

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍAS

Titulación: **GRADUADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA**

Intensificación: **Tecnologías Energéticas**

PROYECTO FIN DE GRADO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA

**CARACTERIZACIÓN TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DE UN REACTOR DE
LECHO FLUIDIZADO PARA OPERACIONES DE TERMOQUÍMICA SOLAR**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍAS

Titulación: **GRADUADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA**

Intensificación: **Tecnologías Energéticas**

**Caracterización teórica y experimental de un reactor de lecho fluidizado para
operaciones de termoquímica solar**

Realizado por

Roberto Matarranz Alcalá

Dirigido por

Alberto Abánades Velasco, Departamento de Ingeniería Energética

y

José González Aguilar

Instituto IMDEA Energía

Resumen.....	VII
Abstract.....	VII
Documento 1: Memoria	2
1. Objetivo y alcance	2
2. Antecedentes	3
2.1 Introducción	3
2.2 Estado del arte de lecho fluidizado	3
2.2.1 Concepto de fluidización	3
2.2.2 Regímenes de fluidización.....	6
2.3 Justificación.....	9
2.4 Energía solar térmica de concentración	22
2.4.1 Concepto y tecnologías.....	22
2.4.2 Termoquímica solar.....	31
3. Desarrollo del proyecto	33
3.1 Análisis Inicial – Dimensionamiento.....	33
3.2 Experimentación.....	35
3.2.1 Ensayos en frío	35
3.2.2 Ensayos en caliente (simulador solar de altos flujos).....	37
3.3 Análisis numérico.....	38
3.3.1 Análisis óptico-energético	38
3.3.2 Estudio termo-fluidodinámico	46
4. Resultados y discusión	57
5. Conclusiones	76
6. Trabajo Futuro.....	77
7. Bibliografía	78
8. Abreviaturas, unidades y acrónimos.....	79
Múltiplos y submúltiplos.....	79
Unidades.....	79
Subíndices	80
Documento 2: Estudio económico del proyecto	82
Documento 3: Anexos	89
Anexo A: Protocolo de experimentación.....	89
Anexo B: Descripción del banco de ensayos	91
Anexo C: Guía de uso del software ‘Mieplot’	93
Anexo D: Planos del reactor.....	97

Índice de figuras

Figura 1. Comportamiento fluido de un lecho fluidizado. a) Los objetos ligeros flotan sobre la superficie b) Las partículas fluyen formando un chorro a través de un agujero c) la superficie se mantiene horizontal al inclinar el lecho d) Al poner en contacto 2 lechos sus superficies libres se igualan e) La diferencia de presión entre 2 puntos es proporcional a la diferencia de altura.	6
Figura 2. Comportamiento de los diferentes regímenes de fluidización, ordenados de menor a mayor velocidad del fluido.....	7
Figura 3. Caída de presión vs velocidad del fluido. [1]	8
Figura 4. Resumen de la transferencia de masa partícula – gas.....	10
Figura 5. U_{mf} vs Presión para diferentes tamaños de partícula	11
Figura 6. Esquema del reactor solar y el CPC.[2].....	13
Figura 7. Instalación experimental del concentrador primario.[2].....	13
Figura 8. Esquema de reactor usado para capturar CO ₂ atmosférico propuesto por A.Steinfield.[3]	14
Figura 9. Esquema de combustor de lecho fluidizado propuesto por Abánades.[4].....	15
Figura 10. Diseño reactor lecho fluidizado usado para disociación de agua por N.Gokon. [5]...	16
Figura 11. (a) Instalación usada por N.Gokon[5,6] con un reactor hecho de cuarzo. (b) Detalle del distribuidor cilíndrico usado.....	17
Figura 12. Sección del reactor solar de lecho fijo irradiado indirectamente para una radiación solar incidente desde la parte superior.[7]	18
Figura 13. Modelado del reactor [9]: a) Transferencia de calor, b) superficies consideradas en el intercambio radiativo, c) coeficientes de transferencia de calor por convección.	20
Figura 14. Esquema de un conjunto CCP.....	23
Figura 15. Esquema de planta CCP con aceite sintético	24
Figura 16. Esquema de instalación de torre central	25
Figura 17. a) Campo de helióstatos Norte-Sur(izquierda) b) Campo de helióstatos circundante (derecha)	26
Figura 18. Esquema de operación de torre central con a) sales fundidas (arriba) y b) con aire (abajo)	28
Figura 19. Esquema de un sistema de disco Stirling.....	29
Figura 20. Esquema de un ciclo termoquímico de 2 etapas.	31
Figura 21. Velocidad de mínima fluidización para ferritas de níquel ($\rho=5663\text{kg/m}^3$) según el diámetro de partícula para temperaturas de 25,700 y 1100 °C.....	34
Figura 22. Caudal de mínima fluidización para ferritas de níquel ($\rho=5663\text{kg/m}^3$) según el diámetro de partícula para temperaturas de 25,700 y 1100 °C.....	34
Figura 23. Caudal de fluidización vs Diámetro de partícula para alúmina con $D=0.033$ m en l/min.	36
Figura 24. Caudal de fluidización vs Diámetro de partícula para ferritas con $D=0.033$ m en l/min.	36
Figura 25. Geometría empleada	38
Figura 26. Potencia absorbida vs Distancia a superficie	41

Figura 27. Potencia incidente vs Fracción volumétrica	42
Figura 28. Longitud óptica vs Fracción volumétrica	42
Figura 29. Sistema de coordenadas esféricas.....	43
Figura 30. U_{θ} vs U_r . De izquierda a derecha y de arriba a abajo, profundidades de 0,1 , 0,4 , 1,3 y 2,8 mm.	44
Figura 31. U_{ϕ} vs U_r . De izquierda a derecha y de arriba a abajo, profundidades de 0,1 , 0,4 , 1,3 y 2,8 mm.	45
Figura 32. U_{θ} vs U_{ϕ} . De izquierda a derecha y de arriba a abajo, profundidades de 0,1 , 0,4 , 1,3 y 2,8 mm.	45
Figura 33. Esquema del modelo CFD y mallado usado.....	48
Figura 34. Algoritmo de resolución de Fluent.	55
Figura 35. ΔP vs Q en vacío para $D = 0.033$ m	57
Figura 36. ΔP vs Q para $H/D = 2$ y $\rho = 4000$ kg/ m ³	58
Figura 37. ΔP vs Q para $H/D = 1$ y $\rho = 4000$ kg/ m ³	58
Figura 38. ΔP vs Q para $H/D = 0,5$ y $\rho = 4000$ kg/m ³	58
Figura 39. ΔP vs Q para $H/D = 0,5$ y $\rho = 5368$ kg/m ³	59
Figura 40. ΔP y caudal frente a tiempo para Ensayo 1.	60
Figura 41. Temperaturas (pirómetro y muestra), caudal y ΔP para Ensayo 1	61
Figura 42. Temperatura de la muestra y concentración de gases en Ensayo 1.....	61
Figura 43. Lecho de SiC Verde en estado fluidizado	62
Figura 44. ΔP y caudal vs tiempo en Ensayo 2.....	63
Figura 45. Temperaturas (pirómetro y muestra) y caudal en ensayo 2	63
Figura 46. Temperatura de la muestra y concentración de gases en Ensayo 2.....	64
Figura 47. ΔP y caudal vs tiempo en Ensayo 3.....	65
Figura 48. Temperaturas (pirómetro y muestra) y caudal en ensayo 3	66
Figura 49. Temperatura de la muestra y concentración de gases en Ensayo 3.....	66
Figura 50. Canales de aire formados en la muestra durante el Ensayo 3.	67
Figura 51. Imágenes de cámaras infrarrojas para ensayos ferrita de níquel (izquierda) y SiC verde (derecha)	67
Figura 52. Vectores de velocidad (izda) y fracción volumétrica (dcha) para fase secundaria en simulación 1	68
Figura 53. Vectores de velocidad (izda) y fracción volumétrica (dcha) para fase primaria en simulación 1	68
Figura 54. Presión relativa (izda) y presión dinámica (dcha) para fase secundaria en simulación 1	69
Figura 55. Presión relativa (izda) y presión dinámica (dcha) para fase primaria en simulación 1	69
Figura 56. Vectores de velocidad (izda) y fracción volumétrica (dcha) para fase secundaria en simulación 2	70

Figura 57. Vectores de velocidad (izda) y fracción volumétrica (dcha) para fase primaria en simulación 2	71
Figura 58. Presión relativa (izda) y presión dinámica (dcha) para fase secundaria en simulación 2	71
Figura 59. Presión relativa (izda) y presión dinámica (dcha) para fase primaria en simulación 2	71
Figura 60 Temperatura en rango 600-700 K (izda) y en rango 682-700 K(dcha).....	72
Figura 61. Imagen de trazado de rayos completo	73
Figura 62. Diagrama de Gantt del proceso de experimentación	85
Figura 63. Diagrama de Gantt completo.....	87
Figura 64. Banco de ensayos (Vista frontal).....	91
Figura 65. Banco de ensayos (Vista lateral)	91
Figura 66. K vs Longitud de onda.	94
Figura 67. L vs Longitud de onda	95
Figura 68. K vs Diámetro de partícula.....	95
Figura 69. L vs Diámetro de partícula	95
Figura 70. K vs Fracción volumétrica	96
Figura 71. L vs Fracción volumétrica.....	96

Índice de tablas

Tabla 1. Valores de C_1 y C_2 según diversos autores [11]	4
Tabla 2. Resumen de los reactores mencionados.....	21
Tabla 3. Grosor de capas en función de la fracción volumétrica de partículas.	38
Tabla 4. Coeficientes ópticos según fracción volumétrica.....	39
Tabla 5. Costes asociados a materiales en la realización del trabajo.	82
Tabla 6. Costes asociados a disponibilidad y uso de equipos.	83

Resumen

El objetivo del presente trabajo es la caracterización, tanto teórica como experimental, de un reactor de lecho fluidizado para operaciones de termoquímica solar. En el apartado experimental se emplea un reactor de lecho fluidizado cedido por el CIEMAT. Para la parte numérica, se realiza un análisis óptico-energético y un estudio termofluidodinámico (dinámica de fluidos computacional, DFC).

Se llevan a cabo ensayos en frío y en caliente para la parte experimental. Los ensayos en frío tienen el objetivo de demostrar la teoría establecida de fluidización, usando partículas de alúmina y ferritas de níquel. Los ensayos en caliente se realizan para observar el comportamiento de un reactor de lecho fluidizado irradiado. Se emplean partículas de carburo de silicio (SiC) y ferritas de níquel.

El análisis óptico-energético se realiza usando el software de trazado de rayos *TracePro*. La simulación se hace con partículas de α -SiC. Las propiedades del material se obtienen con un software adicional. Por otra parte, el estudio DFC se realiza con una licencia académica de *Ansys Fluent*. Se hacen 2 simulaciones de un modelo euleriano de 2 fases, sin condiciones de calor y con 2 paredes con una temperatura fijada.

Abstract

The aim of this project is the characterization, both theoretical and experimental, of fluidized bed reactor for solar thermochemical operations. In the experimental section a fluidized bed reactor donated by CIEMAT is used. For the numerical section, an optical-energetic analysis and a thermo-fluid dynamic study (computational fluid dynamics, CFD) are performed.

Cold and hot experiments are carried out for the experimental section. Cold experiments have the objective of demonstrating the established theory of fluidization, using alumina and nickel ferrites particles. Hot experiments are realized to notice the behavior of an irradiated fluidized bed reactor. Silicon carbide (SiC) and nickel ferrites particles are used.

The optical-energetic analysis is performed using the ray-trace software *TracePro*. The simulation is made with α -SiC particles. Additional software is used to obtain the properties of the material. Besides, the CFD study is made using an academic license of *Ansys Fluent*. Two simulations of an eulerian model with 2 phases are made, without any heat condition and with 2 walls having a fixed temperature condition.

AGRADECIMIENTOS

El mayor de los agradecimientos es para mi familia, por estar siempre para todo lo que he necesitado y apoyarme, sea cual sea mi decisión, además de darme todo lo necesario para seguir formándome según mi gusto.

Agradecer también a todos aquellos amigos que he tenido a lo largo de estos años, porque un camino tan largo se hace mejor en buena compañía. A los Subastaos, por estar ahí todos y cada uno de los días aguantándome. Al club del Machete, por lo que hemos pasado durante toda la carrera. Y mención especial para Nico por encontrar esa licencia gratuita de Fluent que tanto necesitaba. La vida te lo pagará con muchos cafés muy baratos.

Y por último, agradecer a José González, tutor de este trabajo y de mis prácticas de empresa en IMDEA Energía, por la oportunidad concedida, además de a toda la unidad de procesos de alta temperatura. En especial, agradecer a Lucía todo ese tiempo que hemos trabajado juntos, que no ha debido de ser fácil explicar tantas cosas a alguien tan ajeno al mundo de la investigación. Muchas gracias.

CARACTERIZACIÓN TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DE UN
REACTOR DELECHO FLUIDIZADO PARA OPERACIONES DE
TERMOQUÍMICA SOLAR

DOCUMENTO N° 1: MEMORIA

Documento 1: Memoria

1. Objetivo y alcance

El objetivo principal del presente proyecto de fin de grado profundizar en el conocimiento de reactores solares de partículas de lecho fluidizado para su uso en termoquímica solar. El uso de la energía solar concentrada permite suministrar energía limpia y alcanzar las elevadas temperaturas que permiten realizar reacciones químicas. Una de las aplicaciones contempladas reside en la producción de hidrógeno o combustibles (llamados solares) mediante el uso de ciclos termoquímicos. Para comprender el funcionamiento del reactor se realizan análisis experimentales y numéricos, siendo estos de tipo óptico-energético y termofluidodinámico (CFD).

La parte experimental se basa en una serie de experimentos en un reactor de partículas cedido por CIEMAT e instalado en un banco de ensayos que permite calentarlo por su parte superior con un haz de luz concentrada creado por un simulador solar de alto flujo. Éste consta de una lámpara de arco de xenón de 7 kW y un reflector elipsoidal. Las partículas introducidas en el reactor son ferritas de níquel y carburo de silicio.

El estudio numérico se hace en varias etapas. En primer lugar, se analiza la transferencia de radiación mediante simulaciones por trazado de rayos (que emplean el método Montecarlo). Se trata de comprender la absorción de la radiación en el lecho de partículas procedente del simulador solar de alto flujo y su absorción por el lecho de partículas. Para ello se han empleado las herramientas de simulación *TracePro*® y *MiePlot*.

Después se ha llevado a cabo un análisis termofluidodinámico usando *ANSYS Fluent* (en su versión académica). Se simulaban lechos fluidizados en 2D en 2 situaciones, en frío y con una temperatura fijada en una parte localizada de la pared del reactor.

2. Antecedentes

2.1 Introducción

En este capítulo se lleva a cabo una breve introducción al fenómeno de la fluidización, así como a los diferentes regímenes de fluidización. Una vez mencionados, se justifica el régimen de fluidización usado atendiendo a diversos aspectos. A continuación se exponen ejemplos de lechos fluidizados en aplicaciones solares. Por último, se explican aspectos relacionados con la energía solar de concentración y con termoquímica solar.

2.2 Estado del arte de lecho fluidizado

En esta sección se explica exclusivamente el tema de la fluidización. Primero se habla de los conceptos para una partícula, y posteriormente se razona para un lecho con una distribución de partículas. Además, se exponen las propiedades que las partículas adquieren en un lecho fluidizado.

2.2.1 Concepto de fluidización

Comportamiento mono-particular

El fenómeno de fluidización consiste en otorgar a un sólido las propiedades de un fluido. Esto se logra mediante el paso de un fluido a través del sólido, de manera que éste adquiere movimiento sin llegar a ser arrastrado por el fluido.

Contemplando el comportamiento de una partícula en el seno de un fluido, esto sucede cuando la fuerza de arrastre provocada por el fluido sobre la partícula iguala el peso de dicha partícula. La fuerza de arrastre corresponde a la siguiente expresión (1):

$$F = C_D \rho_f U_f^2 A_p \quad (1)$$

donde C_D es el coeficiente de arrastre de la partícula, ρ_f es la densidad del fluido, U_f es la velocidad del fluido y A_p es el área transversal de la partícula.

C_D depende del número de Reynolds del fluido. En este trabajo, se van a obtener números de Reynolds bajos (menores de 10), por lo que C_D no tiene una expresión fija en función del número de Reynolds. Diversos autores han obtenido algunas fórmulas empíricas para hallar C_D .

Una vez se iguala la fuerza gravitacional y la fuerza de arrastre, la partícula se encuentra en estado fluidizado. Cuando esto ocurre, la velocidad del fluido en ese instante se conoce como velocidad de mínima fluidización U_{mf} .

La expresión de U_{mf} para el caso de una partícula es bastante clara. Sin embargo, existen ciertas complicaciones para aplicar el mismo procedimiento para un sistema multiparticular (comúnmente, un lecho de partículas), pues entran en juego otros parámetros como la esfericidad de las partículas ϕ o la porosidad del lecho ε .

Por tanto, en un sistema multiparticular no tiene sentido usar C_D , pues no se puede calcular dicho valor para una distribución de partículas (tratando las partículas como un conjunto).

Comportamiento multi-particular

A la hora de establecer el comportamiento de un lecho fluidizado, la correlación velocidad-diámetro de partícula no es tan evidente. Ergun (1952) propuso una ecuación (2) para relacionar ambos:

$$\frac{\Delta P}{L} \cdot \frac{g d_p \phi}{2 \rho_f U^2} \cdot \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} = 75 \frac{1-\varepsilon}{\phi (Re)_p} + 0.875 \quad (2)$$

A partir de la cual se puede obtener la caída de presión en el estado de mínima fluidización. Incluyendo la expresión que relaciona directamente la caída de presión con la diferencia de densidad entre fluido y sólido y la porosidad del lecho, se obtiene la expresión (3):

$$Ar = 150 \frac{(1-\varepsilon_{mf})}{\phi^2 \varepsilon_{mf}^3} Re_{mf} + 1.75 \frac{1}{\phi \varepsilon_{mf}^3} Re_{mf}^2 \quad (3)$$

Donde:

$$Ar = \frac{gL^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f)}{\mu^2}$$

es el número de Arquímedes y

$$Re_{mf} = \frac{\rho_f U_{mf} d_p}{\mu}$$

ϕ representa la esfericidad de las partículas (toma valor entre 0 y 1, correspondiendo el valor de 1 a esfera perfecta) y ε la porosidad del lecho, que se define como el volumen ocupado por aire entre el volumen total, expresado en tanto por uno.

Wen y Yu (1966) sugieren una forma simplificada de la ecuación de Ergun cuando se cumple (4):

$$\frac{1}{\phi \varepsilon_{mf}^3} \cong 14 \quad y \quad \frac{(1-\varepsilon_{mf})}{\phi^2 \varepsilon_{mf}^3} \cong 11 \quad (4)$$

Entonces, la ecuación de Ergun en términos del número de Arquímedes y de Reynolds puede simplificarse como (5):

$$(Re)_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1 \quad (5)$$

Existen valores de C_1 y C_2 propuestos por diversos autores (tabla 1):

Tabla 1. Valores de C_1 y C_2 según diversos autores [11]

Referencia	C_1	C_2
Wen y Yu (1966)	33.7	0.0408
Richardson (1971)	25.7	0.0365
Saxena y Vogel (1977)	25.3	0.0571
Babu et al. (1978)	25.25	0.0651
Grace (1982)	27.2	0.0408
Chitester et al. (1984)	28.7	0.0494

Al estar tratando con un sistema multiparticular, la distribución de diámetros de las partículas es raramente estrecha, por lo que se tendrá que aproximar el diámetro a usar en las ecuaciones. Se recomienda usar el promedio superficie-volumen (6)

$$\bar{d}_{sv} = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (6)$$

donde x_i es la fracción en peso de partículas con diámetro d_{pi} . Con motivo de simplificar los cálculos, también se puede usar el tamaño de partícula predominante en la muestra.

Propiedades de partículas en lecho fluidizado

Un lecho fluidizado en fase densa se asemeja mucho a un fluido en ebullición. Un lecho fluido en fase densa se caracteriza por tener una distribución de partículas estrecha, por lo que la mayor parte de las partículas poseen una U_{mf} parecida, y por tanto, se encuentran en el mismo estado de fluidización.

De esta manera, un objeto voluminoso con pequeña densidad flota cuando se intenta sumergir en el lecho (figura 1a), las partículas del lecho fluidizado fluyen a través de un pequeño agujero de forma similar a un fluido (figura 1b), la superficie del lecho fluidizado se mantiene horizontal aun cuando el reactor se encuentra inclinado (figura 1c) y se rigen por el principio de los vasos comunicantes (figura 1d).

El principio de los vasos comunicantes dice que 2 depósitos conectados entre sí por algún punto sumergido en el fluido que comparten tienen la superficie libre del fluido a la misma altura. Esto se puede aplicar a 2 lechos fluidizados con distintas alturas que se pretenden conectar: la altura de ambos lechos se igualará en el momento en que se conecten.

Además, se puede medir la diferencia de presión entre 2 puntos del lecho. Dicha diferencia de presión es proporcional a la diferencia de altura entre ellos (figura 1e).

Las 5 propiedades mencionadas se pueden ver en la figura 1.

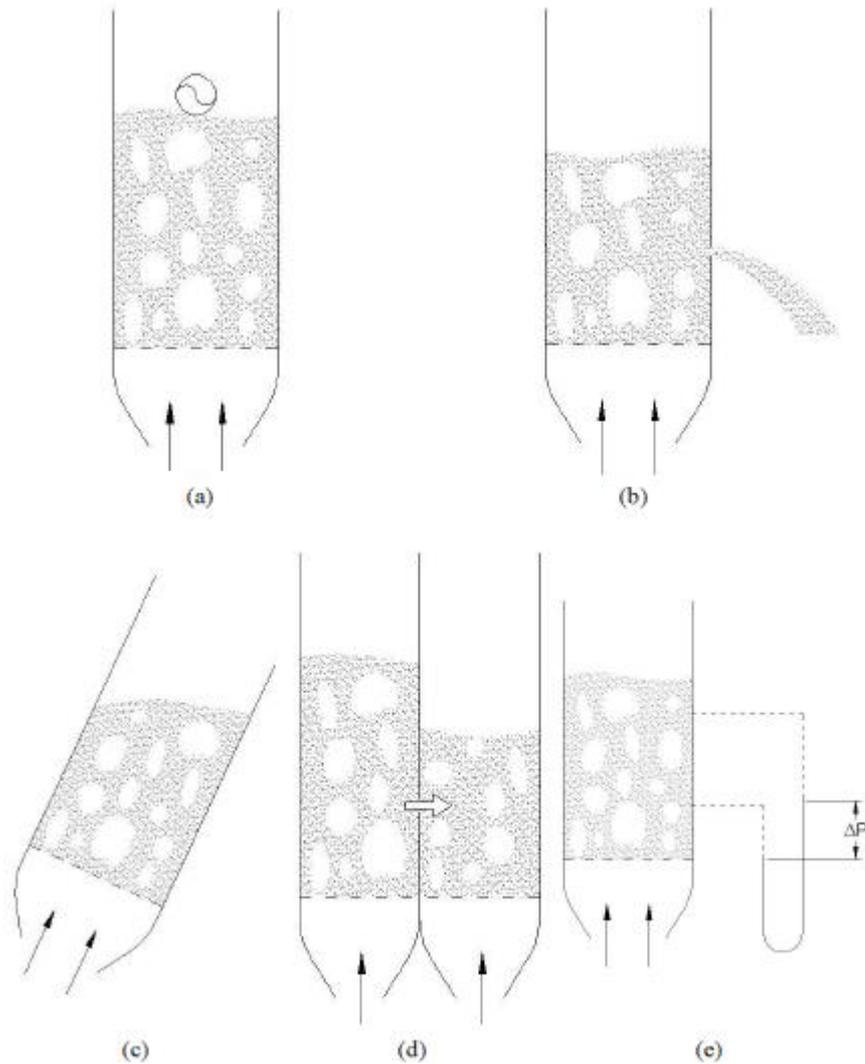


Figura 1. Comportamiento fluido de un lecho fluidizado. a) Los objetos ligeros flotan sobre la superficie b) Las partículas fluyen formando un chorro a través de un agujero c) la superficie se mantiene horizontal al inclinar el lecho d) Al poner en contacto 2 lechos sus superficies libres se igualan e) La diferencia de presión entre 2 puntos es proporcional a la diferencia de altura.

2.2.2 Regímenes de fluidización

En esta sección se van a tratar los diferentes regímenes de fluidización de acuerdo a la velocidad del fluido. Así, aparte de la ya mencionada velocidad de mínima fluidización, se puede hablar de la velocidad de mínimo burbujeo U_{mb} como la velocidad a partir de la cual empiezan a apreciarse la aparición de burbujas en el lecho.

Análogamente, se puede definir la velocidad terminal U_t como la velocidad a partir de la cual las partículas se ven arrastradas fuera del reactor.

Usando las 3 velocidades ya definidas, se pueden establecer 4 regímenes diferentes:

- Lecho fijo, para $U < U_{mf}$
- Lecho fluidizado homogéneo, para $U_{mf} < U < U_{mb}$
- Lecho burbujeante, para $U_{mb} < U < U_t$
- Lecho turbulento, para $U > U_t$

Dentro de la clasificación de régimen burbujeante nos podemos encontrar con distintos niveles, dependiendo del tamaño de las burbujas (que a su vez dependen de la velocidad del fluido). También hay diferentes niveles dentro del régimen turbulento, según la estabilidad de la superficie libre del lecho (es decir, si se puede percibir una superficie libre turbulenta o si ya no existe dicha superficie libre). Sin embargo, estos niveles de fluidización no entran dentro del ámbito de este estudio.

Se pueden observar los diferentes regímenes de fluidización en la figura 2.

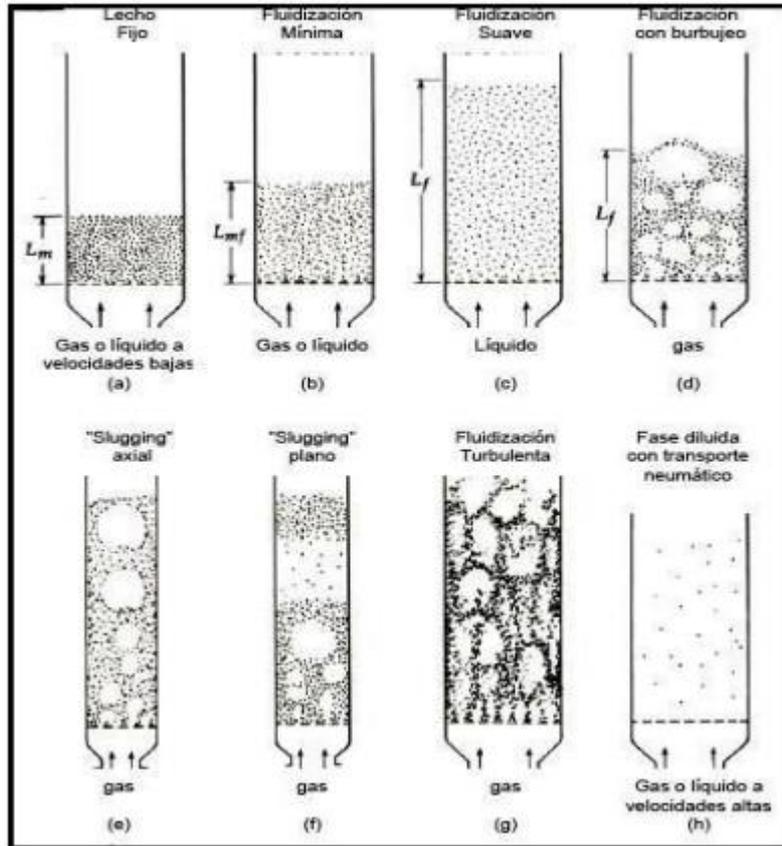


Figura 2. Comportamiento de los diferentes regímenes de fluidización, ordenados de menor a mayor velocidad del fluido.

Transición lecho fijo – fluidizado homogéneo

Como ya se ha mencionado anteriormente, en el régimen de lecho fijo, la velocidad del fluido no es suficiente como para mantener en suspensión todo el lecho de partículas.

Para evaluar la transición de un estado a otro, sólo se ha comentado un procedimiento ‘óptico’, es decir, cuando se observa que las partículas empiezan a suspenderse. Sin embargo, este método no es muy preciso. Una buena manera de observar esta transición es representando y analizando la gráfica de pérdida de presión en el lecho frente a velocidad del fluido, ‘ ΔP vs U ’, como se puede ver en la figura 3.

Una fluidización normal correspondería a la curva ACDEFG. La altura a la que se encuentra C, y por tanto, la velocidad a partir de la cual empieza a observarse movimiento localizado en el lecho, depende de la distribución de las partículas.

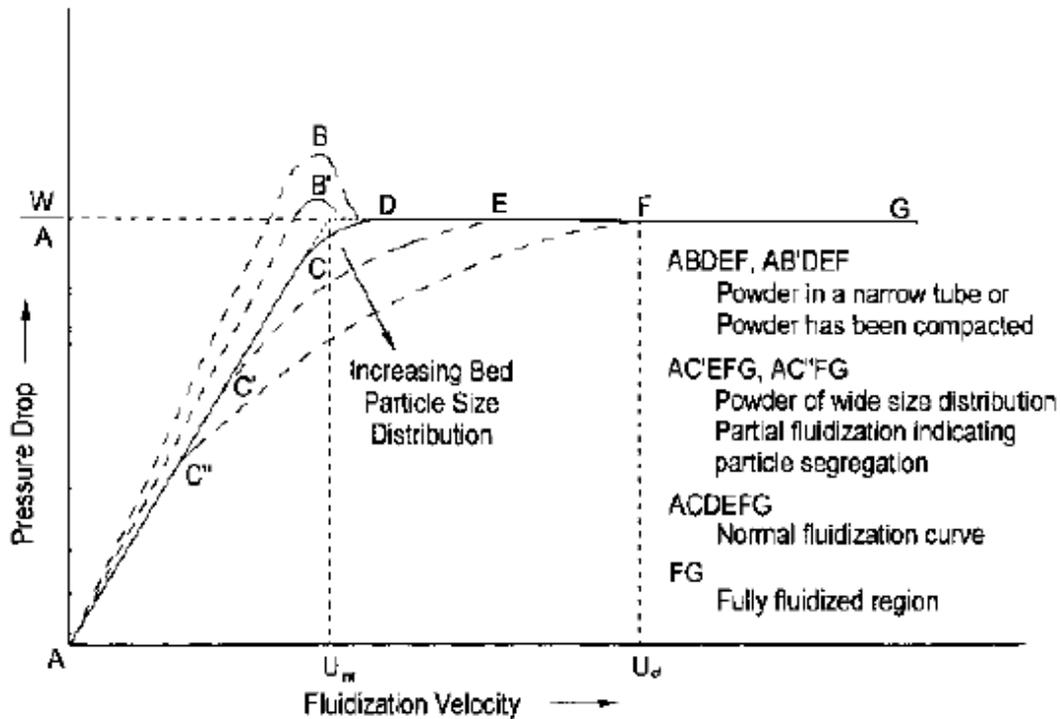


Figura 3. Caída de presión vs velocidad del fluido. [11]

Una vez se supera la fuerza gravitacional ejercida en las partículas (representada por W/A , donde W es peso y A es superficie), el lecho se encuentra en estado fluidizado y un aumento de la velocidad del fluido no conlleva un incremento de presión.

Sin embargo, se puede observar que dicha caída de presión es superada antes de llegar al estado fluidizado. Puede ser debido a los efectos de estar en un tubo estrecho o a que la muestra ha sido compactada. (puntos B, B').

El fenómeno de fluidización queda representado mediante una curva. Para obtener una velocidad de mínima fluidización, se intersecan las rectas que corresponden a la región fluidizada (EF) y a la región en la que la caída de presión es lineal (AC). En la intersección de ambas se puede leer U_{mf} en el eje de abscisas. De esta manera, la transición lecho fijo – fluidizado homogéneo se hace claramente visible.

En realidad, la caída de presión máxima es menor que W/A . Esto es debido a que un pequeño porcentaje de las partículas se sostienen en las paredes del reactor. Las principales causas de este fenómeno son un diseño imperfecto del distribuidor de gas, la dimensión finita del reactor y la posibilidad de canalización del fluido.

Una vez se alcanza la velocidad de mínima fluidización, el lecho comienza a expandirse homogéneamente, incrementando así su altura. Una vez se deja transcurrir un transitorio de tiempo para alcanzar el estado final de fluidización, la altura del lecho se puede calcular mediante la expresión (7):

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_l}{\rho_p} = 1 - (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot \frac{L_{mf}}{L} \quad (7)$$

Donde ρ_l es la densidad de la fase primaria, ρ_p es la densidad de las partículas, ε_{mf} es la porosidad de mínima fluidización, L_{mf} es la altura del lecho en estado de mínima fluidización y L es la altura del lecho en un estado de fluidización superior al de mínima fluidización

Transición lecho fluidizado homogéneo – burbujeante

De forma general, las burbujas aparecerán exclusivamente cuando se supere la velocidad de mínimo burbujeo U_{mb} . Sin embargo, según el grupo al que pertenezcan las partículas en la clasificación de Geldart de polvos, algunos grupos pueden presentar ciertas excepciones.

La clasificación de polvos de Geldart establece 4 grupos diferentes de partículas según sus propiedades de fluidización en condiciones ambiente.

Las partículas que al ser fluidizadas por aire en condiciones ambiente muestran un estado de fluidización no burbujeante a la velocidad de mínima fluidización, seguido de un estado burbujeante si aumenta la velocidad de fluidización, están en el grupo A. Las partículas que bajo estas condiciones presentan exclusivamente un estado burbujeante pertenecen al grupo B. Las partículas del grupo C son finas y cohesivas, por lo que son incapaces de fluidizar. En el grupo D se encuentran las partículas de gran tamaño que forman lechos de chorro.

