mediante la cámara digital, que para cada píxel del sensor genera tres valores función de la radiación que recibe de la escena visualizada en las bandas espectrales pertenecientes al rojo, verde y azul. Esos números son conocidos como números digitales (DN_k) y se puede acceder a ellos mediante un programa capaz de realizar tratamiento de imágenes como MATLAB. De esa forma, se generan tres matrices, donde cada elemento (i,j) , contiene el número digital asociado a la radiación que recibió de la escena visualizada en la correspondiente banda espectral.

La cámara digital asigna un valor de número digital entre $[0, 2^n-1]$, en función de la radiación que recibe cada píxel. Los n bits se conocen como profundidad de digitalización, y a mayor valor, mayor cantidad de tonos –en escala de grises o color- podrán ser representados. Un valor común es de 8 bit, por lo que los números digitales de las distintas bandas espectrales variarán en el rango $[0, 255]$. Un ejemplo puede apreciarse en la Figura 2-2.

En la primera llama que muestra la Figura 1-3 los números digitales asociados al píxel marcado en el rojo, verde y azul son, respectivamente, $[212, 43, 7]$. Claramente, el color del píxel posee un tono más rojo que tonos verdes o azules. Sin embargo, en el píxel marcado en la llama 2, los números digitales resultan ser $[255, 180, 35]$, lo que indica que el rojo ya se ha saturado -alcanza el nivel 255-. La medida extrema se da en la llama 3, en la que los tres colores se encuentran al nivel 255, es decir, saturados. Este color se corresponde con el blanco.

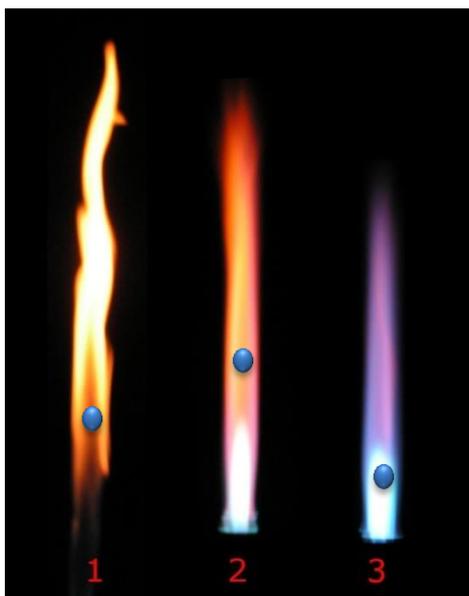


Figura 2-2: Distintas llamas a las que se le asignarán distintos valores de los números digitales en los tres colores considerados

2.1.2. Prácticas experimentales

Joutsenoja et al [13] describe una serie de situaciones donde se ha medido la temperatura de partículas o de una nube de éstas usando la técnica pirométrica; partículas levitando estacionariamente en una balanza electrodinámica, una sola partícula fijada en una parrilla o por medio de un alambre, y un grupo de partículas dispersas sobre un plato. En la referencia 14 se encuentran dos aplicaciones de la técnica pirométrica realizada en dos colores para la determinación de la temperatura de las partículas de combustible en dos tipos de reactores diferentes, flujo arrastrado (EFR) y lecho fluido (FBR). Para la primera aplicación, se obtuvieron medidas simultáneas “in-situ” de la temperatura y el tamaño de la partícula de combustible. En la segunda aplicación, un dispositivo como el descrito antes y mostrado en la Figura 2-1, es utilizado para determinar la temperatura del lecho y de las partículas de combustible individuales que tengan una temperatura diferente (mayor) a la del coadyuvante. Estos experimentos demuestran que la técnica es aplicable tanto a pequeña escala de laboratorio como a escala industrial.

Se han realizado investigaciones en reactores de “Drop-Tube” (DFT), [15-17], que son instalaciones con condiciones de operación sencillas que permiten generar información sobre la combustión del carbón, tal como la temperatura de las partículas y la correlación entre ésta y el tamaño de las partículas. En estos trabajos, por medio de ventanas de acceso óptico de las que dispone el reactor, o bien porque todo el reactor es de cuarzo, se realizan medidas in-situ para obtener la información mencionada. En la referencia 15 una cámara de alta velocidad - 5000 fps -, es empleada para observar la combustión de la partícula, determinándose la velocidad de esta y su tiempo de residencia. En la referencia 16, además de una cámara de alta velocidad, emplean un pirómetro de dos colores para determinar la temperatura de la partícula de carbón que cae por el reactor. Grosshandler [18] estudió el efecto que produce la presencia de hollín induce en la medida de la temperatura de la partícula de combustible empleando pirometría de dos colores en las distintas regiones espectrales. Concluyó que aplicar la técnica pirométrica en la región visible es adecuado cuando la temperatura de la partícula de combustible sea superior a 950°C. Cuando la temperatura es menor y la devolatización tiene lugar, la técnica resulta más imprecisa.

Dicha imprecisión es causada por la reducción de la intensidad de la emisión en el rango visible y las fuertes emisiones del hollín en dicha región. Debido a que las longitudes de ondas mayores son menos afectadas por la emisión del hollín, mediciones en la ventana espectral alrededor de los 4 μm son las más adecuadas, proporcionando mediciones más precisas que la región visible e infrarrojo cercano.

2.1.3. Conclusiones

Es sabido que la temperatura de las partículas de carbón o carbonizado en combustión en un reactor de lecho fluido es superior a la temperatura del lecho. Este exceso de temperatura puede variar desde varias decenas a varias centenas de grados.

Muchos esfuerzos se han llevado a cabo para efectuar una cuantificación del exceso de temperatura de las partículas de combustible sobre la del lecho. Las diferentes técnicas experimentales utilizadas en los trabajos que se encuentran en la literatura que cuantifican este exceso de temperatura pueden clasificarse en técnicas que usan termopares [19], técnicas que utilizan la fotográfica [20-22], por medio de pirometría óptica [14-15], y técnicas que utilizan un anillo metálico fungible que se introduce dentro de una partícula creada con polvo de char y adhesivo. [23].

Por medio de la técnica fotográfica en blanco y negro, o en color, se toman fotogramas de la parte superior del lecho y la intensidad de las imágenes donde aparecen las partículas de interés son comparadas con fuentes de calibración de temperatura conocida.

El método de pirometría óptica en reactores de lecho fluido está basado en una “guía de luz” inmersa en el lecho y una unidad radiométrica. Estimaciones menos precisas de la temperatura de las partículas se obtienen por medio de anillar un alambre fundible a la partícula de carbón y unirlo por medio de resina adhesiva.

Los métodos ópticos, como la fotografía y el pirómetro óptico, obtienen la temperatura superficial de partículas en movimiento libre y pueden ser aplicadas a partículas de menor tamaño que las usadas para el termopar. La medida histórica de la temperatura no puede ser

obtenida, pero en su lugar, la medida de numerosas partículas sí, revelando información sobre las interacciones partícula-partícula. La precisión en este caso, no obstante, es normalmente más pobre que la obtenida con el termopar. El método fotográfico ha sido aplicado solo a partículas de la superficie del lecho donde la transferencia de masa y calor es diferente a la interior del lecho. Se concluye que la medida de la temperatura de pequeñas partículas en movimiento no es posible por métodos de contacto sin afectar al fenómeno bajo estudio, y que no se ha podido desarrollar hasta la fecha ninguna técnica experimental que aporte resultados de alta calidad en las condiciones de oxi-combustión en lecho fluido.

Por tanto, es evidente que la técnica de medida de temperatura que se propone a continuación, mediante una cámara digital, una vez cumplido el requisito de escena visible, es de fácil aplicación y no necesita grandes equipos para poder llevarse a cabo. Por consiguiente, la directriz que se seguirá será la de intentar establecer un método que permita obtener medidas fiables de temperatura de partículas en el seno de un lecho mediante pirometría con cámara digital.

2.2. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIANTE PIROMETRÍA ÓPTICA

A la hora de calcular la temperatura con herramientas pirométricas, una vez comentados los aspectos básicos anteriores, es esencial partir de una serie de ecuaciones y leyes que se detallan a continuación.

Una expresión para la radiación del cuerpo negro ($\varepsilon=1$) recibida por el sensor y los números digitales asociados con dos bandas espectrales (P2C rojo y verde) pueden obtenerse, a partir de la Ley de Planck, tal y como se detalla en el Anexo I, como:

$$T_{P2C} = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_r} \right)}{\left(\ln(\beta_{rg}) + \ln\left(\frac{DN_r}{DN_g}\right) \right) - 5 \ln\left(\frac{\lambda_g}{\lambda_r}\right)} \quad \text{Ec. 2-1}$$

La expresión correspondiente a la temperatura medida mediante Pirometría en un color (P1C):

$$T_{P1C} = \frac{\frac{C_2}{\lambda_k}}{\left[\ln\left(\Phi_k \frac{C_1}{\lambda_k^5}\right) - (\ln(\beta_k) + \ln(DN_k)) \right]} \quad \text{Ec. 2-2}$$

Todos los trabajos en literatura que reflejan el uso de la pirometría en la determinación de la temperatura superficial durante la combustión de partículas de carbón [24], volátiles [25], combustible gaseoso [26], o paredes de un horno industrial usan dos bandas de colores o más. La ventaja de usar más de un color es que la temperatura de la superficie emisora puede ser obtenida asumiendo que ésta sea un cuerpo gris y, por tanto, no se necesita conocer la emisividad de antemano. Por el contrario, en el caso de la pirometría de un color es necesario el conocimiento de este parámetro.

Se deduce de las ecuaciones 2.1 y 2.2 que el parámetro de calibración β (β_{rg} para P2C, y β_k para P1C) necesita ser determinado mediante ensayos de calibración previos. El parámetro de calibración β recoge los parámetros electrónicos y, por tanto, la precisión de la temperatura calculada depende de la correcta estimación de este parámetro. Los dos

principales métodos para la determinación de este parámetro β se discuten en el Anexo I. Por una parte, es posible determinar β conociendo la temperatura de una determinada área visible en el ensayo, llamada área de referencia, que establece la relación entre la luminosidad - que viene dada por la temperatura y la Ley de Planck - y el número digital (DN) que el equipo asigna a dicho área de referencia [27]. Por el contrario, es posible obtener una curva de ajuste que contenga la relación entre el parámetro de calibración y los números digitales en el rango de temperatura de interés [25].

2.3. PARÁMETROS RELEVANTES EN EL TRATAMIENTO DE REACTORES DE LECHO FLUIDO

El esquema general de un reactor de lecho fluidizado consta de un distribuidor, que inyecta un gas en el seno de un lecho de material granulado, albergado por un cuerpo, el reactor, en el que se encuentra introducido el lecho.

Al aumentar la velocidad de circulación del gas a través del lecho llegará un momento en el que las fuerzas de fricción que ejerce el fluido sobre las partículas sean iguales al peso de las mismas. La velocidad que produce ese efecto es una velocidad superficial – caudal de gas/sección de paso- llamada velocidad de mínima fluidización u_{mf} . La tipología de lecho para velocidades inferiores a la de mínima fluidización se corresponde con un lecho fijo. La pérdida de carga, en este caso, viene dada por la Ecuación de Ergún. Velocidades superiores a la de mínima fluidización provocan la fluidización del lecho, en el que la pérdida de carga permanece constante, hasta un valor de la velocidad que provoca el arrastre de las partículas. Un esquema de lo comentado viene representado en la Figura 2-3.

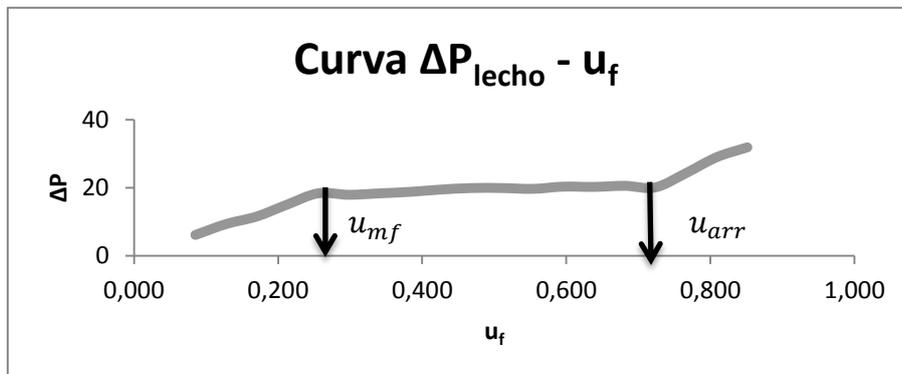


Figura 2-3: Curva pérdida de carga – Velocidad de fluidización de un lecho fluidizado

Para obtener la velocidad de mínima fluidización, u_{mf} , se requiere igualar la pérdida de presión del lecho al peso de éste en el momento en el que el sólido comienza a estar fluidizado:

$$\left[\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s} \right] \cdot Re_{p,mf}^2 + \left[150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s^2} \right] \cdot Re_{p,mf} = Ar \quad \text{Ec. 2-3}$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g}{\mu^2} \quad \text{Ec. 2-4}$$

Si no se conoce la velocidad de mínima fluidización ni la esfericidad de la partícula hay que usar correlaciones empíricas para poder obtener una solución:

$$Re_{mf} = \frac{\rho_g \cdot u_{mf} \cdot d_p}{\mu} = \sqrt{\left(\frac{B}{2A}\right)^2 + \frac{1}{A} Ar} - \frac{B}{2A} \quad \text{Ec. 2-5}$$

, donde:

$$A = \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s}, \quad B = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi_s^2} \quad \text{Ec. 2-6, 2-7}$$

Grace determino experimentalmente los valores de B/2A y 1/A obteniendo los siguientes resultados [29]:

$$\frac{B}{2A} = 27.2 \quad \frac{1}{A} = 0.048$$

Si se sustituyen estos valores en la ecuación 2-5 del Reynold de mínima fluidización se puede comprobar que los valores de porosidad de mínima fluidización y esfericidad de la partícula son los siguientes:

$$\varepsilon_{mf} = 0.43 \quad \phi_s = 0.90$$

Para calcular la fracción de burbuja se utiliza el modelo de Johnson [30] que se basa en la teoría de las dos fases modificada. La expresión que se obtiene para el cálculo de la fracción de burbuja en el lecho es la siguiente:

$$\varepsilon_b = \frac{1}{1 + \frac{1.3}{f} (u_{0,bb} - u_{mf})^{-0.8}} \quad \text{Ec. 2-8}$$

Donde en el caso de que se trate de un lecho estacionario de una unidad burbujeante, f se calcularía a partir de la Ecuación 2-9 [30]:

$$f = [0.26 + 0.70 \exp(-3.3 \cdot 10^3 d_p)] \cdot [0.15 + (u_{0,bb} - u_{mf})]^{-\frac{1}{3}} \quad \text{Ec. 2-9}$$

Para calcular la porosidad media del lecho se utiliza la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{bb} = \varepsilon_b + (1 - \varepsilon_b)\varepsilon_{mf} \quad \text{Ec. 2-10}$$

Se asume que ésta es constante a lo largo de todo el lecho.

Una vez calculada la porosidad media en el lecho, la densidad de la suspensión sería la siguiente:

$$\rho_x = (1 - \varepsilon_{bb})\rho_p \quad \text{Ec. 2-11}$$

La masa de sólidos y la pérdida de carga se calculan a partir de las siguientes expresiones, donde H_x representa la altura del lecho:

$$M_{bb} = \rho_x \cdot A_{bb} \cdot H_x \quad \text{Ec. 2-12}$$

$$\Delta P_{bb} = \rho_x \cdot g \cdot H_x \quad \text{Ec. 2-13}$$

Con el objetivo de caracterizar completamente el equipo, se computarán también las pérdidas de presión en el plato distribuidor.

Para tal efecto se aplica la ecuación de continuidad:

$$Q \left(\frac{m^3}{s} \right) = u_{orif} \cdot \frac{\pi \cdot d_{orif}^2}{4} \cdot N \quad \text{Ec. 2-14}$$

Siendo N el número de orificios, y d_{orif} el diámetro de los orificios del plato distribuidor.

Sustituyendo el resultado obtenido de la velocidad en los orificios del plato de la ecuación 2-14 en la siguiente expresión se halla la curva deseada:

$$\Delta P_{dif} = \left(\frac{u_{orif}}{C_{Dorif}} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{2} \quad \text{Ec. 2-15}$$

3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A continuación, se detallarán tanto los equipos como dispositivos empleados en la realización de los ensayos de calibración del método pirométrico desarrollado, así como la metodología experimental llevada a cabo. Además se expondrán los procedimientos llevados a cabo para efectuar la caracterización del lecho.

3.1. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y DISPOSITIVOS

3.1.1. Equipos y elementos de la planta

- **Horno eléctrico**

El modelo de equipo TV4/50/700/11 es un horno formado por una cámara caliente consistente en dos cuerpos recorridos en su interior por una serie de resistencias. Los dos cuerpos de la cámara están sujetos por brazos articulados y soportados por la estructura principal, la cual incluye una caja de control con panel de mandos de encendido y control automático de la temperatura.

El horno de la instalación, de dimensiones exteriores 1380x1380x657 mm³, posee una cámara interna de dimensiones 500x300x700 mm³, a la cual se tiene acceso desde el exterior mediante una ventana de 18x18 cm² de área cuya finalidad es permitir la adquisición de información acerca de la radiación emitida por los cuerpos introducidos en el equipo. El horno posee dos orificios, superior e inferior, para facilitar la introducción de piezas necesarias para la correcta realización de las distintas operaciones planificadas.

El equipo consume 15,8 A por fase, a 50 Hz. La máxima temperatura alcanzable en continuo es 1050°C, siendo posible alcanzar picos de hasta 1100°C.

El montaje del conjunto se observa en la Figura 3-1, donde se distinguen las partes principales que lo conforman:

-Cámara caliente y estructura principal.

- Pared de ladrillos aislante refractario y fibra aislante.
- Bobinas calefactoras fabricadas a partir de hilos de aleaciones en base Fe-Cr.
- Termopar tipo K.
- Chapa de acero inoxidable, estructura de soporte y tubo cuadrado de acero protegido con pintura resistente a la temperatura.
- Regletas cerámicas para bornes de alta intensidad y terminal de termopar.
- Caja de control:
 - Controlador electrónico.
 - Control de potencia, relé estado sólido.
 - Contactor de potencia.
 - Interruptor y accesorios eléctricos complementarios.

En cuanto a la correcta sintonización del controlador PID para el adecuado control de la temperatura en el interior de la cámara del horno, consúltese en Anexo II.



Figura 3-1: Distintas partes del horno eléctrico de la instalación de laboratorio

- **Chapas de homogeneización de la radiación**

Se han diseñado dos estructuras de acero 304 con el objetivo de homogeneizar la radiación emitida por las resistencias del horno sobre el espacio donde tendrá lugar la reacción de combustión; es decir, limitar la radiación recibida por la cámara a través de la ventana a aproximadamente la emitida por el cuerpo radiante de interés. Teniendo en cuenta la distribución de las resistencias en el interior de la cámara del horno, la disposición de las estructuras metálicas debe ser tal que se consiga homogeneizar la radiación de dichas resistencias emplazadas alrededor de la ventana, que pueden llegar a perturbar la medida de radiación real emitida por los cuerpos introducidos en el horno.

Por esta razón se decide emplear el diseño mostrado en la imagen, en el cual la estructura situada en la puerta posterior del horno tiene forma de tolva o embudo, en aras de homogeneizar la radiación de las resistencias del cuerpo posterior del horno. La que se emplazará en la puerta anterior posee una geometría tal que la estructura anterior encaje en ella y homogeneizará la radiación de las resistencias del cuerpo trasero del horno. Dicho esto, el hueco existente entre ambas debe ser tal que sea posible la instalación del instrumental necesario para la realización de los ensayos planificados de validación y los posteriores de oxi-combustión. Los planos de diseño se adjuntan en el Anexo III. Fotografías de lo expuesto anteriormente pueden observarse en la Figura 3-2.



Figura 3-2: Chapas aislantes de radiación interna del horno de la instalación de laboratorio

Con este diseño se espera que la temperatura medida a la altura de la ventana del horno sea lo más cercana posible a la real.

- **Distribuidor**

El distribuidor de la instalación, construido de acero refractario 310 y con una geometría rectangular 18x180 mm², se encuentra conectado a la toma de aire a presión y cuenta con un total de 35 orificios de 0.8 mm de diámetro distribuidos al tresbolillo. Como se aprecia en la Figura 3-3, cuenta también con un tubo disponible para instalar una toma de presiones o introducir un termopar en el lateral derecho.



Figura 3-3: Pieza que contiene el distribuidor

- **Reactor de cuarzo**

El reactor del equipo, como se ha visto anteriormente, debe ser transparente para facilitar la adquisición de datos de radiación. El cuarzo es el material que permite establecer un compromiso entre transparencia y durabilidad frente a altas temperaturas. El reactor posee una geometría de tubo rectangular, de dimensiones exteriores 500x190x26 mm³ y una pared de 5 milímetros de espesor, y se sitúa insertado entre el distribuidor y el colector. En su interior alberga un lecho de bauxita que es el que se fluidiza en los distintos ensayos programados, como se puede apreciar en la Figura 3-4.

A pesar de contar con una resistencia a los golpes y a la temperatura mucho mayor que el cristal común, ha de notarse que una manipulación y unos calentamientos a altas temperaturas continuados provocan la aparición de grietas que se extenderán hasta la rotura total del reactor. Además, la transparencia del cuarzo, a medida que éste se manipula, se atenúa periódicamente.

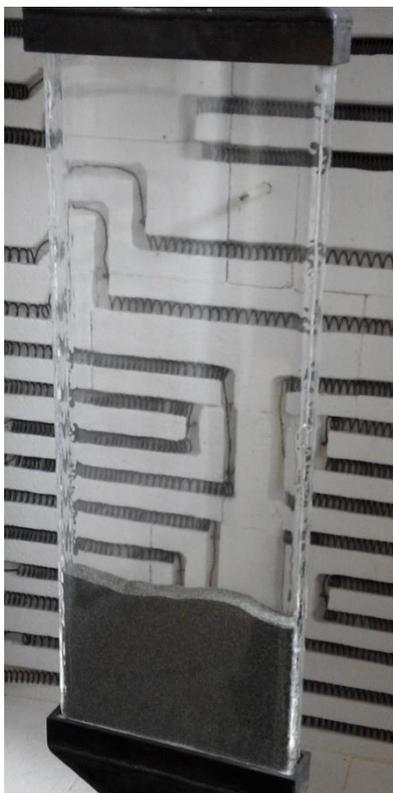


Figura 3-4: Reactor de cuarzo con lecho de bauxita

- **Colector**

El colector, fabricado del mismo acero 310 que el distribuidor para asegurar la resistencia frente a altas temperaturas, se sitúa en la zona superior de la cámara del horno y será el encargado de recoger los gases de combustión y rechazos que se produzcan en el reactor, así como servir de sustento y de guía para la introducción del mismo. En su lado izquierdo cuenta con un tubo de alimentación de 11 mm de diámetro y en el derecho, con tres tubos de introducción de tomas de presión o termopares. En su zona superior, se encuentra conectado a una tubería destinada a expulsar los gases generados al exterior, como se puede observar en la Figura 3-5.

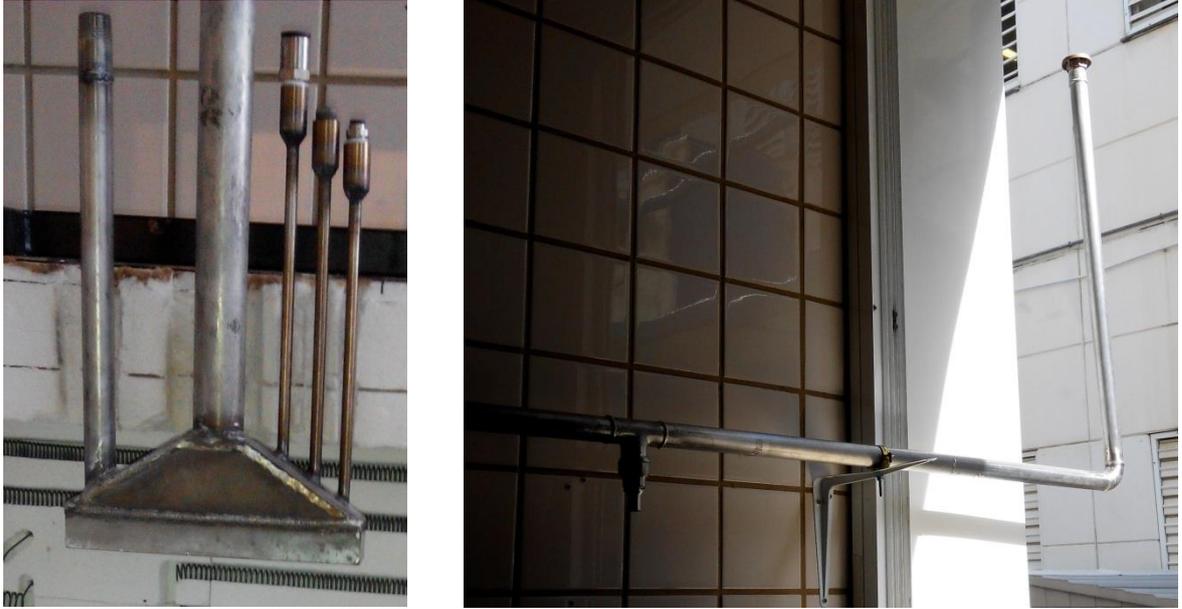


Figura 3-5: Colector y tubería de expulsión de gases

3.1.2. Instrumentación

- **Termopares**

Un termopar es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de potencial muy pequeña (del orden de los milivoltios) que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado punto caliente o unión caliente o de medida y el otro llamado punto frío, o unión fría o de referencia [28].

Los termopares, de tipo K – Figura 3-6 -, usados en los ensayos de calibración poseen un diámetro de 1.5 mm, con una longitud de sonda de 1000 mm y longitud de cable transmisor de 1500 mm. Tienen una unión aislada para evitar retornos de masa y se pueden deformar para adaptarlos a una aplicación en particular sin que pierdan prestaciones. Poseen una vaina de acero inoxidable AISI 310, siendo la máxima temperatura de operación de 1100°C.

Consúltese el Anexo IV para más detalles en cuanto a los distintos ensayos y pruebas realizados para la comprobación del modo en el que se efectúan las medidas en los termopares utilizados en los ensayos de validación del método pirométrico.

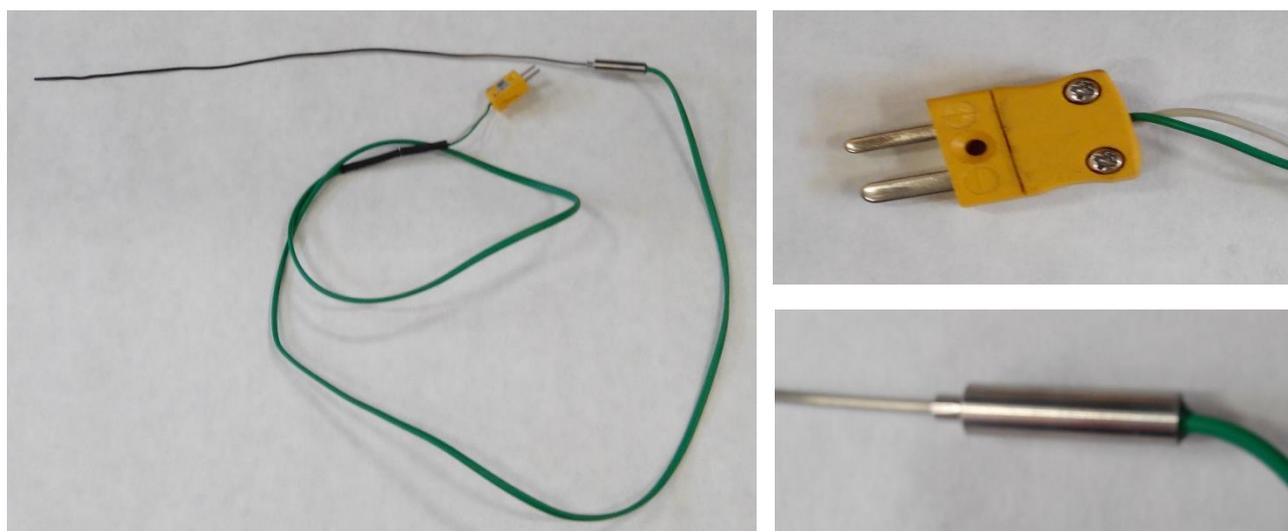


Figura 3-6: Termopares usados en los ensayos de calibración

- **Registrador de datos**

El receptor de datos Picolog USB TC-08 consiste en una caja registradora con ocho puertos de entrada, donde se conectan los termopares usados en los ensayos. La salida, con una conexión USB, es procesada por la aplicación que acompaña al dispositivo en un ordenador. Dicha aplicación, además del grabado de los distintos datos, permite la visualización de éstos en tiempo real en forma de gráfica y de tabla. La figura 3-7 muestra una imagen de este dispositivo.



Figura 3-7: Picolog USB TC-08

- **Videocámara digital**

La videocámara utilizada en los ensayos es una JVC Everio HD –Figura 3-8-, 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 3-8: JVC Everio HD

- **Rotámetro**

Los rotámetros son instrumentos utilizados para medir caudales, tanto de líquidos como de gases que trabajan con un salto de presión constante. Se basan en la medición del desplazamiento vertical de un “elemento sensible”, cuya posición de equilibrio depende del caudal circulante, además de a un cambio en el área del orificio de pasaje del fluido. En el caso del rotámetro instalado en la planta de laboratorio –que se puede observar en la Figura 3-9-, el instrumento cuenta con una válvula de aguja que permite mitigar el efecto de desequilibrio que producen una serie de pulsos procedentes de la instalación aguas arriba.



Figura 3-9: Rotámetro de la instalación de laboratorio

El rotámetro se encuentra calibrado a una presión de 1.25 bar y 20°C de temperatura, con un rango de medida comprendido entre 4 y 40 $\frac{l}{min}$.

En el Anexo V se detallan los cálculos básicos de adecuación del rotámetro al fluido utilizado en los ensayos de calibración -aire- y las tablas y gráficos necesarios para conocer qué velocidad de fluidización corresponde a qué caudal de operación.

- **Medidor de pérdida de presión Yocogawa**

El medidor de diferencia de presiones Yocogawa –Figura 3-10- determina la pérdida de carga entre dos puntos de la instalación, conectados previamente al dispositivo mediante conexiones rápidas.



Figura 3-10: Medidor Yocogawa

3.2. DISPOSICIÓN Y METODOLOGÍA DE ENSAYO

3.2.1 Ensayos Pirométricos

En estos ensayos se pretende determinar una metodología que permita obtener mejoras en la medida de la temperatura de partículas de combustible en el seno de un lecho mediante pirometría óptica con cámara digital. Evidentemente, las altas temperaturas a las que se va a operar (1100°C) requerirían de sistemas muy sofisticados de medición a la hora de comprobar los resultados hallados, si bien es cierto que los termopares, a pesar de los inconvenientes ya comentados en el Capítulo 2, suplen esta necesidad y son instrumentos más asequibles a nivel presupuestario. Por tanto, se decide partir de una versión más simple del objetivo planteado inicialmente; es decir, se propone la obtención de dicho método en condiciones de operación más simples: ensayos con un cuerpo negro estático. Si se mide la temperatura del cuerpo negro con termopares con la premisa de permanecer éste estático, se obvia el problema de limitación de movimiento que involucraba el uso de este tipo de instrumental. Conociendo la emisividad del cuerpo negro, igual a la unidad, será posible utilizar las Ecuaciones 2-1, 2-2, con lo que se obtendrán los parámetros de calibración necesarios para validar el método.

De esta forma, se plantea la realización de dos ensayos:

- Un ensayo de Calibración, en el cual se introducirá un cuerpo negro en el interior del horno de la instalación, sometiéndolo a un barrido de temperaturas (600-1100°C) que será registrado con la ayuda de un termopar en contacto con él. La exposición de dicho cuerpo a tales temperaturas provocará un cambio de color en su superficie, que será capturado por la cámara digital. Mediante la implementación de la ley de Planck en MATLAB y los datos de números digitales de los fotogramas obtenidos en el ensayo, que se corresponderán con las temperaturas características del color de la superficie del cuerpo negro incandescente, se obtendrán unos parámetros de calibración, cuyo desarrollo se detalla en el Anexo I.

- Un ensayo de validación, realizado en las mismas condiciones que el anterior, en el que, con los parámetros de calibración obtenidos anteriormente, se introducirán los nuevos fotogramas derivados de este ensayo. Las temperaturas que proporciona la aplicación de MATLAB con esos parámetros hallados deben corresponderse a las registradas por el termopar en este nuevo ensayo.

La metodología seguida es la siguiente:

En primer lugar, es primordial determinar una configuración de la videocámara que se mantenga constante a lo largo de las pruebas realizadas. Para ello se aconseja prescindir de la función automática de la cámara y desactivar la ganancia de la misma.

El montaje experimental de los ensayos, tal y como se muestra en el esquema de la figura 3-11, consiste en el horno eléctrico, que cuenta con una ventana de cuarzo que permite visualizar los fenómenos que ocurren en su interior, emplazado en una habitación totalmente oscura, aislada de la luz exterior mediante pliegos de cartón adheridos a las ventanas exteriores. Es necesario y primordial que la habitación se encuentre sumida en la mayor oscuridad posible, pues se conseguirá prevenir que cualquier perturbación lumínica pueda interferir en la adecuada actuación del sensor de la cámara.

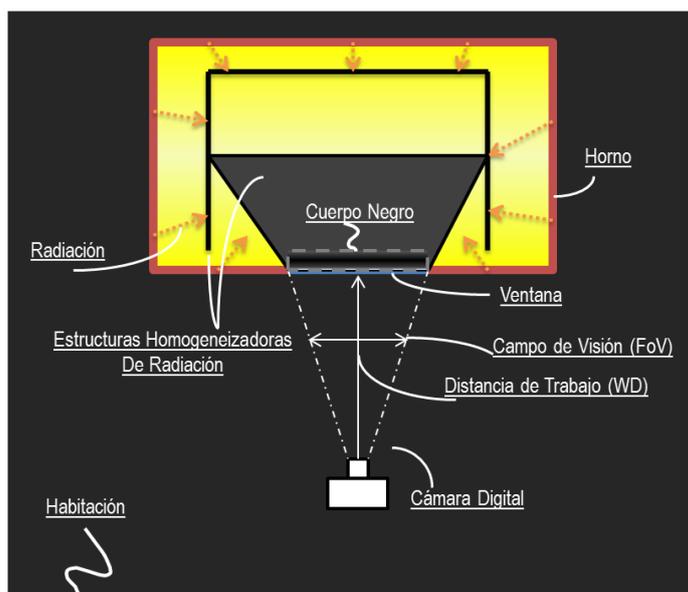


Figura 3-11 Montaje experimental

Por otra parte, se requiere la introducción en el horno de las estructuras de homogeneización de la radiación descritas en el apartado anterior. Una vez instaladas, se

procede a la introducción del cuerpo negro objeto de estudio. En este caso, dicho cuerpo consiste en una chapa de acero 304 cubierta previamente con varias capas de una pintura negra refractaria Flameproof 1100°C (ver Anexo VI), lo que permite la asunción de cuerpo negro perfecto.

Por otra parte, es necesario el registro de la temperatura de la chapa de metal durante la realización del ensayo. Para tal efecto, al necesitar realizar medidas de temperatura mediante termopares, se han practicado en la chapa varios orificios de tres milímetros de profundidad en aras de evitar medidas anómalas de temperatura, por el efecto observado y comentado previamente en el Anexo IV. El cuerpo negro objeto del ensayo, que se puede visualizar en la figura 3-12, se coloca en íntimo contacto con la cara interna del cuerpo delantero del horno, de tal manera que, a través de la ventana de cuarzo, sólo se distingue su superficie negra. De esta forma se garantiza que toda la radiación emitida a través de la ventana proviene de dicha superficie.



Figura 3-12: Cuerpo negro usado en los ensayos de calibración/validación

Una vez introducido un termopar en la chapa de estudio, se cierra la cámara del horno y se pone éste en funcionamiento. Una vez se alcanza la temperatura de 600°C, que es la temperatura a partir de la cual comienza a observarse un cambio en la luminosidad procedente del cuerpo incandescente, se oscurece la habitación y comienza a grabarse el vídeo desde una posición invariable y con un zoom fijado. En el caso ensayado la superficie vista por la cámara es de 3.5x9 cm² (ver figura 3-13).



Figura 3-13: Región vista por el sensor de la videocámara

Se actúa de esta manera, restringiendo la región descubierta de la ventana, debido a que el termopar insertado en el cuerpo negro se encuentra aproximadamente en el centro de la región mostrada, por lo que la medida por parte del termopar se corresponderá en mayor grado a la de la región seleccionada que a la de una región mayor y, por tanto, más lejana del punto de colocación del termopar. Este efecto se explica conociendo que existe un gradiente de temperaturas en el horno de $1^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ en dirección vertical desde el centro geométrico de la ventana.

La distancia entre la superficie negra y el objetivo de la cámara (WD) es de 95 centímetros, con un campo de visión (FOV) –ángulo bajo el que el objetivo de la videocámara captura la escena– de 20° .

Es importante, para garantizar la bondad del experimento, que se comience a registrar los datos en la aplicación PicoLog en el mismo momento en el que se acciona la grabación del vídeo. Esto ocurre debido a que el vídeo se procesa posteriormente en su conversión a formato imagen a razón de un fotograma por segundo –se obtiene una imagen de cada segundo del vídeo durante toda su duración- y el registro de las medidas del termopar en PicoLog se realiza también a una medida de temperatura por segundo. Por tanto, para que las medidas del termopar correspondan exactamente con la temperatura de la superficie negra incandescente mostrada por los fotogramas obtenidos desde el momento de registro del vídeo, ambos dispositivos –cámara y PicoLog- deben comenzar a grabar a la vez. Una vez alcanzado el punto de consigna (1100°C), aplicando una rampa máxima de $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ por

motivos de integridad de la ventana de cuarzo, se para la grabación y se procede a tratar el vídeo realizado.

Una vez abierto el vídeo en una aplicación de tratamiento digital, como por ejemplo Adobe Premiére, se guarda el vídeo como fotografía –para su posterior tratamiento en MATLAB- a razón de 1fps. Por tanto, se generarán tantas imágenes como segundos de duración tenga el vídeo. Estas imágenes del cuerpo incandescente se corresponderán con los datos de temperatura del mismo guardados por cada segundo por el registrador PicoLog en el PC, pues, como se ha insistido anteriormente, las grabaciones tanto de la cámara como del registrador de datos comenzaron en el mismo instante.

Ejemplos de los fotogramas obtenidos en el ensayo se muestran en la Figura 3-14, correspondiente a distintos instantes de tiempo - y por tanto de temperaturas – donde se aprecian las distintas tonalidades alcanzadas por el cuerpo negro de estudio. En la Tabla 3-1 se presentan los valores de los números digitales asociados a cada fotograma.