Así, para los grupos B y D, la velocidad de mínimo burbujeo coincide con la de mínima fluidización ($U_{mf} = U_{mb}$). Por tanto, se producirá directamente una transición de lecho fijo a lecho fluidizado burbujeante.

Para las partículas en el grupo A, se producen las 2 transiciones mencionadas por separado, por lo que ambas velocidades no coinciden ($U_{mf} \neq U_{mb}$). Las partículas del grupo C son incapaces de fluidizar por su propia naturaleza física.

Dentro del grupo A, cuando se supera U_{mb} , empiezan a formarse pequeñas burbujas dentro del lecho. Estas burbujas son zonas de aire que, durante su movimiento de ascensión vertical por el lecho, desplazan a las partículas. Si se sigue aumentando la velocidad del gas, estas burbujas crecerán de tamaño, pudiendo incluso ser de la misma dimensión que el diámetro del lecho.

A causa del burbujeo del lecho, la parte superior del lecho ya no tiene una superficie libre totalmente definida y estable: Llega a ser una zona definida, pero hay fluctuaciones en el nivel de la superficie libre por el efecto de la llegada de burbujas. Por eso, si fuera necesario definir una altura de lecho en régimen burbujeante, se usará una media de todos los valores temporales de la altura.

Diversos autores han propuesto alguna correlación para establecer un valor teórico y calculable de la velocidad del gas en la transición homogéneo – burbujeante. [11]

2.3 Justificación

Una vez explicados los regímenes de fluidización en los que no hay arrastre de partículas al exterior del reactor, se procede a justificar el uso del régimen de fluidización homogéneo.

El primer umbral a establecer es el ya mencionado. Se busca que las partículas queden confinadas dentro del reactor. Por tanto, los regímenes turbulentos (y de mayor velocidad de gas que turbulento) quedan excluidos, centrándonos en los regímenes de lecho fijo, fluidizado homogéneo y burbujeante.

De acuerdo a la distribución de la temperatura en el lecho, el lecho fijo posee la desventaja de que no tiene ningún mecanismo para homogeneizar dicha temperatura. El régimen de lecho fluidizado consigue esta homogeneización mediante transferencia de masa y de calor con coeficientes de película entre fluido y partículas.

El modelo de transferencia de masa empleado es una correlación de lecho homogéneo, la cual establece una similitud entre lecho homogéneo y lecho fijo. Los valores obtenidos teóricamente para los coeficientes de masa en ambos tipos de distribución pueden diferir de los valores

calculados para un modelo de partículas esféricas muy dispersas. En el caso de partículas finas, los valores medios medidos de los coeficientes de transferencia de masa pueden estar por debajo de los valores mínimos calculados teóricamente para esferas dispersas. La causa de esto es la sobreestimación de los potenciales de transferencia o de las superficies activas involucradas. Por esto, si se desea realizar una estimación de los coeficientes de transferencia de masa, se tratarán como unos coeficientes de naturaleza empírica, usándose los valores teóricos. La figura 4 muestra unos comentarios de Kunii y Levenspiel acerca del tema.

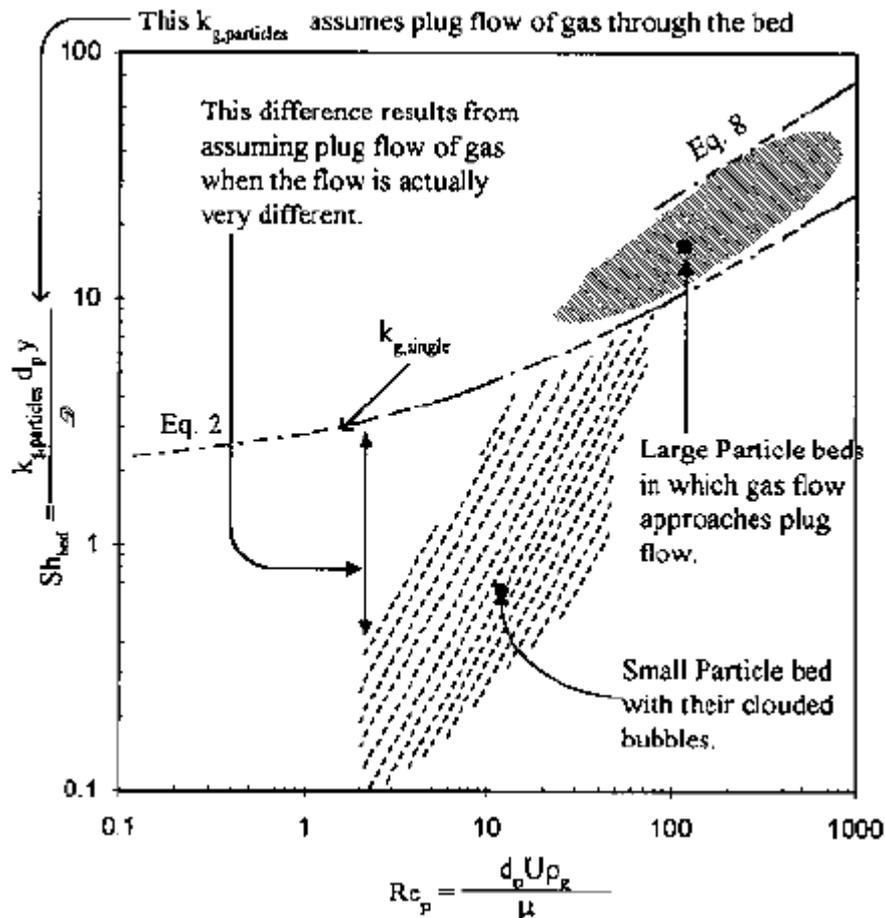


Figura 4. Resumen de la transferencia de masa partícula – gas.

La transferencia de masa es dependiente de la velocidad del gas fluidizador. Sin embargo, hay que acotar el rango de dicha velocidad del gas. Velocidades demasiado altas pueden conllevar problemas de erosión dentro del reactor, tanto de las paredes como del distribuidor. Para ambos elementos, el ratio de erosión corresponde a la siguiente fórmula (8), propuesta por Karri (1990):

$$\text{Erosión} \propto \frac{K_e \rho_{g,h}^2 U_h^3 d_h^2 d_p^3 \rho_p^2}{\phi} \quad (8)$$

donde K_e es una constante de erosión, $\rho_{g,h}$ es la densidad del gas entrante en los agujeros de la pared o el distribuidor, U_h es la velocidad del gas a través de dicho agujero, d_h es el diámetro del agujero y ϕ es el factor de forma de la partícula.

Por tanto, los efectos de erosión aumentan con el cubo de la velocidad. Sin embargo, estos sólo son los efectos de flujos de partículas a través de paredes o distribuidores. También existe un efecto de erosión por el rozamiento de las partículas con la pared, provocado por el movimiento interno del lecho fluidizado.

Así, el objetivo es optimizar la relación transferencia de masa – erosión. Para el presente estudio, la transferencia de masa proporcionada por un régimen homogéneo es suficiente, por lo que usar un régimen burbujeante significa aumentar el ratio de erosión innecesariamente.

Además, una mayor velocidad del gas fluidizador implica un mayor consumo de potencia por parte de dispositivos mecánicos. El rango de velocidades y caudales empleado en este estudio es tan pequeño que las potencias empleadas por los regímenes homogéneo y burbujeante son muy pequeñas. Sin embargo, para un futuro estudio de una planta piloto en el que se emplee un mayor caudal de gas fluidizador (por mayor diámetro de reactor y potencia incidente), habría que realizar un estudio de la potencia consumida.

Por las razones explicadas, el régimen elegido para usar en el reactor es el régimen fluidizado homogéneo. Además de las ventajas ya mencionadas, hay otra ventaja muy importante en cuanto al tamaño de partículas a usar y la presión empleada.

En este estudio, la presión del reactor va a ser parecida a la ambiental (extracción a presión ambiental) y las partículas usadas están dentro del grupo A de la clasificación de polvos de Geldart con un tamaño medio entre 50 y 300 μm . Dentro de este rango, la velocidad de mínima fluidización se mantiene cuasi-constante para un amplio rango de presiones, como muestra la figura 5.

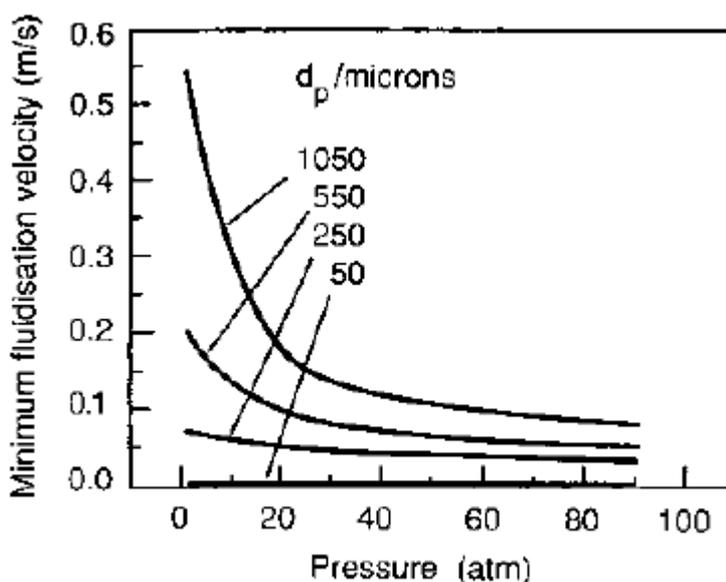


Figura 5. U_{mf} vs Presión para diferentes tamaños de partícula

Como se puede observar, para partículas de 250 μm , la disminución de U_{mf} en el rango de 0 a 80 atm no excede el 50% del valor inicial, concentrándose esta disminución en las primeras 20 atm. Por tanto, se pueden mantener unas condiciones de caudal aproximadamente estables en el caso de procesos que necesiten grandes variaciones de presión dentro del reactor.

Atendiendo a aspectos de transferencia de calor, Ozkaynak et al. (1983) demuestra que por encima de los 800 $^{\circ}\text{C}$, el 35% de la transferencia de calor total en el lecho se produce en forma de radiación. Destacar que por el hecho de encontrarnos en un régimen de lecho fluidizado, la transferencia de calor entre partículas es mejor que en lecho fijo.

2.3 Uso y aplicaciones de reactores de lecho fluidizado

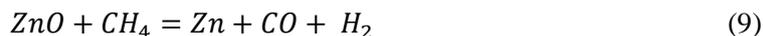
Los reactores de lecho fluidizado permiten obtener mejores coeficientes de transferencia de calor en reacciones gas-sólido, por lo que se ha centrado su estudio en aplicaciones de alta temperatura.

Este aspecto representa una gran ventaja cuando la transferencia de calor es quien limita la cinética de la reacción.

Un primer diseño de un reactor de lecho fluidizado fue propuesto por Flamant en 1980[1]. Consistía de un tubo de sílice transparente, de 34 mm de diámetro, entre 2 soportes metálicos. El tubo estaba irradiado directamente con radiación solar concentrada procedente de un horno solar de 2 kW_{th}. Se hicieron ensayos de calentamiento de materiales refractarios entre 600 °C y 1300 °C y descarbonatación de calcita a 850 °C. Como continuación del diseño, se aumentó la potencia del reactor hasta los 50 kW. Posteriormente, se propusieron algunas mejoras al prototipo, como un lecho de paredes opacas irradiado desde la parte superior.

Los primeros ensayos en termoquímica solar se llevan a cabo en laboratorios mediante el uso de simuladores solares y reactores a escala, por su facilidad de operación, maniobrabilidad y construcción. Se muestra a continuación el modelo de un pequeño reactor desarrollado por Steinfeld et al. [2] para la producción de gas de síntesis y zinc combinando los procesos de reducción de óxido de zinc (ZnO) y reformado de metano (CH₄). La producción de zinc requiere un gran gasto de energía (tanto eléctrica como térmica). Para separar térmicamente el ZnO sin agentes reductores, se necesitan temperaturas de 2350 K. Industrialmente, se hace mediante un proceso carbotérmico y electrolítico que emplea carbono como reductor, para bajar la temperatura hasta los 1200K. Se emplea carbón de coque por su alta disponibilidad y bajo precio, a pesar de ser un gran contaminante.

El objetivo del uso de metano como reductor es la producción de gas de síntesis (CO y H₂), empleado en numerosas industrias como principal combustible. Para llevar a cabo el reformado necesita un donante de oxígeno, en este caso, el ZnO. Se puede observar la reacción en (9):



Así, se obtiene una ventaja triple: la obtención de gas de síntesis de gran calidad sin uso de catalizadores, los gases de escape tienen suficiente valor económico para justificar su recolección en vez de su emisión, y la integración de ambos procesos en un solo reactor puede mejorar la eficiencia en general. Para reducir a cero las emisiones de gases de efecto invernadero del proceso, el calor necesario para llevar a cabo la reacción se suministra mediante energía solar, eliminando costes de combustible consumido y producción de gases contaminantes.

El reactor empleado (figura 6) es un tubo de cuarzo de 20 mm de diámetro que contiene un lecho fluidizado, rodeado de un concentrador parabólico compuesto (CPC). Toda la radiación incidente en el reactor es dirigida al lecho, alcanzándose altos niveles de temperatura y una gran eficiencia térmica. Para hacer incidir radiación solar en el reactor, se dispone de un sistema de concentración primaria en 2 etapas (figura 7), que proporciona 15 kW_{th} con un nivel de flujo de 4000 kW/m². Este diseño ofrece una inercia térmica muy baja, buena resistencia térmica y adaptabilidad a procesos de absorción directa.

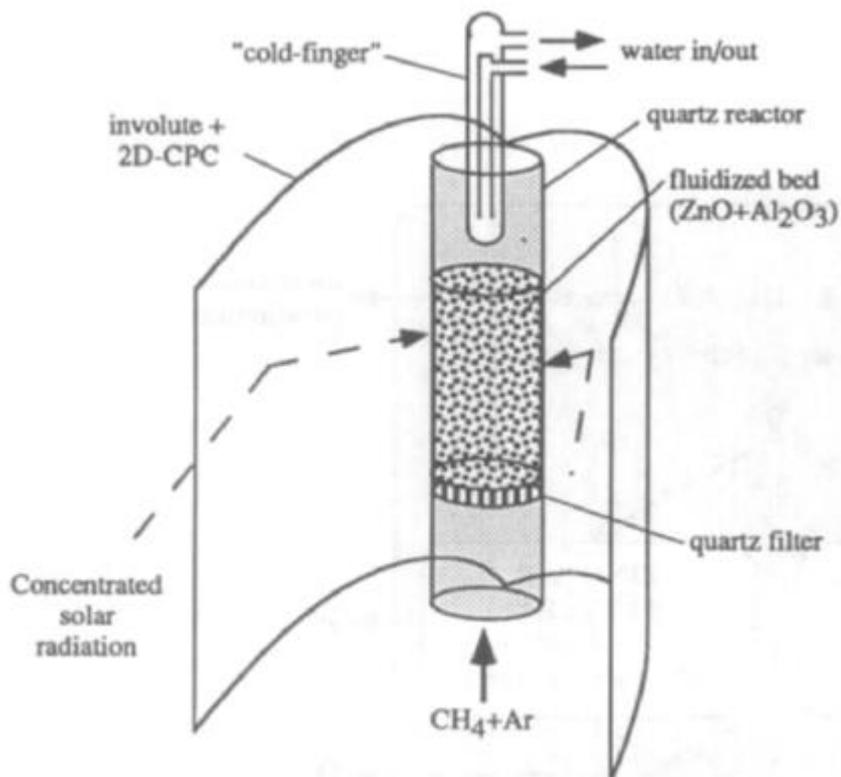


Figura 6. Esquema del reactor solar y el CPC. [2]

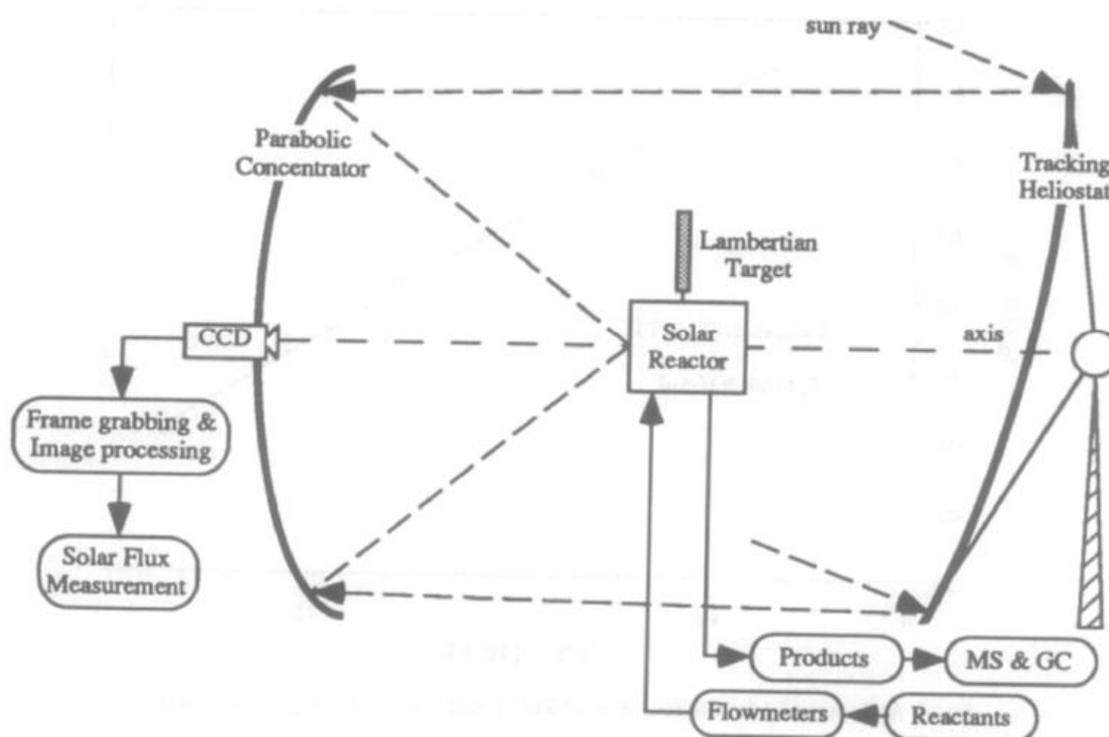


Figura 7. Instalación experimental del concentrador primario. [2]

El lecho opera en condiciones de burbujeo vigoroso, a una temperatura uniforme. Para medir la intensidad de flujo incidente en el reactor, se usa una cámara CCD apuntando al reactor. Se introduce ZnO con un tamaño de grano de $1,2\ \mu\text{m}$ mezclado con partículas de alúmina de $1\ \text{mm}$ para evitar la sinterización de la muestra.

La operación se lleva a cabo a 1370 K y 57 W/cm², consiguiéndose una reducción máxima del CH₄ en el gas reductor del 43%. El resto queda sin reaccionar dentro del lecho. Se observan pequeñas cantidades de H₂O y CO₂ formadas durante la reacción, posiblemente como resultado de la metanización y del cambio gas-agua (10,11):



Sin embargo, los resultados obtenidos muestran que el CH₄ solo reacciona con la superficie libre del Zn, por evidencias como una pequeña cantidad de C (sólido) encontrado junto al Zn y un ratio H₂/CO > 2. Si la reacción hubiera transcurrido como se esperaba, este ratio debería haber sido exactamente 2.

Un diseño similar, propuesto en 2009 [3], emplea la carbonatación de la cal (CaO) y la calcinación de la calcita (CaCO₃) como método de captura de CO₂ atmosférico. Separar el CO₂ directamente del ambiente es termodinámicamente no favorable, debido a que la energía libre de Gibbs es muy alta al intentar separar un gas muy diluido de otra mezcla de gases. Por tanto, esta opción es muy atractiva.

La configuración es muy parecida a la anterior, y se detalla a continuación (figura 8): Un tubo de cuarzo de 25 mm de diámetro exterior, 3 mm de grosor y 250 mm de altura contiene un lecho fluidizado de CaO/CaCO₃. El lecho es irradiado por una lámpara de arco de argón con una potencia radiativa continua de 75 kW_e y una concentración de 4250 kW/m².

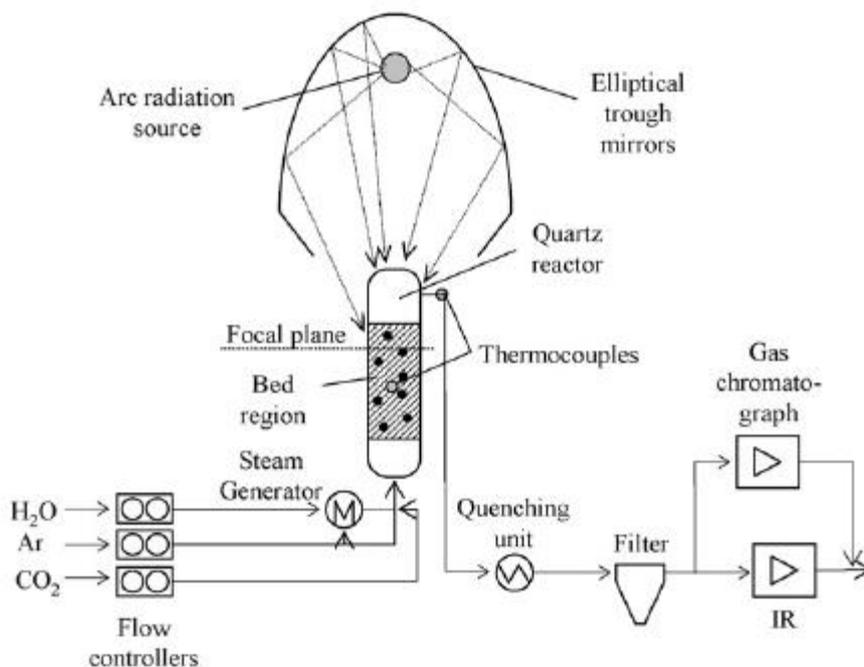


Figura 8. Esquema de reactor usado para capturar CO₂ atmosférico propuesto por A.Steinfield.[3]

En cuanto a la instrumentación, la instalación cuenta con un termopar colocado en el interior del lecho y otro en la salida de los gases. El CO₂ a la salida se analiza continuamente con un analizador infrarrojo y cada 90 s con un cromatógrafo de gases.

Para realizar el experimento, durante la etapa de carbonatación se introduce una muestra de aire sintético con una concentración de CO₂ de 500 ppm y de vapor de agua del 17%, con un caudal de 2 NI/min. Se mantiene durante 600 s a una temperatura de 400 °C.

Una vez se completaba la carbonatación, el gas fluidizador se cambia a argón y se baja el caudal a 1,75 NI/min para completar el ciclo con la etapa de calcinación. Sin embargo, se usa vapor de agua en vez de argón para eliminar los costes de la recuperación de un gas inerte. La temperatura se mantiene entre 800 °C (temperatura favorable para la reacción de calcificación) y 875 °C (temperatura de sinterización de la muestra). Destacar que para lograr la calcinación en una corriente de CO₂ puro a un ratio razonable se necesitan 900 °C, pero la muestra sinteriza.

Al realizar el ensayo, se alcanzó una absorción total de CO₂ con un tiempo de residencia del gas fluidizador de 1,3 s en cada ensayo de 600 s, y una regeneración total del CaO en 500 s. Tras 5 ciclos, el balance de masa del CO₂ es del 99% respecto del inicial. Por lo tanto, este trabajo muestra los beneficios del uso de la energía solar para la captación de CO₂ atmosférico y el uso de vapor de agua en dicho proceso.

Una aplicación de lechos fluidizados diferente a la desarrollada por Steinfield en captura de CO₂ atmosférico usando radiación solar fue propuesta por J.C. Abánades[4] en 2005, desarrollando un modelo de caldera que incorporaba un lecho fluidizado (combustor de lecho fluidizado) para rebajar el nivel de CO₂ producido durante la combustión. Dicho modelo incorporaba el mismo ciclo que el propuesto por Steinfield (CaO/CaCO₃), pero las etapas de calcinación y carbonatación se encontraban justo a la salida del combustor (figura 9). Dado que la etapa de calcinación requiere una mayor temperatura, un aporte de combustible extra era necesario.

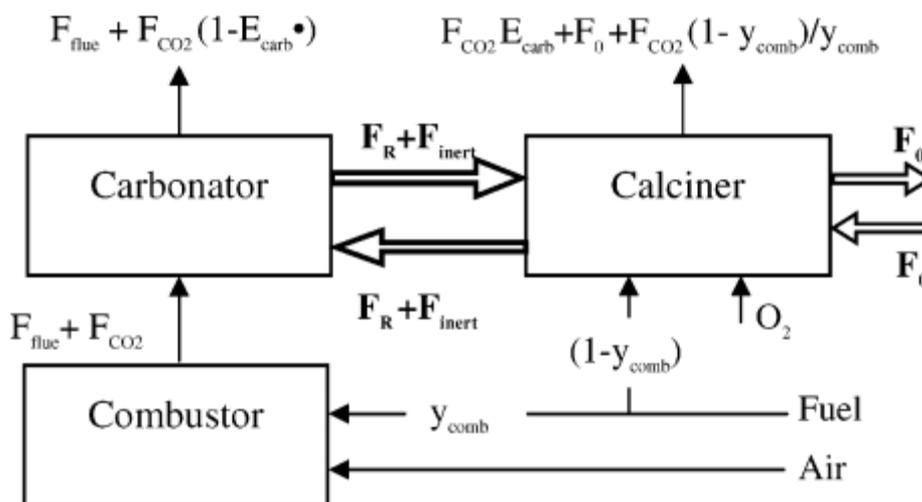


Figura 9. Esquema de combustor de lecho fluidizado propuesto por Abánades.[4]

El principal uso de un lecho fluidizado en esta aplicación se basa en la disminución de diferentes penalizaciones al intentar integrar otras aplicaciones de eliminación de CO₂ en las condiciones de operación óptimas de la planta, como por ejemplo la alta temperatura a la que los procesos de calcinación y carbonatación ocurren a la presión de operación de la central (normalmente, cercana a la ambiental).

También se han empleado lechos fluidizados en el campo de la obtención de los denominados 'combustibles solares'. El principal combustible solar es el H₂, y una de las formas de obtenerlo es mediante la disociación de las moléculas de agua. Mientras que la disociación mediante electrólisis requiere una gran cantidad de energía eléctrica, se ha demostrado que es posible obtener H₂ usando lechos fluidizados y energía solar concentrada como alternativa.

Es el caso de la instalación propuesta por N. Gokon [5] en 2007 donde consiguen la disociación de las moléculas de H_2O introduciendo partículas de ferritas de níquel dentro de un reactor de lecho fluidizado. En este caso, se usa un reactor construido íntegramente con cuarzo, con la luz incidiendo en la parte superior (figura 11a). El diámetro del lecho fluidizado es de 45 mm e incorpora en su interior una sección anular de 20 mm de diámetro para establecer la separación de 2 zonas, una de ellas bajo un mayor nivel de radiación incidente. Así se crea un lecho fluidizado con circulación interna (figura 10).

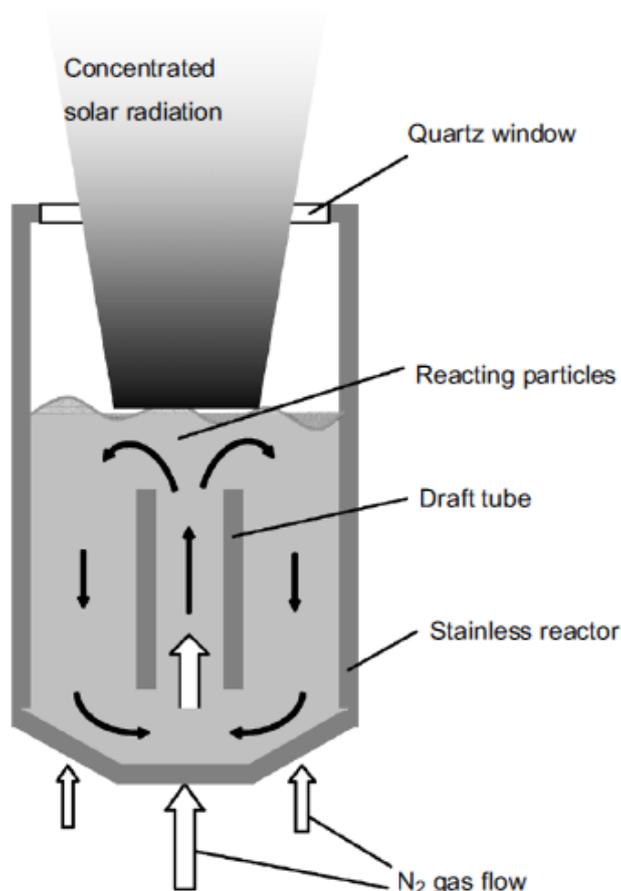


Figura 10. Diseño reactor lecho fluidizado usado para disociación de agua por N.Gokon. [5]

El reactor es iluminado por una lámpara de arco de xenón de 6 kW_e para simular la radiación solar. En la entrada del gas fluidizador, una tapa con forma de prisma cilíndrico se usa para concentrar un mayor caudal de gas en la parte interna y un menor caudal en la parte externa (figura 11b). Así, se establece una circulación dentro del reactor: ascendente en la parte más concéntrica y descendente en la periferia.

La ferrita de níquel empleada es $NiFe_2O_4$ con un soporte de óxido de circonio (ZrO_2) para evitar la sinterización de la muestra. En una irradiación de 30 minutos, el 45% de la muestra se transformó en su estado reducido. Dicha reducción se alcanza a la temperatura de $1400\text{ }^\circ\text{C}$. Posteriormente, se cambia el gas fluidizador por vapor de agua para reoxidar la ferrita y producir H_2 , a una temperatura de $1000\text{ }^\circ\text{C}$.

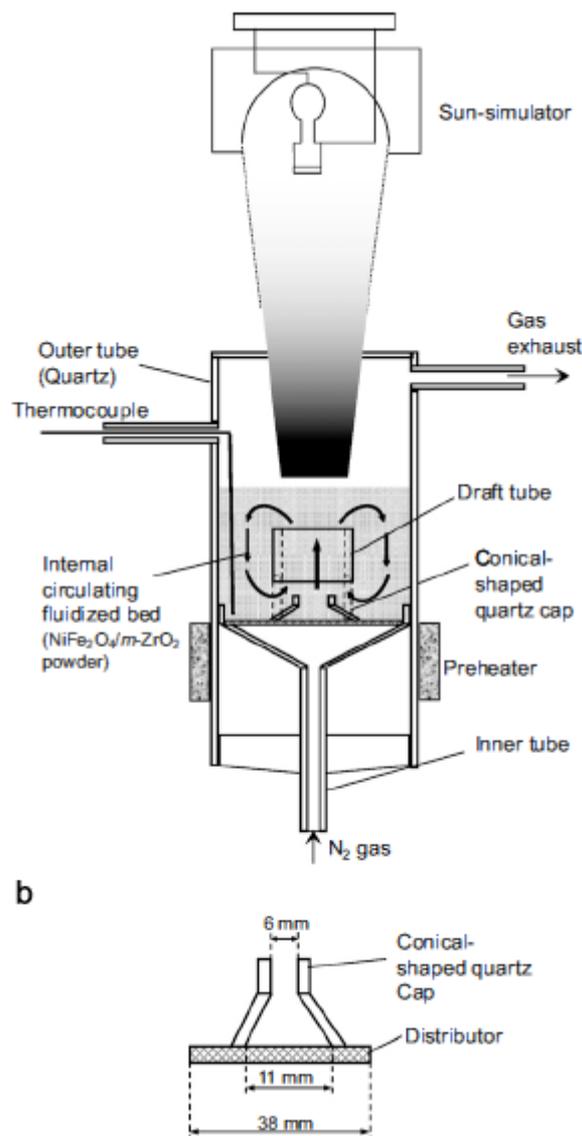


Figura 11. (a) Instalación usada por N.Gokon[5,6] con un reactor hecho de cuarzo. (b) Detalle del distribuidor cilíndrico usado.

Mediante este ensayo, se alcanza una producción de hasta $8,4 \text{ Ncm}^3$ de H_2 por cada gramo de material en el lecho. La máxima conversión se alcanza con un tiempo de irradiación de 60 min.

Un segundo experimento fue llevado a cabo por Gokon, cambiando el material del reactor y reemplazando el cuarzo por acero inoxidable (figura 10). Con esta misma configuración, se consigue aumentar la cantidad de H_2 producido hasta los 9 Ncm^3 de H_2 por cada gramo de material en tan sólo 30 minutos de irradiación. Este incremento puede deberse a la mejor eficiencia térmica de la instalación al contar con paredes opacas.

Sin embargo, en este caso se observa que tras la reducción de la ferrita de níquel no aparece una forma reducida, sino una combinación de NiO y FeO , haciendo que la cinética de la reacción sea demasiado lenta como para tener una eficiencia energética interesante (menor del 1%). Esto puede deberse a que el simulador solar no es de potencia suficiente ($1,2 \text{ kW}_{\text{th}}$) y por tanto, solo se producía la reducción en la parte central del lecho, mientras que las partículas que reaccionan en la periferia del lecho formaban la mezcla de NiO y FeO .

Posteriormente, usando la misma configuración, realizaron otra serie de ensayos aumentando la potencia, teniendo así $2,6 \text{ kW}_{\text{th}}$ en la etapa de reducción y $1,6 \text{ kW}_{\text{th}}$ en la etapa de disociación [6].

En este caso, se consigue una correcta configuración del ciclo sin etapas intermedias. Ensayaron 2 materiales diferentes en el lecho. En primer lugar, se usaron 140g de ferrita de níquel con soporte de ZrO_2 , alcanzándose una conversión del 35% y obteniéndose 951 Ncm^3 de H_2 . En segundo lugar, se introdujo exclusivamente la ferrita de níquel (212g), consiguiendo sólo una conversión del 5%, pero un volumen de H_2 de 1072 Ncm^3 . Quedó demostrado que ambos tipos de partículas son capaces de realizar el ciclo. Además, dada la configuración especial interior del reactor con una sección anular con mayor radiación incidente, se consiguieron mayores rendimientos respecto a lechos fluidizados sin dicha región anular.