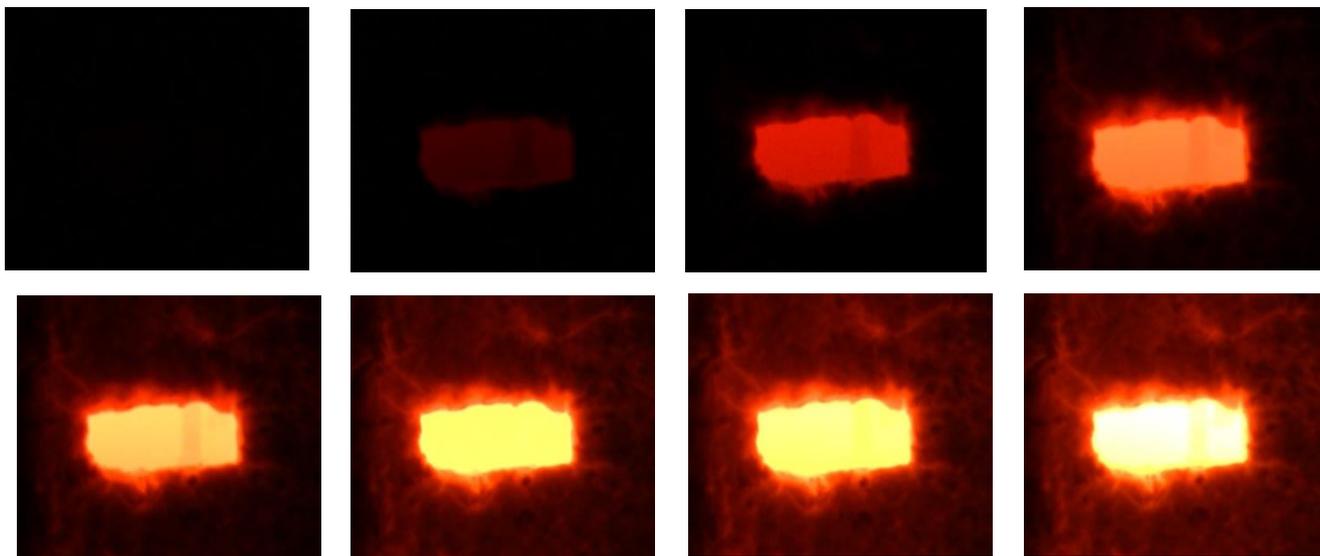


Figura 3-14: Fotogramas obtenidos a partir de los ensayos de calibración

Fotografía	Temperatura (°C)	DN RED	DN GREEN	DN BLUE
1	620	2	0	0
2	699	53	0	0
3	807	213	21	0
4	899	255	127	53
5	929	255	204	97
6	970	255	255	111
7	987	255	255	128
8	1020	255	255	218

Tabla 3-1: Temperaturas y números digitales correspondientes a las figuras 2-9 y 2-10

Como se ha comentado, se requiere un segundo ensayo –de validación- en el que los parámetros de calibración obtenidos deberán predecir las temperaturas del cuerpo negro correspondientes a cada fotograma originado en el nuevo ensayo; es decir, las curvas de calibración obtenidas mediante MATLAB para P1C y para P2C son validadas en otro ensayo en las mismas condiciones del ensayo de calibración.

En este momento se siguen desarrollando diferentes ensayos partículas de char para probar y mejorar la capacidad del método descrito, esta vez con combustible.

Dichos ensayos comprenden la calibración, en lugar de con un cuerpo negro, con partículas de char propiamente dichas.

El trabajo con dichas partículas es ciertamente engorroso, pues las partículas suelen quebrarse y si están insertadas en termopares, las dilataciones de éstos durante los calentamientos provocan que sufran variaciones de posición. Pero es condición necesaria que la imagen mostrada en el área de referencia que se toma en los fotogramas generados permanezca invariable. Para ello se dispone de una pequeña estructura –mostrada en la Figura 3-15 - diseñada como soporte de las partículas para evitar posibles desprendimientos del termopar y movimientos de la misma que dificultarían el postprocesado de los resultados. Además, se han practicado varios orificios en dicha estructura para facilitar la maniobra con termopares finos (0.5-0.75 mm). Dichos termopares, una vez calentados, se fragilizan

extremadamente y no es conveniente maniobrarlos en demasía. Los termopares, entonces, se introducen por los orificios y se consigue mantenerlos en la posición requerida sin necesidad de extraerlos una vez concluidos los ensayos.



Figura 3-15: Estructura soporte de partículas

Una vez halladas las curvas de calibración con las partículas de char, se estaría en condiciones de realizar ensayos, con las mismas condiciones de los ensayos de calibración – distancia de trabajo, campo de visión, zoom de la videocámara -, sin ser necesario el uso de termopares. En ese caso se instalaría al reactor de cuarzo y se añadiría el lecho. Una vez fluidizara el lecho a alta temperatura, se podrán alimentar partículas de carbón o char (notar que si se añade carbón aparecerán llamas) a las que se podrá seguir la trayectoria y calcular el campo de temperatura una vez grabado el vídeo y postprocesados los fotogramas. En la Figura 3-16 pueden apreciarse varias imágenes de un ensayo de prueba de materiales.

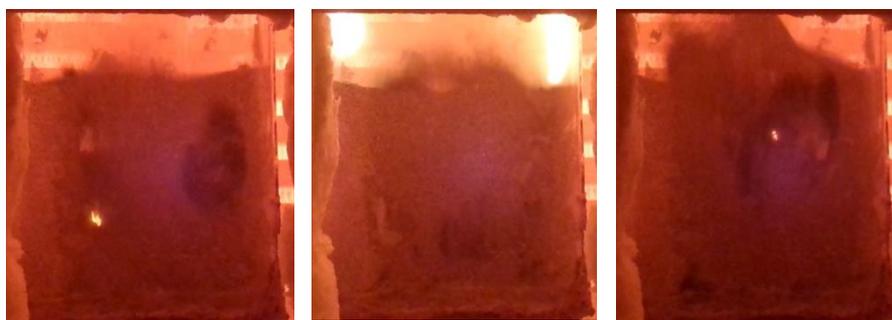


Figura 3-16: Fotogramas generados en ensayo de prueba de materiales

Para consultar la metodología seguida en cuanto a generación de char de los distintos tipos de combustible considerados y sus peculiaridades, consúltese el Anexo VII.

3.2.2. Ensayos de Caracterización Fluidodinámica del equipo del reactor

- **Pérdida de carga en el distribuidor**

Para la recogida de los datos experimentales se procede a abrir la válvula manorreductora de alimentación de aire y a medir la pérdida de carga que sufre el distribuidor mediante un medidor de pérdida de carga Yocogawa, conectado a una toma de presiones instalada en el tubo destinado para tal efecto del lateral del distribuidor. Mediante las Ecuaciones 2-14 y 2-15, se determina la pérdida de carga en el plato.

- **Pérdida de carga en el lecho**

Se pretende a continuación determinar las curvas que relacionan la pérdida de carga del lecho con la velocidad de fluidización ensayada. Para ello, es necesaria la instalación del reactor de cuarzo apoyando éste sobre el distribuidor e insertándolo en la ranura que el colector posee para tal efecto. Una vez hecho esto se sellan con masilla refractaria Wurth las uniones entre las piezas de metal – distribuidor y colector – y el reactor de cuarzo en aras de evitar cualquier fuga del material que compone el lecho. Nótese que este sellado es de vital importancia en los casos en los que se vaya a trabajar en caliente, pudiendo sustituirse la masilla refractaria por cualquier material de sellado – silicona, cintas adhesivas... - en el caso de que se pretenda determinar la curva en frío.

Se han ensayado dos alturas distintas de lecho, $H=10\text{cm}$ ($m=500\text{g}$) y $H=15\text{cm}$ ($m=750\text{g}$), de bauxita, con granulometría comprendida entre $250\mu\text{m}$ y $500\mu\text{m}$.

Del mismo modo, se han realizado dos barridos aumentando el caudal de aire circulante y otros dos disminuyendo el caudal de aire, anotándose la pérdida de carga medida por el instrumento Yocogawa.

En el Anexo VIII se procede a una implementación del modelo del reactor en ANSYS FLUENT como comprobación de los resultados obtenidos.

- **Determinación de pérdida de masa**

En la realización del ensayo, se ha calculado la pérdida de masa de un lecho de bauxita con una granulometría comprendida entre 250-500 μm . A su vez, se han ensayado tres alturas distintas de lecho: $H=10, 15$ y 20 cm.

La velocidad empleada para la realización del experimento se ha elegido como $u=u_{\text{arr}}$, siendo u_{arr} la velocidad a partir de la cual se empieza a producir arrastre, determinada en ensayos previos, que puede consultarse en el siguiente capítulo de resultados del presente proyecto.

La duración de los ensayos se toma de 30 minutos de operación a la velocidad de fluidización explicitada anteriormente.

Cada altura de lecho se ensaya un total de tres veces y se extrae y se renueva el lecho tras cada ensayo.

Una vez abierta la toma de aire, se procede a medir la pérdida de carga en el lecho (la total marcada por el instrumento de medida menos la del distribuidor en el caudal de operación) al comienzo del ensayo. Una vez concluido el tiempo anteriormente anotado, se mide la pérdida de carga en el lecho al final del experimento. Se determina la pérdida de masa como:

$$\Delta m = \frac{\Delta(\Delta P)[\text{mbar}] * 100 * 0.018 * 0.18}{9.81} \quad \text{Ec. 3 - 1}$$

La limitación de este método reside en la sensibilidad de los instrumentos de medida de pérdida de carga. Dado que, en este caso, 1 mbar corresponde a 33 g de lecho y las cantidades de lecho empleadas, correspondientes a las diferentes alturas ensayadas, son de 500, 750 y 1000 g, respectivamente, el error cometido debido a la sensibilidad puede ser inaceptable.

Por esta razón se procede también a realizar dos pesadas del lecho, previa y posterior al ensayo, en una balanza de precisión. La diferencia entre ambas pesadas será la pérdida de masa que se desea conocer.

4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN. DISCUSIÓN.

4.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MÉTODO PIROMÉTRICO.

El ensayo se realizó grabando un vídeo de la evolución cromática de la superficie del cuerpo negro entre los 600°C y 1100°C. Los números digitales (DN) obtenidos se muestran en la Figura 4-1 para las bandas espectrales roja y verde. Se observa que mayores valores de temperatura corresponden con mayores valores de DN. Dado que la radiación emitida en la banda espectral roja es mayor que en la verde, el número digital rojo se satura (alcanza el nivel 255) antes que el verde.

La relación entre la temperatura de la superficie, T_{bs} , y el cociente entre los números digitales rojo y verde (DN_r/DN_g) se muestra en la Figura 4-2. Dicho cociente alcanza un máximo, puesto que se experimenta un mayor crecimiento del DN_{red} que del DN_{green} a temperaturas T_{bs} menores que 700°C. El ajuste de los resultados del ensayo de calibración, calculado a través de MATLAB, proporciona la relación $T_{bs} - DN_k - \beta_k$. La Tabla 4-1 presenta los coeficientes de las curvas de calibración -Ecuaciones 4-1 y 4-2-.

	P2C	P1C-RED	P1C-GREEN
α	-0.0216	0.1711	0.1194
γ	-0.7157	-1.1361	-0.9128
δ	3.1148	-5.0462	-5.4373
R^2	0.9998	0.9464	0.9775

Tabla 4-1: Coeficientes de las curvas de calibración

$$\ln(\beta_{rg}) = \alpha_{P2C} \ln\left(\frac{DN_r}{DN_g}\right)^2 + \gamma_{P2C} \ln\left(\frac{DN_r}{DN_g}\right) + \delta_{P2C} \quad \text{Ec. 4-1}$$

$$\ln(\beta_k) = \alpha_{P1C} \ln(DN_k)^2 + \gamma_{P1C} \ln(DN_k) + \delta_{P1C} \quad \text{Ec. 4-2}$$

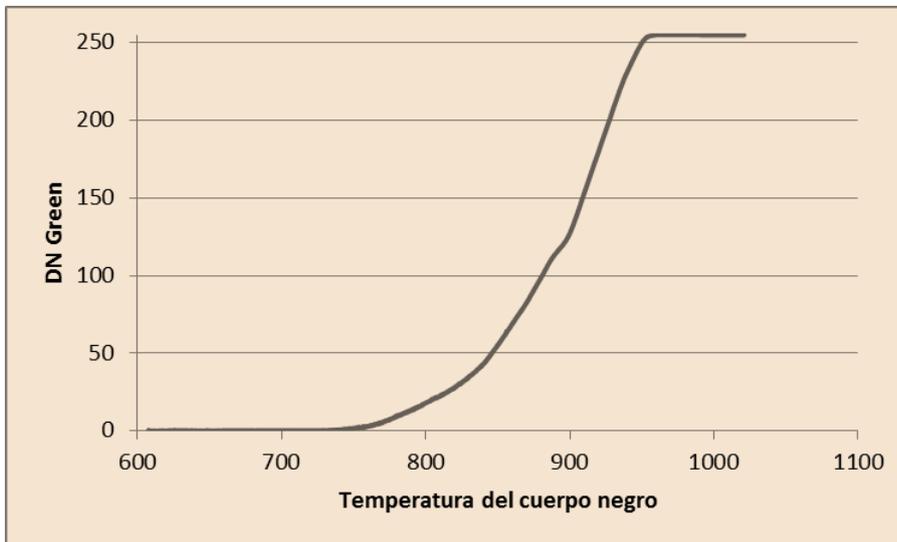
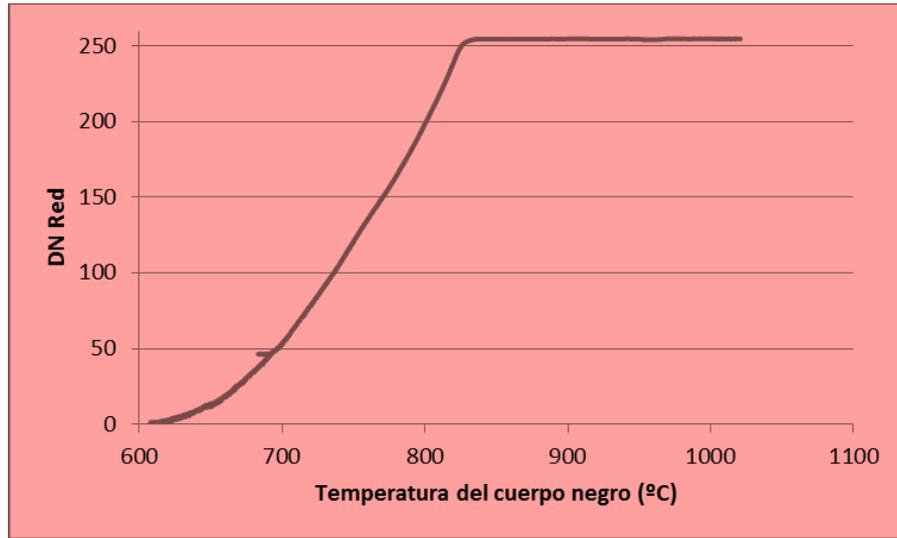


Figura 4-1 Números Digitales Rojo y Verde obtenidos en el ensayo de calibración

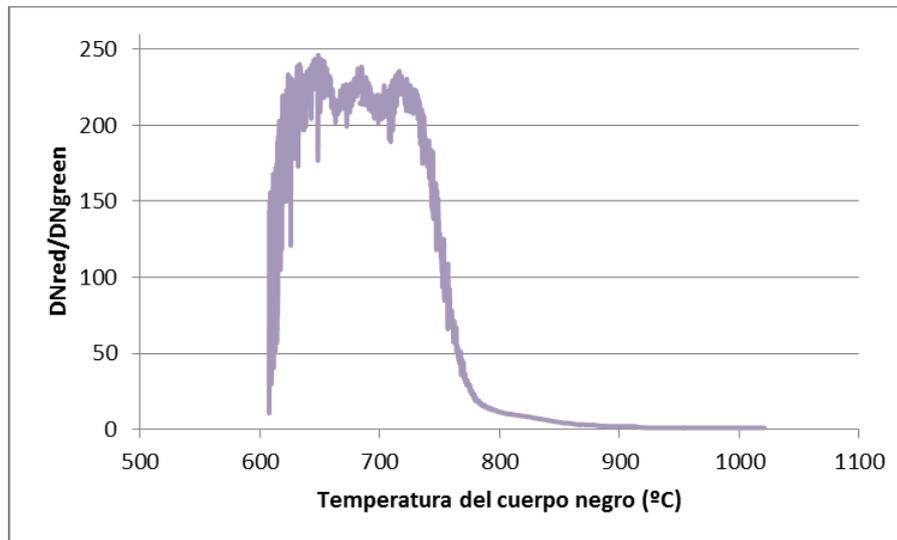


Figura 4-2 Cociente entre números digitales rojo y verde – Temperatura del cuerpo negro

El resultado del ajuste permite calcular la temperatura de la superficie del cuerpo negro a partir de las imágenes resultantes del video grabado en el ensayo de validación. La Figura 4-3 muestra la mejora en la predicción de la temperatura por parte de la P1C-red frente a la P2C para el rango (650 – 825)°C. Para temperaturas superiores a 825°C, el número digital rojo alcanza su valor máximo y los píxeles se saturan. Por tanto, se concluye que la curva P1C-RED no se puede utilizar para la medición de la temperatura para radiaciones mayores a la indicada anteriormente. Se observa que, para temperaturas mayores a la indicada, la curva P1C-GREEN comienza a ser útil para las mediciones con una precisión más que razonable.

De la Figura 4-3 se desprende, igualmente, que el error producido en la predicción de la temperatura por parte de la curva P2C por debajo de 725°C es inaceptable. Esto es debido a que el sensor comienza a detectar suficiente radiación procedente de la banda espectral verde a temperaturas mayores que 725°C.

Por el contrario, se aprecian similares precisiones en la medida por parte de las curvas P1C-GREEN y P2C por encima de 825°C. Este comportamiento se debe a la saturación de los píxeles por parte de la radiación en la banda espectral roja, mientras que los números digitales asociados a la banda espectral verde continúan midiendo la radiación emitida a temperaturas más altas.

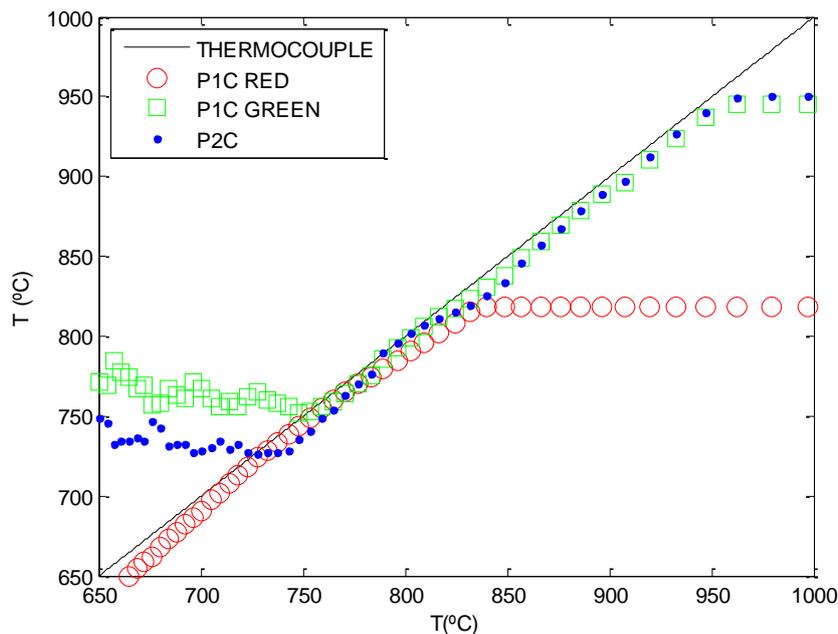


Figura 4-3: Comparación de la temperatura calculada usando P1C- RED/GREEN y P2C

Los resultados expuestos sugieren como mejor opción, para una combinación de ambos rangos de temperaturas – desde 650°C hasta 825°C, y desde 825°C hasta 1000°C –, usar las curvas de calibración de P1C-RED y P1C-GREEN para calcular la temperatura con una alta precisión en los rangos explicitados. El resultado se muestra en la Figura 4-4, donde se compara la sugerencia descrita con la predicción de temperatura dada por la curva P2C. Se concluye que, para temperaturas menores que 725°C, las curvas P1C otorgan una mejor predicción de la temperatura, mientras que para temperaturas mayores a la indicada, el resultado es similar utilizando ambas curvas.