Otra aplicación en la que se usan los lechos fluidizados es en la producción de gas de síntesis usando combustibles fósiles (carbón o coque) o desechos orgánicos como materia prima carbonosa. El trabajo de M. Puig-Arnavat [7] muestra la viabilidad de la gasificación de coque usando lechos fluidizados y energía solar concentrada con una eficiencia máxima del 14% a partir de un estudio anterior de Gordillo y Belghit (figura 12), además de dar posibles alternativas al diseño del reactor.

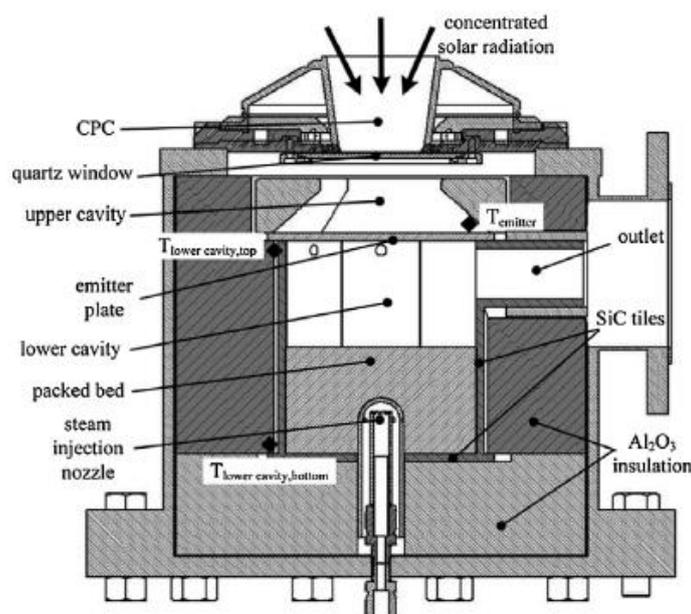


Figura 12. Sección del reactor solar de lecho fijo irradiado indirectamente para una radiación solar incidente desde la parte superior. [7]

Mediante simulación numérica, basado en una instalación anterior de Piatkowski y Steinfield [8] pero añadiendo un reactor de lecho fluidizado, el modelo de Puig-Arnavat predice la composición de los gases producidos y los perfiles de temperaturas para las distintas fases del reactor. Se concluyó que para mejorar el rendimiento, la radiación debía ser dirigida al fondo del reactor para calentar el vapor de agua.

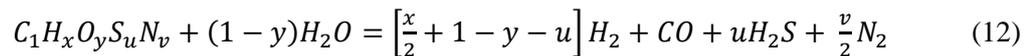
Dentro del mismo tema de gasificación de materias carbonosas, Piatkowski (2011) [9] demuestra que es posible la gasificación de desechos orgánicos como lodos industriales y de procesos de aguas residuales mediante el uso de energía solar concentrada en un reactor de lecho fijo. Conversiones de hasta el 89% se alcanzaron en una planta piloto de 200 kW con un lecho fijo de 4 m de diámetro.

El interés de gasificar residuos carbonosos es dotarlos de un mayor contenido energético. Al producir gas de síntesis de alta calidad a partir de los desechos, la tasa de CO_2 es la mitad al producir energía mediante la quema de dicho gas de síntesis que quemando directamente los residuos carbonosos.

Dado que el lecho está formado por partículas muy heterogéneas entre sí y con una distribución de diámetros poco uniforme, el uso de un lecho fluidizado es prácticamente inviable. Si queremos fluidizar las partículas más grandes, las pequeñas se verán arrastradas fuera del reactor.

El reactor a escala de 8 kW consta de 2 zonas separadas: una zona superior formada por una ventana de cuarzo en la parte superior, paredes opacas laterales y una placa de SiC en la zona inferior que absorbe la radiación incidente. La zona inferior está formada por dicha placa de SiC en la parte superior, un lecho fijo de partículas carbonosas y un inyector de vapor de agua. Así, la placa de SiC sirve como cuerpo negro en una fase, y emisor de radiación en otra. También protege la ventana del posible contacto de partículas y condensación de gases, haciendo que el reactor se clasifique como irradiado indirectamente. La figura 13 muestra la configuración usada.

La ecuación estequiométrica que representa el proceso de gasificación es la sugerida en (12):



En el entorno de los 1400 K, la reacción para los casos de compuestos carbonosos estudiados es de carácter endotérmico, con una entalpía de reacción de 8 MJ/kg.

Al llevar la configuración a la planta piloto de 200 kW, se observó que los lechos de mayor diámetro convertían más material con la misma radiación incidente, debido a menores pérdidas por re-radiación y una mayor porción del calor es absorbido por el lecho fijo reactivo. Así, se consiguen conversiones solar-combustible de hasta el 89,4%.

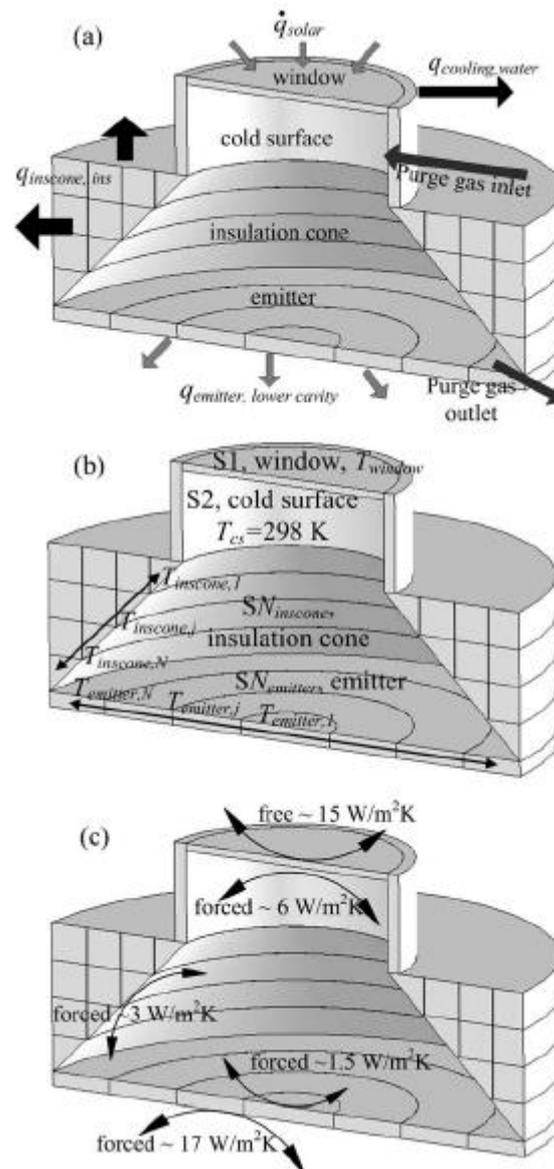


Figura 13. Modelado del reactor [9]: a) Transferencia de calor, b) superficies consideradas en el intercambio radiativo, c) coeficientes de transferencia de calor por convección.

Como resumen, se muestra una tabla (Tabla 2) con los reactores mencionados y las principales observaciones de cada reactor, además de su aplicación.

Tabla 2. Resumen de los reactores mencionados.

Autor/Referencia	Aplicación	Observaciones
G. Flamant, 1980 [1]	Calentamiento de materiales refractarios y descarbonatación de calcita	Tubo de sílice, empleo de horno solar.
A. Steinfield, 1995 [2]	Reducción de ZnO y reformado de CH ₄	Concentrador parabólico compuesto, 15 kW _{th} , régimen de burbujeo, reacción superficial.
A. Steinfield, 2009 [3]	Captura de CO ₂ atmosférico mediante el ciclo CaO/ CaCO ₃	Vapor de agua como gas fluidizador, 75 kW _e , rendimiento de captura de 99% tras 5 ciclos.
J. Carlos Abánades, 2005 [4]	Captura de CO ₂ procedente de combustión en una caldera de lecho fluidizado	Diminución de penalizaciones de ciclos al trabajar en condiciones óptimas de planta.
N. Gokon, 2008 [5]	Producción de H ₂ usando ciclos redox. de NiFe ₂ O ₄ con soporte de ZrO ₂	Distribuidor con sección cónica, fluidización con circulación interna, 2 reactores diferentes estudiados, potencia térmica insuficiente.
N. Gokon, 2011 [6]	Producción de H ₂ usando ciclos redox. de NiFe ₂ O ₄ con soporte de ZrO ₂	Mayor potencia térmica, mayor rendimiento gracias a circulación interna.
M. Puig-Arnavat [7]	Producción de gas de síntesis usando combustibles fósiles (carbón, coque)	Rendimiento de hasta el 14%, radiación dirigida al fondo del reactor, vapor de agua como gas fluidizador.
N.Piatkowski [8]	Producción de gas de síntesis usando residuos carbonosos (lodos industriales/aguas residuales)	Lecho fijo por heterogeneidad de partículas, rendimiento mayor de 89% en planta piloto de 200 kW.

2.4 Energía solar térmica de concentración

En el siguiente apartado se exponen las diferentes tecnologías existentes en el campo de la energía solar térmica de concentración, tanto comerciales como experimentales. Por último se explica el concepto de la termoquímica solar, desde sus principios teóricos hasta las reacciones más usadas.

2.4.1 Concepto y tecnologías

La energía solar se postula como una de las mejores alternativas energéticas a medio plazo para combatir a los combustibles fósiles. Según la temperatura que alcance el dispositivo de aprovechamiento energético, se puede distinguir entre energía solar de baja temperatura o de alta temperatura.

La energía solar de baja temperatura se emplea en dispositivos de baja densidad energética, principalmente para aplicaciones de autoconsumo térmico (agua caliente sanitaria) o eléctrico (paneles fotovoltaicos).

A pesar de la baja densidad energética, la tecnología de baja temperatura se encuentra completamente desarrollada y comercializada, por lo que se trata de una tecnología muy madura y asequible.

Con el objetivo de superar el reto del escalado, los esfuerzos en desarrollar la tecnología solar de alta temperatura no cesan. Se tratan de tecnologías de gran escala, cuyas instalaciones más pequeñas se encuentran en grandes aplicaciones industriales. El objetivo último es la producción de electricidad a gran escala en plantas de varios centenares de megavatios. Estas grandes centrales de producción de energía usan la energía solar para calentar un fluido motor (fluido transportador de calor), que realiza posteriormente un ciclo termodinámico tradicional. Por tanto, se habla de energía solar térmica

Dentro de la energía solar térmica de alta temperatura existen varios tipos según la razón de concentración. Se define la concentración como el área de los colectores de la radiación solar entre el área incidente de dicha radiación en el receptor. Por tanto, la razón de concentración siempre debe ser mayor que la unidad. Para lograr dicha concentración es necesario usar unos colectores solares que, mediante reflexión, redirijan la radiación solar concentrándola.

Los dispositivos de baja concentración tienen una razón de concentración menor de 10. Para ello, los colectores suelen ser espejos totalmente planos. El problema de la energía solar térmica de baja concentración es que no puede alcanzar temperaturas demasiado altas, por lo que la densidad energética se ve fuertemente limitada.

Empleando geometrías más complicadas en los colectores (esféricas, parabólicas o colectores con sensores de seguimiento solar) es posible alcanzar razones de concentración superiores a 100. Existe un límite en la razón de concentración si se usa un único dispositivo colector. Por eso, se puede hablar de media concentración (entre 10 y 100) y alta concentración (más de 100), que a menudo conlleva a un número elevado de colectores.

En todos ellos hay que distinguir las siguientes partes fundamentales:

- El colector es el dispositivo encargado de redirigir la radiación solar. Se denomina apertura al área en la que la radiación solar puede incidir. Debido a la geometría de los colectores, suelen concentrar toda la radiación incidente en un punto, llamado foco.
- El receptor es el dispositivo en el que la radiación concentrada incide tras el colector, con el fin de calentar el fluido motor.

Media concentración

Para la producción de energía a gran escala existen 2 tecnologías de media concentración: los colectores cilíndrico parabólico (CCP) y los colectores lineales de Fresnel. En los cilíndrico parabólicos la geometría empleada es un espejo parabólico mientras que en los colectores tipo Fresnel los espejos son prácticamente planos. En ambos casos, el receptor es un tubo situado en el foco. Por el interior del tubo circula el fluido motor. Estos dispositivos son de seguimiento solar en un solo eje, el eje azimutal.

La tecnología cilindro-parabólica es madura, resultado de su desarrollo a escala comercial desde hace varias décadas. Sin embargo, para lograr una determinada producción eléctrica sigue siendo necesaria un área demasiado elevada, por lo que se puede hablar de una densidad energética media.

Los colectores cilíndricos parabólicos tienen este nombre porque la superficie reflectante, de geometría cilíndrico parabólica, concentra la radiación a lo largo de un eje focal, en el que se encuentra el receptor. Al circular un fluido por el interior del tubo, la radiación hace que se caliente, transformando la radiación solar en calor sensible o latente.

Los valores usuales de flujo de radiación incidente sobre el receptor están entre los 40 y 60 kW/m², pudiendo alcanzar temperaturas funcionales de 450 °C. En la figura 14 se muestra un CCP.

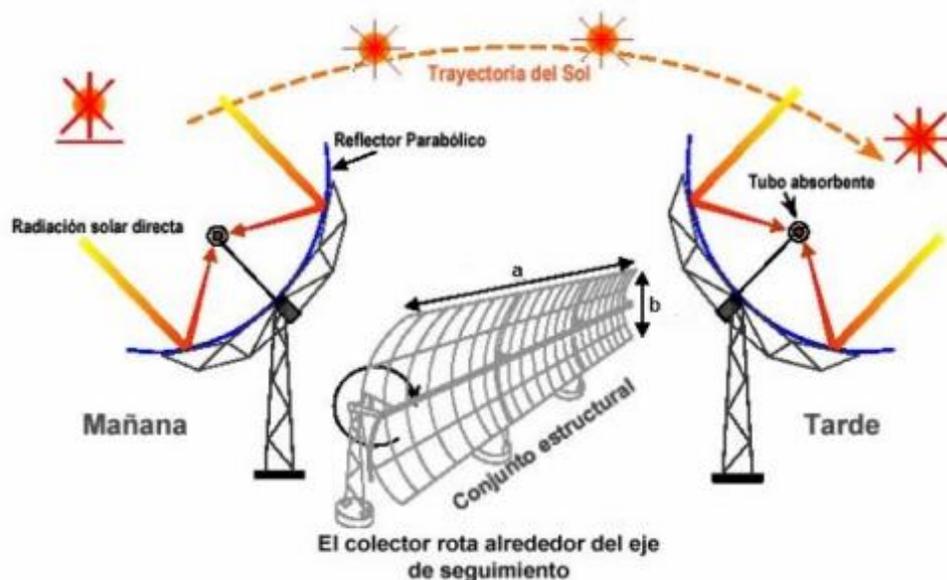


Figura 14. Esquema de un conjunto CCP.

Son altamente modulables, pudiendo alinear un CCP con el siguiente compartiendo el mismo eje focal. Así, se consiguen longitudes de colectores de hasta 100 metros, que tienen una apertura de 5 ó 6 metros.

El colector suele estar hecho de plásticos recubiertos con películas de plata o aluminio, chapas metálicas o, lo más usado, vidrios con una capa de plata recubiertos con un protector de base de cobre y pintura epoxi.

El receptor se trata de un tubo (normalmente metálico) localizado en el interior de un tubo de cristal. El tubo absorbente suele ser un tubo de acero inoxidable con un recubrimiento que realice algún tipo de selectividad espectral que absorba gran parte de la radiación de onda corta (radiación directa), pero emita muy poca radiación de onda larga (radiación difusa). Esto es un principio común para todos los receptores solares. El problema es que no puede absorber radiación difusa,

teniendo así unas pérdidas energéticas. La radiación de onda larga se emite en forma de calor, lo que ayuda a prevenir pérdidas. Además, el uso de un tubo externo de cristal también ayuda a reducir las pérdidas de calor.

En cuanto al fluido de trabajo, el tipo a emplear depende de la temperatura de trabajo. Para bajas temperaturas de trabajo (200 °C) se puede utilizar agua desmineralizada o etilenglicol. Para temperaturas de hasta 400 °C se utilizan aceites sintéticos. Existen nuevas plantas en proceso de demostración que usan sales fundidas, permitiendo temperaturas de trabajo de hasta 540 °C y la posibilidad de realizar el almacenamiento de dichas sales.

De todas las tecnologías solares con concentración, los CCP son los que tienen una mayor experiencia, estando consolidados en el ámbito comercial. Las plantas SEGS en California suman más de 2,5 millones de metros cuadrados de CCP con una producción neta de 354 MWe.

Para producir electricidad, el fluido motor calentado en los tubos es enviado posteriormente a un intercambiador de calor con agua, donde se produce vapor sobrecalentado que acciona un turboalternador. Esto se asemeja a un ciclo Rankine de cualquier central de producción de energía convencional. En la figura 15 se muestra el esquema de una planta en la que el fluido motor es un aceite sintético. Si el fluido motor es de sales fundidas, se suele incluir un tanque intermedio de almacenamiento de sales.

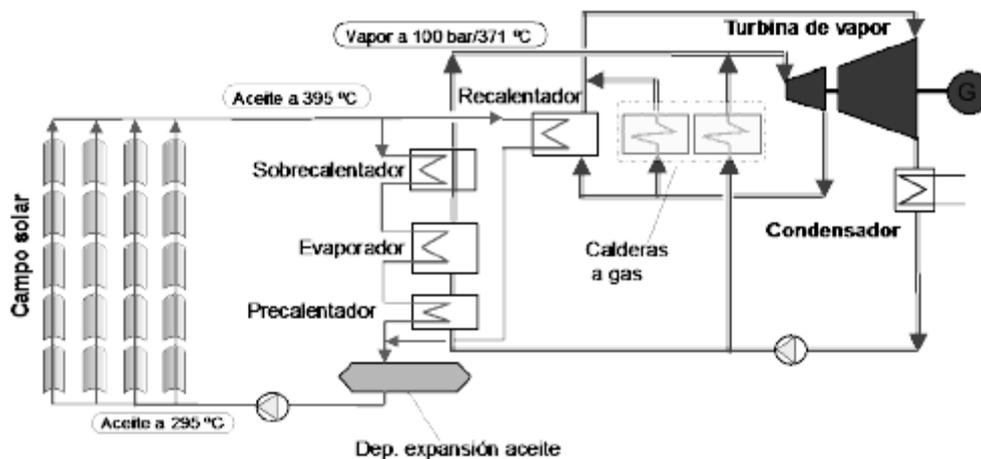


Figura 15. Esquema de planta CCP con aceite sintético

La central termosolar de CCP es actualmente una de las alternativas más baratas para producir electricidad o vapor sobrecalentado a alta presión (375 °C/100 bar). Es una tecnología totalmente disponible en la actualidad, pero no resulta excesivamente competitiva a menos que se tengan algún tipo de ayudas fiscales. Sin embargo, el escaso riesgo de la tecnología CCP hace que existan algunas empresas que promueven la construcción de centrales de este tipo en países con un buen nivel de insolación.

A pesar de que pueden operar solamente con la energía de los CCP, existe la posibilidad de integrar un ciclo combinado para hibridar el ciclo. Con esto se consigue abaratar el coste de producción de la electricidad, pero la fracción de energía solar usada se reduce al 15%.

Se prevé que el coste de la electricidad producida por las plantas CCP a corto plazo esté en torno a 0,15-0,2 €/kWh, dependiendo del tamaño de la planta y de la insolación disponible.

Se espera que la mejora tecnológica o la producción en masa de los componentes disminuyan rápidamente el precio de esta tecnología.

La instalación a gran escala de colectores lineales tipo Fresnel se trata de una larga serie de colectores que comparten el mismo tubo receptor.

Sin embargo, el eje focal de esta tecnología se puede ver distorsionado por aspectos ópticos. Es por ello que es necesario re-concentrar la radiación. Esto se consigue colocando un espejo sobre el tubo como un segundo colector para redirigir los rayos que no incidan en el tubo o usando una configuración multitubos con varios receptores en paralelo para capturar toda la radiación que pueda incidir en ellos.

Las principales ventajas de la tecnología tipo Fresnel son:

- Espejos mucho más simples y baratos que se pueden producir cómodamente en masa.
- Menos hormigón y acero al ser una estructura más ligera. Esto también facilita el montaje de la instalación.
- Las cargas producidas por el viento son menores, consiguiendo una mejor estabilidad estructural, menos pérdidas ópticas y menos roturas del vidrio de los espejos.
- El área de espejo por receptor es mayor que en CCP, lo cual es un dato importante porque el receptor es de los elementos más caros de la instalación.

La eficiencia óptica de campos de colectores Fresnel es menor que en campos de CCP por propiedades geométricas. Sin embargo, la simpleza tecnológica hace que pueda ser más fácil de manufacturar e instalar. Aún no hay datos de comparativa de precios de electricidad producida entre ambas tecnologías.

Alta concentración

Las tecnologías de alta concentración se caracterizan por razones de concentración superiores a 100 y temperaturas de trabajo de hasta los 1500 °C. Dentro de esta clasificación se encuentran los sistemas de torre central y los discos parabólicos.

Los sistemas de torre central usan un conjunto de colectores terrestres planos llamados helióstatos para redirigir la radiación a una torre de gran altura donde la luz se convierte en calor. Por tanto, en la torre se encuentra el receptor. Los modelos ya implementados alcanzan temperaturas de hasta 650 °C, según el fluido de trabajo. En la figura 16 se puede observar un sistema de torre central.

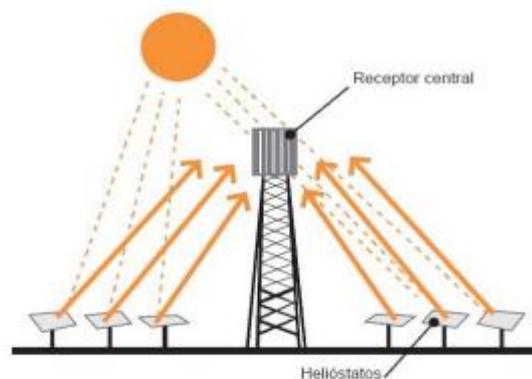


Figura 16. Esquema de instalación de torre central

Los altos flujos de radiación (entre 300 y 1000 kW/m²) permiten trabajar a más altas temperaturas e integrarse en otros ciclos más eficientes de forma escalonada (hibridación con ciclos combinados). Además, la opción de almacenamiento térmico es altamente recomendable,

lográndose alcanzar factores de capacidad muy elevados superando las 4500 horas de funcionamiento anuales.

El sistema de colectores (o campo de heliostatos) es una de las partes más importantes del proyecto, llegando a costar hasta el 60% del total.

Tienen la misma función que en el resto de tecnologías (redirigir la radiación hacia el receptor) y tienen una estructura similar al resto de tecnologías, con la especialidad de que no presentan curvatura. Sin embargo, es necesario un mayor control de seguimiento para alinear todo el campo de heliostatos hacia la torre.

Existen de diversos tamaños, desde 1 hasta 150 m². Sin embargo, se tiende a usar aquellos de menor tamaño por su facilidad de transporte, instalación y puesta en servicio.

La orientación del campo de heliostatos depende en gran medida de la orografía del terreno, del tamaño de la planta y de la ubicación de la torre. Teniendo en cuenta esto, las 2 formas clásicas de organizar el campo es de forma circundante (figura 17a) y en campo Norte-Sur (figura 17b), cuya orientación final depende además de la latitud del emplazamiento. Sin embargo existen otras disposiciones menos habituales, como orientaciones que aprovechen orografías especiales o el uso de un concentrador secundario.

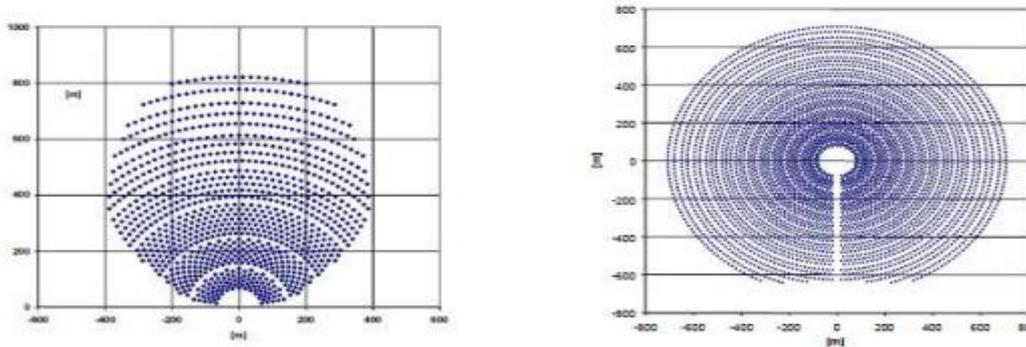


Figura 17. a) Campo de heliostatos Norte-Sur(izquierda) b) Campo de heliostatos circundante (derecha)

La torre es el elemento que sirve de soporte al receptor. Es necesario que esté ubicado a cierta altura para minimizar el efecto de las sombras de los heliostatos y bloqueo de éstos. Por tanto, cuanto mayor sea el campo de heliostatos, más alta debe ser la torre. Sin embargo, esto introduce pérdidas ópticas por dispersión atmosférica al haber más distancia entre los colectores y el receptor o pérdidas por errores en el seguimiento de los espejos. Además, también sirve de soporte para ciertos elementos auxiliares como blancos lambertianos o sensores de medida. Suele estar hecha de hormigón o acero.

El receptor se encuentra encima de la torre y debe estar hecho de tal manera que se minimicen las pérdidas ópticas (reflexión de los rayos o emisión de radiación de onda larga) y de calor. Se trata de un intercambiador de calor por cuyo interior circula el fluido motor.

En cuanto a la geometría de éste, depende fuertemente de la orientación del campo de heliostatos. Si se trata de un campo central, al incidir los rayos en toda la superficie del receptor, los diseños no tienen objeto a demasiada innovación. Sin embargo, en campos Norte-Sur hay más diseños. Diseños tradicionales donde los rayos inciden directamente en la superficie externa del receptor hasta diseños más novedosos donde el receptor posee una ventana de cuarzo y todos los rayos son dirigidos a través de esa ventana para minimizar pérdidas de calor.

En cuanto al fluido motor, se trata del mayor condicionante de la temperatura de trabajo. Si se usa vapor como fluido de trabajo, la temperatura se limita a los 250 °C. Usando aceites sintéticos se

pueden lograr los 400 °C. Los diseños con sales fundidas alcanzan los 650 °C además de introducir la posibilidad del almacenamiento térmico. Los futuros diseños otro tipo de compuestos pueden permitir elevar la temperatura hasta los 1000 °C además de almacenamiento mucho más duradero al almacenar el calor de forma química, mientras que las sales fundidas la almacenan de forma sensible.

Al lograr temperaturas tan altas de trabajo, se pueden integrar fácilmente en ciclos termodinámicos supercríticos. Una alternativa es la producción directa de vapor (DSG) a altas temperaturas, aunque aún es una tecnología muy temprana.

Las principales ventajas de los sistemas de torre central son:

- Temperaturas mayores que permiten un mayor rendimiento de los ciclos de producción de electricidad (Rankine habitualmente) y una reducción del consumo de agua en el condensador.
- Al aumentar la temperatura de trabajo hace factible la opción de almacenamiento térmico para conseguir una planta de producción eléctrica manejable en el tiempo.
- Al existir mayores gradientes de temperatura, los sistemas de almacenamiento térmico tienen mayor capacidad con el mismo coste.

Los primeros proyectos de sistema de concentración de receptor de torre central no superaban los 10 MW de potencia y se operaron durante los años 80 con fines experimentales en su mayoría, excepto las plantas TSA (España) y Solar Two (EEUU), cuya experiencia operacional se desarrolló durante los 90.

Destacar que varios de estos sistemas están localizados en España, en la Plataforma Solar de Almería (PSA) del CIEMAT. Los fluidos de trabajo han sido sodio líquido, vapor saturado o sobrecalentado, aire o sales de nitratos fundidas.

Con el conjunto de experiencias mostradas se ha demostrado la viabilidad técnica de los sistemas de torre central. Se considera técnicamente posible alcanzar rendimientos del 23% en puntos de diseño y hasta del 20% anual con un coste de inversión actual en torno a los 2.3 €/Wp [15].

En la actualidad hay varios esquemas de integración de la tecnología en el mercado, con 3 de ellos claramente predominantes:

El primero de ellos, originario del proyecto Solar Two (EEUU) e implantado en España por Torresol Energy se denomina Gemasolar y está basado en el uso de centrales puramente solares que usan sales fundidas como fluido motor con almacenamientos térmicos de 15 horas. El proyecto Solar Two demostró el bajo coste y la elevada fiabilidad de las sales como fluido. A pesar de que el sistema no estaba completamente optimizado, el sistema contaba con 2 tanques con una capacidad equivalente a 3 horas y 1400 toneladas de sales que pudieron demostrar una eficiencia del 97%. El mayor interés del concepto está en las plantas de alto factor de capacidad, Gemasolar es de 19 MW, puramente solar y con un almacenamiento de 15 horas equivalentes. Debido a la gran capacidad de almacenamiento se conectó a la red eléctrica en 2011, siendo un proyecto rompedor en el ámbito de la integración de sistemas puramente solares en redes eléctricas nacionales.

Frente a la estrategia de un gran número de horas de almacenamiento existen 2 variables que se complementan entre sí: el uso de diseños de bajo riesgo basados en generación de vapor y el uso de receptores volumétricos de aire con una gran sencillez operacional y una mayor temperatura de trabajo.

Los receptores de vapor surgieron como una alternativa dentro del proyecto europeo SOLGAS, promovido por SODEAN en Sevilla, cuyo objetivo era integrar la energía solar en la caldera de

recuperación de un ciclo combinado. Los sistemas híbridos ofrecen costes de producción de 0,1-0,15 €/kWh, mientras que los sistemas solares puros se ubican en el rango de los 0,15-0,2 €/kWh. Varios proyectos similares han establecido la estrategia de integración del receptor de vapor saturado en sistemas de cogeneración o en repotenciación de sistemas de ciclo combinado convencionales.

Como alternativa puramente solar se encuentra el proyecto PS10 de la empresa Solúcar Energía. Se trata de una planta de 11MW que utiliza un receptor de vapor saturado a 250 °C y 40bar. Para periodos nublados, la planta cuenta con un almacenamiento de vapor saturado de 15 MWh (50 minutos a 50% de carga). Posteriormente se desarrolló el proyecto PS20 de 20 MW. Ambas están conectadas a red. En la figura 18 se muestra el esquema de operación de una planta que trabaja con sales fundidas y de otra que trabaja con aire.

La figura 18b corresponde al marco del proyecto europeo SOLAIR, donde se usa un receptor volumétrico de aire y un sistema de almacenamiento en termoclina con lecho cerámico de alúmina.

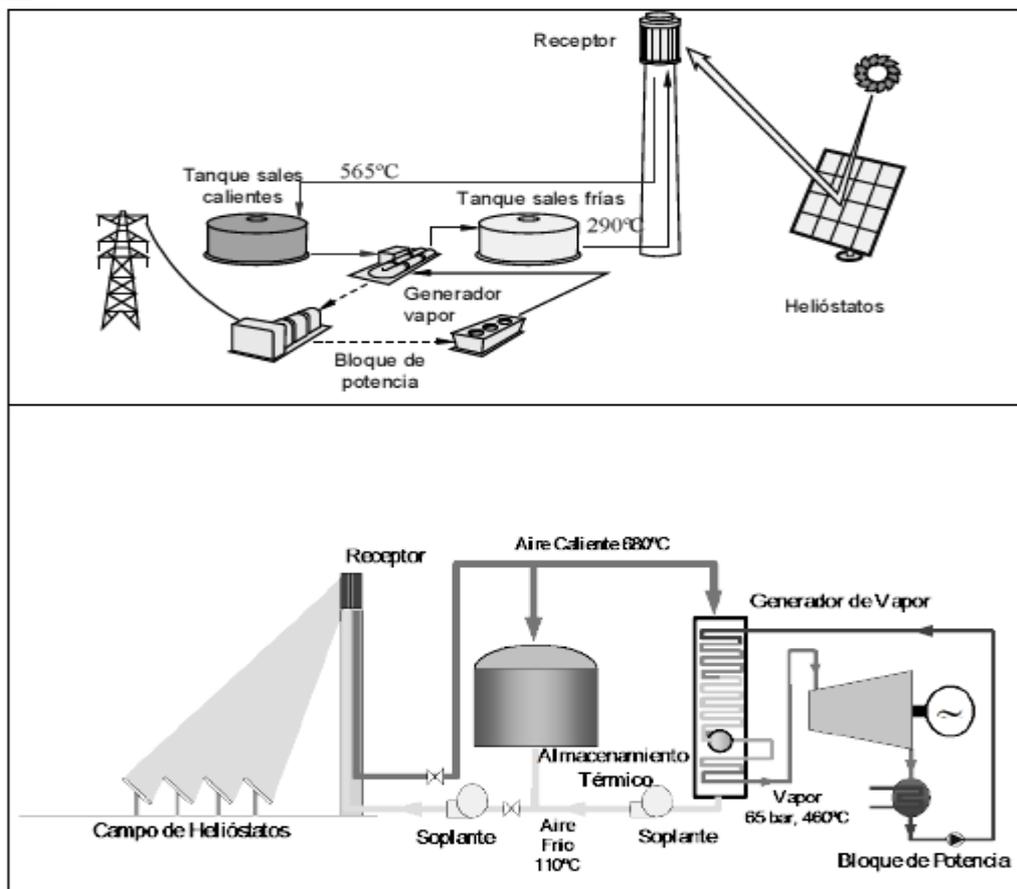


Figura 18. Esquema de operación de torre central con a) sales fundidas (arriba) y b) con aire (abajo)

Existen proyectos de mayor potencia en EEUU, con el proyecto de energía solar Crescent Dunes de 110 MW o la central solar de Ivanpah de 392 MW. La central solar de Ivanpah está compuesta por un sistema de 3 torres, con una producción anual de 420 GWh. Aunque aún no está optimizada por lo que produce el 50% de su capacidad.

Por último, la tecnología de discos parabólicos (o discos Stirling) es la que se encuentra en una fase más temprana de desarrollo. El dispositivo consiste en un colector con forma de disco parabólico que refleja toda la radiación incidente al punto focal, donde se encuentra el receptor. En el receptor se encuentra directamente la unidad generadora de potencia, como un motor

Stirling o una microturbina. Necesita de un seguimiento del sol biaxial, lo cual hace la tecnología más sofisticada.

A pesar de esto, el alto factor de concentración (por encima de 3000) permite alcanzar temperaturas del orden de los 1500 °C. Esto hace que tengan el mejor rendimiento de conversión de todas las tecnologías (en torno al 30%) y un 25% de promedio diario en unidades de 7 a 25 kW. En la figura 19 se muestra un disco Stirling.

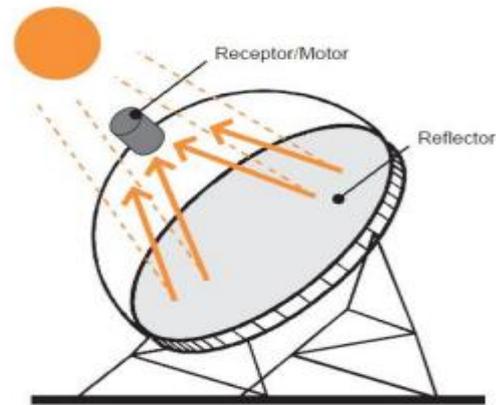


Figura 19. Esquema de un sistema de disco Stirling

El colector es el elemento más complejo del dispositivo. Debido a la curvatura parabólica y a la baja relación distancia focal/diámetro ($f/D=0,6$), la razón de concentración se eleva al máximo. Con temperaturas de trabajo entre 650 y 800 °C, se consiguen eficiencias en el motor Stirling en torno al 40%. La superficie cóncava del colector está cubierta por espejos de vidrio de segunda superficie con su correspondiente curvatura parabólica o bien por espejos delgados o polímeros metalizados de primera superficie soportados sobre una estructura de fibra de vidrio o de membrana tensionada.

Los receptores para sistemas de disco Stirling son de tipo cavidad, con una pequeña apertura por la que entran los rayos y su correspondiente sistema de aislamiento. El sistema de transferencia de calor al fluido motor tiene 2 métodos. En el primero se ilumina directamente un panel de tubos por el interior de los cuales circula el fluido motor, normalmente gaseoso (aire, hidrógeno, helio). En el segundo se utiliza el concepto de tubo de calor o *heat pipe*, vaporizándose un metal líquido (sodio) que luego condensa en la superficie de los tubos por los que circula el fluido motor para refluir nuevamente hacia la zona de calentamiento, formando un intercambiador de calor de 2 etapas.

El mayor esfuerzo de investigación se centra en usar la unidad Stirling en combinación con un generador. Actualmente se usan 2 tipos de motor Stirling: cinemático y de pistón libre. Los cinemáticos usan hidrógeno como fluido motor y tienen mejor eficiencia que los de pistón libre. Sin embargo, los de pistón libre usan helio como fluido motor y no producen fricción durante su operación, reduciendo significativamente el mantenimiento del motor.

En cuanto al sistema de seguimiento, ha de ser altamente preciso para seguir la posición del sol en todo momento. Por ello, realizan un seguimiento en 2 ejes. Existen 2 tipos de montaje. El primero es un seguimiento en acimut-elevación, donde el seguimiento se realiza en los ejes vertical y horizontal. El otro tipo se denomina seguimiento polar, donde el movimiento en uno de los ejes es muy lento para seguir únicamente las variaciones estacionales del sol, mientras que el movimiento en el otro eje es a velocidad constante.

Por estas características, la tecnología de discos Stirling presenta estas ventajas:

- La localización del generador ayuda a reducir pérdidas de calor, lo que significa que la capacidad de generación es pequeña, extremadamente modular (tamaños típicos de 5 a 50 kW) y apropiados para generación dispersa.
- Consiguen la mayor eficiencia de todas las tecnologías solares de concentración.
- Usan refrigeración seca, por lo que no necesitan grandes sistemas de refrigeración o torres de refrigeración, permitiendo su instalación en zonas áridas.
- Gracias al poco terreno que ocupan y a su gran estabilidad estructural, se pueden colocar en pendientes o terreno desigual a diferencia del resto de tecnologías.

Estos factores hacen que los discos Stirling puedan ser una alternativa económicamente viable en zonas de difícil acceso, aunque el coste de producción nivelado sea bastante superior al resto de tecnologías. Aparte del coste, los discos Stirling no pueden usar fácilmente un sistema de almacenamiento. Aún están en fase de demostración y el coste de producción en masa no es cierto. Debido a la gran modularidad, su facilidad de escalado y su pequeño tamaño pueden ser la alternativa a la energía fotovoltaica en regiones áridas.

La experiencia operacional de los discos Stirling se limita a unas pocas unidades ensayadas en EEUU y Europa, concretamente en la Plataforma Solar de Almería. La primera generación de discos consiguió una alta concentración y unos excelentes resultados debido a las configuraciones facetadas de vidrio/metal, aunque a un coste excesivo (se estima que 300 €/m² para grandes producciones) y con estructuras muy pesadas (100 kg/m²). El disco Vanguard fue operado en California durante 18 meses (1984-85). Tenía 10 metros de diámetro, una superficie de 86,7 m² y un generador Stirling de 25 kW, formado por 4 cilindros en paralelo y montados en cuadrado. El gas de trabajo era hidrógeno con una presión máxima de 20 MPa y temperatura de 720 °C. El método de regulación de potencia se efectuaba a través de la presión del gas. Con más de un 30% de conversión neta, este dispositivo aún sustenta el récord. Posteriormente, entre 1984 y 1988 se desarrolló un disco con la misma base, pero con ligeras mejoras tecnológicas. Desde 1998 se está relanzando la tecnología con la denominación de disco SES/Boeing. Acumula 8000 horas de operación con un 94% de disponibilidad para irradiancias superiores a 300 kW/m².

En Europa, los principales desarrollos se han llevado a cabo de la mano de compañías alemanas, tanto del disco como del suministro del motor Stirling. Se han desarrollado varias unidades de 7,5 a 8,5 metros de diámetro ensayadas en la Plataforma Solar de Almería, con más de 30000 horas acumuladas de operación y disponibilidades por encima del 90%. Son sistemas que pretenden una significativa reducción de costes, aunque a cambio ofrecen menores rendimientos. Los colectores se hacen de membrana de acero inoxidable tensionada. La membrana delantera se deforma con procedimientos de moldeo hidroneumático para conseguir la geometría parabólica. En operación la membrana se estabiliza gracias a una pequeña presión negativa. Una vez conformada se le pegan vidrios delgados de 0,9 mm de espesor de 50 x 30 cm. El motor trabaja con Helio a 630 °C y 15 MPa lo que conlleva un rendimiento del motor Stirling del 20%.

2.4.2 Termoquímica solar

La termoquímica solar se centra en la producción de H_2 mediante la ruptura de la molécula de agua. Esta reacción precisa de un entorno de alta temperatura, conseguido a través de radiación solar incidente en el reactor.

Para conseguir una producción continuada de H_2 , es necesario realizar el proceso cíclicamente. Los ciclos a estudiar son reacciones tipo redox con óxidos metálicos. En una primera etapa, el reactivo (en forma de óxido) se reduce liberándose así uno o varios de los átomos de oxígeno que posee el reactivo. Esta es la etapa que precisa mayor temperatura por ser un proceso endotérmico.

En la segunda etapa, se inyecta vapor de agua al producto reducido para producir una reacción exotérmica. En esta etapa se produce la disociación del agua produciéndose hidrógeno ya que el oxígeno del agua oxida el óxido reducido, obteniéndose el óxido inicial.

Un esquema de la reacción se puede observar en la figura 20, donde M representa el metal del que está formado el óxido. Destacar que M no tiene por qué ser un solo metal, sino que puede ser una combinación de varios, incluso una combinación no estequiométrica.

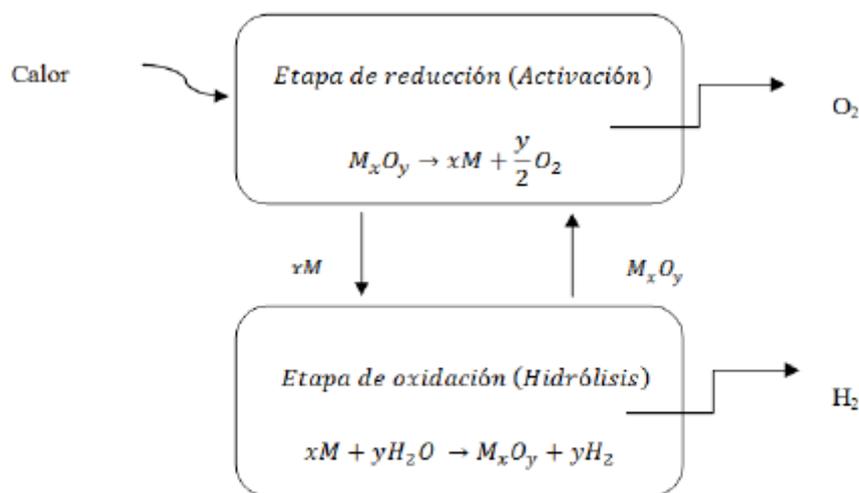


Figura 20. Esquema de un ciclo termoquímico de 2 etapas.

Los ciclos termoquímicos poseen una serie de ventajas frente a la descomposición directa del agua. Estos pueden operar a menores temperaturas y no es necesario incluir una etapa de separación de gases, ya que el oxígeno y el hidrógeno se generan en etapas diferentes.

A continuación se realiza un breve resumen de los óxidos más empleados:

- Fe_3O_4 / FeO : Primer ciclo propuesto, por Nakamura (1977). Reducción a $1800\text{ }^\circ\text{C}$ y oxidación espontánea a partir de $1473\text{ }^\circ\text{C}$. Posee la ventaja de tener un ratio de producción de H_2 bastante alto, pero tiene las desventajas de tener una temperatura de activación bastante alta ($1800\text{ }^\circ\text{C}$), pérdida de reactivación tras efectuar varios ciclos, sinterización y fundido en la etapa de reducción y necesidad de molienda y granulación para obtener buenos resultados en la etapa de hidrólisis.
- Óxidos mixtos basados en hierro: En este grupo se incluyen todas las ferritas. Poseen la ventaja de tener una temperatura de activación menor (entre 700 y $1100\text{ }^\circ\text{C}$), pero la producción de H_2 es limitada por el uso de una reacción no estequiométrica.

- $\text{CeO}_2 / \text{Ce}_2\text{O}_3$: El óxido de cerio (ceria) se ha usado principalmente por la gran reactividad que presenta con vapor de agua, lo que le da un gran rendimiento de producción de H_2 y una cinética química rápida. Sin embargo, la temperatura de la etapa de reducción es alta y se tiene que realizar a una presión no superior a 200 mbar. Además, existe vaporización parcial de la ceria durante la reducción.
- ZnO / Zn : Esta reacción se emplea habitualmente para extraer Zn metálico en lugar de para realizar ciclos termoquímicos, como alternativa a la obtención de Zn por electrólisis. Por tanto, para la obtención de H_2 , esta reacción necesita una alta temperatura, un rápido enfriamiento de los productos para evitar recombinación y una técnica de separación de Zn y O_2 . Además, la formación de una capa de óxido limita el rendimiento de la etapa de oxidación.
- MnO_x : Diversos óxidos de manganeso se han utilizado para producir H_2 con ciclos de 3 etapas, añadiendo NaOH al proceso. Evaluando el proceso de 2 etapas, su temperatura de activación es relativamente baja (900 °C) y es un material barato. Sin embargo, sufre una sinterización severa a lo largo de los ciclos. Dependiendo del tamaño de las partículas, se puede experimentar una pérdida del ratio de reactivación en muy pocos ciclos.

3. Desarrollo del proyecto

En este capítulo se comenta todo lo referente a la parte experimental del proyecto. Para una visión más detallada acerca de la instalación experimental acudir al anexo B.

3.1 Análisis Inicial – Dimensionamiento

En este apartado se obtienen algunas de las primeras magnitudes características de un sistema fluidizado en general, para posteriormente particularizar el caso de las ferritas de níquel.

Para ello, es necesario identificar las variables de partida. Estas se pueden dividir según su procedencia, teniendo así variables físicas y variables geométricas.

Como variables físicas se entienden aquellas que vengan determinadas por aspectos puramente físicos, propios del ambiente o de las condiciones a ensayar. En este apartado se encuentra la temperatura y presión del sistema fluidizado y la densidad de ambas fases.

En variables geométricas se localizan todas aquellas que sean aspectos puramente constructivos del sistema y se pueden seleccionar. Aquí se encuentran, por tanto, el diámetro del lecho fluidizado, fijado en 77 mm, y el tamaño de las partículas.

Por último, hay algunos datos que no son estrictamente variables, ya que se tratan de constantes. Se trata de las constantes de la ecuación de Ergun para el número de Reynolds de mínima fluidización en función del número de Arquímedes ($C_1 = 33,7$; $C_2 = 0,0408$).

Se considera que para establecer las ecuaciones, el sistema es completamente estable y todas las variables comunes a ambas fases son iguales.

Si se pretenden analizar unas temperaturas muy altas, es necesario corregir en función de la temperatura la densidad del gas, a través de la ecuación de los gases ideales, y la viscosidad del gas.

La viscosidad del gas μ_g , se ha aproximado según la temperatura del gas de la siguiente manera (13):

$$\mu_g = 2 \cdot 10^{-14}T^3 - 5 \cdot 10^{-11}T^2 + 7 \cdot 10^{-8}T + 8 \cdot 10^{-7} \quad (13)$$

Se define, además, el parámetro adimensional del número de Arquímedes Ar como (14):

$$Ar = \frac{\rho_g(\rho_s - \rho_g)gd_s^3}{\mu_g^2} \quad (14)$$

Con el número de Arquímedes se puede obtener el número de Reynolds de mínima fluidización usando la fórmula (5) expuesta en el apartado 2.2.1.

Usando la definición del número de Reynolds se puede obtener la velocidad del gas fluidizador para lograr el estado de mínima fluidización (15):

$$Re_{mf,g} = \frac{\rho_g u_g d_p}{\mu_g} \quad (15)$$

Por otra parte, se define el diámetro adimensional de partícula $d_{p,a}$ como (16):

$$d_{p,a} = \sqrt[3]{Ar} \quad (16)$$

Con este parámetro se puede formular la velocidad de escape de las partículas o velocidad terminal U_t (17):

$$U_t = \frac{d_{p,a} \mu g}{(d_p \rho g) \left(\frac{18}{d_{p,a}^2} + \frac{2,335 - 1,744 \phi}{2 \sqrt{d_{p,a}}} \right)} \quad (17)$$

El parámetro más importante es la velocidad de mínima fluidización, pues en muchos casos, no se podrá alcanzar la velocidad terminal debido a aspectos constructivos. Con esto, se obtienen las curvas de velocidad de mínima fluidización frente al diámetro de partícula, mostradas en la figuras 21 y 22 para las temperaturas de 25, 700 y 1100 °C.

Los valores obtenidos en las gráficas sobre la velocidad de mínima fluidización son teóricos, y hay que tener en cuenta que se han realizado varias aproximaciones. Destacar que aproximadamente, dicho valor será ligeramente mayor.

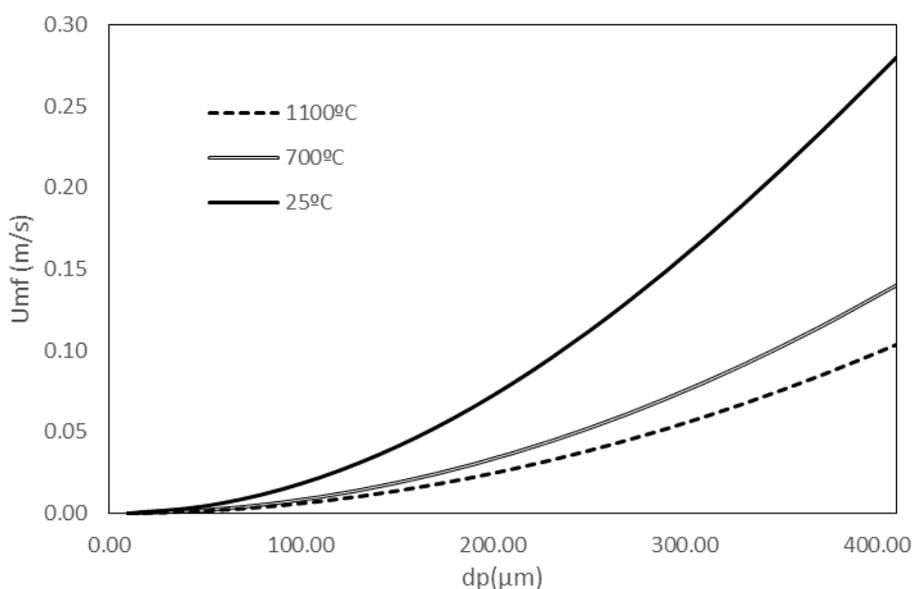


Figura 21. Velocidad de mínima fluidización para ferritas de níquel ($\rho=5663\text{kg/m}^3$) según el diámetro de partícula para temperaturas de 25,700 y 1100 °C.

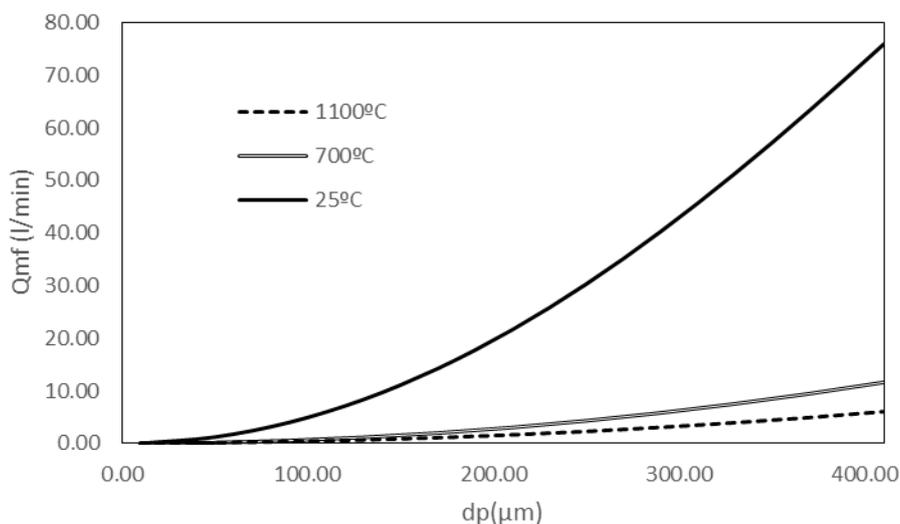


Figura 22. Caudal de mínima fluidización para ferritas de níquel ($\rho=5663\text{kg/m}^3$) según el diámetro de partícula para temperaturas de 25,700 y 1100 °C.

Se debe conocer el valor aproximado de la caída de presión por unidad de longitud que tendrá lugar en el lecho. Se puede obtener a partir de la ecuación (2) del apartado 2.2.1. Se suponen partículas totalmente esféricas de 50 μm , con un lecho en estado de mínima fluidización con aire como gas fluidizador. Se obtiene una caída de presión de 86,18 Pa/m, lo que no conllevaría riesgos estructurales para el experimento. Destacar que el valor experimental será siempre mayor debido a que no se tiene una salida directa a la atmósfera o a la introducción de otros factores que deberían estudiarse.

Se define el factor R como la división entre la velocidad de mínima fluidización y la velocidad terminal para una temperatura dada. Este factor es útil para tener una idea aproximada del rango de velocidades en el que se puede trabajar. Los valores de R varían entre 25 y 100 para una temperatura dada en el rango de diámetro de partícula estudiado (10-410 μm). Destacar que, para un mismo diámetro de partícula, R sigue una proporcionalidad directa con la temperatura, lo cual dice que el rango de velocidades de operación en frío es más estrecho que para cualquier operación en caliente.

3.2 Experimentación

En el siguiente apartado se exponen los resultados obtenidos en diferentes ensayos, tanto en frío como en caliente.

3.2.1 Ensayos en frío

El objetivo de esta serie de ensayos es confirmar la teoría de fluidización. Para ello, se dispone de un tubo de 33 mm de diámetro y 2 muestras diferentes, una de ellas es alúmina con un diámetro de partícula de 0.5 mm y otra de ellas es ferrita de níquel con un diámetro de partícula mayor de 25 μm .

Análisis teórico

Antes de empezar con la comprobación experimental, es necesario obtener el caudal de mínima fluidización teórico.

Como datos para obtener esta velocidad, se define la densidad de la alúmina como 4000 kg/m^3 , la densidad de las ferritas de níquel como 5368 kg/m^3 y las propiedades generales del aire. Se usa la aproximación de Wen y Yu, con valores de C_1 y C_2 de 33.7 y 0.0408 respectivamente.

Realizando los cálculos necesarios, se obtienen unas gráficas en las que se muestra la velocidad de mínima fluidización frente al tamaño de partícula a las temperaturas de 25, 500, 1100 y 1500 $^{\circ}\text{C}$.

A continuación se muestra la gráfica obtenida de tamaño de partícula frente a caudal de fluidización para la alúmina en condiciones ambientales (figura 23).

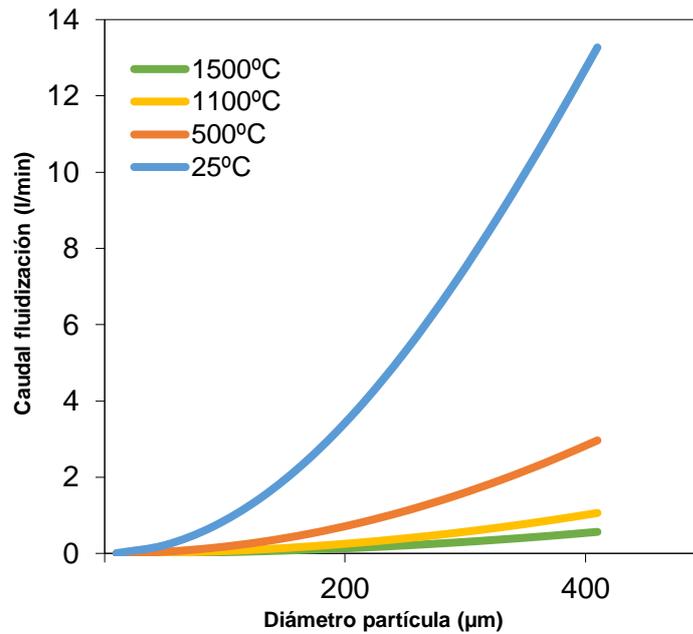


Figura 23. Caudal de fluidización vs Diámetro de partícula para alúmina con $D=0.033$ m en l/min.

En condiciones ambientales, en un lecho de 0.033 m de diámetro, se obtiene un caudal de mínima fluidización para las partículas de 500 μm de 14.3 l/min

Usando el mismo procedimiento, se obtienen las gráficas análogas para ferritas de densidad $5368 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (figura 24).

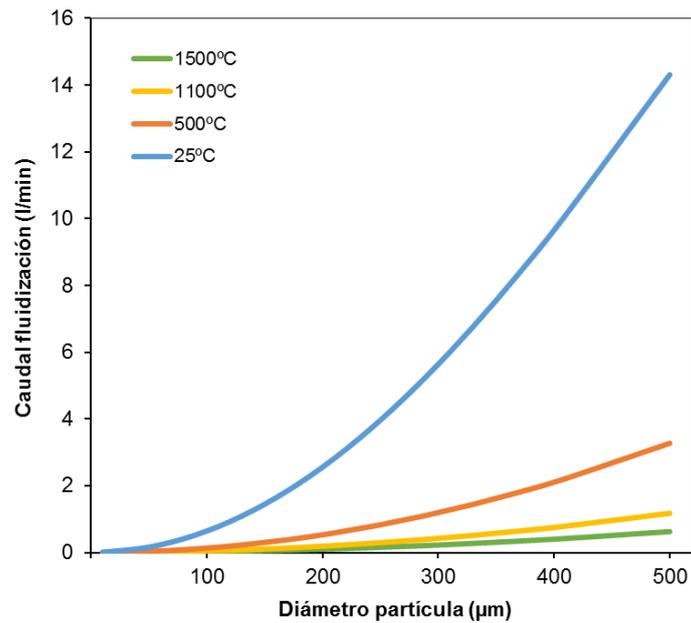


Figura 24. Caudal de fluidización vs Diámetro de partícula para ferritas con $D=0.033$ m en l/min.

Así, para un tamaño de partícula de 50 μm , corresponde un caudal de fluidización 0.22 l/min para el lecho de 0.033 m de diámetro.

3.2.2 Ensayos en caliente (simulador solar de altos flujos)

El objetivo de esta serie de ensayos es la realización de alguno de los ciclos termoquímicos propuestos. Para ello, primero se hacen dos ensayos con SiC como inerte para caracterizar el reactor y, después, se emplean las ferritas de níquel para un proceso completo alimentando argón y argón-agua.

El simulador solar de altos flujos consiste en una lámpara de arco de xenón de 7 kW. Una lámpara de arco es un tipo de lámpara que emite luz producida por un arco eléctrico. La lámpara está formada por 2 electrodos separados entre sí en una atmósfera cuya composición está controlada. Dicha atmósfera puede ser neón, argón o xenón, entre otros. Al existir la suficiente diferencia de potencial entre ambos electrodos se produce la ruptura dieléctrica del aire, formándose el arco.

La rutina a seguir para poder realizar el apartado experimental correctamente y en condiciones seguras, tanto para el dispositivo como para la persona, se encuentra detallado en el anexo A.

Los resultados de los 3 ensayos realizados, al igual que las conclusiones obtenidas de cada uno, están detallados en el apartado correspondiente dentro del epígrafe 4.

3.3 Análisis numérico

En este apartado se procede a realizar una serie de simulaciones con el fin de obtener algunas de las magnitudes características de un lecho fluidizado. Por tanto, se realiza un estudio óptico-energético para obtener una serie de parámetros en cuanto a la absorción y dispersión de radiación, y un análisis termofluidodinámico para estudiar el funcionamiento aproximado de un lecho fluidizado.

3.3.1 Análisis óptico-energético

El objetivo del presente estudio es evaluar las propiedades ópticas de un lecho fluidizado. Para ello, se ha usado el programa comercial de trazado de rayos *TracePro*. Este programa traza rayos de una potencia a definir por el usuario desde una fuente a elegir y recopila los datos de los rayos que atraviesan las superficies de la geometría a estudiar. Para este estudio se utiliza como fuente un modelo desarrollado en *TracePro* del simulador solar de altos flujos Kiran-7 en el que la fuente está definida como un punto y se han especificado el resto de componentes de la lámpara, como el reflector elíptico y los cables.

La geometría usada para modelar un lecho fluidizado es la indicada en la figura 25. Se trata de una serie de cilindros coaxiales. El grosor de cada cilindro se ha estimado según la fracción volumétrica de partículas que se encuentran en un lecho fluidizado en la posición que ocupa dicho cilindro.

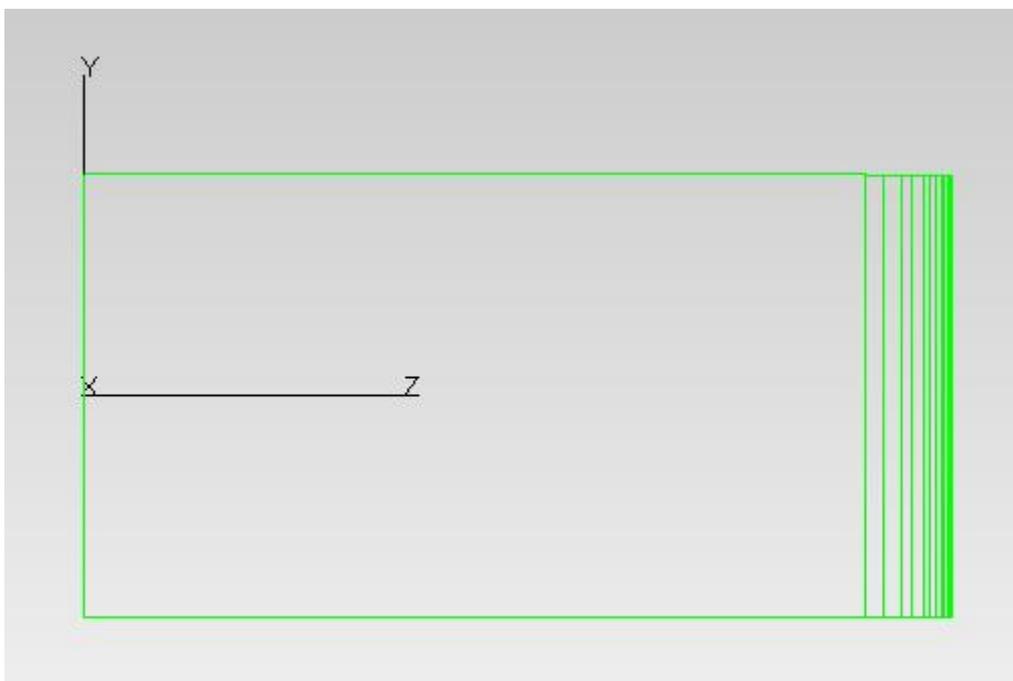


Figura 25. Geometría empleada

A continuación, se muestra una tabla con los espesores de las capas según su fracción volumétrica de partículas (tabla 3):

Tabla 3. Grosor de capas en función de la fracción volumétrica de partículas.

Fv	0.01	0.05	0.07	0.1	0.13	0.15	0.18	0.2	0.23	0.25	0.32	0.38	0.45	0.52	0.6
H (mm)	0.18	0.02	0.1	0.1	0.4	0.5	0.5	1	1	1	2	2	3	3	135

A la hora de asignar propiedades a la geometría, hay que tener en cuenta las propiedades del material y la distribución de partículas según la siguiente fórmula (18):

$$k_x = \frac{3F_v Q_x}{2d_p} \quad (18)$$

Donde:

K_x : Coeficiente óptico a obtener (mm^{-1})

F_v : Fracción volumétrica

Q_x : Propiedad óptica asociada a k_x

d_p : Diámetro de partícula (mm)

Así, se pueden obtener los 3 coeficientes ópticos asociados al material: extinción (ext), absorción (abs) y dispersión (sca). Los 3 coeficientes se pueden relacionar entre sí, siendo el coeficiente de extinción la suma de la absorción y la dispersión. A continuación se representan los resultados obtenidos (tabla 4):

Tabla 4. Coeficientes ópticos según fracción volumétrica

Fv	Abs (-/mm)	Ext($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	Anisotropía	Scat(-/mm)
0.01	0.03	1.19E-06	0.83	0.06
0.05	0.19	7.55E-06	0.83	0.309
0.07	0.27	1.07E-05	0.83	0.433
0.1	0.38	1.51E-05	0.83	0.619
0.13	0.502	2.00E-05	0.83	0.804
0.15	0.58	2.31E-05	0.83	0.928
0.18	0.696	2.77E-05	0.83	1.114
0.2	0.77	3.06E-05	0.83	1.238
0.23	0.889	3.53E-05	0.83	1.423
0.25	0.966	3.84E-05	0.83	1.54
0.28	1.08	4.29E-05	0.83	1.733
0.32	1.237	4.92E-05	0.83	1.98
0.38	1.469	5.84E-05	0.83	2.352
0.45	1.74	6.92E-05	0.83	2.785
0.52	2.011	8.00E-05	0.83	3.21
0.6	2.32	9.23E-05	0.83	3.714

El material que constituye el lecho es carburo de silicio (SiC) de un tamaño de partícula de 370 μm . Para la obtención de las propiedades ópticas es necesario resolver la teoría de Mie para el material. Sin embargo, se ha utilizado un programa de cálculo complementario que, a través de una distribución de partículas y diversos valores del índice de refracción complejo según la longitud de onda de la radiación incidente, es capaz de obtener dichas propiedades ópticas en el rango de longitudes de onda definido (anexo C).

Una vez se han obtenido los coeficientes ópticos correspondientes, es necesario introducirlos en *TracePro*. Estas propiedades se introducen en propiedades de material y propiedades de

dispersión volumétricas. Es importante prestar atención a las unidades en las que hay que introducir dichos coeficientes para dimensionarlos según se requiera.

Análisis sobre precisión

Una vez se hayan definido todos los parámetros, es posible que el resultado del primer trazado de rayos sea poco satisfactorio, ya que los rayos apenas atravesarán un milímetro de la geometría. Esto es debido a que el programa ha dejado de trazar rayos cuando presentan un valor inferior a un cierto umbral de energía.

Por tanto, una de las primeras tareas es modificar dicho umbral y optimizar su valor. Si el umbral es demasiado alto, los rayos de poca energía no los trazará a pesar de suponer una componente no despreciable en el cálculo de la energía incidente final. Si el umbral es demasiado bajo, trazará perfectamente un gran número de rayos pero el tiempo de cálculo se incrementará drásticamente.

El umbral de trazado se puede encontrar en *Raytrace – Raytrace Options – Thresholds – Flux Threshold*. El valor a introducir se encuentra en tanto por uno, es decir, si aparece 0,05, el programa deja de trazar rayos cuando su energía sea inferior al 5% respecto del rayo inicial. Por defecto, aparece el valor mencionado de 0,05.