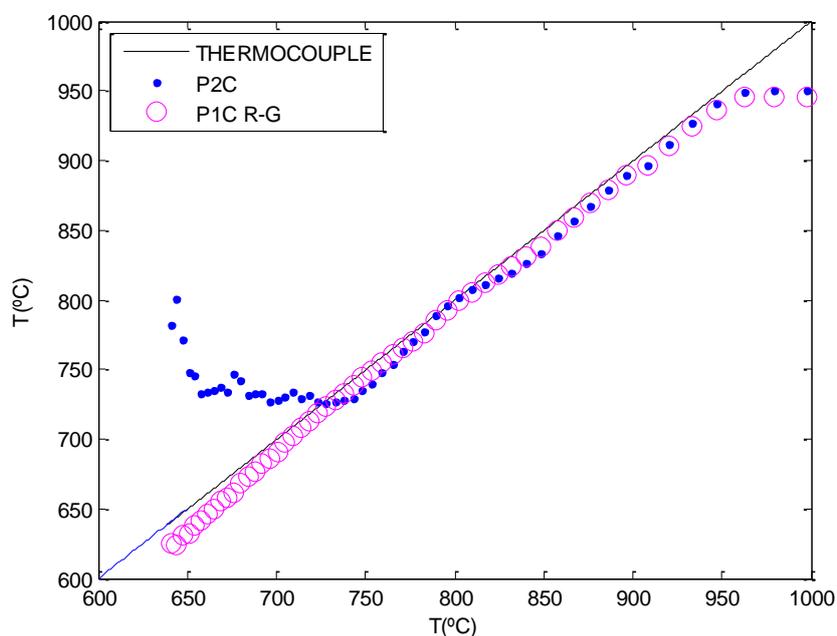


Figura 4-4: Precisión de P2C y P1C considerando el valor del número digital rojo

Para CFB el rango de temperatura más usual de medida es superior a 800°C, por lo que se podría llegar a pensar que la precisión de ambos métodos – P1C R-G y P2C – no difieren en demasía. Sin embargo, el valor concreto de 725°C hallado en los ensayos descritos depende de la videocámara (propiedades ópticas y electrónicas), así como de las condiciones de trabajo (WD, FOV). Para otras videocámaras y condiciones de operación ese valor de temperatura podría ser diferente al identificado en los ensayos desarrollados y, por tanto, el uso de P2C sería inconveniente incluso a 800°C. Por ese motivo, se considera que la P1C R-G proporciona un método más seguro y fiable que el proporcionado por la clásica P2C, y tan sólo se necesita una modificación en la implementación del método.

4.2. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FLUIDODINÁMICA DEL LECHO

4.2.1. Pérdida de carga en el distribuidor

- **Caracterización en frío (25°C)**

Según la Ecuación 2-15, la curva correspondiente a la pérdida de carga en el distribuidor en frío, una vez calculada la densidad del aire a 25°C, se puede hallar una vez conocido el parámetro C_{Dorif} . Este parámetro depende de la forma, diámetro y tortuosidad de los canales por los que circula el gas fluidificador, por lo que no parece poder hallarse con facilidad en el caso de la instalación que compete a este proyecto. Sin embargo, contando con los valores experimentales obtenidos, y asumiendo éstos como correctos, si se asegura una coincidencia entre las curvas teórica y experimental, el valor del parámetro C_{Dorif} se cifra en 1.37. Una representación de ambas curvas se encuentra en la Figura 4-5.

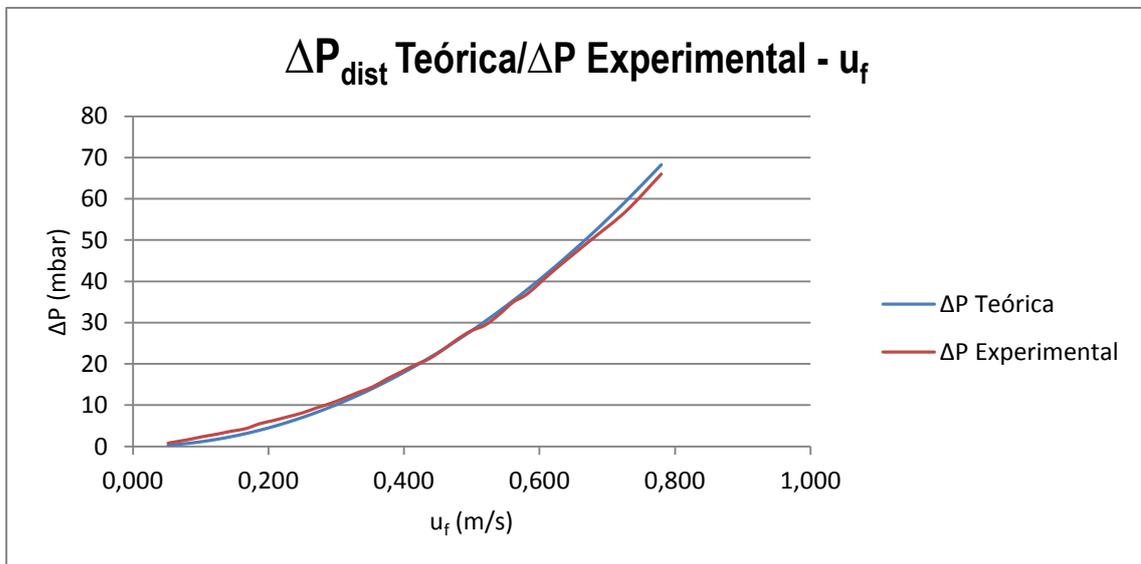


Figura 4-5: ΔP teórica y experimental del distribuidor Vs. Velocidad de fluidización a 25°C.

- **Caracterización en caliente (800°C)**

Procediendo de la misma forma que en el caso en frío, es decir, midiendo la pérdida de carga en el distribuidor para distintos caudales, se obtiene la curva representada en la Figura 4-6. Se comparan estos valores con los obtenidos con la Ecuación 2-15, también representados en la figura. El valor del coeficiente C_{Dorif} en esta ocasión se ha cifrado en $C_{Dorif} = 0,92$ tras un ajuste de la curva teórica con la experimental, tal y como se procedió en el caso en frío.

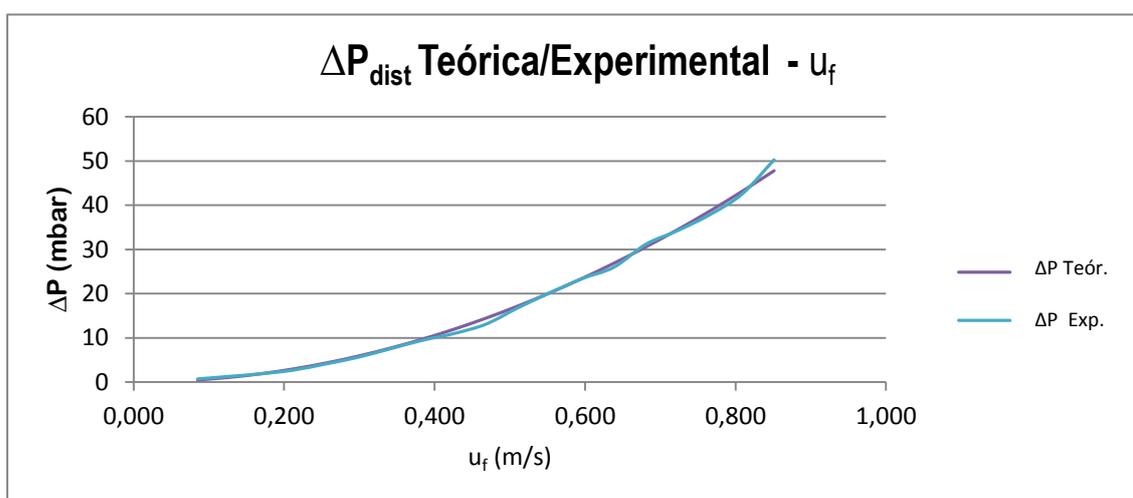


Figura 4-6: ΔP teórica y experimental del distribuidor Vs. Velocidad de fluidización, 800°C

En este caso la pérdida de carga en el distribuidor es menor que en el caso en frío, lo que puede parecer contradictorio, al tender los orificios de la placa a cerrarse por la acción del calor.

En primer lugar, el coeficiente C_{Dorif} , efectivamente, ha disminuido su valor con respecto al caso en frío, lo que provocaría un aumento de la pérdida de carga. Pero por otra parte, al aumentar la temperatura desde 25°C hasta los 800°C a los que se realiza el ensayo, la densidad del aire se hace manifiestamente menor (desde 1,14 kg/m³ hasta 0,33 kg/m³), lo que provoca que en el cómputo global de la ecuación 2-15 la pérdida de carga disminuya.

4.2.2. Pérdida de carga en el lecho

Se han ensayado dos alturas distintas de lecho, $H=10\text{cm}$ ($m=500\text{g}$) y $H=15\text{cm}$ ($m=750\text{g}$), de bauxita, con granulometría comprendida entre $250\mu\text{m}$ y $500\mu\text{m}$.

- **Caracterización en frío (25°C).**

Se presentan a continuación las Figuras 4-7 y 4-8, de pérdida de carga totales en los lechos de 10 y 15 cm, donde se aprecia la histéresis en la medida. La figura 4-9 representa la pérdida de carga en el lecho (pérdidas totales menos las del distribuidor) para ambas alturas ensayadas.

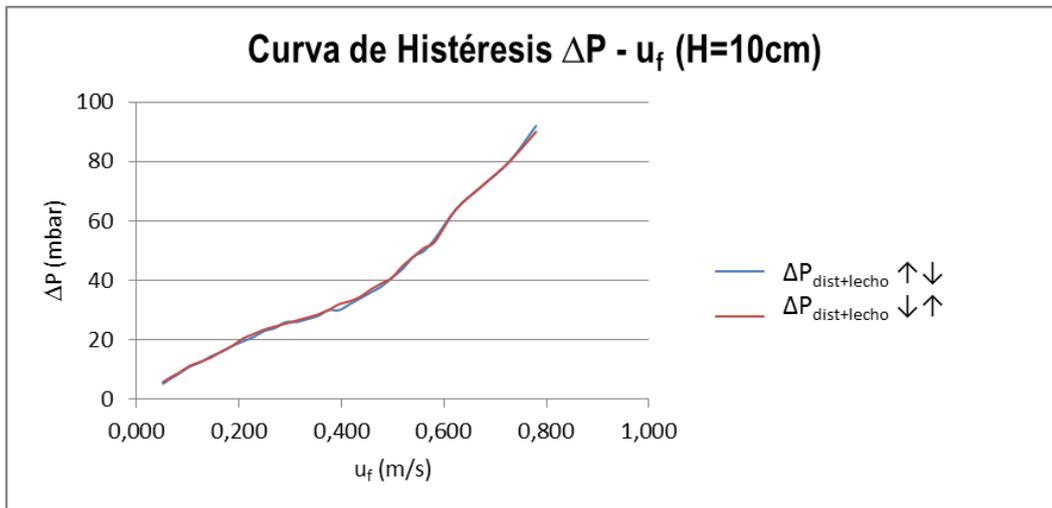


Figura 4-7: Curva de Histéresis ΔP Vs Velocidad de fluidización con $H=10\text{cm}$, 25°C

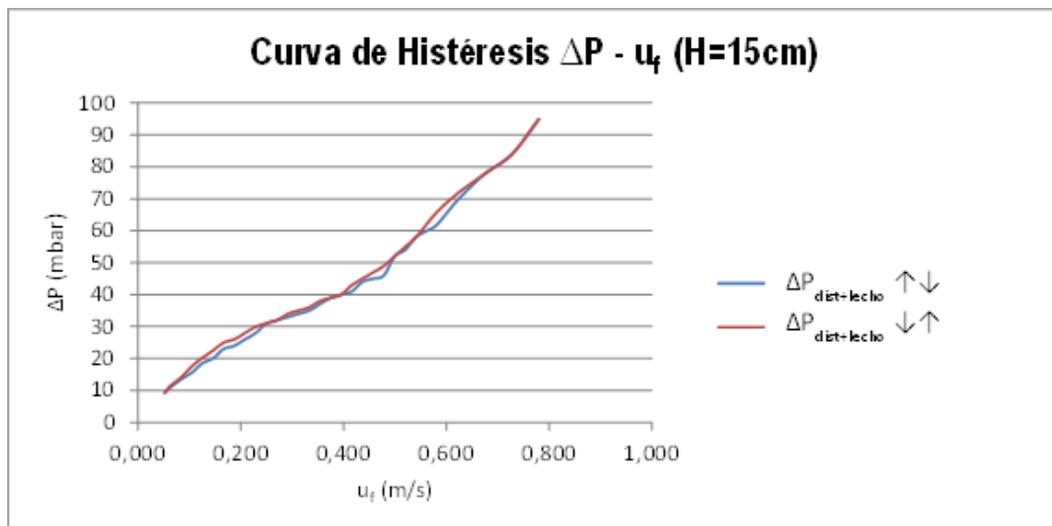


Figura 4-8: Curva de Histéresis Pérdida de carga Vs Velocidad de fluidización con $H=15\text{cm}$, 25°C

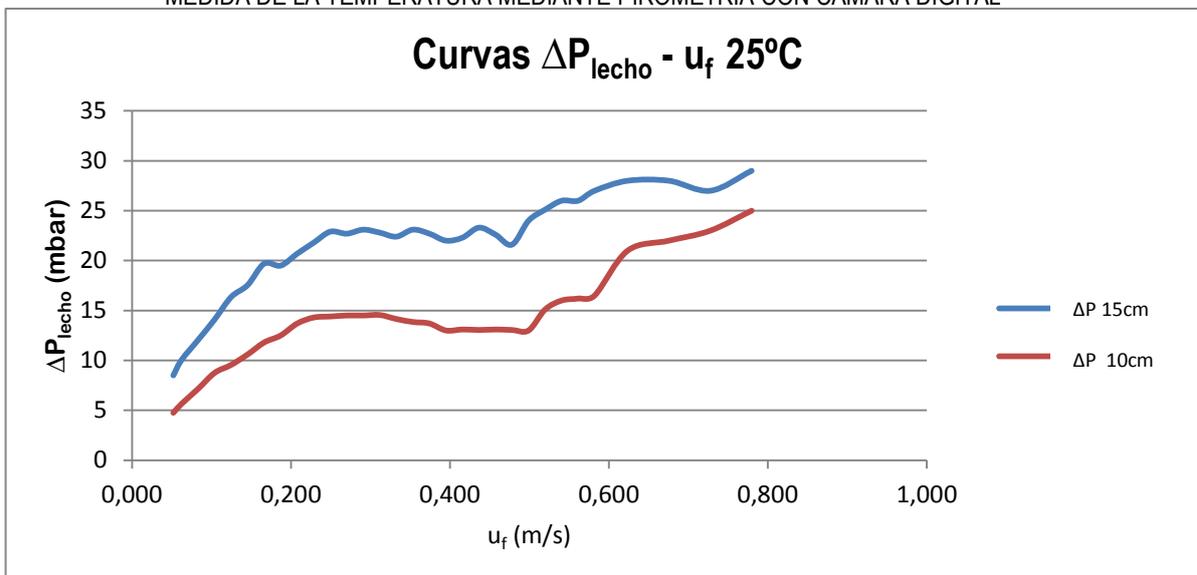


Figura 4-9: Pérdida de carga en los lechos de 10cm y 15 cm ensayados vs. Velocidad de fluidización 25°C

A la vista de esta última figura, se puede determinar la velocidad de mínima fluidización tomando el valor de la velocidad a partir del cual la pérdida de carga en el lecho se hace constante. Este valor resulta ser:

$$u_{minfl} = 0,23 \frac{m}{s}$$

Del mismo modo, puede determinarse la velocidad a partir de la cual comienza a existir arrastre de partículas, que corresponde con el valor de la velocidad a partir de la cual la pérdida de carga pierde el valor constante anteriormente citado y comienza a incrementar. Este valor se cifra en:

$$u_{arr} = 0,53 \frac{m}{s}$$

Como comprobación, y para muestra del tratamiento de reactores simples en aplicaciones de cálculo complejas, se han repetido los ensayos en la aplicación ANSYS FLUENT. Los resultados se encuentran en el Anexo VIII.

- **Caracterización en caliente (800°C)**

Se presentan a continuación las figuras 4-10, 4-11, de pérdida de carga totales en los lechos de 10 y 15 cm, donde se aprecia la histéresis en la medida. La figuras 4-12

representa la pérdida de carga en el lecho (pérdidas totales menos las del distribuidor), para ambas alturas ensayadas, respectivamente.

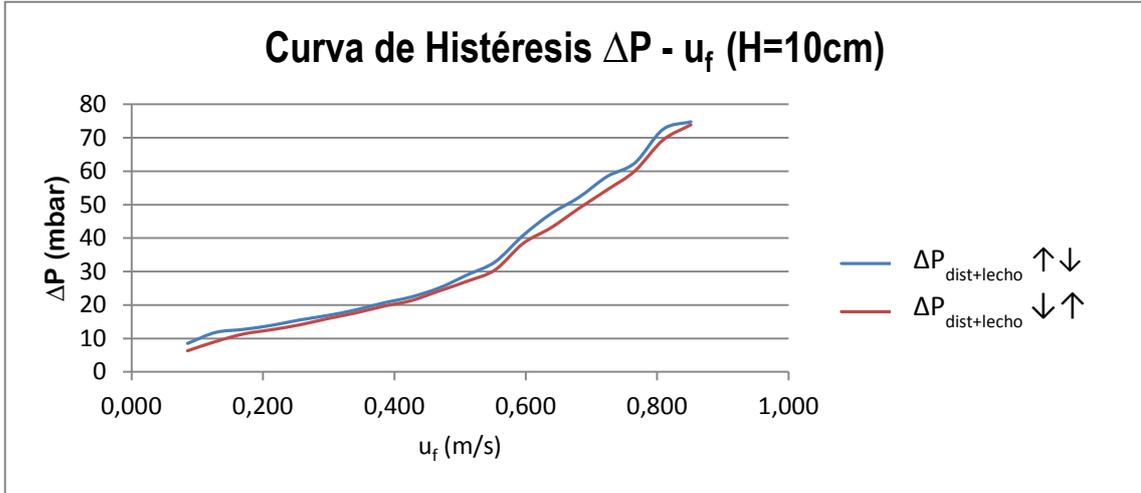


Figura 4-10: Curva de Histéresis Pérdida de carga Vs Velocidad de fluidización con H=10cm, 800°C

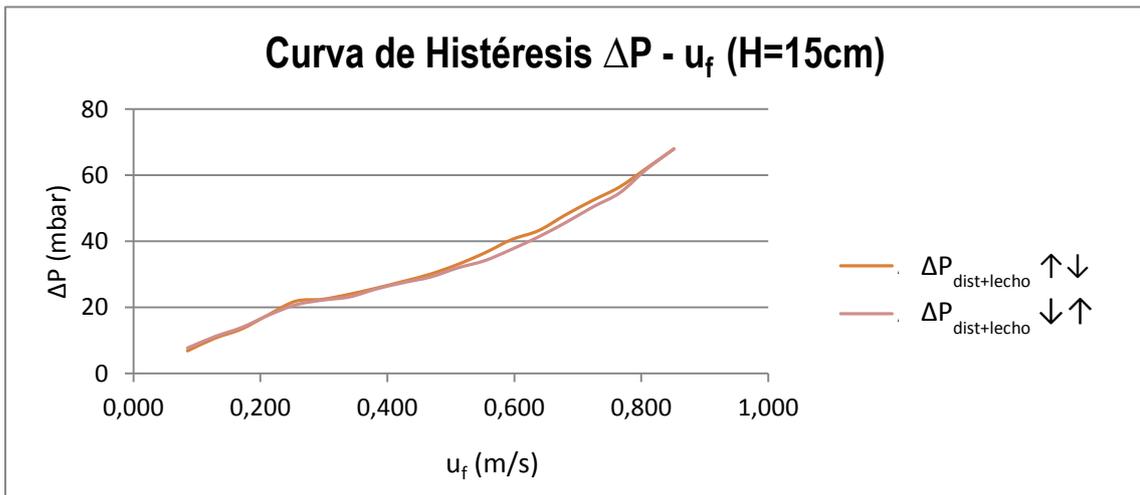


Figura 4-11: Curva de Histéresis Pérdida de carga Vs Velocidad de fluidización con H=15cm, 800°C

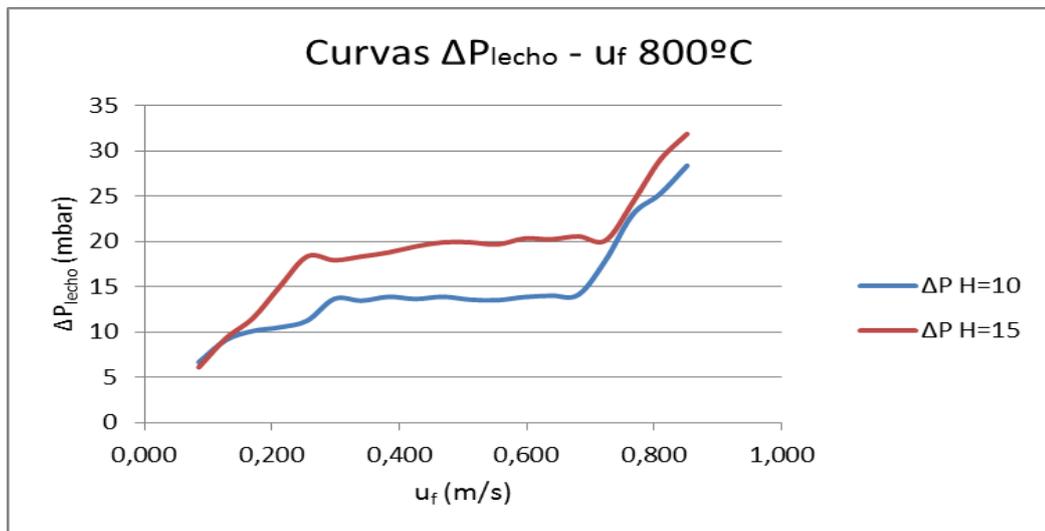


Figura 4-12: Pérdida de carga en el lecho de vs. Velocidad de fluidización, 800°C

Cabe destacar una peculiaridad referente a los ensayos a partir de los cuales se obtuvo las Figura 4-12. El ensayo con el lecho de 10 cm de altura se realizó con una muestra de bauxita de granulometría 250-500 μ m, con una mayor fracción de gruesos que la muestra con la que se realizó el ensayo del lecho de 15 cm de altura. Esta segunda muestra fue molida a partir de una bauxita de mayor granulometría. El molino del laboratorio proporciona un producto que, a pesar de estar incluido en las especificaciones de granulometría indicadas anteriormente, tiene un mayor porcentaje de finos que la primera muestra con la que se realizaron los ensayos.