Así, se han llevado a cabo 3 estudios de precisión donde se han trazado 100.000 rayos en cada uno, con umbrales de 0,01, 0,001 y 0,0001. Para realizar el análisis se ha evaluado el flujo incidente en una superficie fijada para los 3 estudios, con una geometría idéntica. Notar que dicho valor del flujo obtenido dependerá de la profundidad a la que se evalúe el flujo. Por tanto, no se pretende evaluar el flujo total incidente, sino el incremento de flujo entre un nivel de precisión y el siguiente.

Una vez realizadas las 3 configuraciones, se obtiene que el incremento de flujo entre el umbral de 0,01 y 0,001 es de 4 W para una profundidad de 0,78 mm. El incremento de flujo entre 0,001 y 0,0001 es de 40 mW. Sin embargo, el tiempo de cálculo para el umbral de 0,0001 ha sido 10 veces mayor que el tiempo de cálculo con 0,001.

Por tanto, la mejor opción es realizar todos los estudios con un precisión de 0.001, ya que se optimiza el tiempo de cálculo y las pérdidas de flujo obtenidas.

Análisis según distancia focal

Realizado el estudio sobre la precisión a utilizar, se procede a realizar el primer estudio en la geometría. Se emplea la geometría mostrada en la figura 1 y se evalúa la radiación incidente en las diferentes superficies. El número de rayos a trazar se ha reducido a 40.000 debido a limitaciones en el cálculo.

Para ello, es necesario obtener la tabla de rayos incidentes en cada una de las superficies. En dicha tabla, los valores buscados son el flujo incidente y el vector Z. Es importante el valor del vector Z ya que sólo nos aportan información los rayos cuyo vector Z sea negativo.

Por tanto, es necesario realizar un filtrado de datos. Se introducen los datos en una hoja de cálculo y se filtran aquellos que su vector Z sea positivo, realizando así un cálculo del flujo incidente con los rayos con vector Z negativo.

Se llevan a cabo 3 estudios, según la distancia que hay desde el foco del haz de rayos trazado a la superficie de la geometría. Se define el foco como el lugar geométrico donde la concentración de rayos es más elevada. Por aspectos constructivos, el foco del simulador solar empleado se sitúa a 770 mm de la fuente de rayos.

Tomando como referencia el eje Z positivo y situando el 0 en la posición en la cual el foco coincide con la superficie superior de la geometría. Las distancias estudiadas son:

- 0 mm
- +150 mm (el foco está 150 mm por encima de la superficie)
- -100 mm (un foco trazado virtualmente se encuentra 100 mm introducido en la geometría respecto de la superficie superior)

Tras la obtención y procesado de datos, se obtiene la gráfica mostrada en la figura 26:

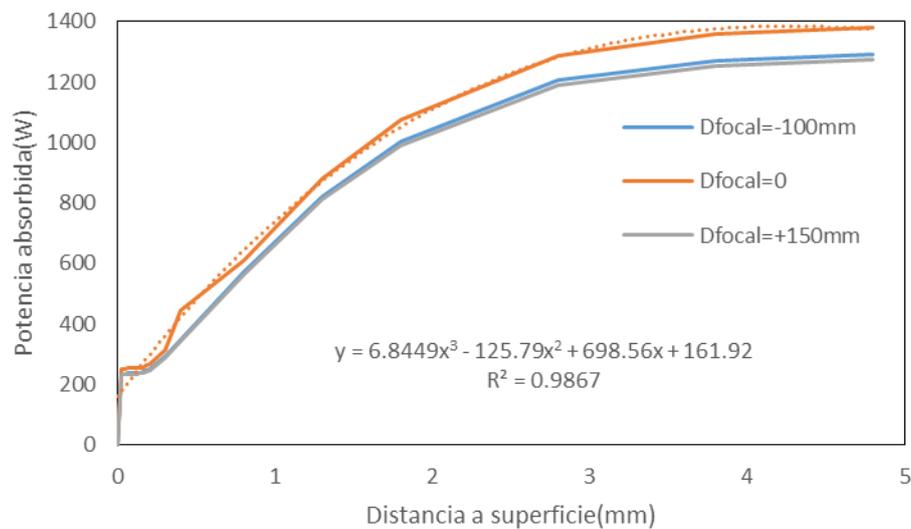


Figura 26. Potencia absorbida vs Distancia a superficie

En la gráfica se puede observar que, como era de esperar, el mejor resultado se obtiene cuando la distancia del foco a la superficie es nula, con una diferencia de hasta 100 W respecto al resto de los casos. Además, se ha representado una línea de tendencia con el fin de facilitar futuras aproximaciones. Un ajuste polinómico de grado 3 ofrece una precisión con un error inferior al 2%.

Destacar que la mayor pérdida de potencia se encuentra en la superficie de la geometría. Esto es debido a que el carburo de silicio evaluado es el α -SiC, que es transparente y reflejante. Para disminuir esta pérdida, una posible solución es la utilización de un material oscuro, ya que los colores oscuros absorben la radiación. También es posible la utilización de carburo de silicio con impurezas. Sin embargo, no se han encontrado datos suficientes del carburo de silicio con impurezas acerca de sus propiedades ópticas.

Análisis según fracción volumétrica de partículas

El siguiente análisis pretende cuantificar la interferencia de las partículas en la difusión del trazado de rayos. Para ello, se evalúa la potencia incidente en una superficie, como en el apartado anterior. Sin embargo, ahora se fija una distancia respecto de la superficie. Los coeficientes ópticos usados son los mismos que en el estudio anterior.

En cuanto a la posición respecto del simulador solar, se utiliza aquella en la que el foco coincide con la superficie superior de la geometría, dado que da mejores resultados en cuanto a radiación incidente.

Para llevar a cabo el análisis, se realizan sucesivas configuraciones idénticas cuya única diferencia sea la fracción volumétrica del material. De cada una se obtiene una tabla de rayos que, tras hacer

un filtrado según la dirección de los rayos, permite la obtención de una longitud óptica L , definida como la longitud a la cual la radiación ha disminuido en un factor e . Por tanto, la longitud óptica se relaciona con la radiación incidente de la siguiente manera (19):

$$I = I_0 e^{-x/L} \quad (19)$$

Donde:

I : Intensidad incidente en una superficie a una distancia x de la parte superior

I_0 : Intensidad incidente en la superficie superior

x : Distancia de la superficie a evaluar hasta la parte superior de la geometría

L : Longitud óptica.

Para el rango de fracciones volumétricas a estudiar, se han obtenido los siguientes resultados (figura 27 y 28).

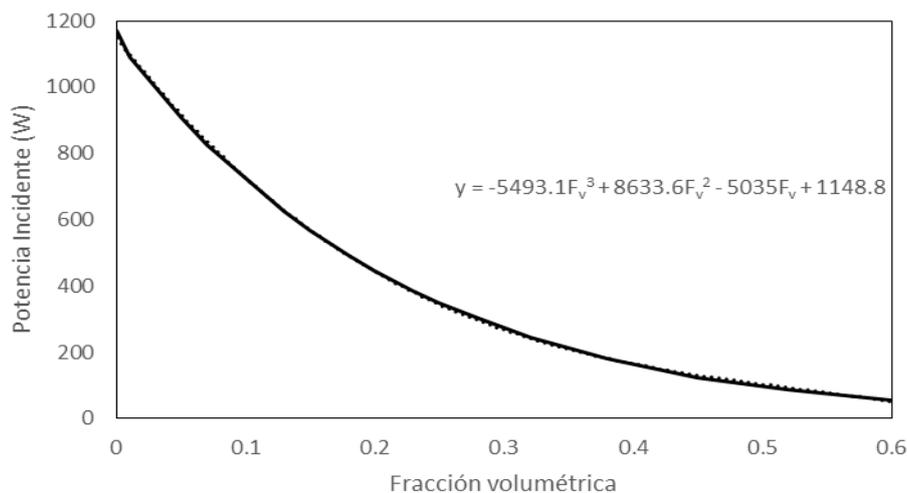


Figura 27. Potencia incidente vs Fracción volumétrica

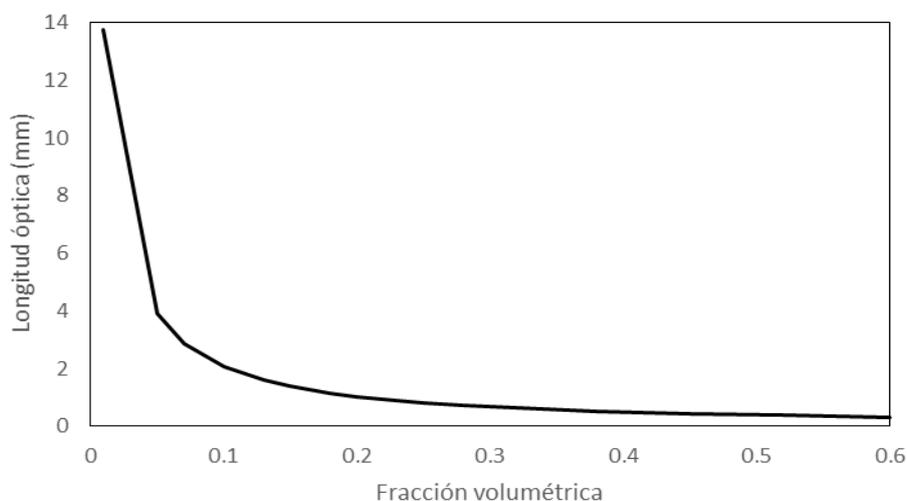


Figura 28. Longitud óptica vs Fracción volumétrica

Se ha obtenido la fórmula de la potencia incidente en función de la fracción volumétrica para la posterior elaboración de un mapa de potencias absorbidas.

Como era de esperar, se observa que para porosidades tendiendo a 1 (es decir, fracciones volumétricas tendiendo a 0), la longitud óptica crece asintóticamente. Esto permite hacer una pequeña estimación acerca de la distribución ideal de partículas en un lecho fluidizado.

Para el rango de fracciones volumétricas entre 0,3 y 0,6, la longitud óptica apenas varía 0,3 mm. Sin embargo, el mayor incremento de longitud óptica se observa entre 0,01 y 0,1, con una diferencia de 11 mm. Por tanto, si se pretende buscar que la radiación incida directamente en un lecho de partículas con unas propiedades determinadas, hay que tener un cuidado especial de que no se cree una zona en la geometría del lecho en la que la fracción volumétrica de partículas tome un valor entre 0,05 y 0,2. Además, en el caso de conseguir un lecho de partículas en fase densa (fracción volumétrica entre 0,5 y 0,6), se puede decir que prácticamente se absorbe toda la radiación en la superficie.

Análisis angular

A la hora de saber cómo es la distribución de rayos, es importante saber cuál es la dirección predominante de los rayos en diferentes profundidades, para saber si los efectos de retrodispersión son importantes dentro del lecho. Además, también es necesario evaluar la potencia de dichos rayos cuantitativamente.

Para ello, se han escogido las superficies a profundidad 0,1, 0,4, 1,3 y 2,8 mm y se han representado todos los rayos que las atraviesan.

A pesar de ser el sistema de coordenadas cartesiano el más familiar, se ha elegido representar los rayos en coordenadas cilíndricas. Al cambiar de base, algunos parámetros de interés adquieren un valor característico muy reconocible, sin dejar de lado lo representativo de una medida angular en una geometría con simetría de revolución.

Por tanto, el sistema de coordenadas cilíndrico se caracteriza de la siguiente manera (figura 29):

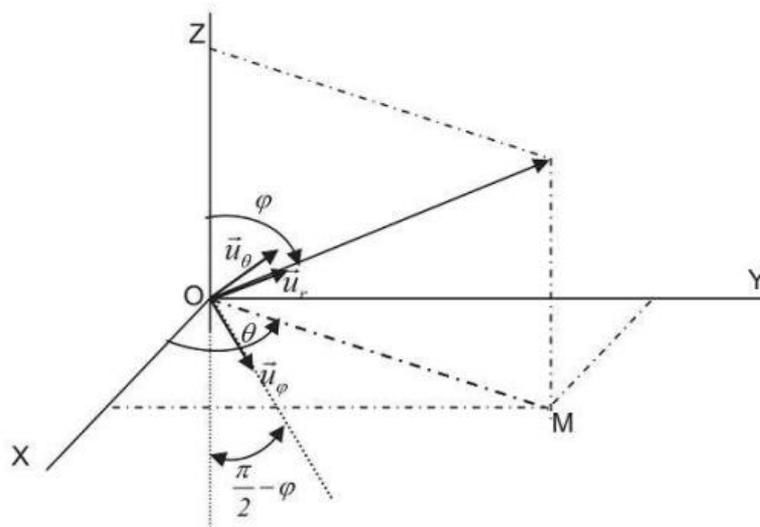


Figura 29. Sistema de coordenadas esféricas

Donde se define r como la longitud total del vector, φ como el ángulo que forma el vector con el eje Z y θ como el ángulo que forma la proyección del vector sobre el plano XY con el eje X. Teniendo esto en cuenta, se han tratado los rayos como vectores y se han cambiado de base mediante las siguientes expresiones (20):

$$U_r = U_x \cos\theta \sin\varphi + U_y \sin\theta \sin\varphi + U_z \cos\varphi \quad (20)$$

$$U_\theta = -U_x \sin\theta + U_y \cos\theta$$

$$U_\varphi = U_x \cos\theta \cos\varphi + U_y \sin\theta \cos\varphi - U_z \sin\varphi$$

Donde U_x , U_y y U_z representan las componentes del vector velocidad en coordenadas cartesianas, $\cos\theta$ y $\sin\theta$ la coordenada X e Y del vector dividido entre el módulo de la proyección del vector sobre el plano XY, respectivamente, y $\sin\varphi$ o $\cos\varphi$ la coordenada X o Z del vector dividido entre el módulo total del vector, respectivamente.

Para llevar a cabo el siguiente procesado de datos, es necesario que los vectores estén normalizados para poder contrastar los datos entre diferentes superficies.

Se han representado los gráficos U_θ vs U_r , U_φ vs U_r y U_θ vs U_φ (figuras 30, 31 y 32).

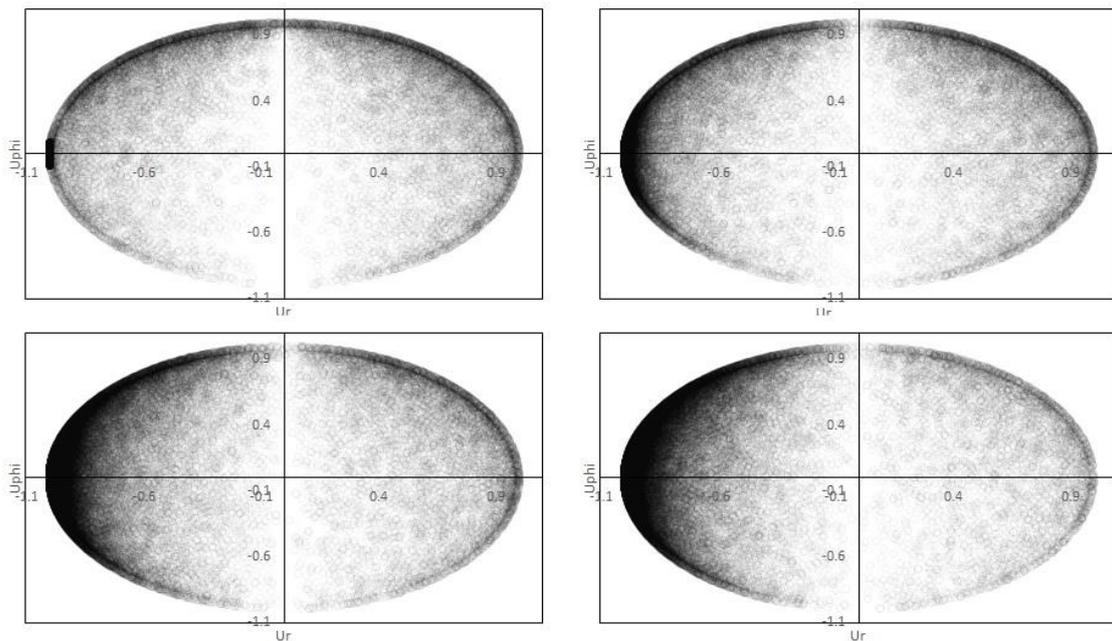


Figura 30. U_θ vs U_r . De izquierda a derecha y de arriba a abajo, profundidades de 0,1, 0,4, 1,3 y 2,8 mm.

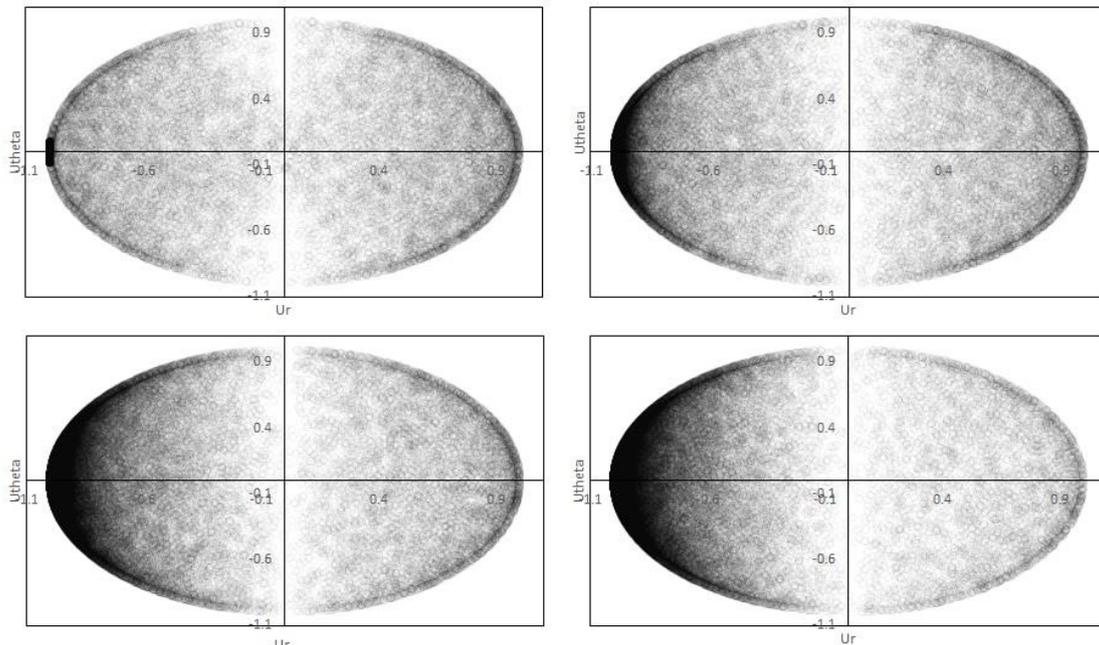


Figura 31. U_θ vs U_r . De izquierda a derecha y de arriba a abajo, profundidades de 0,1, 0,4, 1,3 y 2,8 mm.

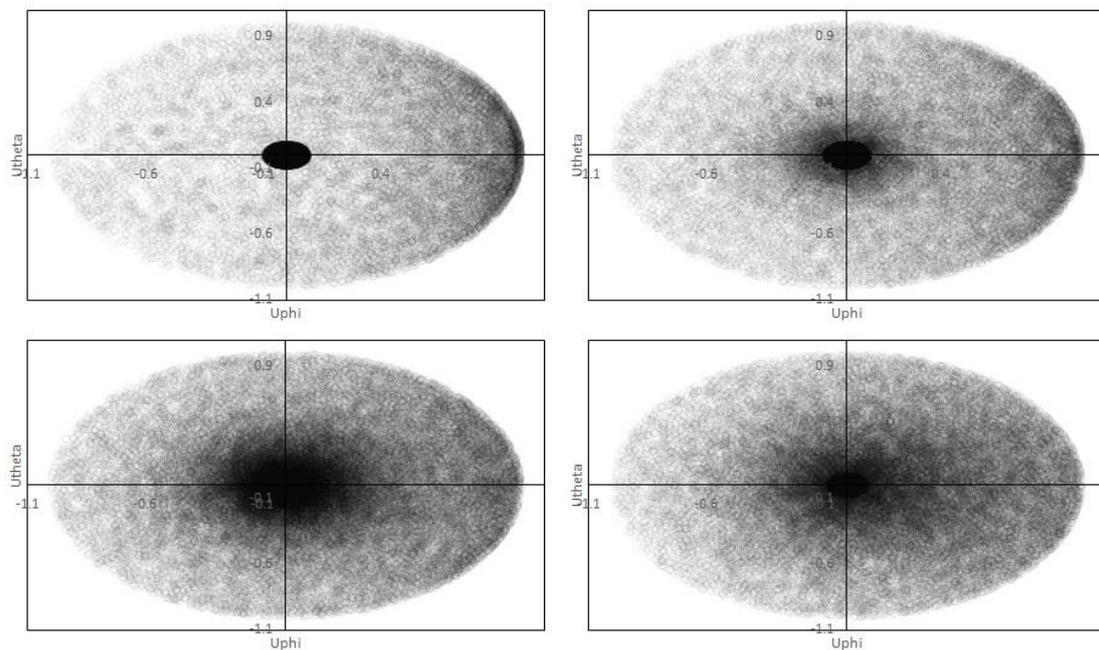


Figura 32. U_θ vs U_ϕ . De izquierda a derecha y de arriba a abajo, profundidades de 0,1, 0,4, 1,3 y 2,8 mm.

Observando las gráficas, se puede ver con claridad que las direcciones angulares características sin dispersión tienden a tomar un valor muy próximo a -1. Sin embargo, a medida que aumenta la profundidad, los valores se van alejando aunque siguen en el entorno de -1.

Analizando la segunda figura, se puede observar que la superficie analizada se representa mediante el eje Y de la figura. Así, los valores negativos de X representan la dispersión en la dirección esperada de los rayos (en la geometría corresponde al eje Z negativo), mientras que los valores positivos corresponden a retrodispersión. Mirando la profundidad de 0,1 mm, se ve una gran concentración de los rayos en la dirección deseada, aunque existe una componente bastante importante de retrodispersión. En contraste, mirando la profundidad de 2,8 mm, los rayos en la

dirección del eje Z negativo se han dispersado más, pero la componente de retrodispersión se ha reducido.

La última figura nos da una idea bastante clara de cómo inciden los rayos en la superficie analizada. Sin embargo, hay que tener en cuenta el número de rayos incidentes en cada superficie. Es decir, parece que los rayos en la cuarta superficie están más concentrados que en la tercera. Esto puede ser debido a que esos rayos que dispersan la imagen de la tercera superficie sean de baja energía y hayan sido totalmente absorbidos antes de llegar a la última superficie. Se observa un color más oscuro en el entorno del borde derecho, que representa un desvío de los rayos en una dirección predominante.

3.3.2 Estudio termo-fluidodinámico

Con el fin de poder observar un funcionamiento aproximado del reactor de lecho fluidizado, se opta por realizar un estudio termo-fluidodinámico (Computational Fluid Dynamics, CFD). Estos programas son caros, tanto en tiempo como en dinero. Por tanto, es necesario optimizar al máximo el trabajo de esta sección para poder obtener resultados.

Elección software

Como consideración previa, es necesario escoger un software apropiado para la resolución del problema. Un software que no sea lo suficientemente robusto puede llevar a resultados erróneos, o incluso no poder resolver el modelo.

Tras un primer intento de desarrollar el modelo en COMSOL Multiphysics, se descubre que la implementación del modelo y su ajuste para alcanzar la convergencia no son inmediatos. Por ello, tras varios ensayos y modificaciones de los parámetros, se optó por abandonar esta herramienta y desarrollar el modelo con el software ANSYS Fluent.

Introducción

Las herramientas de modelado numérico de mecánica de fluidos (CFD, Computational Fluid Dynamics) se emplean para la resolución de un problema donde una geometría es asociada a diferentes fenómenos físicos, representados mediante modelos. A través de diferentes entradas y salidas de diferentes variables de dichos modelos físicos, se consigue simular el comportamiento de dichos fenómenos físicos en un determinado espacio de tiempo.

Dichos modelos son ajustables mediante parámetros. Los parámetros pueden calcularse automáticamente a partir del estado del sistema o tener un valor fijo para toda la simulación. Además, existe la posibilidad de que los parámetros sigan una determinada ley comprobada por algún autor y que se puede representar mediante una fórmula. Algunas de las leyes más empleadas se encuentran configuradas por defecto en el programa ANSYS Fluent.

Por tanto, una simulación se corresponde a un determinado número de modelos ajustables mediante parámetros que se rigen por unas leyes.

Dichos modelos son válidos en toda la geometría de la simulación. Para poder resolverlo (debido a que se pueden presentar discontinuidades en muchas ocasiones), es necesario realizar un mallado de la geometría. Esto significa que la geometría se va a dividir en un número muy elevado de elementos de control mucho más pequeños que la geometría original. Estos elementos pueden tener la forma que se desee, aunque es recomendable que guarden cierta relación con la geometría por tema de simplificación. Un elemento de control aislado está directamente relacionado con aquellos con los que esté en contacto. Este proceso de unión se llama 'ensamblado'.

Para poder empezar la simulación, es necesario establecer una serie de condiciones iniciales y de contorno. Las condiciones iniciales son los valores de todos los parámetros en el momento de empezar la solución. Las condiciones de contorno son los valores que adquieren algunos parámetros en puntos del espacio muy definidos para todo momento de tiempo.

Así, los programas CFD resuelven el modelo en cada uno de los parámetros de control en el primer instante de tiempo para obtener todos los parámetros del sistema, ensambla los elementos de control para obtener el valor final de los parámetros y los compara entre sí. Si dicha comparación (o error) supera un valor umbral, el software volverá a realizar todos los cálculos pero cambiando las condiciones iniciales por las condiciones obtenidas en el instante de tiempo calculado.

Creación del modelo

Para la creación del modelo, el primer paso es crear la geometría. Para ello, se pueden usar tanto programas integrados en Ansys como cualquier software externo de diseño gráfico por ordenador.

Por temas de limitación de recursos y tiempo, sólo se puede modelar en 2D ó 2,5D (2 dimensiones muy predominantes frente a una tercera insignificante). Por ello, el modelo creado responde ante la geometría de un rectángulo con base de 77 mm. En cuanto a la altura del rectángulo, es un parámetro ajustable según el desarrollador. Se ha estimado oportuno que sea de una altura suficiente como para que el flujo esté completamente desarrollado en la parte superior del rectángulo, por lo que una altura idónea es de unos 300 mm. Si se pretende recrear el reactor de lecho fluidizado con la mayor precisión posible, esta altura debería ser ligeramente menor. La altura inicial de las partículas se establece en 77 mm para lograr una relación $H/D = 1$.

Para el caso en el que se introduzca un flujo de calor desde la parte superior, es necesario realizar alguna transformación en los laterales de la geometría. Para ello, los muros laterales se dividen en 2 secciones: una primera que mida 77 mm desde la parte inferior, y la segunda que mida lo que reste hasta completar los 300 mm originales.

Una vez creada la geometría, hay que pasar a definir un mallado que se ajuste correctamente al modelo físico que se pretende implantar. Para ello, Ansys dispone de un programa de mallado integrado. En general, el mallado se suele ajustar bastante bien automáticamente. Sin embargo, es posible realizar una composición del mallado más refinada si el usuario lo requiere. Es recomendable refinar la malla en la zona inferior de la geometría al tratarse de un área con más actividad, ya que se encuentran tanto las partículas como el aire.

Además, para el caso del estudio con flujo de calor, en la zona superior es necesario tener una malla con un tamaño bastante fino como para que en cada una de las divisiones realizadas en el borde superior se incluyan 2 nodos, a fin de minimizar el error.

Dentro del programa de mallado hay que definir los distintos contornos de la geometría. Por defecto, todos los bordes de la geometría se definen como pared, quedando así la geometría encerrada por una única pared. En el modelo que se pretende definir, es necesario realizar una distinción de los bordes de la geometría. Así, distinguiremos entre una entrada por velocidad (situada en el borde inferior de la geometría), 2 paredes (situadas en los lados de la geometría) y una salida por presión (situada en la parte superior de la geometría). Los conceptos que representan cada una de estas distinciones se definen más adelante.

Además, de las particiones realizadas en las paredes laterales, es necesario hacer una distinción: a las que se encuentran colindantes con el borde inferior se les otorgará un nombre diferente que a las que colindan con la parte superior con el fin de que el software CFD no lo asemeje al mismo

dominio, pues cada parte tiene unas condiciones de contorno diferentes. En la figura 33 se muestra un dibujo detallado del esquema y del mallado.

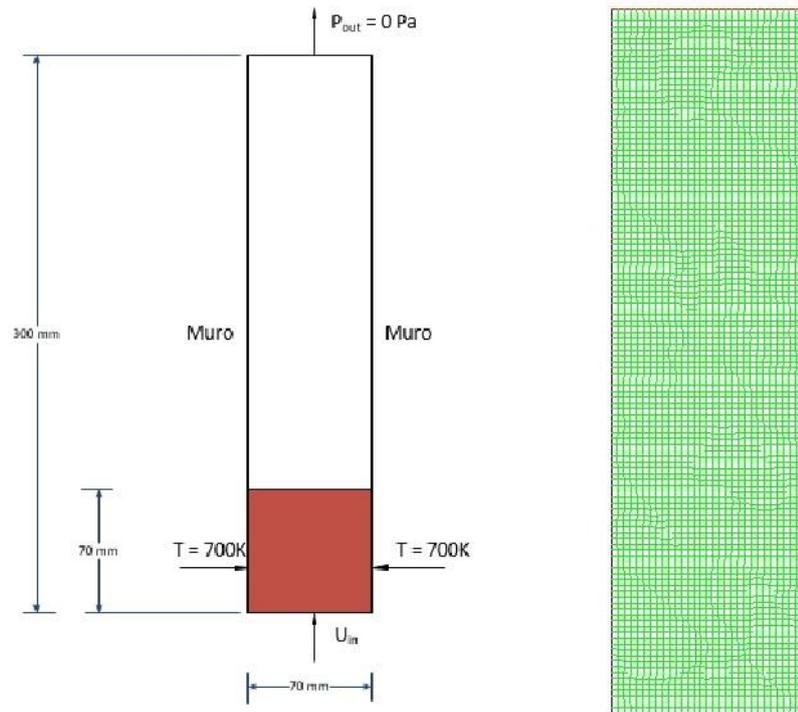


Figura 33. Esquema del modelo CFD y mallado usado

Con el mallado creado y la geometría definida, se empiezan a implantar modelos físicos. Para ello, se usa el software Fluent, integrado en Ansys.

El principal modelo a implantar es de un flujo multifásico. Para ello, se va a emplear el modelo euleriano. Dicho modelo simula las fases por separado que interactúan entre sí mediante determinados parámetros. Para calcular la solución, Fluent tiene unas determinadas peculiaridades al emplear este modelo:

- Presión compartida por todas las fases.
- Ecuaciones de momento y continuidad resueltas por separado para cada fase.
- Existen una serie de parámetros para las fases granulares:
 - Temperatura granular calculada para cada fase granular.
 - La viscosidad del lecho y los esfuerzos de cortadura de fases se obtienen aplicando la teoría cinética a flujos granulares.
- Existen diversos coeficientes de arrastre entre fases, apropiados según el modelo a realizar.
- Todos los modelos de turbulencia se pueden aplicar a las fases o a la mezcla.

Las ecuaciones generales que Fluent resuelve son las siguientes:

- Ecuación de fracción volumétrica de la fase q (21 y 22)

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (21)$$

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (22)$$

Donde α_q representa la fracción volumétrica de la fase q y V_q el volumen total de la fase q. Además, se puede definir la densidad efectiva ρ_q (23):

$$\rho_q = \alpha_q \hat{\rho}_q \quad (23)$$

Donde $\hat{\rho}_q$ representa la densidad real de la fase q.

- Ecuación de continuidad (24):

$$\frac{1}{\rho_{rq}} \left[\frac{d}{dt} (\alpha_q \rho_q) + \nabla (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] \quad (24)$$

Donde \bar{v}_q representa el vector velocidad de la fase q, ρ_{rq} la densidad volumétrica media en el dominio de estudio y \dot{m}_{pq} la transferencia de masa de la fase p hacia la fase q.

Resolviendo estas 2 primeras ecuaciones en conjunto para cada una de las fases secundarias permite el cálculo de la fracción volumétrica de la fase primaria.

- Ecuaciones del momento entre sólido y fluido para la fase sólida s (25 y 26):

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} (\alpha_s \rho_s \bar{v}_s) + \nabla (\alpha_s \rho_s \bar{v}_s \bar{v}_s) \\ &= -\alpha_s \nabla P - \nabla P_s + \nabla \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \bar{g} \\ &+ \sum_{l=1}^N [K_{ls} (\bar{v}_l - \bar{v}_s) + \dot{m}_{ls} \bar{v}_{ls} - \dot{m}_{sl} \bar{v}_{sl}] + [\bar{F}_s + \bar{F}_{lift,s} + \bar{F}_{vm,s} + \bar{F}_{td,s}] \end{aligned} \quad (25)$$

$$\bar{\tau}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \bar{v}_q + \nabla \bar{v}_q^T) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \bar{v}_q \bar{I} \quad (26)$$

Donde P es la presión del sistema, P_s es la presión del sólido, $\bar{\tau}$ es el tensor de tensiones de deformación, \bar{g} es el vector gravedad, l es el conjunto de todas las fases sólidas y K_{ls} es el coeficiente de intercambio de momento entre fases.

Por otro lado, hay una componente de fuerzas en la ecuación: \bar{F}_s representa cualquier fuerza externa aplicada a la fase s, $\bar{F}_{lift,s}$ es la fuerza de sustentación, $\bar{F}_{vm,s}$ es la fuerza de masa virtual y $\bar{F}_{td,s}$ es la fuerza de dispersión turbulenta. La ecuación de estas fuerzas se detalla más adelante.

En cuanto a la ecuación del tensor de tensiones de deformación, μ_q es la viscosidad dinámica, λ_q es la viscosidad del lecho y \bar{I} es el tensor de inercia.

También se define una ecuación para el momento entre fluido y fluido. Sin embargo, el sistema a analizar está formado únicamente por una fase sólida y una fase fluida.

- Ecuación de conservación de la energía (27):

$$\frac{d}{dt} (\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q h_q) = \alpha_q \frac{\partial P_q}{\partial t} + \bar{\tau}_q: \nabla \bar{u}_q - \nabla \cdot \bar{q}_q + S_q + \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp}) \quad (27)$$

Donde h_q es la entalpía específica, \bar{q}_q es el flujo de calor, S_q es un término fuente externo, Q_{pq} es la intensidad de calor intercambiado entre fases y h_{pq} es la entalpía de interfase.

El calor intercambiado Q_{pq} debe coexistir con las condiciones locales del entorno, de manera que $Q_{pq} = -Q_{qp}$, y $Q_{pp} = 0$.

Definición de parámetros

Las ecuaciones del apartado anterior son las que, por defecto, Fluent resuelve para cualquier tipo de problema multifásico. Para crear el modelo deseado, se han de definir una serie de coeficientes y parámetros específicos a lo que se pretende simular.

- Concentración de área interfacial (28):

Se define como el área interfacial entre 2 fases por unidad de volumen. Es un parámetro importante para definir masa, momento y energía en la interfase. Se emplea el modelo simétrico, que se define como:

$$A_i = \frac{6\alpha_p(1 - \alpha_p)}{d_p} \quad (28)$$

Donde A_i es la concentración de área interfacial y d_p es el diámetro de partícula.

- Coeficiente de arrastre e intercambio de momento entre fases

El coeficiente de arrastre es uno de los parámetros más importantes de la simulación, al determinar casi exclusivamente la altura final del lecho fluidizado. Tras una revisión bibliográfica, se concluye que el mejor modelo para lechos fluidizados es el propuesto por Gidaspow (29).

$$K_{sl} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_l \rho_l |\bar{v}_s - \bar{v}_l|}{\alpha_s} \alpha_l^{-2.65} \text{ para } \alpha_l > 0.8 \quad (29)$$

$$K_{sl} = 150 \frac{\alpha_s(1-\alpha_l)\mu_l}{\alpha_l d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_l \alpha_s |\bar{v}_s - \bar{v}_l|}{d_s} \text{ para } \alpha_l \leq 0.8$$

$$\text{Donde } C_D = \frac{24}{\alpha_l Re_s} [1 + 0.15(\alpha_l Re_s)^{0.865}]$$

- Coeficiente de Nusselt (30):

Aunque no se realice un modelo donde la temperatura sea un factor decisivo, Fluent necesita definir un modelo específico al activar la ecuación de conservación de la energía. El elegido es el modelo de Gunn, recomendado para flujos granulares:

$$Nu_s = (7 - 10\alpha_f + 5\alpha_f^2) \left(1 + 0.7Re_s^{0.2} Pr^{1/3}\right) + (1.33 - 2.4\alpha_f + 1.2\alpha_f^2) 0.7Re_s^{0.2} Pr^{1/3} \quad (30)$$

Donde Nu_s es el número de Nusselt, Re_s es el número de Reynolds y Pr es el número de Prandtl.

Este modelo es aplicable para porosidades entre 0,35 y 1 y números de Reynolds mayores de 10^5 . El número de Prandtl se define para $q=f$.

- Fuerza de masa virtual (31):

El efecto de la velocidad de masa virtual ocurre cuando una fase secundaria p se acelera respecto a una fase primaria q . La inercia de la masa de la fase primaria que interactúa con la fase secundaria acelerada provoca una ‘fuerza de masa virtual’ en las partículas:

$$\bar{F}_{vm} = C_{vm} \alpha_p \rho_q \left(\frac{dq \bar{v}_q}{dt} - \frac{dp \bar{v}_p}{dt} \right) \quad (31)$$

C_{vm} es el parámetro modificable en Fluent. Para la simulación, tiene el valor de 0,5. El término $\frac{dq}{dt}$ representa la derivada parcial respecto al tiempo de la fase material (32):

- $$\frac{dq(\phi)}{dt} = \frac{\partial(\phi)}{\partial t} + (\bar{v}_q \cdot \nabla)\phi \quad (32)$$

- Fuerza de sustentación

La fuerza de sustentación actúa en las partículas por efecto del gradiente de velocidad de la fase primaria. Se define como (33):

$$F_{lift} = -C_l \rho_q \alpha_p (\bar{v}_q - \bar{v}_p) \times (\nabla \times \bar{v}_q) \quad (33)$$

Donde C_l es el coeficiente de sustentación. El efecto de esta fuerza apenas es apreciable para partículas de diámetro muy pequeño, por lo que no se incluye dicho efecto en el modelo, obteniendo así C_l el valor de 0.

- Coeficientes de restitución

Para flujos granulares compresibles (por debajo de una fracción volumétrica máxima) se calcula una presión de sólido que se usa en la ecuación del momento de la fase granular (34):

$$P_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (34)$$

Donde θ_s es la temperatura granular, e_{ss} es el coeficiente de restitución para colisiones de partículas y $g_{0,ss}$ es la función de distribución radial. El valor de e_{ss} empleado es 0,9.

$g_{0,ss}$ es una función de distribución que gobierna el flujo desde una situación compresible hasta la situación incompresible (donde la fracción volumétrica del entorno es igual a la máxima). Dado que sólo existe una fase sólida, se puede emplear la siguiente fórmula excepcionalmente (35):

$$g_0 = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (35)$$

Por otra parte, el coeficiente de intercambio sólido-sólido tiene la siguiente fórmula (36):

$$K_{ls} = \frac{3(1 + e_{ls}) \left(\frac{\pi}{2} + C_{fr,ls} \frac{\pi^2}{8} \right) \alpha_s \rho_s \alpha_l \rho_l (d_l + d_s)^2 g_{0,ls}}{2\pi(\rho_l d_l^3 + \rho_s d_s^3)} |\bar{v}_l - \bar{v}_s| \quad (36)$$

Donde e_{ls} es el coeficiente de restitución y $C_{fr,ls}$ es el coeficiente de fricción entre las fases sólidas l y s.

- Temperatura granular (37):

La temperatura granular para una fase sólida s es proporcional a la energía cinética de la forma:

$$\theta_s = \frac{1}{3} u_{s,i} u_{s,i} \quad (37)$$

Donde $u_{s,i}$ representa la velocidad fluctuante en la componente i. Por tanto, se puede definir la magnitud como una media de la velocidad fluctuante y aleatoria de las partículas. Incluyendo esto, la ecuación de transporte que deriva de la teoría cinética queda como (38):

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \alpha_s \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \theta_s \bar{v}_s) \right] = (-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \bar{v}_s + \nabla \cdot (K_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \varphi_{ls} \quad (38)$$

Donde $(-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s)$ es la generación de energía por el tensor de deformación, $(K_{\theta_s} \nabla \theta_s)$ es la difusión de energía siendo K_{θ_s} el coeficiente, γ_{θ_s} es la disipación colisional de energía y φ_{ls} es el intercambio de energía entre la fase líquida l y la fase sólida s.

El término $(K_{\theta_s} \nabla \theta_s)$ describe el flujo difusivo de la energía granular. Se puede obtener según el modelo de Syamlal et al. (39 y 40):

$$K_{\theta_s} = \frac{15d_s\rho_s\alpha_s\sqrt{\theta_s\pi}}{4(41-33\eta)} \left[1 + \frac{12}{5}\eta^2(4\eta-3)\alpha_s g_{0,ss} + \frac{16}{15\pi}(41-33\eta)\eta\alpha_s g_{0,ss} \right] \quad (39)$$

$$\eta = 1/2 (1 + e_{ss}) \quad (40)$$

La disipación colisional de energía representa el ratio de disipación de energía en una fase sólida debido al choque de partículas. Se representa mediante la expresión de Lun et al. (41):

$$\gamma_{\theta_s} = \frac{12(1-e_{ss}^2)}{d_s\sqrt{\pi}} \rho_s \alpha_s^2 \theta_s^{3/2} \quad (41)$$

La transferencia de energía entre 2 fases por energía fluctuante se representa como (42):

$$\varphi_{ls} = -3K_{ls}\theta_s \quad (42)$$

- Esfuerzos de cortadura

El tensor de esfuerzos tiene varias componentes debido a intercambio de momento entre partículas por traslación y colisión. Además, se incluye un término viscoso para simular la transición al estado en el que la fracción volumétrica alcanza el máximo, aunque dicho término no se tenga en cuenta (43, 44 y 45):

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (43)$$

Donde:

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5}\alpha_s\rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{1/2} \alpha_s \quad (44)$$

Para $\mu_{s,kin}$ se usa el modelo de Syamlal et al. (45):

$$\mu_{s,kin} = \frac{\alpha_s d_s \rho_s \sqrt{\theta_s \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[1 + \frac{2}{5}(1 + e_{ss})(3e_{ss} - 1)\alpha_s g_{0,ss} \right] \quad (45)$$

El término viscoso de estos esfuerzos (o viscosidad friccional) no se ha considerado oportuno incluirlo debido a que la dificultad de los cálculos se incrementa en gran medida, además de ser necesaria la adición de algunos modelos físicos adicionales para su correcta simulación.

- Viscosidad volumétrica (46):

Esta viscosidad se define como la resistencia de las partículas granulares a la compresión y a la expansión. Se emplea el modelo de Lun et al. :

$$\lambda_s = \frac{4}{3}\alpha_s^2 \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{1/2} \quad (46)$$

Materiales

Con los parámetros físicos fijados, es necesario introducir las magnitudes características para ambas fases.

A pesar de que las partículas son un medio sólido, en el estado inicial de la simulación se va a suponer un estado fluidizado para agilizar el cálculo. Por tanto, ambas fases se definen como fluidos.

Al tratarse de una simulación de un experimento en frío, la fase primaria es aire y posee cualidades estándar a 25 °C. Estas son una viscosidad de 1,225 kg/m³ y una viscosidad dinámica de 1,7894·10⁻⁵ kg/m·s.

Para la simulación con flujo de calor, se pretende estudiar el patrón de calentamiento de la fase secundaria. Por tanto, la fase primaria se ha simulado como una fase ideal transparente a efectos de la transmisión de calor. Esto significa un valor de C_p (calor específico) muy bajo y un valor de λ (conductividad térmica) muy alto.

Para la fase secundaria se ha decidido usar las ferritas de níquel. En condiciones estándar, el fabricante nos proporciona el dato de que la densidad es de 5663 kg/m^3 .

Para la viscosidad dinámica, es necesario acudir a fuentes bibliográficas al no haber una única fórmula establecida para ello. Johnson propuso la siguiente (47):

$$\mu_a = \mu_f [1 + 0.5(1 - \varepsilon)] [(1 - \varepsilon)/\varepsilon]^9 / \varepsilon^4 \quad (47)$$

Con la fórmula de Johnson (47) y considerando el estado de mínima fluidización ($\varepsilon \sim 0,6$), se obtiene una viscosidad dinámica de $5,8 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$.

Las propiedades térmicas de la ferrita de níquel no son proporcionadas por el fabricante. Sin embargo, tras realizar una búsqueda bibliográfica, Andrew T. Nelson [12] realiza unos ensayos para la determinación de dichos valores, los cuales se han empleado en la simulación. Con ello, se otorga el valor de $0,75 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ al calor específico y el valor de $6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ a la conductividad térmica.

Condiciones de contorno

Con los materiales definidos, el siguiente paso es obtener las condiciones de contorno del modelo. Debido a la simplicidad geométrica de éste, existen solo 3 condiciones:

- Salida de presión

Es el lugar geométrico por el cual el flujo es considerado que sale de la simulación. Se sitúa en el borde superior de la geometría y tiene 3 parámetros ajustables.

La presión mínima de salida (o presión de manómetro), la cual tiene que ser superada en la salida para que el flujo pueda salir, se fija en 0 Pa .

Existe la posibilidad de que el flujo que ha salido del sistema pueda volver a entrar porque las características del sistema hayan variado mucho en una determinada dirección. Por tanto, se habla de que existe flujo de retorno, y se cuantifica mediante 2 parámetros: la temperatura granular (fijada en $0,0001$) y la fracción volumétrica (fijada en 0). Se obtienen dichos valores porque se espera conseguir un régimen fluidizado no arrastrado.

- Entrada de velocidad

Es el lugar geométrico por el cual se produce una entrada del flujo, en forma de velocidad fijada. Se sitúa en el borde inferior de la geometría y tiene 5 parámetros ajustables.

Análogamente a la salida de presión, se define la presión mínima de entrada como la presión adicional a la que entra el flujo al sistema. Se fija en 0 Pa .

Para ambas fases es necesario definir la dirección y la velocidad del flujo. Debido a la simplicidad de la geometría, el flujo en la entrada es normal a la geometría en el punto de entrada. La velocidad se fija en $0,05 \text{ m/s}$ para la fase primaria en la simulación sin flujo de calor, dado que en la entrada sólo va a haber aire.

Si se introduce un flujo de calor, la velocidad de mínima fluidización cae mucho, por lo que se fija en $0,005 \text{ m/s}$.

Además, para la fase secundaria, se puede definir también la fracción volumétrica y la temperatura granular de la entrada. La entrada es exclusiva para la fase primaria, por lo que la fracción volumétrica es 0 y la temperatura granular es 0,0001.

- Pared

La pared es el lugar geométrico que no puede ser atravesado por ninguno de los elementos de la simulación. Se sitúa en las caras laterales de la geometría y tiene 2 parámetros ajustables.

Es necesario definir si la pared es un lugar fijo en el espacio o está sometido a algún tipo de movimiento de traslación o rotación. Para la simulación, se establece como un muro estacionario.

El último parámetro es para definir cómo se desarrolla el flujo en las cercanías de la pared, y es la condición de cortadura. Se define independientemente para cada una de las fases.

Para la fase primaria no hay cortadura, por lo que el perfil de velocidades toma la típica forma parabólica cuando está desarrollado.

Sin embargo, para la fase secundaria existen esfuerzos de cortadura. Esto se ha simulado mediante el coeficiente de especularidad, que se aproxima como la rugosidad de la pared. A partir de ello, se puede obtener si la fase secundaria desliza sobre la pared o no. Dicho coeficiente toma valores entre 0 (pared lisa) y 1 (pared muy rugosa). Para simplificar la simulación, dado que no es muy influyente en los resultados, se ha fijado el valor de 0. Este coeficiente sólo es importante para simulaciones en flujos muy turbulentos o arrastrados.

Por último, para la simulación con flujo de calor se establece una temperatura fija en las paredes indicadas en la figura 52 de 700 K.

Método de resolución

Para que Fluent pueda resolver el problema, es necesario indicar el patrón de cálculo que éste tiene que seguir. Es por esto que existen los solucionadores (o solvers). Son rutinas establecidas de cálculo.

Es necesario elegir un solucionador para el método en general, uno para cada una de las ecuaciones de mayor importancia (en este caso son 3), y otro para la resolución transitoria del problema. En la figura 34 se muestra el algoritmo seguido por el solucionador elegido para el problema.

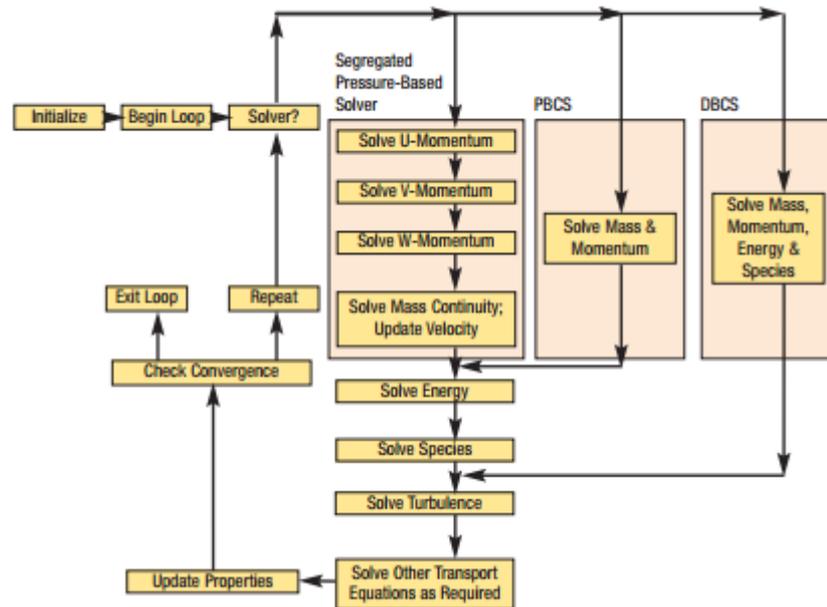


Figura 34. Algoritmo de resolución de Fluent.

Al ser una primera aproximación del problema, donde lo que interesa es un resultado generalista y no una determinada precisión, se eligen los solucionadores más sencillos por ser más rápidos. Éstos son aquellos que sigan un esquema de primer orden, que significa que aproximan cualquier serie numérica hasta la primera derivada. Así, la pérdida de exactitud se traduce en la eliminación del término de la segunda derivada (que si se incluye en solucionadores de segundo orden).

Como se puede ver en la imagen, el cálculo no termina hasta que no se alcance una determinada convergencia (comúnmente llamado error). Si el solucionador no logra un valor de convergencia suficientemente bajo, continuará haciendo cálculos hasta que lo logre. Sin embargo, hay algunas variables que de un cálculo a otro pueden sufrir una gran variación debido a que dependen fuertemente de otra variable. Para evitar esto, se introducen los factores de subrelajación.

Los coeficientes de relajación limitan el incremento que una variable puede sufrir de una iteración a la siguiente. Por ello, en las variables dominantes del sistema no debería manipularse (es decir, que el incremento que sufre la variable en el cálculo sea el mismo incremento que va a tener la variable final). Sin embargo, para variables secundarias es recomendable establecer un coeficiente de relajación. La fórmula que siguen estos factores es del tipo (48):

$$\phi = \phi_{old} + \alpha \Delta \phi \quad (48)$$

Donde ϕ es el valor de una variable cualquiera usada para la siguiente iteración, ϕ_{old} es el valor de la variable antes de realizar la iteración, $\Delta \phi$ es el incremento que ha sufrido la variable tras la iteración y α es el coeficiente de relajación.

Al estar usando un solucionador que emplea como parámetro dominante del sistema la presión, es recomendable que el coeficiente de relajación de la presión sea lo más bajo posible. Análogamente, al no usar el solucionador basado en la densidad, el coeficiente de relajación de la densidad debe ser alto (en torno a 1). Para el resto de variables, Fluent tiene unos valores predeterminados que son óptimos para la mayoría de los casos. En el caso de que la convergencia de alguna de esas variables sea demasiado alta (error muy alto), se recomienda reducir ligeramente el coeficiente de relajación de esa variable, en torno a un 10-20 % del valor inicial. No es recomendable disminuirlos demasiado, pues el resultado final de las variables no refleja el resultado real.

Una vez se han establecido los coeficientes de relajación, es necesario inicializar el sistema, o lo que es lo mismo, establecer las condiciones iniciales de la simulación. Se pretende que lo único que haya en el dominio al empezar la simulación sean las partículas. Destacar que la región ocupada por las partículas no comprende todo el dominio, por lo que hay que definir la región en la cual se encuentran. Además, el sistema empieza desde un estado fluidizado para ahorrar tiempo de cálculo. El resto de variables se inicializan con un valor neutro.

Por último, es necesario definir el tiempo de cálculo. El método empleado es con pasos de tiempo adaptados, para que según sea la convergencia, Fluent decida si puede calcular un paso de tiempo mayor o menor. Es recomendable empezar con un paso de tiempo muy pequeño y que Fluent lo aumente hasta el óptimo.

Además, hay que definir el número máximo de iteraciones por cada paso temporal. Si se alcanza ese número máximo de iteraciones sin alcanzar la convergencia deseada, los valores de las variables obtenidos en la última iteración del paso temporal se usan para la primera iteración del siguiente paso temporal, aunque no cumplan los requisitos de convergencia. Por ello, un número demasiado bajo de iteraciones conlleva a un elevado error en cálculos largos, pero un número demasiado elevado de iteraciones alarga el tiempo de cálculo innecesariamente. Se ha establecido el valor de 50 iteraciones por cada paso temporal.

4. Resultados y discusión

En este capítulo se comentan todos los resultados obtenidos en conjunto de cada una de las partes (experimentación y análisis numérico) con el fin de obtener una idea del funcionamiento de un reactor de lecho fluidizado en operación.

Experimentación

Primero se muestran los resultados obtenidos para el análisis de fluidización en frío.

Una vez se han obtenido los caudales teóricos de fluidización, el siguiente paso es realizar los ensayos para determinar la velocidad de fluidización real. Observando la forma de la gráfica ΔP vs Q , se define la velocidad de mínima fluidización como el punto en el que un incremento de caudal no conlleva a un incremento de presión.

Sin embargo, si se pretende evaluar los resultados directamente, se observa que este punto nunca se produce. Esto es debido a la caída de presión que hay en el tubo por el hecho de haber un fluido circulando a través de él.

Por tanto, es necesario realizar primero un ensayo del tubo vacío, para poder cuantificar las pérdidas. Se muestra en la figura 35.

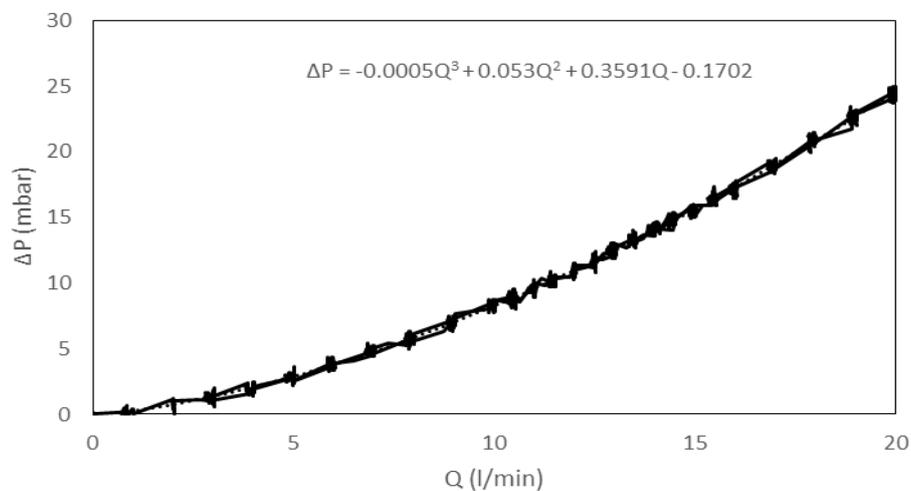


Figura 35. ΔP vs Q en vacío para $D = 0.033$ m

Se ha adjuntado una aproximación de la fórmula que sigue la curva, con un error inferior al 0,2%.

Una vez obtenida la curva de vacío, el siguiente paso es efectuar los ensayos de fluidización con distintos volúmenes de material. Se han efectuado ensayos con alturas de $H/D = 0,5$, 1 y 2. Destacar que el procesado de datos consiste en hacer la diferencia entre la curva de fluidización obtenida en cada caso y la curva de vacío. Los resultados se muestran en las figuras 36, 37 y 38.

Junto a cada curva, al tratarse de dispersiones de puntos, se ha realizado una aproximación polinómica de la curva para poder observar el punto de inicio de la fluidización.

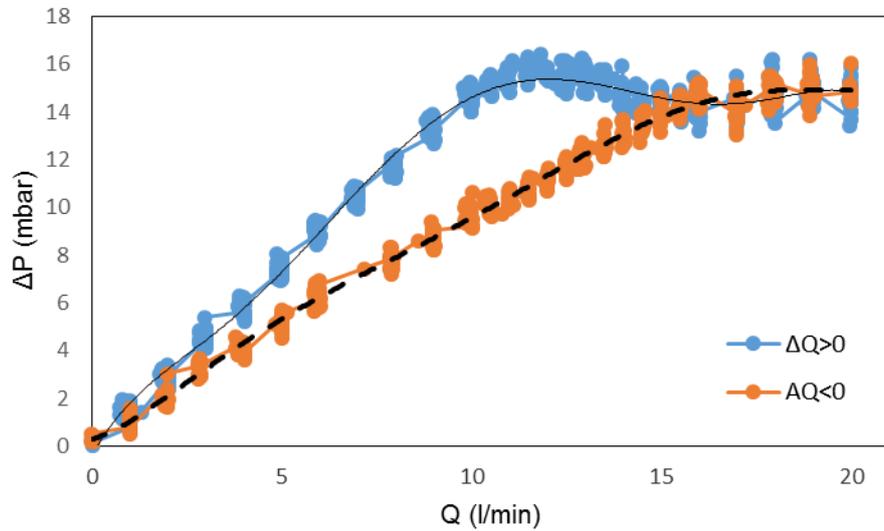


Figura 36. ΔP vs Q para $H/D = 2$ y $\rho = 4000 \text{ kg/m}^3$

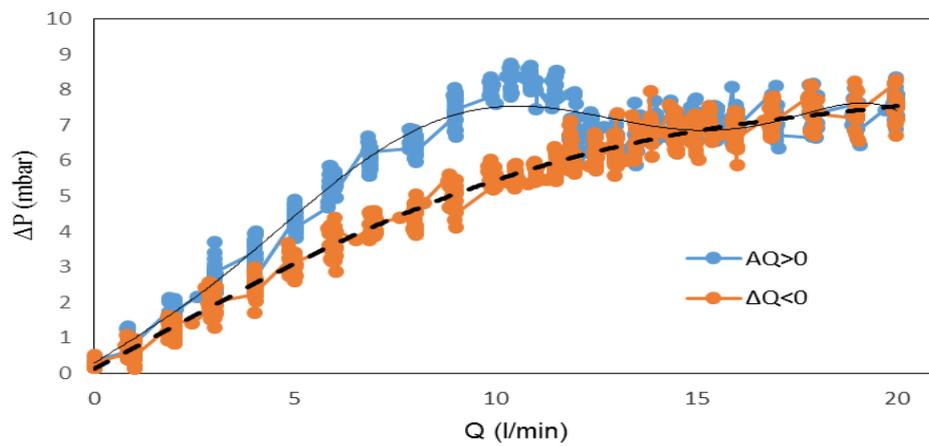


Figura 37. ΔP vs Q para $H/D = 1$ y $\rho = 4000 \text{ kg/m}^3$

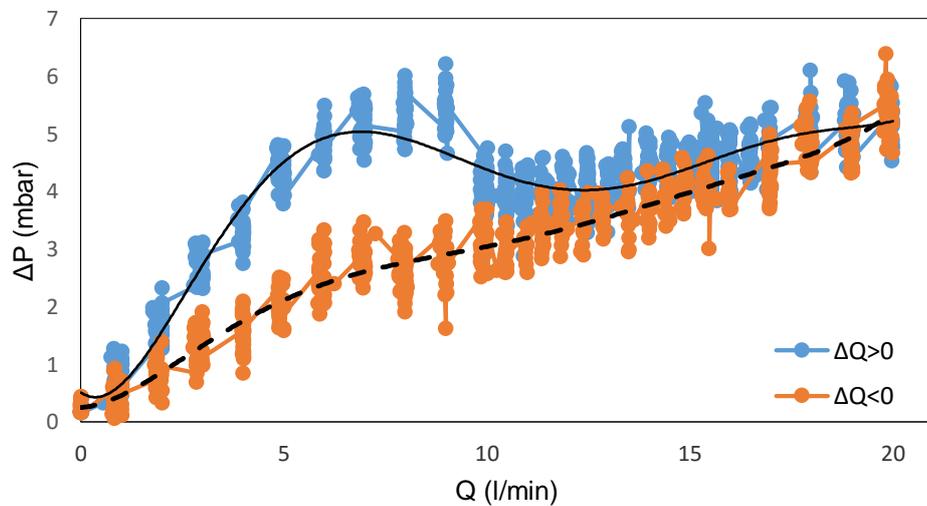


Figura 38. ΔP vs Q para $H/D = 0,5$ y $\rho = 4000 \text{ kg/m}^3$

La curva de fluidización obtenida para $H/D = 0,5$ no se asemeja demasiado a la forma que teóricamente debe tener. Esto puede ser debido a la precisión de los aparatos de medida o a que el material dentro del lecho es insuficiente. Se observa que el incremento de presión en 2 puntos con el mismo caudal puede variar en 1 mbar que, según el caudal del que se trate, puede llegar a suponer hasta una imprecisión del 100%.

Sin embargo, analizando el caso de $H/D = 2$, la curva de fluidización obtiene una forma bastante parecida a la teórica. El caudal de mínima fluidización se puede observar que se aproxima al caudal calculado teóricamente, tomando el valor de 13 l/min

Analizando las otras 2 gráficas, se observa una fuerte dependencia del caudal de mínima fluidización con el volumen de partículas introducido. Mientras que para $H/D = 1$, el caudal se mantiene en el entorno de los 11 l/min, para $H/D = 0,5$ toma un valor de 7 l/min, valor muy inferior al calculado previamente.

En cuanto a la instalación experimental usando las ferritas de níquel, sólo se ha podido experimentar con una altura del lecho de 18 mm (aproximadamente, $H/D = 0,5$) debido a la escasez del material. Se muestran los datos obtenidos en la figura 39.

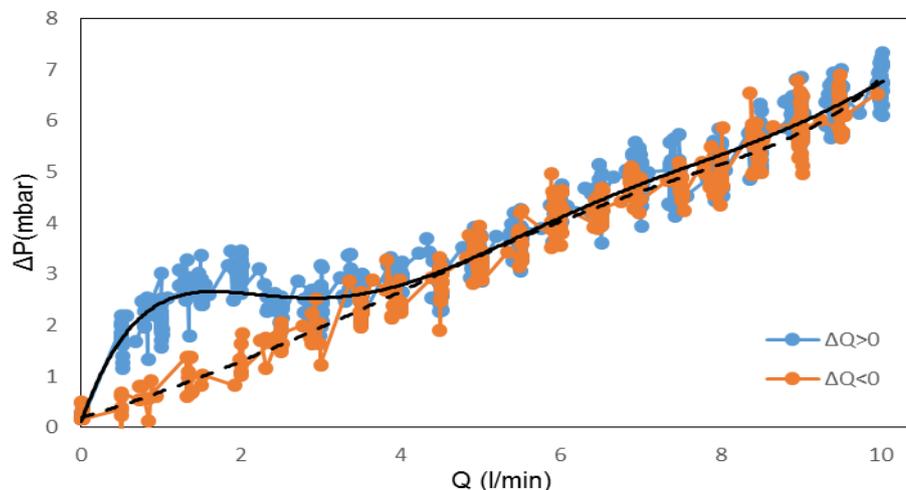


Figura 39. ΔP vs Q para $H/D = 0,5$ y $\rho = 5368 \text{ kg/m}^3$

Las partículas han pasado una fase de tratamiento térmico, para ser posteriormente molidas. Únicamente se han filtrado con una malla de $25 \mu\text{m}$ para no tener en la muestra partículas demasiado pequeñas. Sin embargo, no se puede definir un tamaño de partícula característico a priori.

Tras observar la gráfica de fluidización, la velocidad a la cual fluidiza la muestra queda perfectamente definida (1,5 l/min). A partir de dicha velocidad se obtiene un tamaño de partícula característico, correspondiente a $130 \mu\text{m}$. Es decir, en aspectos de fluidización, la muestra con un tamaño de partícula heterogéneo se puede tratar como otra muestra con un único tamaño de partícula de $130 \mu\text{m}$.

La forma de la gráfica dista mucho de parecerse a la curva de fluidización teórica. Esto puede ser debido a una cantidad insuficiente material o a aspectos constructivos del experimento. Se observa que solo fluidiza por un lateral del lecho, lo que indica que no hay una distribución de caudal homogénea.

Durante la observación del transcurso del experimento, se ha decidido imponer el límite de caudal en 10 l/min porque la muestra adquiere un carácter burbujeante con las partículas más grandes, por lo que puede que se arrastren algunas de las más finas.

Efectivamente, mientras que las partículas de $130\ \mu\text{m}$ son arrastradas a caudales de $50\ \text{l/min}$, cuando se comprueba la parte superior del experimento se observa una importante acumulación de partículas en el borde del tubo. El caudal de arrastre para partículas de $10\ \mu\text{m}$ es $0,8\ \text{l/min}$ y para partículas de $50\ \mu\text{m}$ es de $17,38\ \text{l/min}$. Por tanto, al haber sido tamizadas con una malla de $25\ \mu\text{m}$, se justifica la presencia de partículas arrastradas en el lecho.

Fijando un caudal de $10\ \text{l/min}$, se ha arrastrado una parte de la muestra. Sin embargo, se ha observado un estado fluidizado para la mayor parte de la muestra a partir de $6.5\ \text{l/min}$. Para $10\ \text{l/min}$, la muestra fluidizada no arrastrada mostraba cierto carácter burbujeante con variaciones bruscas de la altura del lecho.

Teniendo en cuenta todo esto, puede justificarse la forma que toma la curva de fluidización. Se observa un pico en la caída de presión que corresponde con la fluidización de la mayor parte de la muestra. Sin embargo, en vez de mantener una caída de presión constante según se aumenta el caudal, la caída de presión aumenta debido a que una parte de las partículas son arrastradas.

A continuación se muestran los resultados y conclusiones obtenidos de la experimentación en el reactor de lecho fluidizado irradiado.

Ensayo de SiC360 en aire

Para el primer ensayo a analizar se introducen en el reactor partículas de carburo de silicio (SiC 360, con un tamaño de partícula de $30,2\ \mu\text{m}$). En las figuras 40, 41 y 42 se puede observar la variación de las variables características del experimento. La figura 43 muestra una vista del interior del reactor en el transcurso del experimento.