4.2.3. Pérdida de masa

Los resultados obtenidos, mediante la Ecuación 3-1 y mediante pesadas, son los siguientes:

- H=10 cm

Ecuación: $\Delta m_1=11.8$ g; $\Delta m_2=16.43$ g; $\Delta m_3=15.7$ g

Pesadas: $\Delta m_1=7.1$ g; $\Delta m_2=7.6$ g ; $\Delta m_3=7.6$ g

- H=15 cm

Ecuación: $\Delta m_1=19.9$ g; $\Delta m_2=26.42$ g; $\Delta m_3=19.7$ g

Pesadas: $\Delta m_1=12.3$ g; $\Delta m_2=11.90$ g; $\Delta m_3=12.6$ g

- H=20 cm

Ecuación: $\Delta m_1=122.3$ g; $\Delta m_2=135.3$ g; $\Delta m_3=120.7$ g

Pesadas: $\Delta m_1=26.1$ g; $\Delta m_2=25.3$ g; $\Delta m_3=23.9$ g

Teniendo en cuenta las pesadas experimentales, tras media hora de operación a la velocidad a la cual comienza a existir arrastre, las pérdidas de masa, en porcentaje para cada altura de lecho ensayada son:

- H=10 cm $\rightarrow \Delta m \cong 1.47\%$
- H=15 cm $\rightarrow \Delta m \cong 1.61\%$
- H=20 cm $\rightarrow \Delta m \cong 2,51\%$

Puede observarse que, a una mayor altura de lecho, se produce el arrastre de las partículas con mayor facilidad.

REFERENCIAS

- [1] T. Wal, R. Stanger, S.Santos. The current state of oxy-fuel technology: demonstrations and technical barriers. Oxyfuel 2nd Combustion conference.
- [2] J. Saastamoinen, A. Tourunen, T. Pikkarainen, H. Hasa, J. Miettinen, T. Hyppanen, K. Myohanen. Fluidized bed combustion in high concentrations of O₂ and CO₂. Proc. 19th Int. Conf. Fluid. Bed Combust. 2006, No. 49.
- [3] F. Scala, R. Chirone. Combustion of single coal char particles under fluidized bed oxyfiring conditions. Industrial & Engineering Chemistry Research, 49(11):1029-11036 (2010).
- [4] F. Scala, R. Chirone. Fluidized bed combustion of single coal char particles at high CO₂ concentration. Chemical Engineering Journal, 165:902-906 (2010).
- [5] Oxi-Combustión y Oxi-Gasificación en Lecho Fluidizado: Estudio de la Conversión del Carbonizado para el Diseño y Optimización de Equipos de Captura de CO₂ de Segunda Generación (ENE2012-37999)
- [6] R Hernberg, J Stenberg. Simultaneous in situ measurement of temperature and size of burning char particles in a fluidized bed furnace by means of fiberoptic pyrometry. Combust Flame. 1993: 95:191– 205.
- [7] Xavier Elías Castells (2005). La combustión. Factores endógenos y exógenos, en Tratamiento y valorización energética de residuos, Ediciones Díaz de Santos.
- [8] R Hernberg, J Stenberg. Simultaneous in situ measurement of temperature and size of burning char particles in a fluidized bed furnace by means of fiberoptic pyrometry. Combust Flame. 1993: 95:191– 205.
- [9] L. zhang, E. Binner, Y. Qiao, Chun-Zhu. Li, High-speed Camera Observation of Coal Combustion in Air and O₂/CO₂ Mixtures and Measurement of Burning Coal Particle Velocity. Energy Fuels 2010, 24 pag 29-37.

[10] L. zhang, E. Binner, Y. Qiao, Chun-Zhu. Li, In-situ diagnostics of Victorian brown coal combustion in O_2/N_2 and O_2/CO_2 mixtures in drop-tube furnace.

[11] L. zhang, E. Binner, Y. Qiao, Chun-Zhu. Li, Sankar Bhattacharya and Yoshihiko Ninomiya. Experimental Investigation of the Combustion of Bituminous Coal in Air and O_2/CO_2 Mixtures: 1. Particle Imaging of the Combustion of Coal and Char. Energy Fuel 2010, 24, 4803-4811.

[12] Macêk, A. Bulik, C. Direct measurement of char-particle temperatures in fluidized bed combustors. Twentieth Symposium (Internacional) on Combustion Institute, 1984/pp. 1223-1230.

[13] Joutsenoja, T. Heino, P. Hernberg, R. and Bonn, B . Pyrometric Temperature and size Measurements of Burning Coal Particles in a Fluidized Bed Combustor Reactor. Combustion and flame 118:707–717 (1999).

[14] Joutsenoja, T. Pyrometric thermometry and sizing of fuel particle combustion. Tampere 1998.

[15] L. zhang, E. Binner, Y. Qiao, Chun-Zhu. Li, High-speed Camera Observation of Coal Combustion in Air and O_2/CO_2 Mixtures and Measurement of Burning Coal Particle Velocity. Energy Fuels 2010, 24 pag 29-37.

[16] L. zhang, E. Binner, Y. Qiao, Chun-Zhu. Li, In-situ diagnostics of Victorian brown coal combustion in O_2/N_2 and O_2/CO_2 mixtures in drop-tube furnace.

[17] L. zhang, E. Binner, Y. Qiao, Chun-Zhu. Li, Sankar Bhattacharya and Yoshihiko Ninomiya. Experimental Investigation of the Combustion of Bituminous Coal in Air and O_2/CO_2 Mixtures: 1. Particle Imaging of the Combustion of Coal and Char. Energy Fuel 2010, 24, 4803-4811.

- [18] Grosshandler, W. L., The Effect of Soot on Pyrometric Measurements of Coal Particle Temperature. *Combustion and Flame*, 1984, 55, 59.
- [19] Winter, F. Prah, M. E. and Hofbauer, H. Temperatures in a fuel particles burning in a fluidized bed: The effect of drying, devolatilization, and char combustion. *Combust. Flame* 108:302 (1997).
- [20] Roscoe, J. C., Witkowski, A. R., and Harrison, D. The temperature of coke particles in fluidized combustor. *Trans. IChemE* 58:69 (1980)
- [21] Ross, I. B., Patel, M. S., and Davidson, J. F. The temperatures of burning carbón particles in fluidized beds. *Trans. IChemE* 59:83 (1981).
- [22] H.Lu, LT. Ip, A. Mackrory, L. Werrett, J. Scott, D. Tree, L. Baxter. Particle Surface Temperature Measurements with Multicolor Band Pyrometry. *AIChE Journal* (2009) , 55:243–255.
- [23] Yates, J. G. and Walker, P. R., 1978, *Proc Second Engng Foundation Conf*, Eds, J. F. Davidson and D. L. Keairns, Cambridge University Press, 241.
- [24] Lu H, Ip LT, Mackrory A, Werrett L, Scott J, Tree D, Baxter L, Particle surface temperature measurements with multicolor band pyrometry, *AIChE Journal* 55 (2009) p. 243–255.
- [25] Bu C, Leckner B, Chen X, Pallarès D, Liu D, Gómez-Barea A, Devolatilization of a single fuel particle in a fluidized bed under oxy-combustion conditions. Part A: Experimental results, *Combust Flame* (2014) (In press).
- [26] Zukowski W, Baron J, Bulewicz EM, Kowarska B, An optical method of measuring the temperature in a fluidized bed combustor, *Combust Flame* 156 (2009) p. 1445-1452.
- [27] Li D. Thermal image analysis using calibrated video imaging. Doctoral Thesis, University of Missouri-Columbia, Colombia, 2006.
- [28] Anatyshuk y Lukian: *Physics of thermoelectricity*. Institute of Thermoelectricity, 1998.

[29] Grace, J.R., "Contacting Modes and Behaviour Classification of Gas-Solid and Other Two-Phase Suspensions", Can. J. Chem. Eng., 64, 353-363 (1986).

[30] Pallarés, D., Díez, Pedro A., Johnsson, F. : "Experimental Analysis of Fuel Mixing patterns in a Fluidized Bed" The 12th International Conference on Fluidization - New Horizons in fluidization Engineering, 2007.

ANEXO I: DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIANTE PIROMETRÍA DE UNO Y DOS COLORES. MÉTODO DE CALIBRACIÓN.

La emitancia de un cuerpo ideal (cuerpo negro) se modela mediante la Ley de Planck

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

La emisividad de un cuerpo no ideal a una temperatura dada es:

$$e(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) e^o(\lambda, T) \quad (\text{AI-2})$$

Para temperaturas pertenecientes al rango (600, 1000)°C y longitudes de onda comprendidas en el rango visible (0.38, 0.7) μm , la ecuación AI-1 puede simplificarse al cumplirse que $\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) \gg 1$, por lo que la emisividad del cuerpo real puede ser expresada mediante:

$$e(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \quad (\text{AI-3})$$

Por tanto la irradiancia que abandona la superficie real, como la que se sitúa en la ventana del horno eléctrico, se puede modelar como:

$$j(\lambda, T) = \varepsilon_{rs}(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \quad (\text{AI-4})$$

AI.1. Pirometría aplicada a dos bandas espectrales o colores

Usando la EC. (AI-4) en dos longitudes de onda diferentes (rojo y verde, puesto que son más energéticas que la azul) en el espectro visible en el rango especificado de temperaturas:

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_r} \right)}{\ln\left(\frac{j(\lambda_r, T)}{j(\lambda_g, T)}\right) - \ln\left(\frac{\varepsilon_{rs}(\lambda_r, T)}{\varepsilon_{rs}(\lambda_g, T)}\right) - 5 \ln\left(\frac{\lambda_g}{\lambda_r}\right)} \quad (\text{AI-5})$$

El cociente $j(\lambda_r, T)/j(\lambda_g, T)$ puede ser estimado mediante los DN dados por el aparato electrónico:

$$\frac{j(\lambda_r, T)}{j(\lambda_g, T)} \approx \beta_{rg} \frac{DN_r}{DN_g} \quad (A1-6)$$

Introduciendo las Eqs. (A1-6) in (A1-5), la temperatura puede ser determinada como:

$$T_{P2C} = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_r} \right)}{\left(\ln(\beta_{rg}) + \ln\left(\frac{DN_r}{DN_g}\right) \right) - \ln\left(\frac{\varepsilon_{rs}(\lambda_r, T)}{\varepsilon_{rs}(\lambda_g, T)}\right) - 5 \ln\left(\frac{\lambda_g}{\lambda_r}\right)} \quad (A1-7)$$

A1.2. Pirometría aplicada a una banda espectral

Integrando Eq. (A1-4) en la banda espectral considerada $\Delta\lambda_k$

$$\int_{\Delta\lambda_k} j(\lambda, T) d\lambda = \int_{\Delta\lambda_k} \varepsilon_{rs}(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) d\lambda \quad (A1-8)$$

El primer miembro de la Eq. (A1-8) se puede estimar como

$$\int_{\Delta\lambda_k} j(\lambda, T) d\lambda \approx \beta_k DN_k \quad (A1-9)$$

El segundo miembro de la Eq. (A1-8) se puede simplificar

$$\int_{\Delta\lambda_k} \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_k T}\right) d\lambda \approx \Phi_k \varepsilon_{rs}(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda_k^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_k T}\right) \quad (A1-10)$$

La sustitución de las ecuaciones (A1-9) and (A1-10) en la ecuación (A1-8) proporciona la temperatura correspondiente a la pirometría de un color (P1C)

$$T_{P1C} = \frac{C_2}{\lambda_k \left[\ln\left(\Phi_k \frac{\varepsilon_{rs}(\lambda, T) C_1}{\lambda_k^5}\right) - (\ln(\beta_k) + \ln(DN_k)) \right]} \quad (A1-11)$$

Las ecuaciones (AI-7) y (AI-11) permiten determinar la temperatura de la superficie real, como la situada en la ventana del horno eléctrico usado en los ensayos mediante los parámetros de calibración: β_{rg} para P2C and β_k en el caso de P1C. Dichos parámetros pueden obtenerse de dos maneras diferentes:

AI. 3. Calibración mediante ajuste

Tratando las imágenes obtenidas del cuerpo negro a diferentes temperaturas y usando las expresiones Eq. (AI-12) para P2C, o Eq. (AI-13) en el caso de P1C y los números digitales proporcionados por los píxeles, se obtiene un valor del parámetro de calibración. Los puntos obtenidos, $[\ln(DN_r/DN_g) - \ln(\beta_{P2C})]$, o $[\ln(DN_k) - \ln(\beta_k)]$ se someten a un ajuste polinomial para las curvas de P2C y P1C, respectivamente. Los polinomios obtenidos contienen la información requerida, resultando:

$$\ln(\beta_{rg}) = C_2 \left(\frac{1}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_r} \right) + 5 \ln \left(\frac{\lambda_g}{\lambda_r} \right) - \ln \left(\frac{DN_r}{DN_g} \right) \quad (AI-12)$$

$$\ln(\beta_k) = \ln \left(\Phi_k \frac{C_1}{\lambda_k^5} \right) - \frac{C_2}{T_{bs} \lambda_k} - \ln(DN_k) \quad (AI-13)$$

AI. 4. Calibración mediante un área de referencia en la escena visualizada.

El segundo método para el cálculo del parámetro de calibración usa la región de referencia a una temperatura conocida en el campo de visión durante el ensayo. Por tanto, β_{rg} (P2C) y β_k (P1C) se calculan para cada fotografía generada en el ensayo. El parámetro de calibración se obtiene a través de las ecuaciones (AI-7) y (AI-11), y se particulariza para la temperatura del área de referencia y sus números digitales asociados. Después, se calcula la media para los parámetros pertenecientes a cada píxel de la región de referencia, y usados para interpretar esa misma fotografía.

ANEXO II: SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR PID 2416 DEL HORNO TV4/50/700/11

El correcto funcionamiento del horno TV4/50/700/11 (estrechamente relacionado con el éxito de los experimentos que se pretenden realizar) depende en gran medida de la capacidad de éste para establecer la temperatura en el punto de consigna deseado sin que existan grandes fluctuaciones una vez alcanzado el mismo. Para conseguir este objetivo, se procederá a la sintonización del controlador PID 2416 disponible. El objetivo de este documento es proporcionar los valores de sintonización del controlador que proporcionen una menor fluctuación de temperatura en el punto de consigna.

Tras varios ensayos, se extrajeron las siguientes conclusiones:

- En primer lugar, se obvia la función derivativa del controlador, por comprobarse experimentalmente que esta función retrasa la respuesta del sistema más de lo debido, alcanzándose en el punto de consigna bajadas de temperatura de hasta 30°C. Se ha comprobado que una función proporcional más una integral es la óptima en el control de la temperatura en el interior del horno.

- Introduciendo los valores $K_c=65$, $t_i=4$ s, $t_d=0$ s en ambos controladores PID disponibles (el primero representa el control del sistema en valores por encima del punto de consigna, y el segundo por debajo del mismo), se consigue:
 - Operando en un punto de funcionamiento de 800°C, se consigue establecer la temperatura del horno en un intervalo comprendido entre 792°C y 808°C.

 - Si el punto de funcionamiento es de 900°C, la temperatura del horno se encontrará comprendida entre 888°C y 905°C.

Cabe destacar que el ciclo oscilatorio de temperaturas (desde el extremo inferior al superior de los intervalos arriba explicitados) tiene una duración de 40 segundos en el primer caso analizado, y de 45 segundos en el segundo.

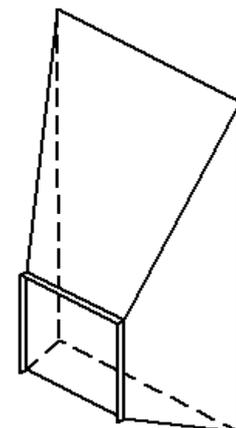
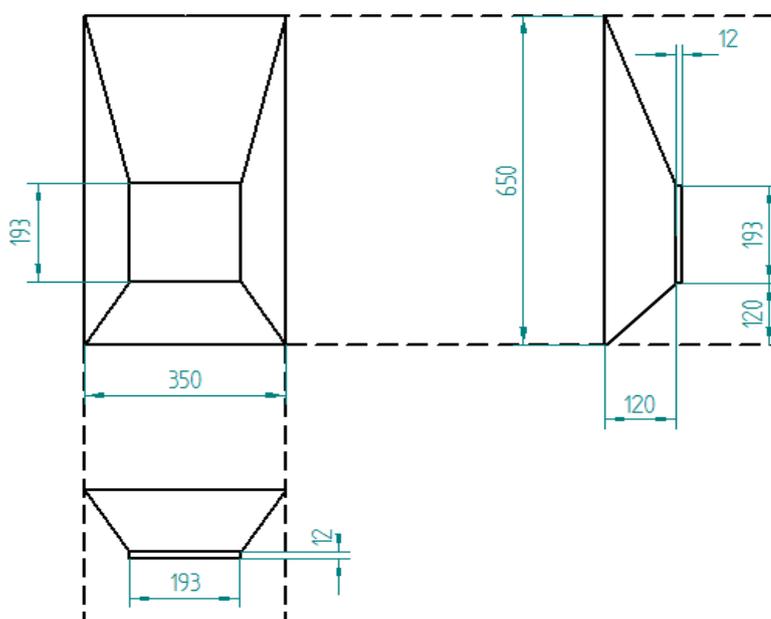
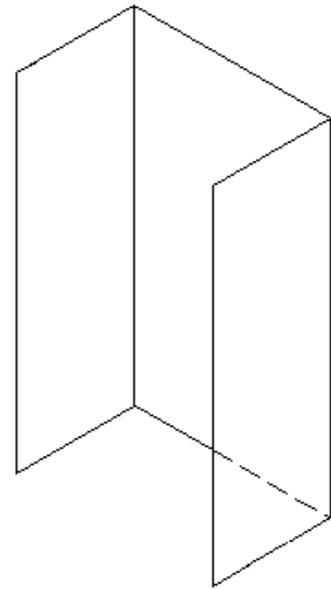
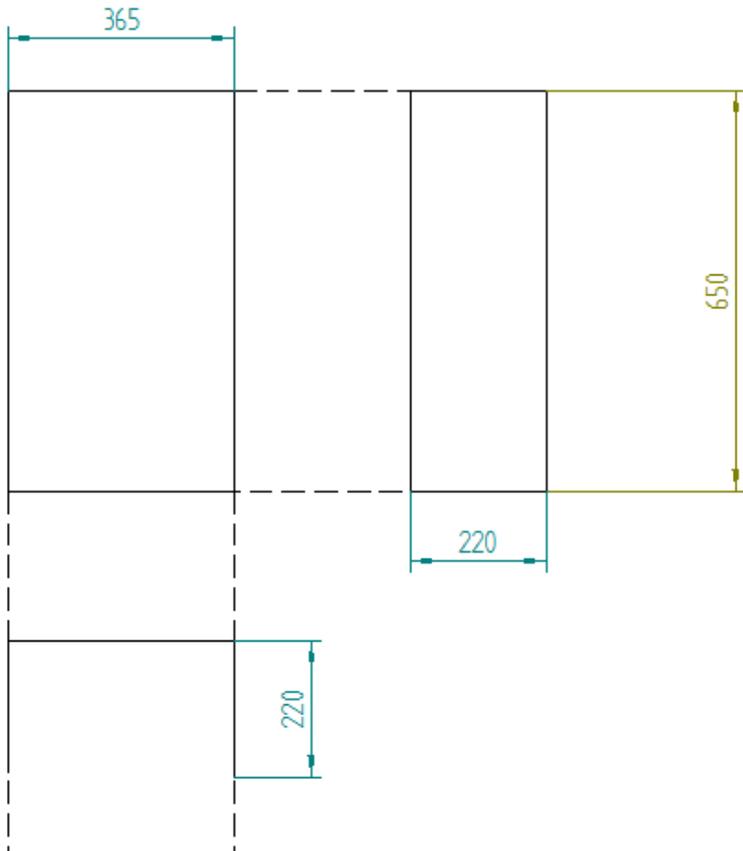
La razón por la cual la fluctuación de temperatura en el segundo caso es mayor que en el primero reside en que el intercambio de calor con el exterior a 900°C es, lógicamente, más rápido que a 800°C, por lo que la pérdida de temperatura del horno en la duración del ciclo a alta temperatura es mayor.