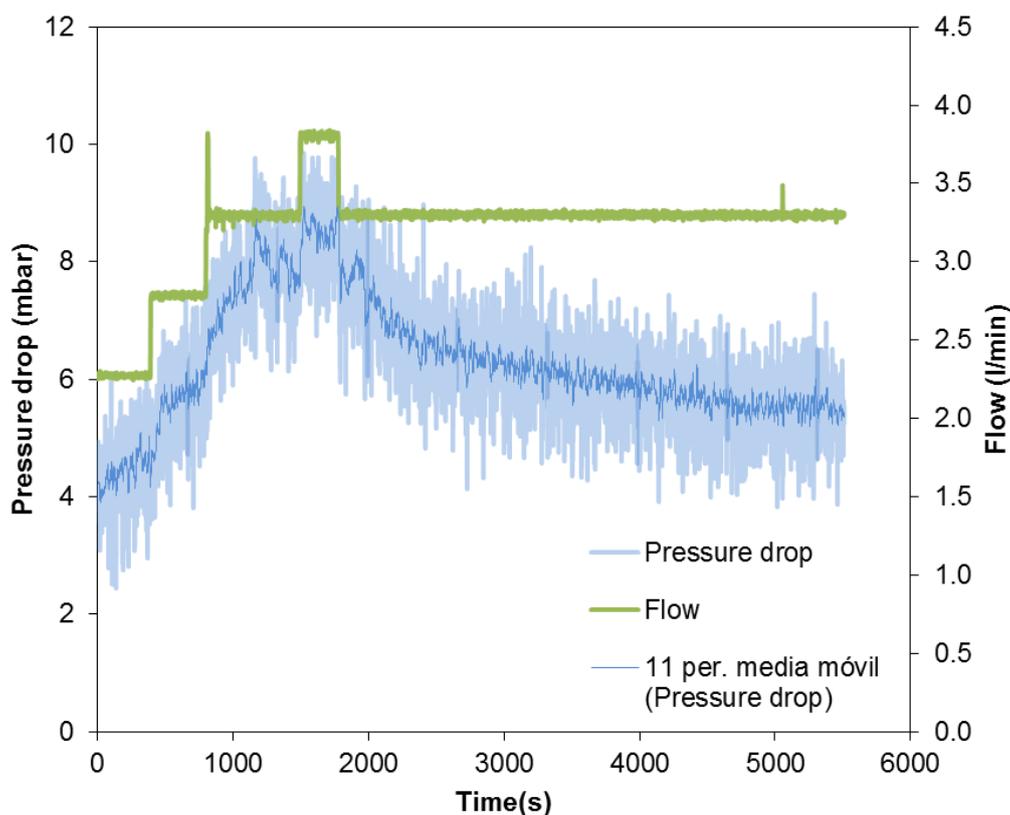


Figura 40. ΔP y caudal frente a tiempo para Ensayo 1.

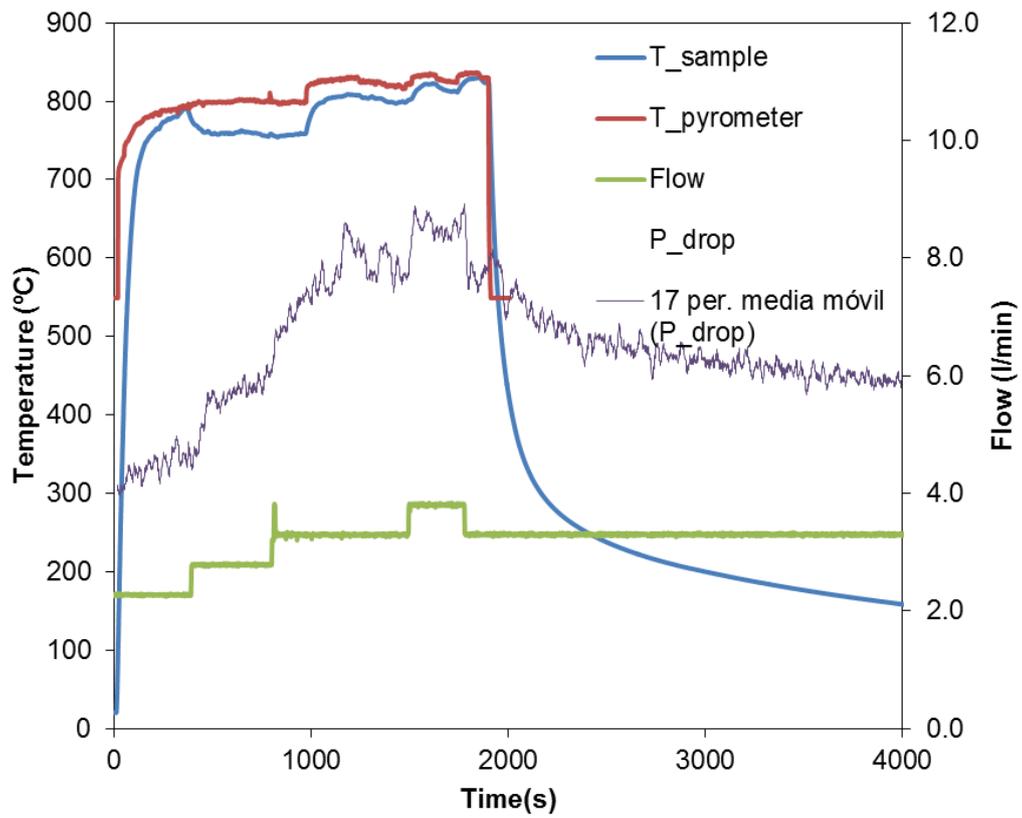


Figura 41. Temperaturas (pirómetro y muestra), caudal y ΔP para Ensayo 1.

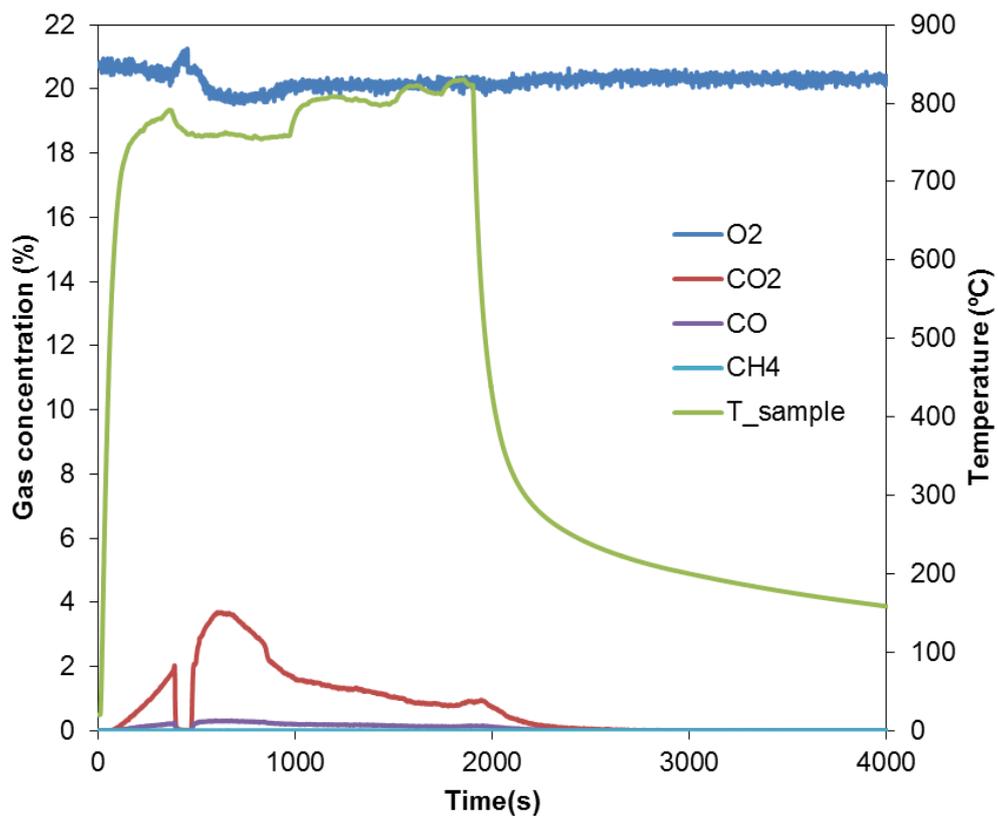


Figura 42. Temperatura de la muestra y concentración de gases en Ensayo 1



Figura 43. Lecho de SiC Verde en estado fluidizado

Este experimento no tiene ninguna rutina de operación específica, sólo observar la fluidización del SiC en aire y el comportamiento del reactor y de la instalación frente al simulador solar.

Se observa que la temperatura del pirómetro difiere de la del termopar (T_{sample}) debido a que el pirómetro mide la temperatura de la superficie (zona directamente irradiada) mientras que el termopar mide en el interior de la muestra. Además, el termopar está protegido con una vaina cerámica.

En cuanto a la producción de CO y CO₂ que se aprecia al principio del experimento, esto se puede deber a la existencia de pequeñas impurezas de carbono en la muestra. Para confirmarlo, sería necesario realizar un análisis elemental de la muestra. En el caso de que se trate de una calcinación de la muestra, el análisis indicaría la existencia de silicio en la muestra. Sin embargo, el caso de una calcinación de SiC es improbable ya que es inerte hasta los 1600 °C.

El caudal de fluidización se establece, detectándose de forma visual, en torno a los 2-3,5 l/min, mayor del teórico.

Además, se puede ver como la temperatura influye en la caída de presión del sistema: con el simulador solar apagado y la muestra enfriándose a flujo constante, la caída de presión disminuye a medida que lo hace la temperatura de la muestra.

Ensayo de SiC360 en argón/vapor

Para el experimento anterior se observa que el foco del simulador solar (spot) incide en parte en la cerámica, lo que indica que el reactor necesita ser centrado. Se mueve el reactor, pero a pesar de la nueva ubicación, parte del spot sigue incidiendo en la cerámica. No se puede mover más el reactor por motivos estructurales.

El modus operandi del experimento será el siguiente: una vez se haya estabilizado la temperatura, se apaga el simulador para colocar un 50% de atenuación (es decir, sólo un 50% del flujo total incide en la muestra), se vuelve a encender el simulador y se inyecta vapor de agua.

En las figuras 44, 45 y 46 se observa el transcurso del experimento.

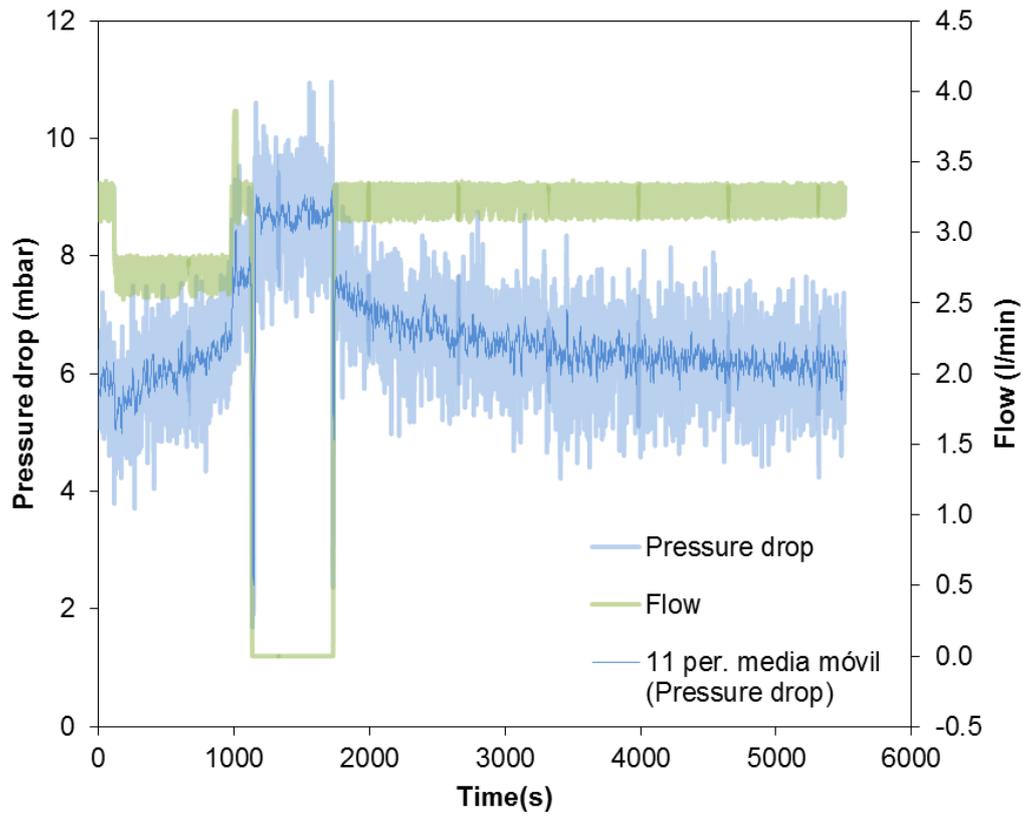


Figura 44. ΔP y caudal vs tiempo en Ensayo 2.

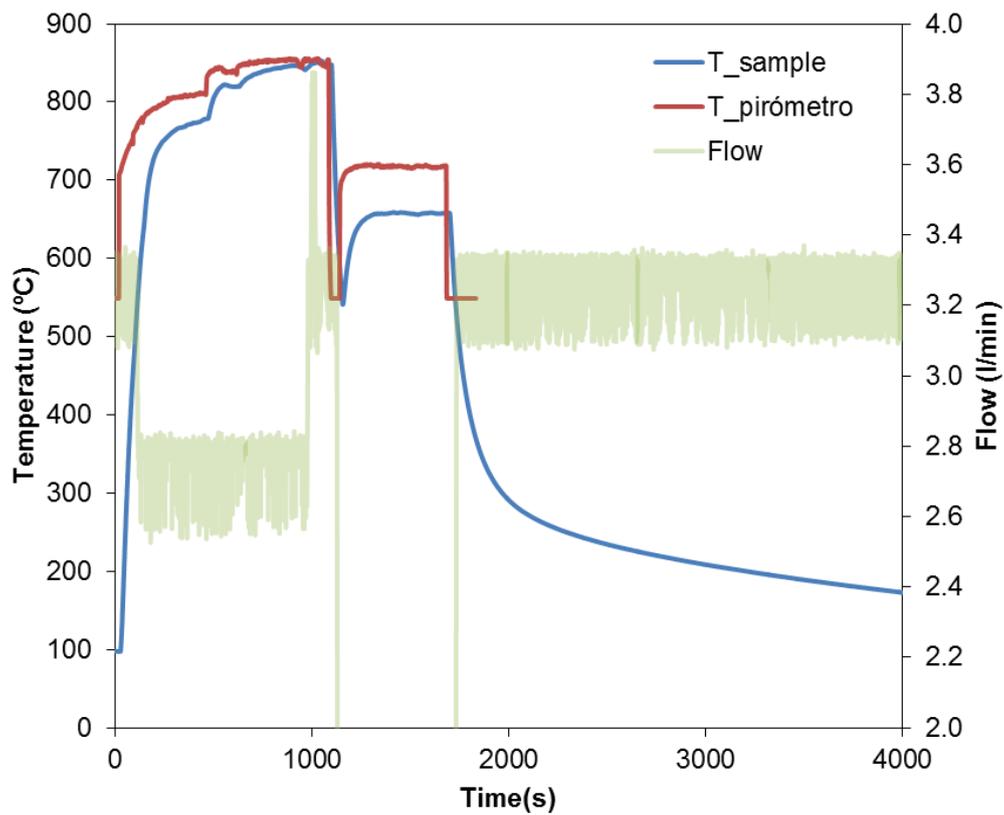


Figura 45. Temperaturas (pirómetro y muestra) y caudal en ensayo 2.

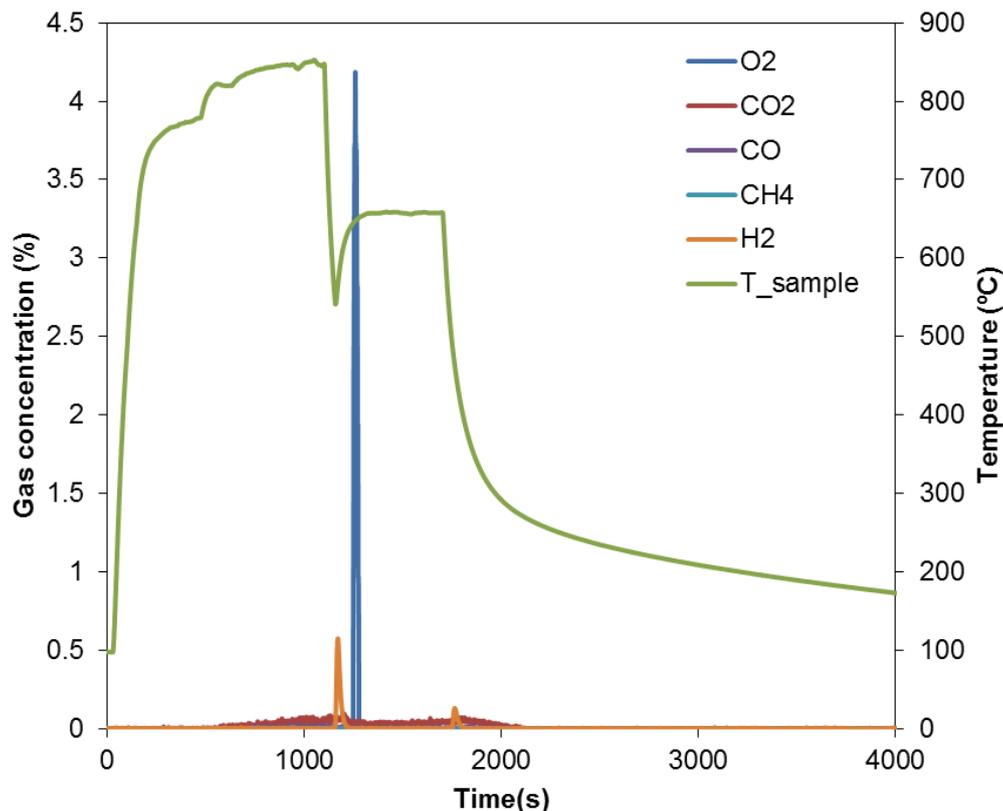


Figura 46. Temperatura de la muestra y concentración de gases en Ensayo 2

En la primera parte del experimento se prueba con diferentes caudales para establecer el óptimo. Visualmente se observa que a 4 l/min llega demasiado polvo a la ventana. Se fija un caudal de 3,5 l/min de argón y 30 g/h de vapor.

El momento de apagado del simulador solar se produce cuando la temperatura cae bruscamente, en torno a los 1000 segundos. Es notable el efecto de la atenuación, ya que la temperatura estable máxima alcanzada tras colocar la atenuación es 200 °C inferior a la obtenida sin atenuación.

El cambio en la configuración del reactor se aprecia en la temperatura máxima alcanzada por el sistema sin atenuación, siendo 30 °C mayor que en el caso anterior.

Los picos de O₂ y H₂ que aparecen en el transcurso no tienen una explicación clara, ya que, como se dijo anteriormente, el SiC es inerte hasta los 1600 °C.

Una posible explicación es que en la línea de introducción de vapor de agua al sistema exista una burbuja de aire residual. Por tanto, al empezar a inyectar vapor, esta burbuja de aire se ve arrastrada, haciendo que el porcentaje de O₂ de dicha burbuja aparezca como un pico al tratarse de argón el gas fluidizador.

En cuanto al pico de H₂, no se puede tratar de una termólisis de la molécula del agua porque no tenemos temperatura suficiente ni estamos ante un óxido metálico reducido. El equipo de detección de H₂ es inestable ante la presencia de N₂, por lo que el equipo detecta el N₂ de la burbuja de aire y lo computa como un pico de H₂.

Se aprecia también un pico de H₂ de menor magnitud al dejar de introducir vapor de agua. Puede tratarse de alguna pequeña fuga del sistema, de manera que se haya introducido accidentalmente aire en la línea de argón.

Sin embargo, no se ha encontrado una explicación clara al tiempo de retardo entre ambos picos. Al ser el N_2 más ligero que el O_2 puede que haya sido arrastrado antes por el gas fluidizador y computado por el equipo antes en el tiempo. Sin embargo, al tratarse de una burbuja aislada, no debe detectarse tan atrasado el pico de O_2 en el tiempo. Es necesario realizar más pruebas antes de llegar a una conclusión, aunque es seguro que no se trata de una disociación de la molécula de agua.

Ensayo de ferrita de níquel

Mediante este ensayo se pretende realizar un ciclo termoquímico completo. Primero, el gas fluidizador se fija en argón puro durante la etapa de reducción. Una vez superada la etapa de reducción, el gas fluidizador se cambia a una mezcla de argón y vapor de agua para lograr la etapa de hidrólisis. En las figuras 47, 48 y 49 se muestra el seguimiento del ensayo.

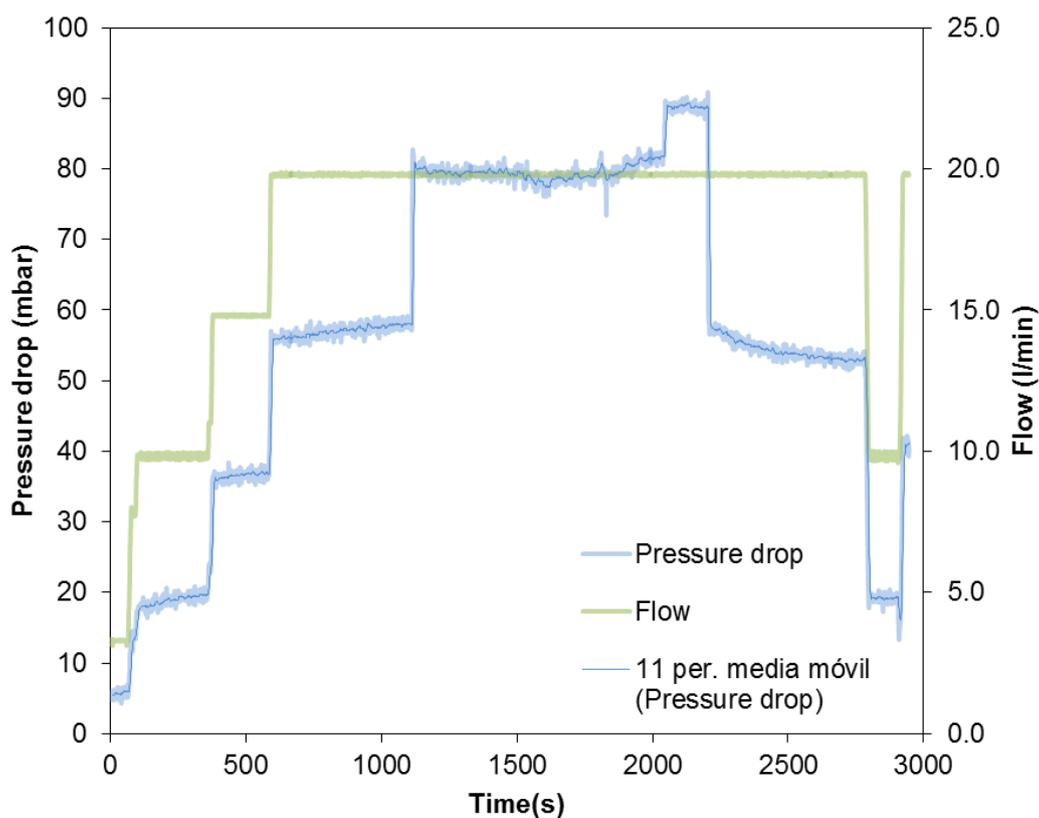


Figura 47. ΔP y caudal vs tiempo en Ensayo 3.

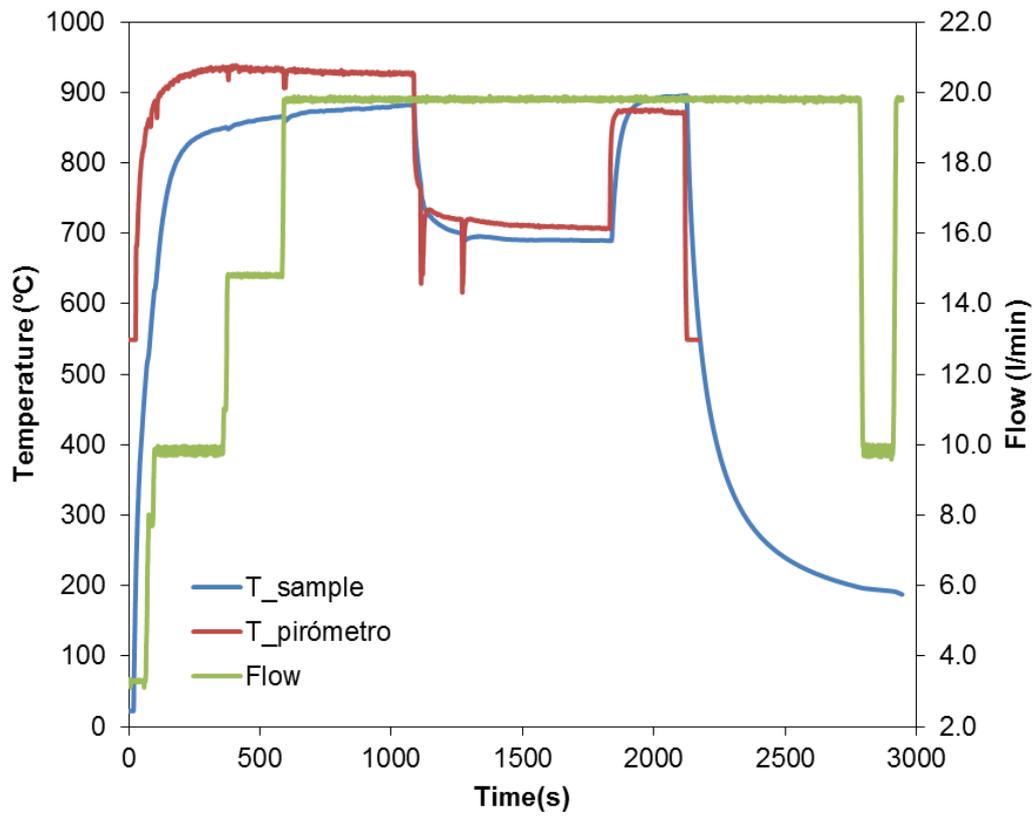


Figura 48. Temperaturas (pirómetro y muestra) y caudal en ensayo 3

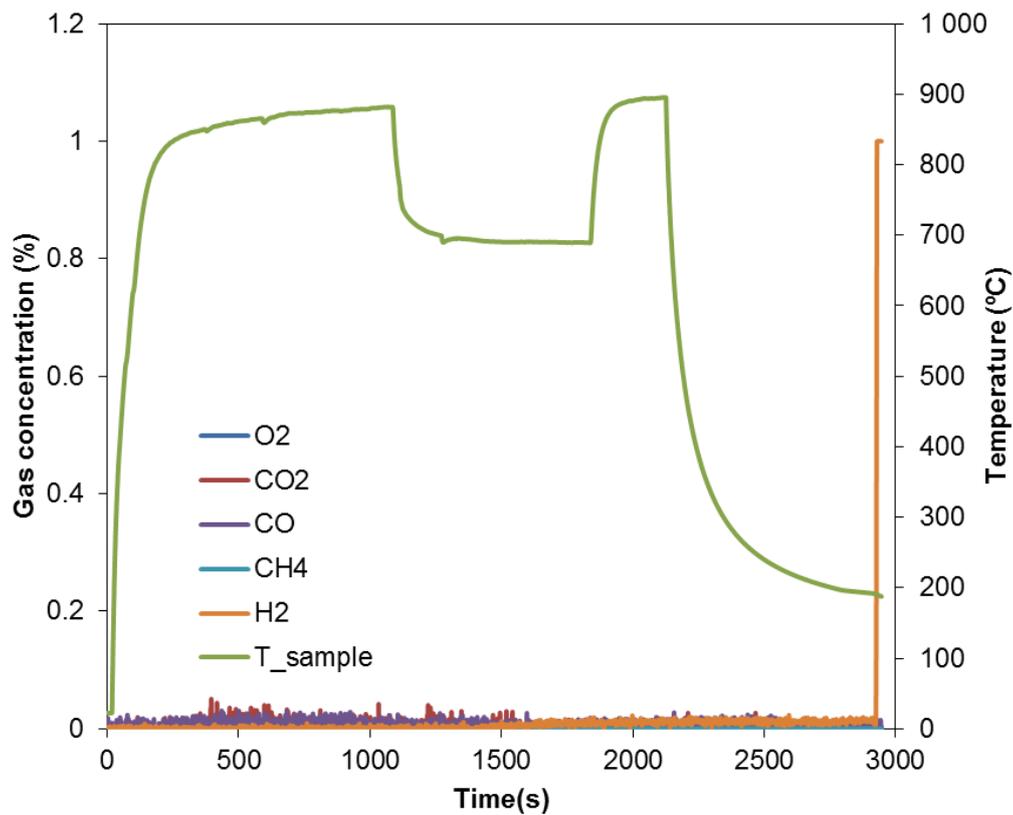


Figura 49. Temperatura de la muestra y concentración de gases en Ensayo 3

Uno de los hechos importantes del ensayo es la formación de canales de aire en la muestra. Una vez la muestra ha alcanzado la temperatura necesaria para conseguir un estado fluidizado, el estado fluidizado se mantiene por unos pocos segundos. Después, se forman los canales de aire que hacen que el aire no tenga el efecto fluidizador deseado sobre la muestra, volviendo al estado de lecho fijo. En la figura 50 se puede observar dicho efecto.



Figura 50. Canales de aire formados en la muestra durante el Ensayo 3.

El instante de inyección de vapor de agua se observa en la figura 38 con el incremento de presión que sufre el sistema en torno a los 1100 segundos.

Como no se alcanza la temperatura necesaria para la reducción de la muestra, no se observa ningún desprendimiento de O_2 . Por consiguiente, al no realizarse la etapa de reducción térmica, no se puede efectuar la siguiente etapa de disociación del agua. Es necesaria una temperatura considerablemente mayor para poder realizar la reducción ($1400\text{ }^\circ\text{C}$). Sin embargo, si se alcanza la temperatura necesaria para la hidrólisis del agua ($700\text{-}900\text{ }^\circ\text{C}$).

En la figura 51 se muestran las imágenes de las cámaras de seguimiento infrarrojas de los ensayos con ferritas de níquel (izquierda) y SiC360 (derecha). Se puede apreciar que la muestra está mucho más caliente en el ensayo de SiC. Esto puede ser debido a que el spot en el ensayo con ferritas no estaba centrado, como se puede observar al ver la cerámica a una temperatura mucho mayor que en el otro ensayo.

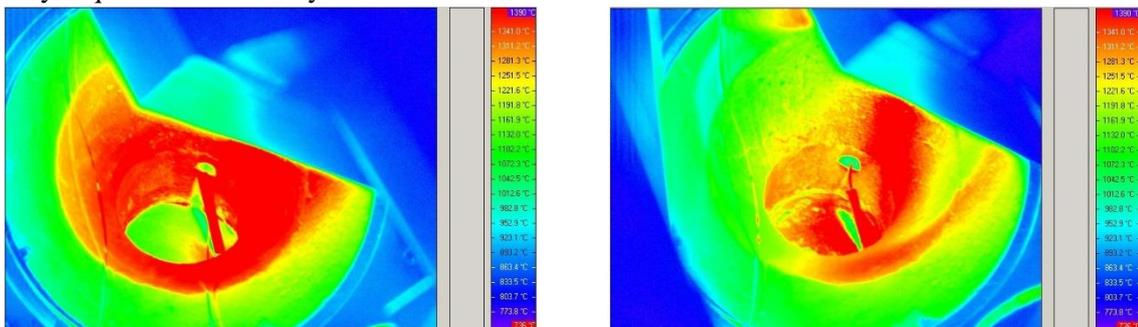


Figura 51. Imágenes de cámaras infrarrojas para ensayos ferrita de níquel (izquierda) y SiC verde (derecha)

Análisis numérico

Los primeros resultados mostrados se corresponden con el estudio termofluidodinámico realizado.

El objetivo del primer estudio (aquel que no tiene incluido ningún aspecto de transferencia de calor) es la visualización del comportamiento que tienen ambas fases en un lecho fluidizado completamente desarrollado. Ambos estudios se han realizado para un tiempo de simulación final de 1000 segundos.

En las figuras 52 y 53 se muestran la fracción volumétrica y los vectores de velocidad para ambas fases en el caso de no incluir ningún flujo de calor. En las figuras 54 y 55 se muestran las presiones dinámicas y relativas de ambas fases.