Del mismo modo, es necesario ajustar los niveles de Low y High Cutback del controlador a 5°C en aras de que no se produzcan bajadas ni subidas bruscas de temperatura. Menores valores de Cutback provocan que la velocidad de la respuesta del controlador sea tal que aumentan los rangos de fluctuaciones en el punto de consigna. Mayores valores de Cutback hacen la respuesta demasiado lenta, por lo que se consigue el mismo efecto que se acaba de describir.

Los valores antes expuestos pueden modificarse de la siguiente forma:

- Encender el horno.
- Pulsar el botón Página hasta encontrar ACCS.
- Pulsar el botón scroll.
- Seguidamente, pulsar arriba/abajo hasta que aparezca el dígito 1. La pantalla parpadeará y se iluminará el cartel PASS.
- Pulsar el botón scroll y con los botones arriba y abajo buscar la función FULL.
- Pulsando el botón Página se encontrarán ahora funciones que no estaban disponibles antes de realizar los pasos expuestos.
- Buscar con el botón Página la opción PID List y pulsar scroll para ir accediendo a los distintos parámetros.
- Cambiar sólo los valores de P_b (K_c), t_i , t_d , H_{cb} , L_{cb} , P_{b2} (K_{c2}), t_{i2} , t_{d2} , H_{cb2} , L_{cb2} a los mencionados anteriormente.
- Pulsar los botones Página y scroll a la vez para volver a la pantalla de inicio.

ANEXO III: PLANOS DE LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS AISLANTES DE RADIACIÓN



ANEXO IV: ENSAYOS DE DETERMINACIÓN DE MEDIDA DE TERMOPARES

La exactitud en las medidas realizadas por los termopares es de vital importancia para asegurar la bondad de los ensayos llevados a cabo. De esta forma, se necesita conocer exactamente cuál es la manera en la que los termopares realizan las medidas. Se ha observado que una medida meramente puntual del instrumento no garantiza una corrección de la magnitud medida.

Para probar esto se dispone una chapa de acero 310 en el interior del horno. Se ha comprobado que la temperatura en el interior de la cámara del horno en el eje horizontal, en un entorno cercano al centro geométrico de la ventana del equipo, se mantiene constante. Por ello, las medidas registradas por dos termopares, uno simplemente en contacto con la chapa y otro en contacto con ésta, pero a su vez aislado del ambiente por una masilla refractaria, deberían ser idénticas. En diversos ensayos se comprueba que esto no es cierto, siendo las medidas entre ambos muy dispares – con diferencias de hasta un 15% en temperaturas cercanas a los 1000°C -, y por tanto la influencia del aislante es más que notable en el registro de la temperatura de la chapa por parte del termopar.

En un segundo ensayo, en el que se dispuso una chapa de acero en posición vertical, pegada al marco de la ventana exterior del horno, se pretende ilustrar mejor este efecto. Colocando un termopar desde el exterior de la ventana sobre la chapa, insertándolo por una grieta realizada sobre el refractario que enmarca la ventana de cuarzo, se realiza una medida de la temperatura de la chapa en el punto en el que el termopar está en contacto con ésta. Seguidamente, se prueba a aislar la ventana con una lámina de material aislante de lana de roca. Se observa que, al poco tiempo, la medida dada por el termopar comienza a aumentar, habiendo limitado la convección con el exterior, siendo el punto de contacto entre la chapa y el termopar el mismo que anteriormente.

Por estos motivos se concluye que la medida que realiza el termopar no es exactamente la de la superficie en íntimo contacto con él, sino una ponderación -desconocida a priori- de la de ésta y de la del entorno del extremo de la sonda.

Mediante pruebas con varios termopares, de distintos diámetros, de 0.5 mm y de 1,5 mm, se comprueba que la medida que realizan los termopares depende del espesor del material de la vaina de metal en la cual se encuentran insertados los cables pertenecientes a la unión soldada. A mayor diámetro del termopar, la medida real se realiza cada vez más alejada del extremo.

Se concluye que a medida que se trabaja con termopares de mayor diámetro no destinados a medidas puntuales, los cuales no son adecuados para temperaturas superiores a 400°C, será necesario insertar el termopar en el cuerpo cuya temperatura se desea conocer.

ANEXO V: CARACTERIZACIÓN DEL ROTÁMETRO DE LA INSTALACIÓN

Se pretende determinar las curvas que caractericen la velocidad de fluidización de las partículas en función del caudal de gas que circule por el lecho y de la Temperatura.

El caudal será medido mediante un rotámetro ($\frac{l}{min}$), calibrado a una presión de 1.25 bar y 20°C de temperatura, con un rango de medida comprendido entre 4 y 40 $\frac{l}{min}$. Al ser las condiciones de operación distintas a las de calibración, es necesario formular una corrección del caudal, que viene dada por la ecuación:

$$\frac{Q}{Q_{ref}} = \sqrt{\frac{\rho_{ref} \cdot (\rho_{flot} - \rho_{ref})}{\rho \cdot (\rho_{flot} - \rho)}} \cong \sqrt{\frac{\rho_{ref}}{\rho}} \quad [AV - 1]$$

La densidad del aire en las condiciones de calibración es:

$$\rho_{1.25 \text{ bar}, 20^{\circ}\text{C}} = \frac{1.25 \text{ atm} \cdot 28.97 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 293.15\text{K}} = 1.5065 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Por lo que el caudal de gas en las condiciones en las que se esté desarrollando el experimento en cuestión será:

$$Q = Q_{ref} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ref}}{\rho}} \quad [AV - 2]$$

La presión a la que se encuentra el aire a la entrada es 1 atm, al haber circulado por la válvula manorreductora y considerarse despreciables las pérdidas de carga de la instalación aguas abajo del rotámetro. La temperatura ambiente sufrirá pequeñas modificaciones en función del mes del año y de la hora a la que se esté realizando el experimento, por lo que se realizarán los cálculos con una temperatura media entre 10°C y 40°C.

Se presentan los resultados en la Figura AV-1, para todo el rango de medida del rotámetro:

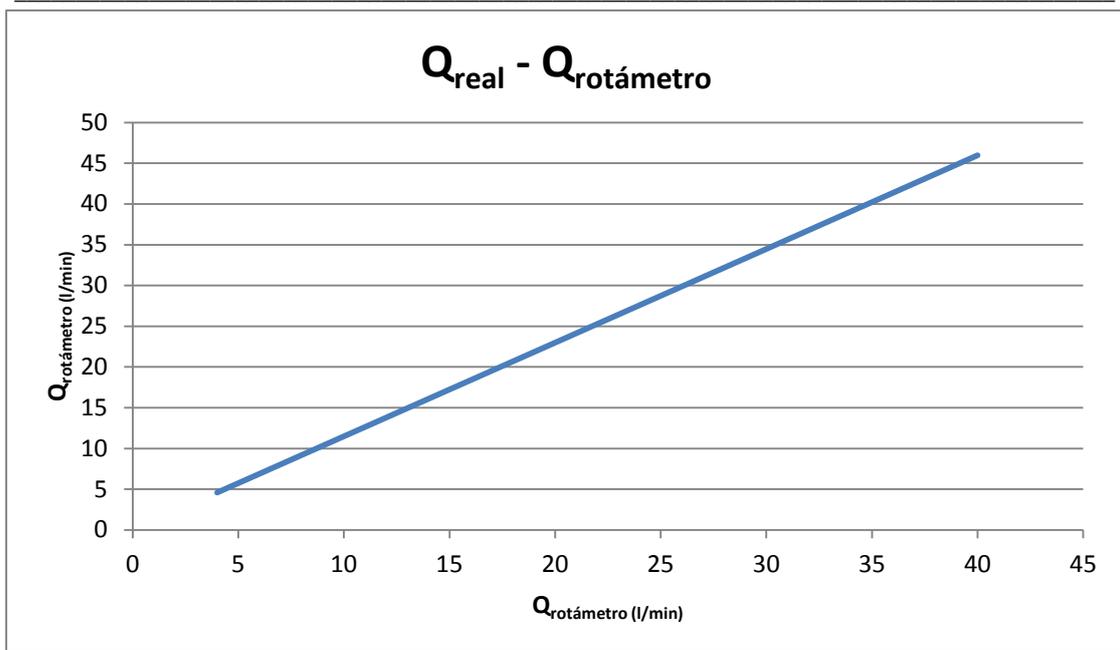


Figura AV-1: Caudal Real vs. Caudal marcado por el rotámetro

El cálculo de la velocidad de fluidización se llevará a cabo teniendo en cuenta que:

$$u = \frac{Q}{A} \quad [AV - 3]$$

Siendo el área de paso $A=0.18 \cdot 0.018 \text{ m}^2$.

Para obtener el valor de la velocidad u en m/s, se efectuará la conversión:

$$Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = Q \left(\frac{\text{l}}{\text{min}} \right) \cdot \frac{1}{1000 \text{l} \cdot 60 \text{s}} \quad [AV - 4]$$

Sin embargo, en aras de obtener la velocidad de fluidización a otras temperaturas, es necesario formalizar la conversión desde las unidades de $\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}$.

$$Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = Q \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right) \cdot \frac{T_{lecho}}{273.15 \cdot 3600} \quad [AV - 5]$$

, siendo T_{lecho} la temperatura alcanzada por el lecho. Se ha comprobado experimentalmente que la temperatura del aire de entrada se iguala a la del lecho prácticamente al entrar en contacto con él.

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura AV-2, donde quedan recogidos los distintos valores de la velocidad de fluidización en función del caudal marcado por el rotámetro para las temperaturas de 25°C, 750°C, 800°C, 850°C y 900°C :

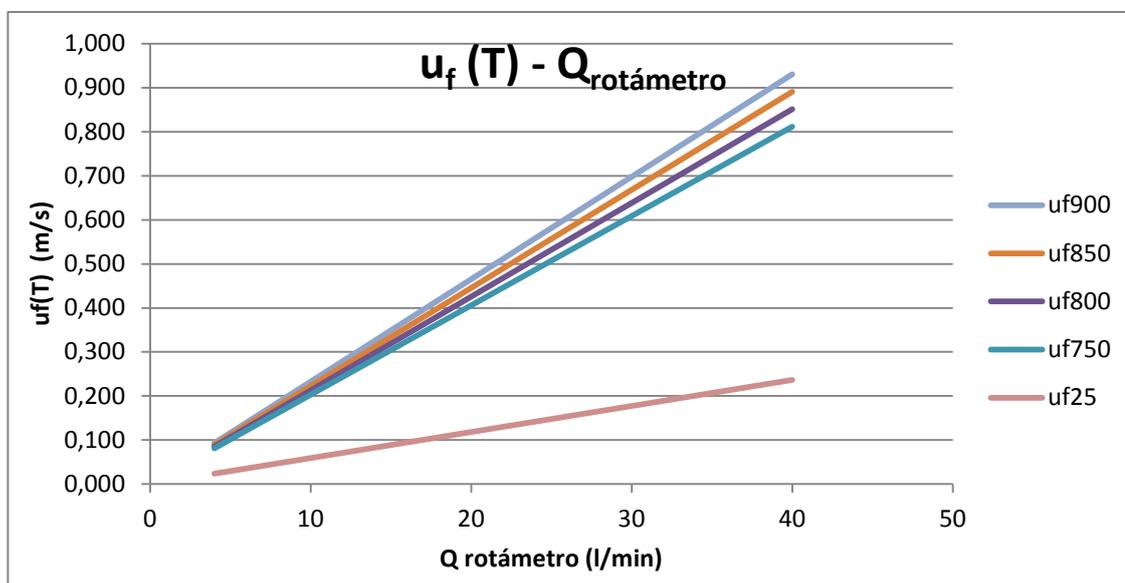


Figura AV-2: Velocidad de fluidización Vs. Caudal marcado por el rotámetro

Dichos resultados quedan igualmente recogidos en la Tabla AV-1:

Q l/min	Q l/min real	uf25	uf750	uf800	uf850	uf900
4	4,598	0,024	0,081	0,085	0,089	0,093
6	6,897	0,035	0,122	0,128	0,134	0,140
8	9,195	0,047	0,162	0,170	0,178	0,186
10	11,494	0,059	0,203	0,213	0,223	0,233
12	13,793	0,071	0,243	0,255	0,267	0,279
14	16,092	0,083	0,284	0,298	0,312	0,326
16	18,391	0,095	0,325	0,341	0,356	0,372
18	20,690	0,106	0,365	0,383	0,401	0,419
20	22,989	0,118	0,406	0,426	0,445	0,465
22	25,287	0,130	0,446	0,468	0,490	0,512
24	27,586	0,142	0,487	0,511	0,535	0,558
26	29,885	0,154	0,528	0,553	0,579	0,605
28	32,184	0,166	0,568	0,596	0,624	0,651
30	34,483	0,177	0,609	0,638	0,668	0,698
32	36,782	0,189	0,649	0,681	0,713	0,744
34	39,080	0,201	0,690	0,724	0,757	0,791
36	41,379	0,213	0,730	0,766	0,802	0,838
38	43,678	0,225	0,771	0,809	0,846	0,884

Tabla AV-1: Velocidades de fluidización para cada caudal marcado por el rotámetro

ANEXO VI: PINTURA VHT DE ALTA TEMPERATURA

Para poder realizar la asunción de cuerpo negro en los ensayos de calibración, es necesario realizar un pintado previo de la pieza que se desea ensayar. La limitación impuesta por las altas temperaturas a las que se ve sometida la pieza implica la necesidad de optar por una pintura resistente a dichas solicitudes térmicas.

Se ha adquirido la pintura VHT Flameproof negra –en la Figura AVI-1-. La forma de aplicación es minuciosa, pues implica tres capas de pintura espaciadas veinte minutos en el tiempo y una hora posterior de secado. Una vez esté aplicada, será necesario realizar dos calentamientos, el primero a 121°C durante media hora y el último a 321°C durante el mismo tiempo, con la intención de eliminar volátiles perniciosos y fijar la pintura a la pieza correctamente. Será necesario dejar enfriar la pieza antes de volver a calentarla.



Figura AVI-1: Pintura VHT Flameproof Negra

ANEXO VII: GENERACIÓN DE CHAR. TIPOLOGÍA DE CARBÓN.

La generación de las partículas de char que se utilizarán durante la realización de los ensayos se realiza disponiendo un total de doce crisoles, seis en cada puerta del horno, con una partícula de carbón en el interior de cada uno. Una de las puertas del horno con los crisoles correspondientes puede observarse en la Figura AVII-1.



Figura AVII-1: Disposición de los crisoles en una de las puertas del horno eléctrico

Previamente se realizan pesadas de cada una de las partículas. El proceso de generación de char tiene lugar mediante un calentamiento hasta los 850°C, con una rampa de 10°C/min, desde temperatura ambiente. Se procede de esta forma debido a que un calentamiento más rápido provoca una devolatilización más brusca, con lo que la forma de la partícula resultante hace impracticable el necesario taladrado posterior.

La geometría que presentan las partículas generadas es la que se aprecia en la Figura AVII-2:



Figura AVII-2: Char generado a partir de hulla subbituminosa

Mediante una segunda pesada posterior al calentamiento, se determina el contenido en materia volátil del carbón. Tras 25 muestras de carbón sub-bituminoso de la Central Térmica de Los Barrios, el contenido en volátiles de estos se cifra entre un 44.3% y un 46.2%, con una media de un 45,25%.

A la hora de generar las partículas de char, además del método de generación desarrollado, es necesario tomar en cuenta otros aspectos, tales como las sollicitaciones mecánicas a las que se van a ver sometidas las partículas a lo largo de los ensayos de calibración con las mismas.

Para realizar dicha calibración, es necesario realizar los ensayos que ya se ejecutaron con la placa de metal, y que se encuentran debidamente explicitados en el Capítulo 3 , esta vez con partículas de char. El gran impedimento que se encuentra es que la naturaleza de las partículas generadas hace, en ocasiones, impracticable cualquier manipulación necesaria para los ensayos programados. Dichas manipulaciones implican un taladrado de la partícula para la posterior inserción de un termopar que permita en primera instancia calibrar los fotogramas generados del vídeo de su combustión y, posteriormente, la validación de la curva de calibración determinada en el ensayo previo.

Los tipos de combustible que se manejan son los siguientes:

- **Madera de haya:**

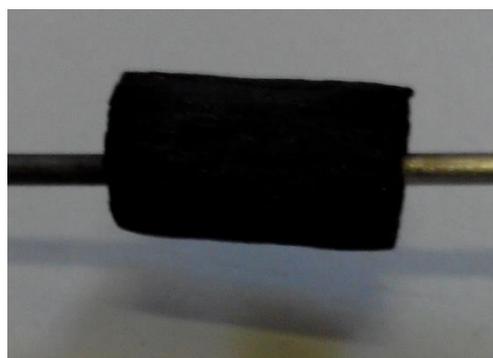


Figura AVII-3: Madera de haya char generado a partir de ella.

El char generado de madera de haya –Figura AVII-3- reduce el tamaño original de la partícula en un 75%, por lo que será necesario introducir retazos de un tamaño considerable para que la partícula que se genera pueda ser aceptable para los ensayos.

El char generado a partir de esta madera es de fácil taladrado y de una fragilidad no demasiado acusada.

El contenido en volátiles de la madera se ha cifrado, tras ensayar veinte partículas de diferentes tamaños iniciales, en un 86%.

- **Hulla subbituminosa**



Figura AVII-4: Hulla subbituminosa

La hulla subbituminosa –Figura AVII-4- procede de la central de Los Barrios, Cádiz. El char generado en las condiciones detalladas anteriormente, presenta una geometría similar a la inicial, sin reducir su tamaño de forma apreciable, pero con la aparición de grietas debido al escape de los volátiles –Figura AVII-5- .



Figura AVII-5: Char generado a partir de hulla subbituminosa

La practicabilidad del necesario taladrado es moderada. Su naturaleza agrietada provoca que, según la partícula, ésta se fragmente al insertar la broca. Se ha comprobado que la manera más efectiva de realizar el taladrado es insertar la broca en la dirección paralela a la de las grietas. El porcentaje de volátiles se cifra en un 38%.

- **Hulla bituminosa**

Esta hulla procede de la central ElcoGas de Puertollano y tiene un aspecto terroso. La partícula se fragmenta totalmente al generar el char, con forma de tierra de color oscuro – Figura AVII-6-. El contenido en volátiles, tras varios ensayos con un total de diez muestras, se cifra en un 61%.



Figura AVII-6: Hulla bituminosa y char generado a partir de ella

- **Antracita**

La antracita utilizada en la generación de char es procedente de Ciuden. El char generado a partir de la antracita tiene aspecto de “milhojas” –Figura AVII-7-, fragmentándose en planos horizontales de un espesor minúsculo, por lo que es imposible destinar este char a los ensayos programados. En varios ensayos dispuestos para determinar el contenido en volátiles, éstos se han cifrado en un 12 %.



Figura AVII-7: Antracita y char generado a partir de ella

ANEXO VIII: TRATAMIENTO DE COLUMNA DE LECHO FLUIDO EN ANSYS FLUENT. DIRECTRICES Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS BÁSICOS.

A lo largo de este documento se pretende ilustrar el tratamiento de un reactor de lecho fluido sin y con influencia de la temperatura en la aplicación de ANSYS FLUENT 14.5.

Para tal efecto, se seguirá ilustrativamente cada acción que sea necesaria tomar en el programa para obtener los resultados deseados, así como una breve exposición teórica de la que se desprenda la idoneidad de utilizar una función u opción de la aplicación y no otra.

AVIII 1. CARGA DE LA APLICACIÓN

Tras abrir el programa, se han de seleccionar las opciones que se muestran en la Figura AVIII-1. (2D en la selección de *Dimension* y Double Precision seleccionado en *Options*). Seleccionar la pestaña *Environment* y validar la opción Setup Compilation for UDF Environment. Esta acción permitirá que sea posible compilar funciones predeterminadas por el usuario (*User Defined Functions*), escritas en lenguaje C, que se ejecutan dinámicamente con el solver de ANSYS FLUENT. Estas funciones pueden contener modelos dinámicos, condiciones de contorno, inicializaciones de soluciones... cuya introducción en ANSYS FLUENT sería imposible de otra manera.

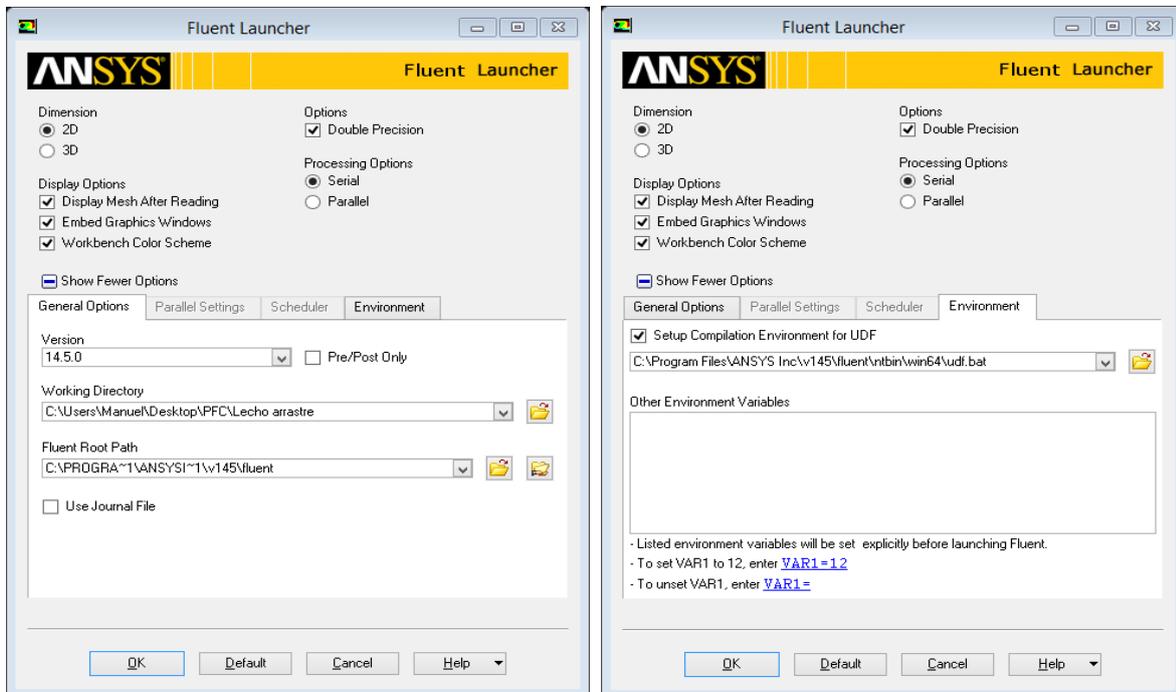


Figura AVIII-1 Pantallas de la aplicación de lanzamiento de ANSYS FLUENT

La geometría objeto de simulación es la representada en la Figura AVIII-2

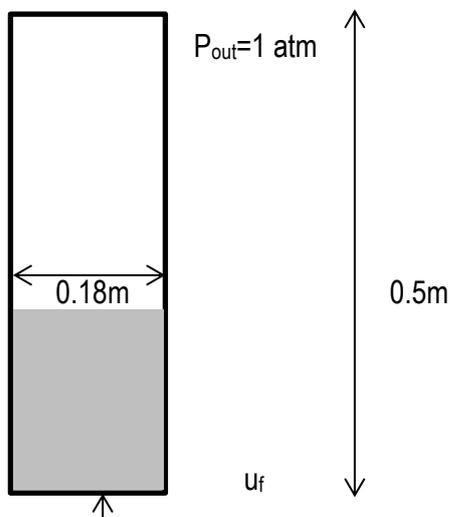


Figura AVIII-2: Geometría del reactor y columna de lecho

AVIII 2. LECTURA DE LA MALLA

A continuación, se procede a leer la malla: *File*→*Read*→*Mesh*, accediendo de este modo al directorio de trabajo. Al hacer doble click sobre el archivo .msh se cargará la malla.

El siguiente paso es pulsar sobre el botón *Check* en el subapartado *Mesh* de la pestaña *General* (Figura AVIII-3). La importancia de este paso radicará en la seguridad de que la malla importada podrá ser trabajada por parte del solver de la aplicación. Una comprobación imprescindible es asegurarse de que el volumen de la malla es positivo. Esto puede comprobarse en la consola derecha, donde aparecerán los valores de longitud, área y volumen de malla.

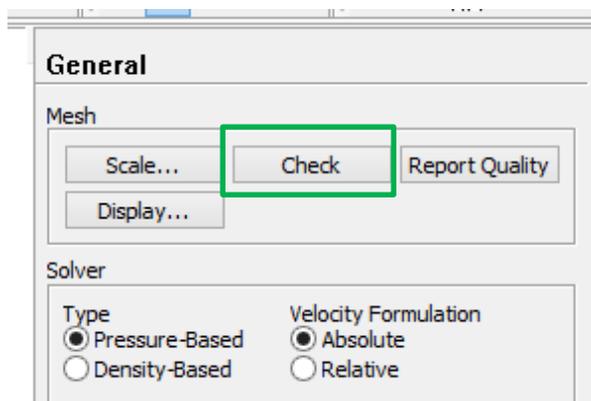


Figura AVIII-3: Pantalla de chequeo de la malla

Seleccionar *Transient* de entre las opciones *Time*, pues los resultados obtenidos se desean conocer en el régimen transitorio.

AVIII 3. MODELOS

A continuación será necesaria la elección del Modelo multifásico que se aplicará en la simulación. En este punto se presentan varias opciones, que se tratarán brevemente en este documento, con extensas ampliaciones previstas en posteriores actualizaciones del mismo.



En primer lugar, cabe destacar que cada uno de los modelos que presenta ANSYS FLUENT se ajustará en mayor o menor medida a cada régimen de flujo multifásico. Un resumen de estos regímenes se presenta en la figura AVIII-4.

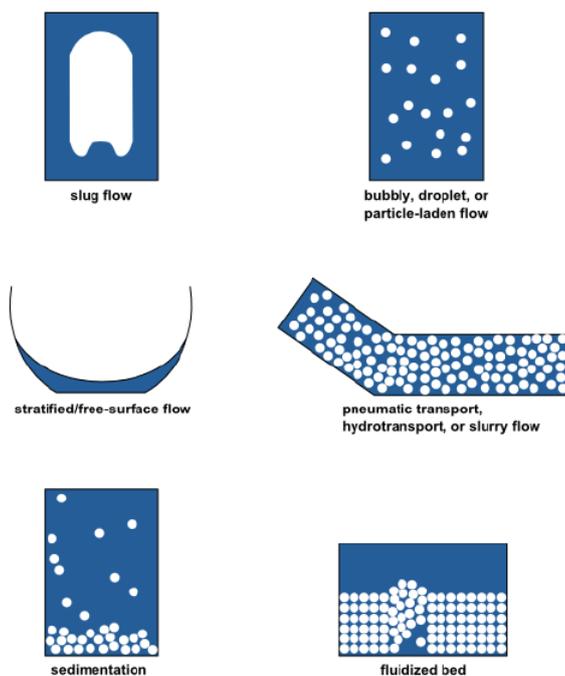


Figura AVIII-4: Distintos regímenes de flujo multifásico

Por otra parte, los distintos métodos que ofrece ANSYS FLUENT en la computación de los regímenes arriba expuestos son:

- Método Euler-Lagrange: La fase fluida se resuelve como un continuo, mediante la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, mientras que la fase dispersa se

resuelve mediante una búsqueda de partículas, burbujas o gotas a través del flujo previamente calculado. La fase dispersa puede intercambiar masa, energía y cantidad de movimiento con la fase fluida. Este método se hace considerablemente más sencillo cuando las interacciones partícula-partícula son despreciables, lo que implica que la fase dispersa ocupe una baja fracción en volumen.

- Método Euler-Euler: Las distintas fases se tratan matemáticamente como un continuo compenetrado. En ANSYS FLUENT, existen tres modelos diferentes dentro de este método: El modelo VOF (*the Volume Of Fluid*), el modelo de Mezcla y el modelo Euleriano.
 - Modelo VOF: Este modelo está indicado para dos o más fluidos inmiscibles, donde el interés de cálculo reside en la interfase entre los fluidos. Las ecuaciones de cantidad de movimiento tienen una misma formulación para los fluidos y la fracción en volumen de los mismos en cada celda es calculada para todo el dominio de cada fase.
 - Modelo de Mezcla: Este modelo está diseñado para dos o más fases fluidas o sólidas (partículas). El modo de proceder de este modelo es la resolución de cantidad de movimiento de la mezcla, para posteriormente calcular velocidades relativas de la(s) fases(s) dispersa(s).
 - Modelo Euleriano: Resuelve una serie de n ecuaciones de cantidad de movimiento y de continuidad para cada fase. Para flujos granulares, se utiliza la teoría cinética en la obtención de propiedades de la mezcla. En este caso, resulta indispensable la introducción de funciones definidas por el usuario, ya que el intercambio de cantidad de movimiento dependerá directamente de la mezcla que se esté modelando en cada momento.

Como resumen de lo anterior, se presenta a continuación la Tabla AVIII-1, que recoge cada una de las aplicaciones multifásicas de los diferentes modelos expuestos.

Modelo VOF	Modelo de Mezcla	Modelo Euleriano
-Slug Flow -Superficie Libre	-Transporte Neumático (homogéneo) - Burbujas, gotas o partículas -Hidrotransporte, slurry flow.	- Transporte Neumático (granular) - Burbujas, gotas o partículas -Lecho Fluidizado -Sedimentación

Tabla AVIII-1: Correspondencia Régimen de flujo – Modelo de ANSYS FLUENT más adecuado



Por tanto, en la aplicación que ocupa, es claro que debe elegirse el Modelo Euleriano. En la consola de la izquierda, se ha de seleccionar *Models*. Cuando se abra dicha pestaña, ha de seleccionarse *Multiphase* y elegir entre las opciones el modelo Euleriano. Una vez hecho esto, pulsar OK. Otra de las opciones que se deben contemplar es el intercambio de calor con el medio, por lo que debería seleccionarse la pestaña *Energy Equation* de la opción *Energy*. Durante este apartado del documento no se optará por resolver el problema de intercambio de calor. Se tratará ese caso en el siguiente apartado. Sin embargo, se hará referencia a las opciones que deberían seleccionarse si en el problema existieran elementos con diferentes temperaturas.

AVIII 4. MATERIALES

A continuación se definirán las propiedades principales para los materiales que compondrán las fases. Cabe destacar que, aunque en la consola de *Materials* de ANSYS FLUENT aparezcan fluidos y sólidos diferenciados, en un reactor de lecho fluido

existen una fase fluida y otra sólida. Al encontrarse la fase sólida fluidizada, será necesario introducir los datos pertenecientes a esta fase como si de un fluido se tratase.

Introduciendo los valores de densidad para el aire de $1,225 \text{ kg/m}^3$ y para el lecho de 3000 kg/m^3 concluye la definición de los materiales (otros parámetros serán introducidos en la definición de las fases). Al introducir la densidad de la bauxita como un fluido y, tras pulsar, Change/Create, ANSYS FLUENT preguntará si se desea prescindir del aire como material. Será necesario pulsar la opción *No*. Se presentan las pantallas de propiedades de Materiales en la Figura AVIII-5.

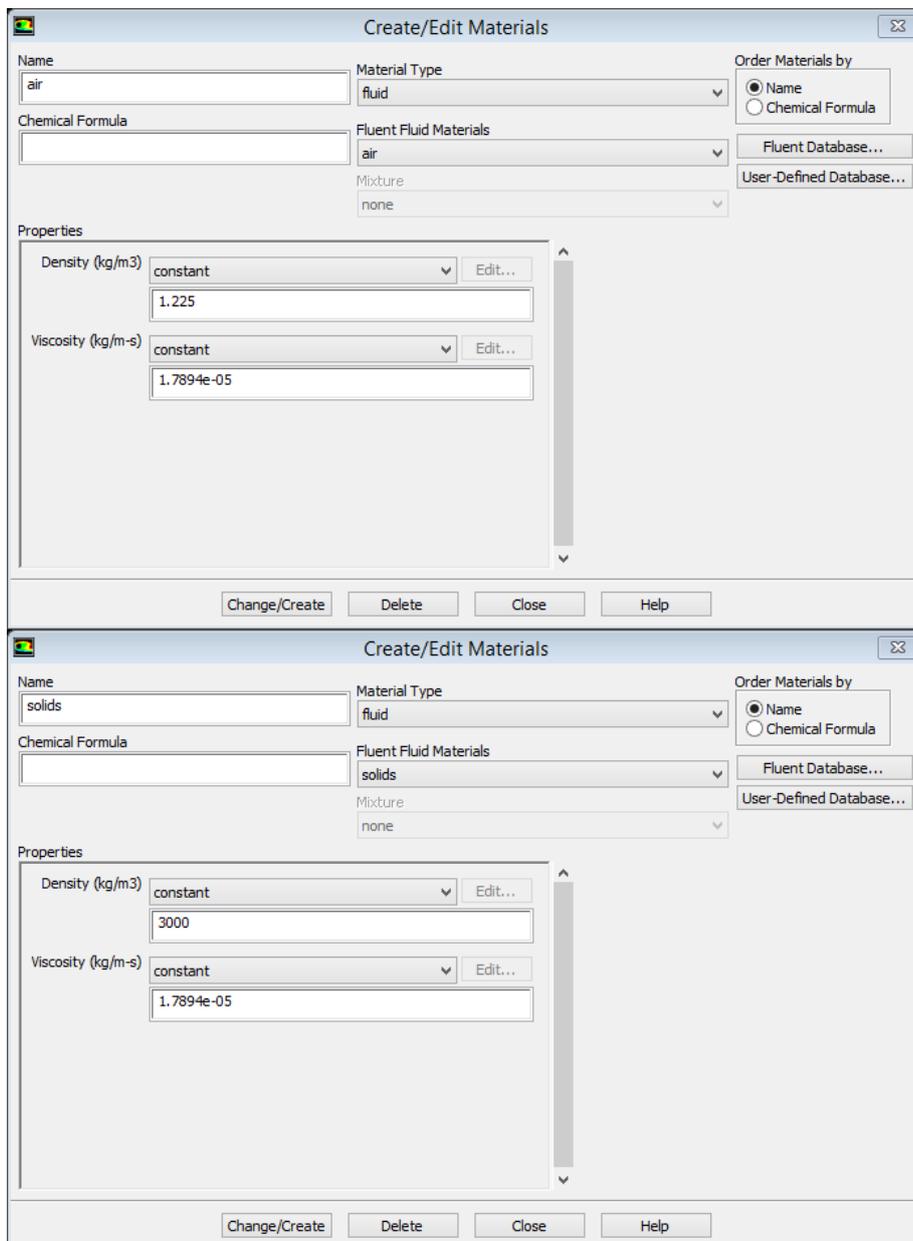


Figura AVIII-5: Pantallas de propiedades de Materiales

AVIII 5. COMPILACIÓN DE LA FUNCIÓN UDF

Para compilar la función UDF se siguen los siguientes comandos:

Define→User-Defined→Functions→Compiled...

En la pantalla que representa la Figura AVIII-6, pulsar *Add* y seleccionar la UDF previamente programada. Seguidamente, se han de pulsar las opciones *Build* y *Load*.

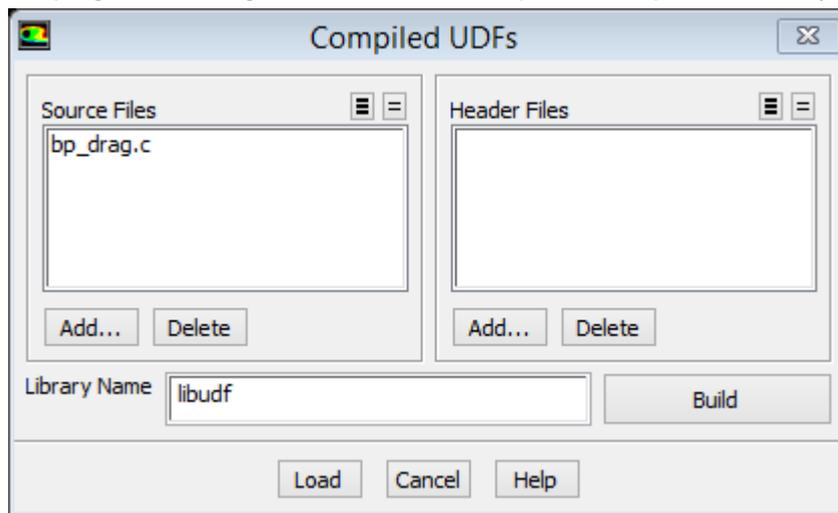


Figura AVIII-6: Pantalla de compilación de la función UDF

La naturaleza de la función UDF será discutida en un apartado posterior.

AVIII 6. DEFINICIÓN DE LAS FASES

Ahora es el momento de definir las fases que entrarán en juego en la simulación. Los parámetros que deben ser introducidos en la pestaña *Phases* se recogen en la Figura AVIII-7.

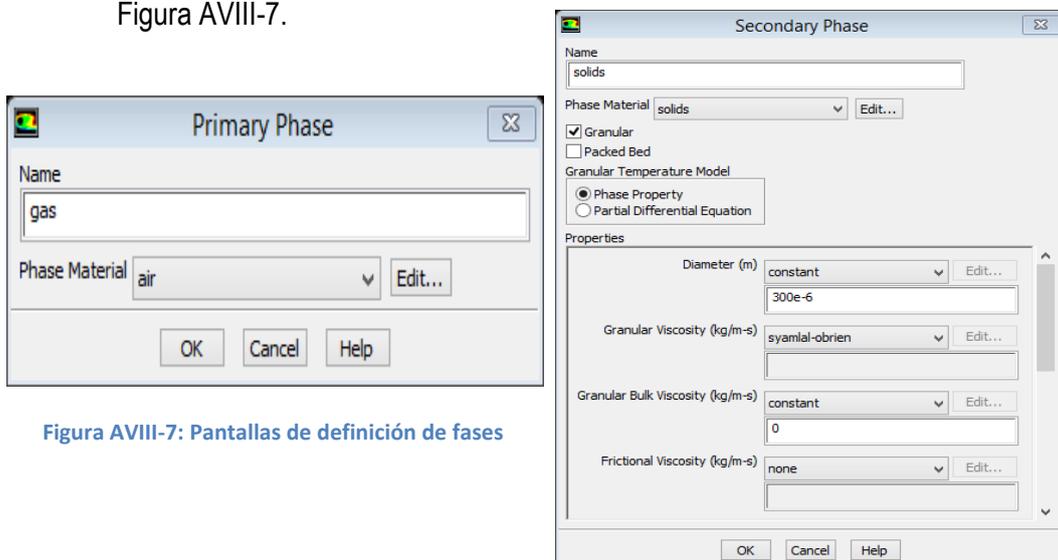


Figura AVIII-7: Pantallas de definición de fases

Una vez definidas ambas fases, es necesaria la determinación de una ley de interacción entre ellas. Esa es la utilidad de la función UDF compilada previamente: Contiene la ley de interacción (viscosidad granular) que se usará en la resolución del problema.



En ANSYS FLUENT la viscosidad granular es la suma de tres contribuciones viscosas: Las viscosidades colisional, cinética y friccional.

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fric} \quad (Ec. A VIII - 1)$$

Evidentemente, la contribución de las distintas viscosidades varía en los distintos regímenes. En un régimen con una baja cantidad de sólido (diluido), la probabilidad de colisión es baja, por lo que en ese caso, la mayor contribución vendrá dada por la viscosidad cinética. En un caso con partículas muy densas, la mayor contribución será debida a la fricción. En un caso intermedio se encuentra el régimen viscoso. En él las partículas de sólido se moverán como un fluido, pero aún así la probabilidad de colisión es alta. Al colisionar entre ellas, las partículas no desarrollarán, a priori, una gran velocidad, por lo que la contribución cinética de la viscosidad será razonablemente pequeña y la dada por la contribución colisional, de gran relevancia.

Se pasará a continuación a describir brevemente cada una de las contribuciones y los modelos más usuales que las reproducen:

- $\mu_{s,col}$: La viscosidad colisional se debe a las colisiones entre partículas descritas en la teoría cinética de flujo granular de Lun et al [1]. Existen dos formulaciones principales para modelar esta contribución:
 - Modelos de Gidaspow y Syamlal:

$$\mu_{s,col} = \frac{8}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{os} \eta \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (Ec. AVIII - 2)$$

- Modelo de Sinclair:

$$\mu_{s,col} = \frac{5d_s\rho_s(\theta_s\pi)^{1/2}}{96\alpha_s} \left(\left[\frac{8\alpha_s}{5(2-\eta)} \right] \left[1 + \frac{8}{5}\eta(3\eta - 2)\alpha_s \right] g_{os} + \frac{768}{25\pi}\eta\alpha_s^2 g_{os} \right) \quad (Ec. AVIII - 3)$$

Donde g_{os} es un factor de corrección que modifica la probabilidad de colisión en casos cercanos al empaquetamiento.

- $\mu_{s,kin}$: El modelo de viscosidad cinética viene dado, igualmente por Lun et al en su modelo de teoría cinética modificada para partículas esféricas e inelásticas
- $\mu_{s,fric}$: La viscosidad friccional, en el caso que compete, no posee relevancia, al no ser las partículas lo suficientemente grandes como para suponer una contribución viscosa.



En lo que sigue, se hará uso del modelo Syamlal et al. en la simulación de la interacción del lecho. Seleccionando *Phase Interaction*, se introducen los parámetros tal y como en la Figura AVIII-8.

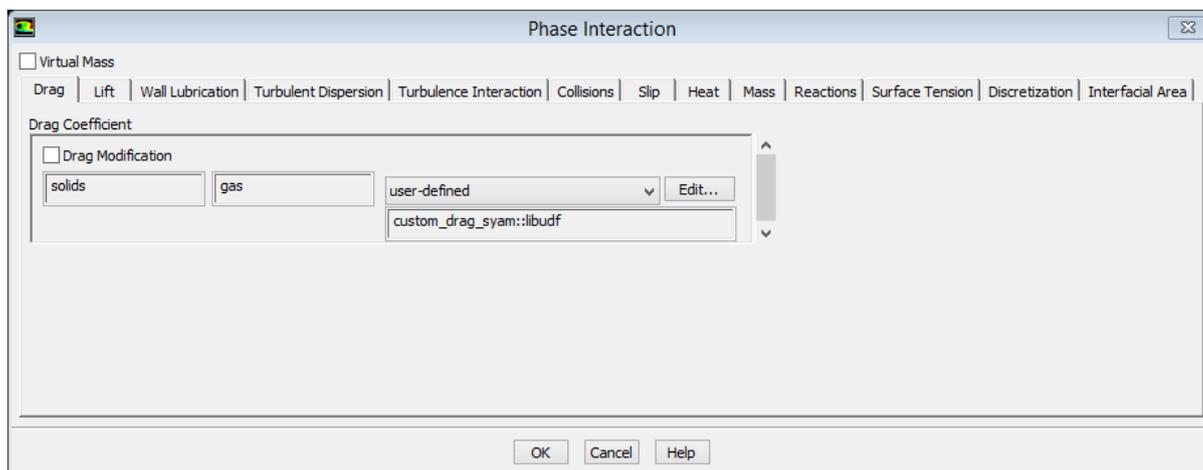


Figura AVIII-8: Pantalla de definición de la interacción entre fases.

AVIII 7. CONDICIONES DE CONTORNO

En este caso, la malla tiene predefinida la zona de entrada de aire como superficie susceptible de contener una condición de contorno. Para introducirla, sólo es necesario visitar el menú de *Boundary Conditions*→*vinlet*. En el menú *Boundary Conditions* aparecerán por defecto todas las superficies que, en la confección de la malla, han sido definidas como contenedoras de una condición de contorno.

Para la fase gas, se introduce el valor de velocidad de fluidización que se desea ensayar, tal y como aparece en la Figura AVIII-9.

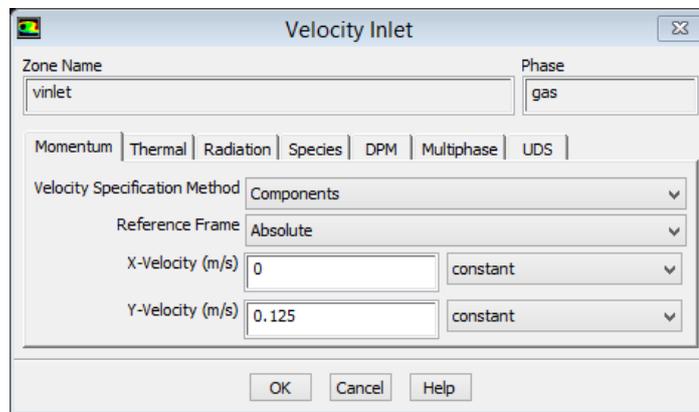


Figura AVIII-9: Pantalla de definición de condición de contorno en velocidad

Si se considerase la acción de la temperatura, sería necesario incluir la temperatura de la superficie en la pestaña *Thermal*.

0. CONDICIONES DE OPERACIÓN

En *Operating Conditions* se introducen los siguientes términos, como recoge la Figura AVIII-10:

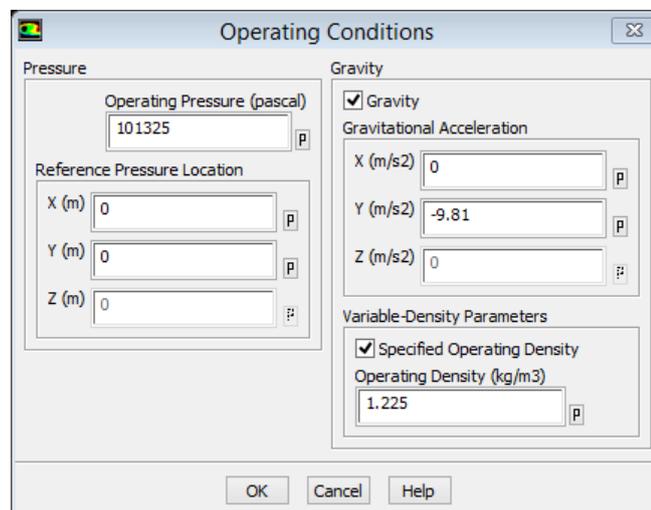


Figura AVIII-10: Pantalla de condiciones de operación

AVIII 8. INICIALIZACIÓN Y CÁLCULO DE LA SOLUCIÓN

A continuación, se inicializa la solución. En este proceso se seguirán los siguientes pasos:

- Adaptación de la región: ANSYS FLUENT tiene la opción de refinar el cálculo en la(s) región(es) de la geometría de interés en la resolución. En este caso, dependiendo los resultados obtenidos en su mayoría de la columna de sólido, el input a la aplicación será el de la columna de sólido. Todo ello se muestra en la Figura AVIII-11.

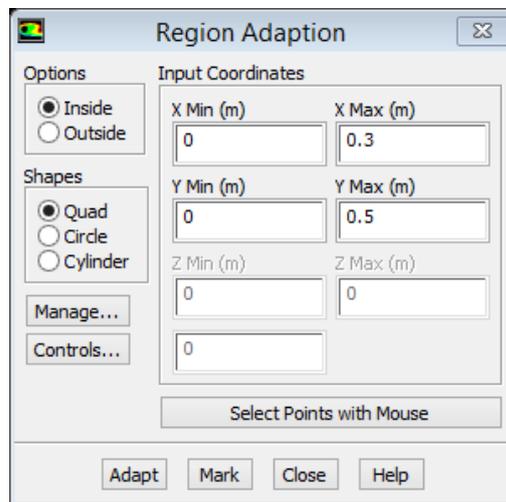


Figura AVIII-11: Pantalla de adaptación de la región.

- Inicialización: En la pestaña *Solution Initialization*, pulsar el comando *Initialize*. Posteriormente, y en la misma pestaña, se pulsa sobre *Patch* tras seleccionar las opciones contempladas en la figura AVIII-12.

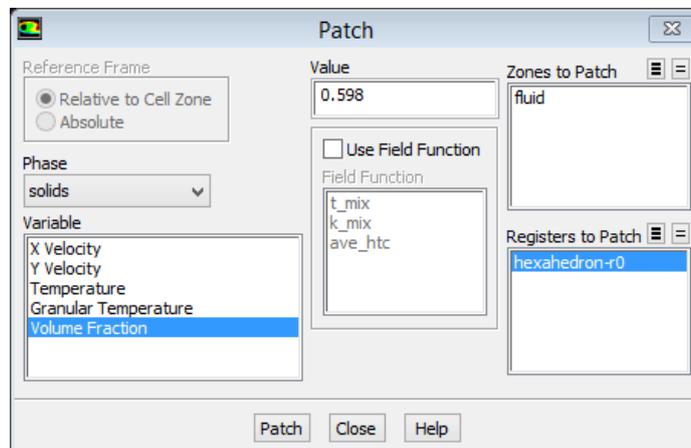


Figura AVIII-12: Pantalla de Inicialización de la Solución

- Comenzar el cálculo: En la pestaña *Run Calculation*, tras introducir los parámetros de *Time Step* y *Number of Time Steps*, se pulsa sobre *Run* y comenzará a calcularse la solución.

AVIII 9. RESULTADOS

AVIII 9.1 Velocidad de mínima fluidización

Al aumentar la velocidad de circulación de un gas a través de un lecho inicialmente fijo, la fuerza de fricción producida por el gas sobre el material granular aumenta. Este hecho hace que incremente la pérdida de carga (ΔP) en el lecho. Llegado el momento, las fuerzas de fricción sobre el material granular igualarán el peso del lecho y éste fluidizará. Una vez fluidice, la ΔP en el lecho permanecerá constante a pesar de aumentar la velocidad del gas u_g . La velocidad a la que comienza a manifestarse la constancia de la ΔP con la velocidad se denomina velocidad de mínima fluidización u_{mf} . A pesar de ello, para un valor determinado de la velocidad del gas (u_{arr}), se observará la pérdida del comportamiento constante antes mencionado y la ΔP volverá a incrementarse debido al arrastre del sólido en el reactor. Un resumen gráfico de lo expuesto puede observarse en la Figura AVIII-13.

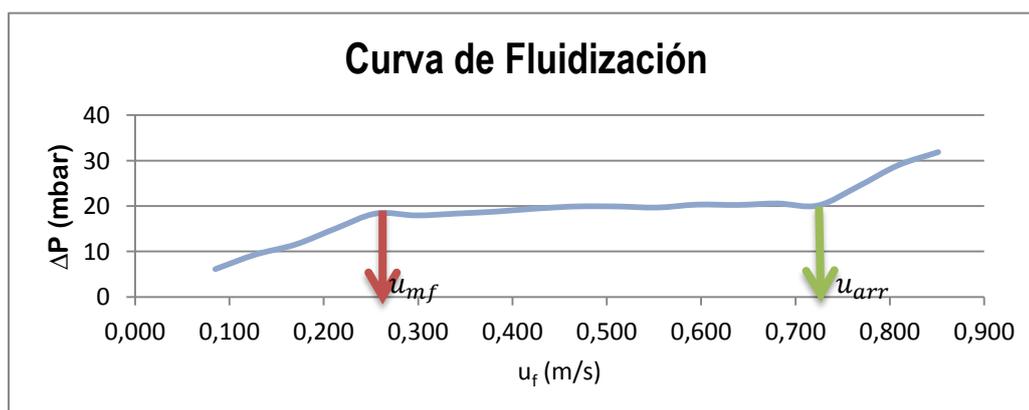


Figura AVIII-13: Ejemplo de curva de fluidización

Para calcular la velocidad de mínima fluidización en ANSYS FLUENT se variará la velocidad de entrada del gas en las condiciones de contorno expuestas en los apartados anteriores. Hecho esto, se computará la pérdida de carga en el lecho

en el postprocesado de los resultados obtenidos de la simulación (Opción de *Graphics and Monitors*, donde se seleccionan los perfiles de Fracción en volumen, Presión, Velocidad... que se deseen mostrar en cada caso). Realizando esta operación para distintos valores de velocidades de entrada de gas se obtendrá la curva de fluidización deseada.

Se ha utilizado la estrategia descrita para comprobar los resultados obtenidos en el capítulo 5 de caracterización de la pérdida de carga del lecho en frío. En ese caso se experimentó con dos alturas de lecho distintas en el reactor de la instalación, $H=10\text{cm}$ y $H=15\text{cm}$. La altura del lecho en la malla importada se realiza patcheando una región menor o mayor en los pasos de importación de la malla.

La curva $\Delta P-u_f$ que se genera tras distintas simulaciones es la que representa la Figura AVIII-14, donde se representan los valores de pérdida de carga para ambas alturas de lecho previamente ensayadas.

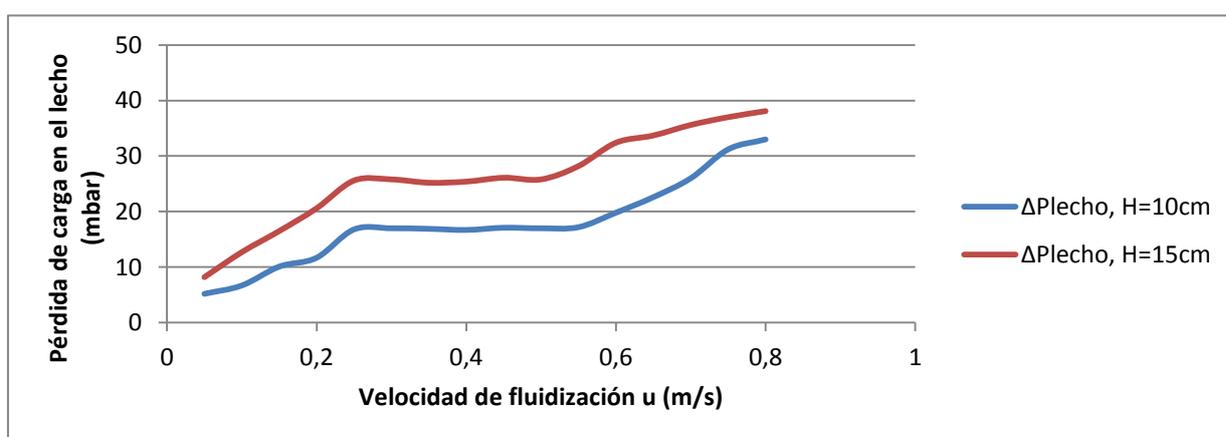


Figura AVIII-14: Pérdida de carga en el lecho calculada en ANSYS FLUENT

La velocidad de mínima fluidización que se obtiene es de $u_{mf} = 0,25\text{m/s}$, en contraposición con la hallada anteriormente, que se cifra en $0,23\text{m/s}$. Nótese que se han ensayado intervalos de velocidad de fluidización de 0.05m/s debido al elevado tiempo de computación de los resultados que acarrea la aplicación. La velocidad a partir de la cual comienza a aparecer arrastre es de $u_{arr} = 0.55\text{m/s}$ en el caso de altura de lecho igual a 10centímetros , y $u_{arr} = 0.5\text{m/s}$. Este resultado fue cifrado en los ensayos experimentales en $0,53\text{m/s}$.

La discrepancia entre los resultados pueden ser debidos a diversos efectos:

- Modelo elegido.
- Efectos de pared no incluidos en el modelo de ANSYS FLUENT.
- Pérdida de carga en el distribuidor introducida manualmente para cada valor de velocidad ensayado.

AVIII 9.2 Perfiles de Fracción en Volumen de Burbujas

La Figura AVIII-15 representa los perfiles de fracción en volumen de burbujas (aire) de las distintas simulaciones de ANSYS FLUENT para distintas velocidades de fluidización

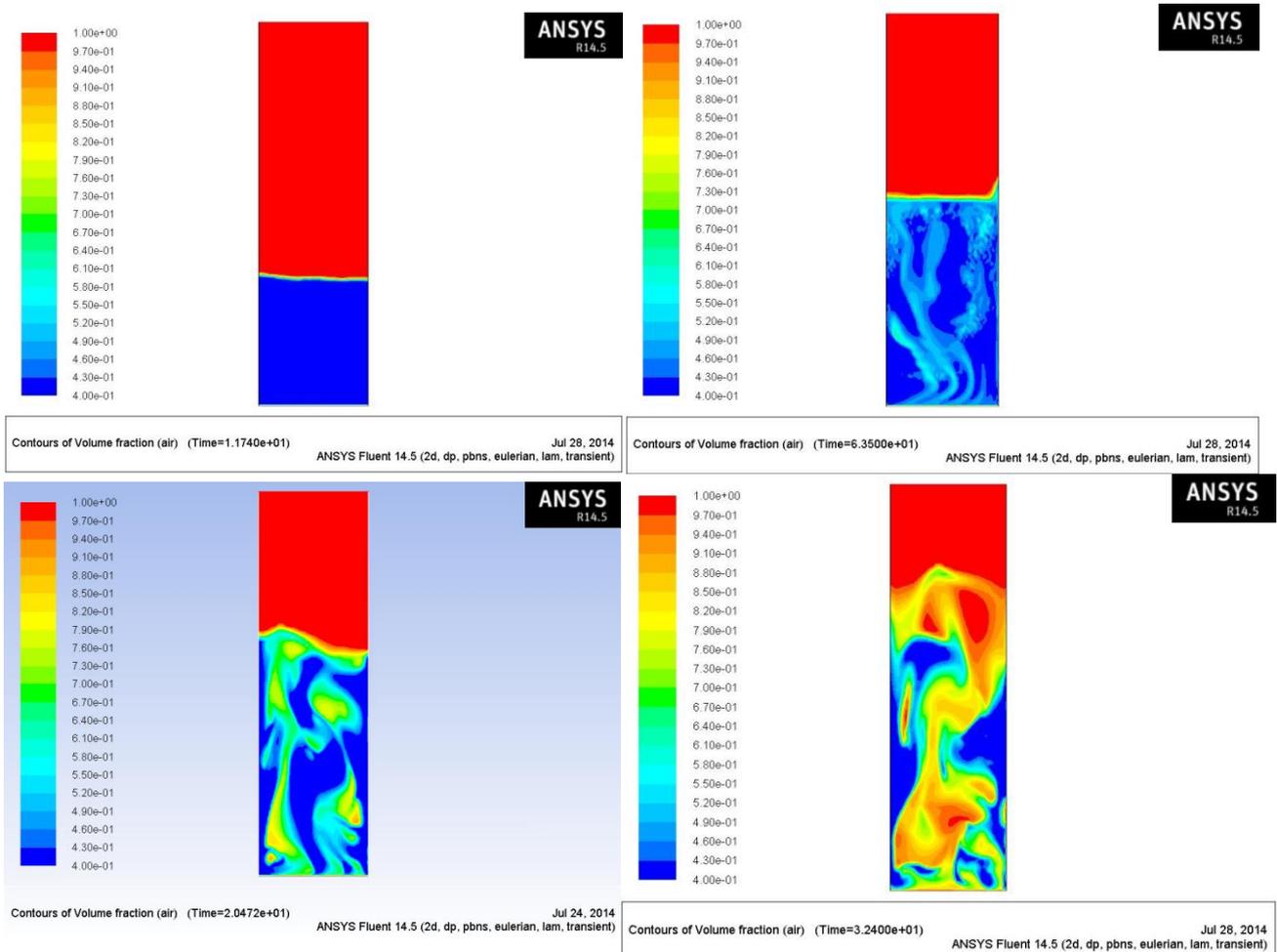


Figura AVIII-15: Perfiles de Fracción en volumen de aire para las siguientes velocidades de fluidización: 0.1, 0.25(mínima fluidización), 0.4 y 0.8 m/s.