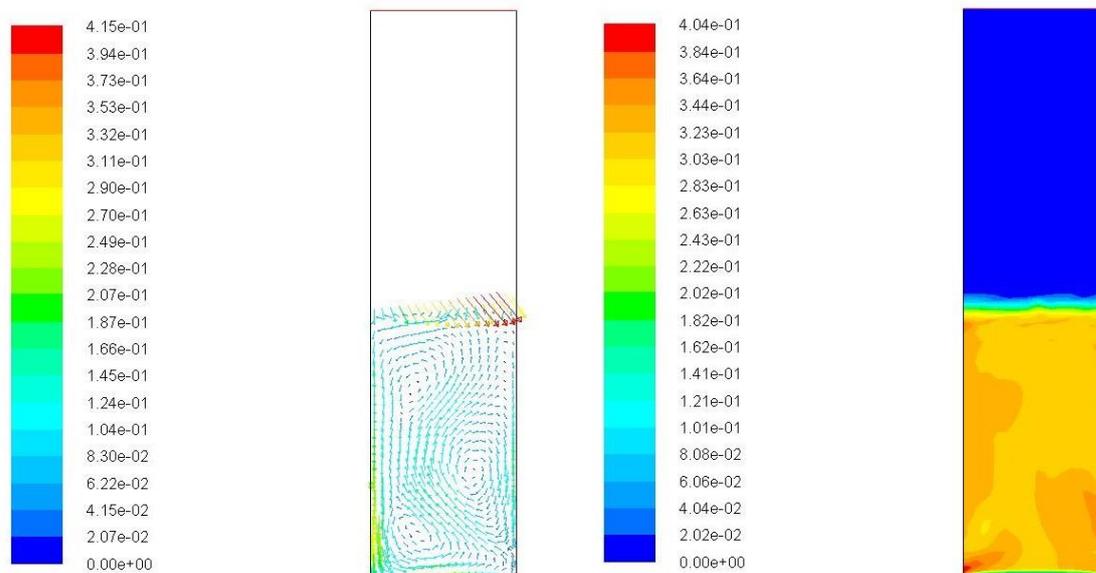


Figura 52. Vectores de velocidad (izda) y fracción volumétrica (dcha) para fase secundaria en simulación 1

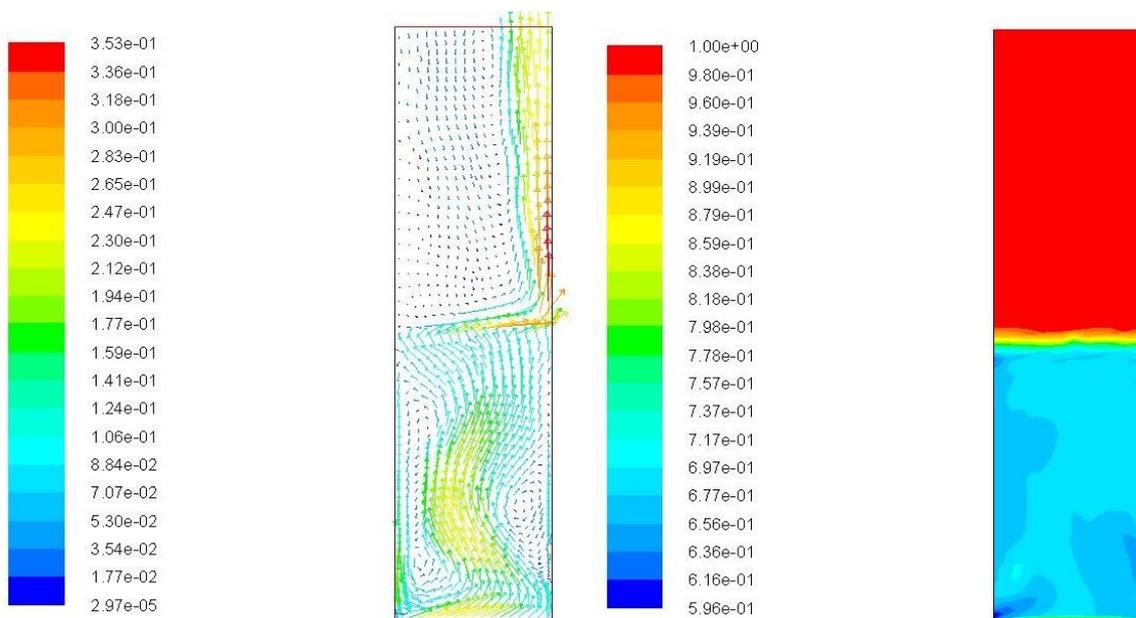


Figura 53. Vectores de velocidad (izda) y fracción volumétrica (dcha) para fase primaria en simulación 1

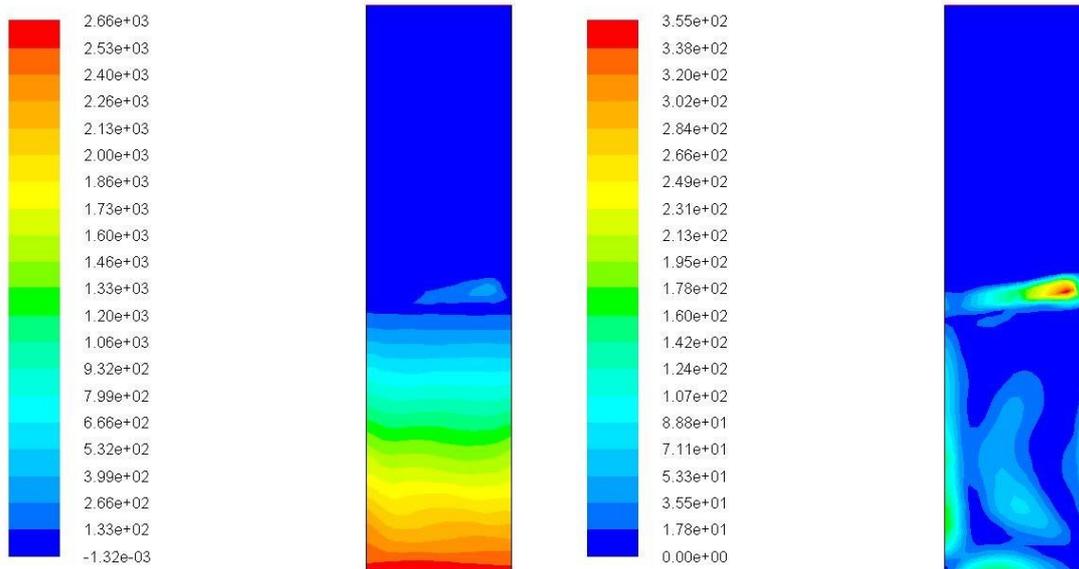


Figura 54. Presión relativa (izda) y presión dinámica (dcha) para fase secundaria en simulación 1

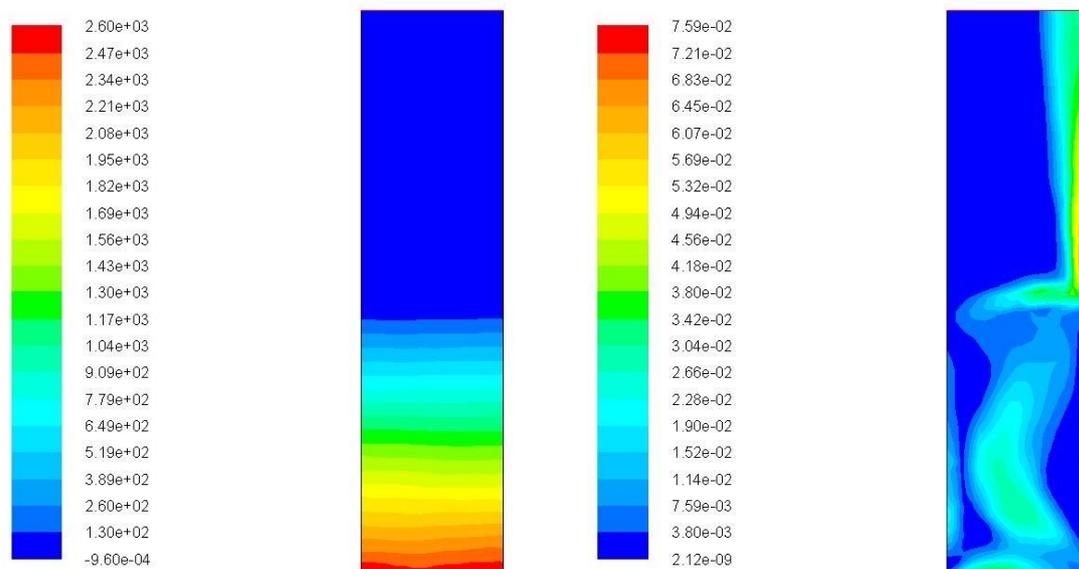


Figura 55. Presión relativa (izda) y presión dinámica (dcha) para fase primaria en simulación 1

Mirando las imágenes de la fracción volumétrica y la velocidad, se aprecia claramente que las zonas con mayor velocidad del aire corresponden a las zonas con menor fracción volumétrica de partículas, por lo que se podrían entender como burbujas de aire.

Además, en las zonas con mayor concentración de partículas se observa que la velocidad de las mismas adquiere un movimiento claramente rotatorio, con forma de vórtice. Es por ello que, si se pretende conseguir una fluidización en la que todas las partículas suban a la superficie, puede ser necesario conducir de alguna manera el movimiento de las partículas a través del lecho, como el establecimiento de zonas de mayor o menor velocidad del gas fluidizador o la incorporación de una geometría adicional dentro del lecho.

A pesar de esto, el movimiento dentro del lecho fluidizado sigue el patrón esperado: en la zona central del lecho se produce un movimiento ascendente de ambas fases, con desprendimientos de

corriente que provocan ‘turbulencias’ en el lecho (las ya explicadas burbujas). Cerca de la pared, el aire sigue un perfil de velocidad típicamente parabólico, mientras que las partículas no tienen un patrón claro de movimiento en la pared. Sin embargo, este movimiento debería ser en sentido descendente en su mayoría para equilibrar el movimiento ascendente de la zona central.

El patrón de movimiento de las partículas en la zona superior del lecho es algo confuso. Se puede apreciar una velocidad en sentido descendente de gran magnitud por parte de las partículas, además de un patrón de velocidades claramente centrado en una pared por parte del aire. Si se evalúa en conjunto con las gráficas de presión dinámica, se puede sacar la conclusión de que las partículas de la zona superior del lecho fluidizado (o la interfase) crean una gran presión en el sistema, como se puede observar en la figura 56 derecha. Por tanto, el aire se redirige por los gradientes de presión, formándose esa columna de aire a gran velocidad. Podría asimilarse a un jet. Mientras que la contribución de la presión dinámica del aire a la total es ínfima (5 órdenes de magnitud inferior), la presión dinámica de los sólidos puede llegar a sumar la mitad de la presión total en puntos muy localizados.

Sería recomendable realizar una búsqueda bibliográfica en cuanto a modelos de presión en la interfase o de la concentración del área interfacial con el objetivo de comprobar que el modelo usado es el correcto y que el comportamiento mostrado no se trata de un error de elección de modelo.

Por último, se observa que la mayor presión relativa alcanzada por el sistema es en torno a los 50 mbar, y siempre en la zona inferior del sistema. Por tanto, en el caso de existir una limitación de presión en la zona superior (por ejemplo, por la posibilidad de que se rompa la ventana de cuarzo del reactor en la experimentación), la presión que soporta esa región dependerá únicamente de lo que haya aguas abajo del lecho fluidizado.

Ahora se procede a evaluar los resultados al introducir un flujo de calor fijado por una temperatura constante en una zona de las paredes laterales. Se muestran los resultados de la velocidad y fracción volumétrica (figuras 56 y 57), presión relativa y presión dinámica para ambas fases (figuras 58 y 59) y la temperatura con 2 rangos de escala diferentes para poder observar diferentes detalles en cada imagen (figura 60).

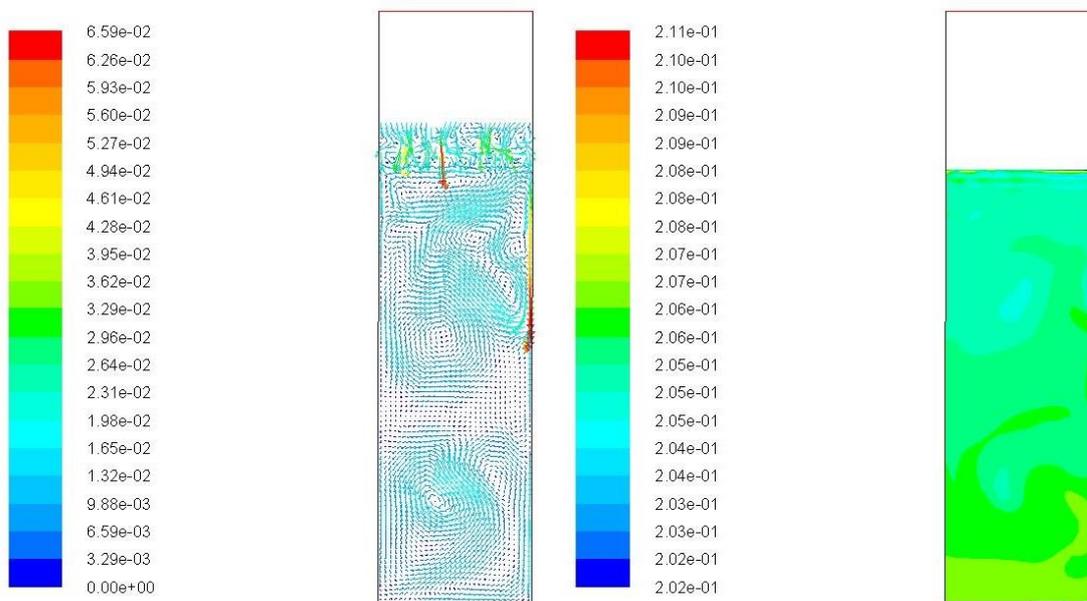


Figura 56. Vectores de velocidad (izda) y fracción volumétrica (dcha) para fase secundaria en simulación 2

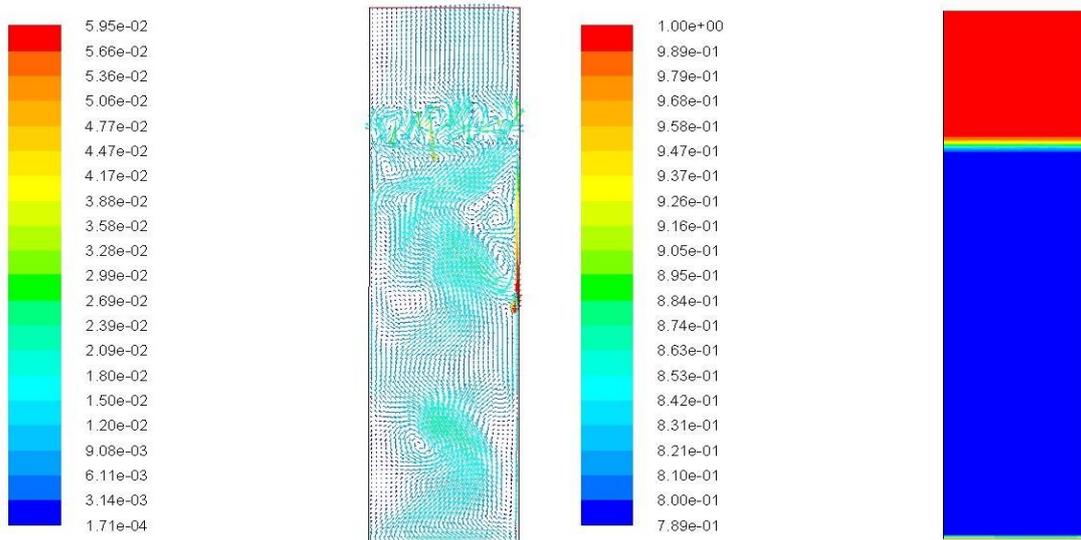


Figura 57. Vectores de velocidad (izda) y fracción volumétrica (dcha) para fase primaria en simulación 2

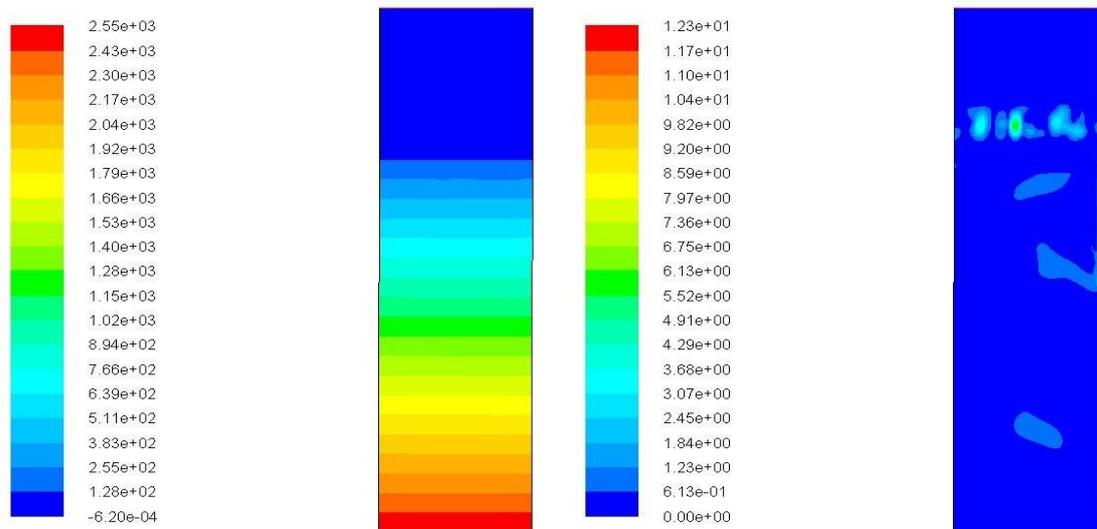


Figura 58. Presión relativa (izda) y presión dinámica (dcha) para fase secundaria en simulación 2

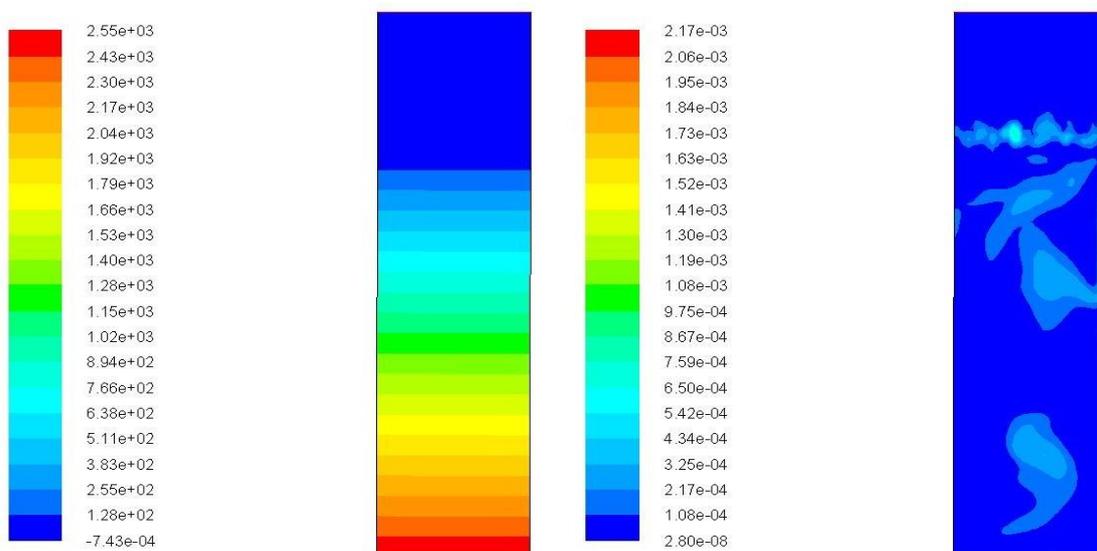


Figura 59. Presión relativa (izda) y presión dinámica (dcha) para fase primaria en simulación 2

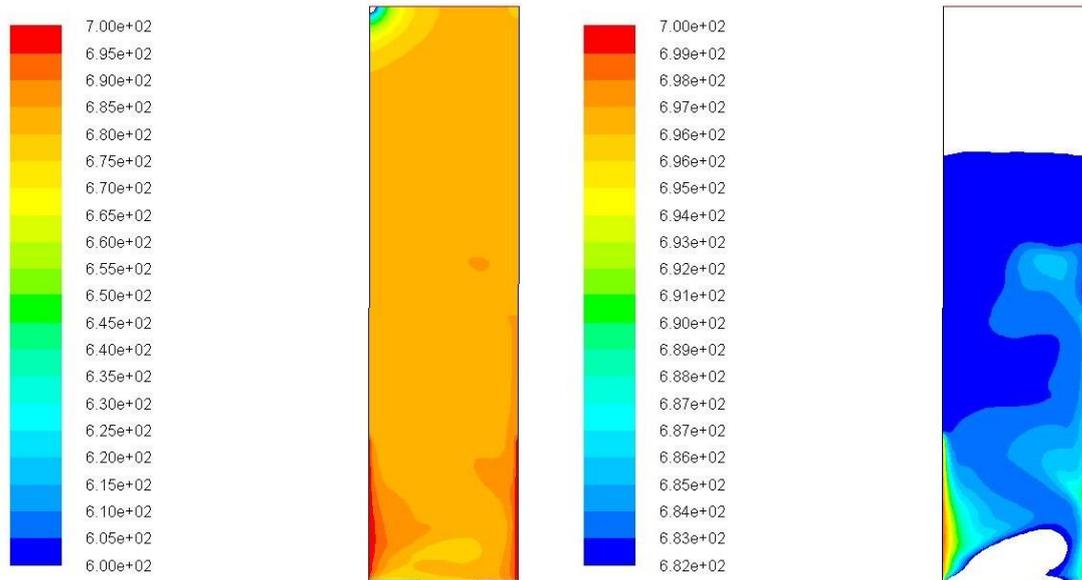


Figura 60 Temperatura en rango 600-700 K (izda) y en rango 682-700 K(dcha)

En las figuras de las fracciones volumétricas, se observa que ésta es muy constante en toda la longitud del lecho. Si se reduce la escala considerablemente, se puede observar que la parte más densa es la parte inferior del lecho. Además, sigue habiendo una presencia notable de burbujas dentro del lecho, aunque la diferencia de fracción volumétrica entre el interior de la burbuja y el exterior es mucho menos significativa.

Destacar que la velocidad entrante de aire es de 0.005 m/s y la temperatura de 300 K. Se observa que la altura del lecho es claramente superior que en el caso sin calor a pesar de que con calor el gas fluidizador tiene menor velocidad, mostrando la fuerte dependencia del sistema con la temperatura.

Al tratarse de una simulación tan larga, la temperatura es casi estable en todo el dominio. Por ello, para poder apreciar diferentes contornos de temperatura ha sido necesario establecer un rango más ajustado. Así, se puede ver que aunque parezca que el aire sale a la misma temperatura que la fase secundaria, en realidad dicha temperatura es ligeramente inferior. Sin embargo, el efecto enfriador del aire entrante a las partículas por la parte inferior del lecho no es muy notorio. Se observa que en apenas 20 mm del borde inferior, la temperatura ya es superior a los 682 °C.

La introducción de una condición de calor en el sistema no ha alterado drásticamente la caída de presión relativa del sistema. Esto es debido a que el efecto que introduce la temperatura se ve apaciguado por la disminución de la velocidad del aire entrante.

En cuanto a los contornos de la presión dinámica del sistema, aunque la ejercida por parte de los sólidos supere en magnitud a la presión dinámica ejercida por el aire, el efecto global que tiene esta presión sobre la velocidad de ambas fases se ve claramente dominado por la ejercida por el aire, obteniéndose claramente un patrón de velocidad que coincide con dicha presión.

En la velocidad de ambas fases en la interfase, se observa una condición muy turbulenta de ambas. La fase primaria sugiere que en la interfase existe cierto burbujeo ya que los vectores de velocidad tienen forma de vórtice que rápidamente cambian a un flujo laminar.

A continuación, se hace un breve resumen de las conclusiones obtenidas del análisis óptico-energético.

Una vez realizados los análisis correspondientes, se puede observar una imagen del programa de trazado de rayos (figura 61) y extraer unas conclusiones. Dichas conclusiones no tienen por qué corresponderse con lo observable a simple vista.

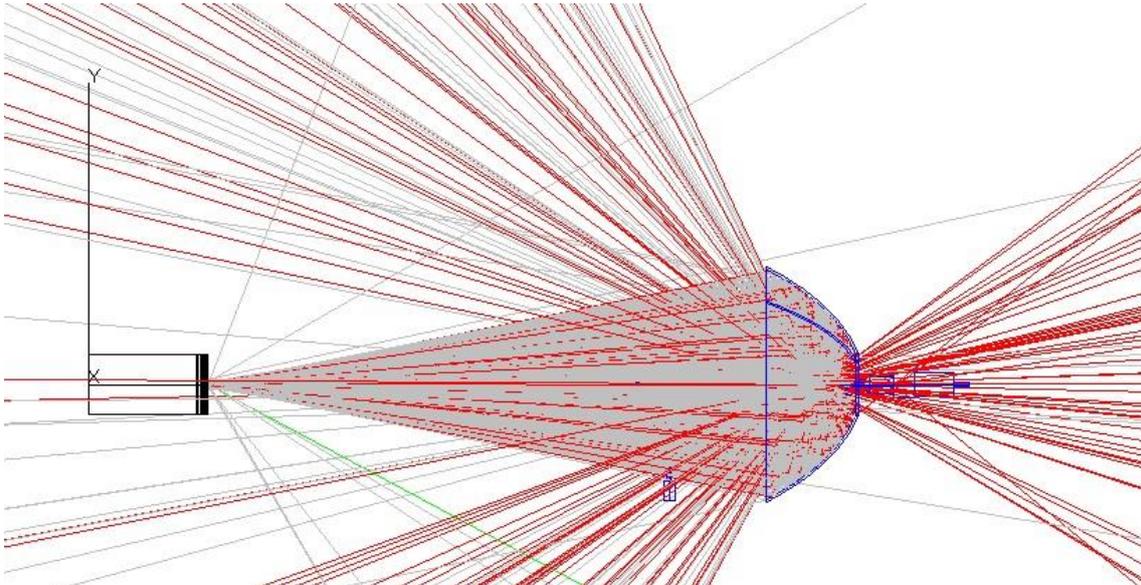


Figura 61. Imagen de trazado de rayos completo

Se distingue una importante componente de rayos de baja energía (mostrados en color grisáceo). De acuerdo al número de rayos de dicho color, se puede pensar que aportan más energía que los rayos que inciden directamente desde el simulador (en color rojo). Sin embargo, los rayos de color gris aportan apenas la mitad de energía que aportan los rayos que inciden desde el simulador.

La mayor parte de los rayos se absorbe en los primeros milímetros de la geometría. Esto es debido a que la fracción volumétrica de partículas en esa zona está comprendida entre 0,05 y 0,2. La longitud óptica perteneciente a esos valores sufre una variación muy grande. Por tanto, la mayor parte de la energía es absorbida en una zona en la que la concentración de partículas es muy baja. Cuando se realicen ensayos reales, es aconsejable tamizar muy bien la muestra de partículas para prevenir la formación de dicho rango de fracciones volumétricas.

A pesar de tratarse de un medio dispersivo, los rayos se mantienen concentrados a lo largo de su recorrido. En las primeras capas se distingue una importante componente de retrodispersión, que se va atenuando según se aumenta la profundidad. También se observa una desviación de los rayos en favor de una dirección predeterminada.

Conclusión final

En cuanto a los ensayos realizados en frío, la obtención de la altura del lecho es un dato importante debido a su influencia sobre la velocidad de mínima fluidización. El caso de la alúmina no tiene ningún problema asociado al ser todas las partículas iguales entre sí. Al tratarse de una distribución de partículas monomodal, la teoría de fluidización da buenos resultados, obteniéndose lo esperado. El ensayo realizado con ferrita de níquel tratada revela que es importante realizar un tratamiento intensivo de la muestra para conseguir un tamaño de partícula muy homogéneo. Las partículas no son perfectamente esféricas y, además, no se puede establecer un diámetro de partícula concreto. Por tanto, se encuentra una parte del lecho en estado fijo y una cantidad de partículas que han sido arrastradas para la misma velocidad de gas fluidizador.

Los resultados en experimentación en caliente no han sido demasiado esclarecedores debido al límite de temperatura máxima que impone la configuración actual. Sin embargo, el banco de ensayos funciona correctamente, lo que indica que está bien diseñado y construido. Si se

pretenden alcanzar temperaturas mayores, es necesario probar una configuración del banco de ensayos diferente o usar un simulador de altos flujos de mayor potencia.

La temperatura de activación de las ferritas de níquel queda muy lejos, ya que una activación completa requiere de una temperatura mayor de 1300 °C y tan solo se alcanzan 950 °C. Sin embargo, la etapa de hidrólisis si se puede realizar en el caso de contar con unas partículas de ferrita de níquel ya activadas, pues la temperatura a la que se produce es a los 900 °C. Si se pretende conseguir un ciclo completo con la configuración actual es necesario recurrir a otro tipo de partículas. Un ejemplo puede ser las ferritas de níquel-manganeso o de níquel-zinc. La adición de Mn(II) o Zn(II) acelera la etapa de activación, según propone Tamaura [14].

La formación de canales de aire en el ensayo de ferrita de níquel ha impedido que se alcanzara el estado fluidizado, mientras que en el ensayo con SiC no ocurre este fenómeno. Puede que la solución sea añadir una cantidad de material mayor al reactor, pues como se puede apreciar en el análisis en frío, la altura del lecho es un parámetro importante. Se necesitan hacer más ensayos al respecto.

Los resultados del análisis óptico han sido muy satisfactorios. Tras realizar la simulación, se obtiene que la longitud óptica de un medio fluidizado compuesto por partículas transparentes e incoloras es de apenas unos milímetros. Por lo que toda la radiación absorbida en un lecho fluidizado se localiza en la superficie del lecho. Además, los datos se han conseguido contrastar con el estudio de Nelson [12], con una aproximación relativamente buena al tratarse de materiales diferentes con aspectos ópticos parecidos.

Sin embargo, es necesario encontrar los datos específicos para realizar la simulación con ferritas de níquel. Se puede intentar aproximar el índice de refracción complejo como un imaginario puro al tratarse de un material opaco de color oscuro, pero es preferible encontrar datos demostrados.

En cuanto al análisis numérico de mecánica de fluidos, el éxito reside en la creación de un modelo con unas físicas implementadas no demasiado complicadas que responde bastante bien. El tiempo de simulación para el primer caso es de apenas 2 horas, mientras que para el segundo caso hicieron falta 23 horas. Sin embargo, estos resultados son aceptables.

Se obtienen imágenes del funcionamiento interno de un reactor de lecho fluidizado y diferentes variables que afectan al sistema.

La dependencia del sistema con la temperatura es muy marcada, a pesar de imponer una condición de temperatura menor que la existente en el caso real. Además, se observa cómo se obtiene un régimen de fluidización más rápido a pesar de ser la velocidad del gas de fluidización mucho menor, por la existencia de fuertes corrientes rotacionales en la parte superior del lecho.

A pesar de ello, el patrón de movimiento de las partículas en la parte interior del lecho es en ambos casos muy parecido: movimiento ascendente por la zona central del lecho, descendente de menor magnitud por las paredes con presencia de zonas que revierten esta tendencia y tienen un flujo ascendente de partículas. Sin embargo, esta tendencia apenas se mantiene por un centímetro, siendo el patrón predominante el de un flujo descendente por las paredes, incluso con presencia de calor.

Al estar introduciendo aire frío en el sistema en caliente, se observa que el efecto refrigerante de esta entrada de aire es aproximadamente de la misma longitud que la pared con una temperatura fijada. Esto puede influir en el comportamiento del sistema. Si se pretende minimizar este efecto, es necesario que la temperatura de entrada del gas de fluidización sea aproximadamente igual a la que tienen las partículas en las cercanías de la región de entrada del gas de fluidización.

Además, se ha encontrado con que una variable llamada *presión granular* no aparece con un significado demasiado claro. Tras una breve búsqueda bibliográfica, las definiciones encontradas no se ajustan demasiado a lo obtenido. Se le añade que la guía de teoría que proporciona Fluent no muestra una ecuación sobre dicha variable, ni aparece mencionada.

Según Zenit et al. [13], es necesario representar 5 órdenes de magnitud para incluir todas las teorías acerca de éste fenómeno, lo que es un indicador del bajo grado de comprensión en este tema.

Por efecto de la temperatura, se obtiene que la región ocupada por partículas (o altura del lecho) es mucho mayor que el ensayo 2 en el ensayo 1. Esto hace que la fracción volumétrica sea menor en toda la región, como es obvio. Sin embargo, se obtiene una distribución de la fracción volumétrica en el ensayo 2 muy estrecha, con apenas variación a lo largo de toda la altura.

El próximo paso es el estudio de los modelos radiativos propuestos por Fluent para la creación de un modelo que se aproxime más al reactor de lecho fluidizado real y su funcionamiento. Para ello, es necesario incorporar los resultados obtenidos en el análisis óptico-energético.

5. Conclusiones

El desarrollo de la energía solar como fuente de energía renovable de gran potencia es un objetivo energético actual, siendo los sistemas de torre central los mejores candidatos por sus múltiples posibilidades de funcionamiento. La posibilidad de generar combustible (H_2) usando energía solar y agua existe, y se estudia un posible sistema de funcionamiento en el trabajo.

De los ensayos experimentales llevados a cabo se obtienen varias conclusiones. La primera es, que es necesario que el tamaño de partícula esté perfectamente controlado para tener un régimen de fluidización lo más estable y controlado posible. Lo segundo, que para obtener algún resultado de un posible funcionamiento real es necesario cambiar la configuración del ensayo irradiado.

Una posible solución puede ser emplear un simulador solar de altos flujos de mayor potencia. Se estima que para poder realizar un ciclo termoquímico se necesitan $200\text{ }^\circ\text{C}$ más en la muestra durante la fase de activación. Otra opción, sería cambiar la configuración del banco de ensayos para acercar la muestra al punto focal del simulador solar de altos flujos.

En cuanto a la parte de análisis numérico, el trazado de rayos revela que, en el hipotético caso de que se tenga un material que pueda ser atravesado por la luz fácilmente, la longitud óptica cae drásticamente por el hecho de estar en régimen de fluidización. A modo de aproximación, se puede decir que la mayoría de la radiación es absorbida en la superficie del lecho, lo que puede llevar a realizar modificaciones geométricas dentro del lecho para hacer más eficiente el proceso.

Se ha realizado una primera aproximación del estudio CFD por la complejidad de este tipo de cálculos. Tras implantar un modelo sin ninguna condición de calor y otro con una condición de calor sencilla pero no real, se han obtenido algunas conclusiones e ideas del funcionamiento interno de un reactor de lecho fluidizado, como es la circulación interna de partículas o la influencia de los gradientes de presión sobre dicho movimiento. El siguiente paso es conseguir implantar un modelo radiativo correcto para realizar una simulación lo más real posible.

Dado que esta tecnología se encuentra en una fase muy temprana, aún quedan muchos campos de investigación y optimización. Es necesario realizar más ensayos en caliente antes de probarlo en una planta piloto. Sería muy interesante conseguir realizar un ensayo donde la producción de H_2 sea real.

6. Trabajo Futuro

En este apartado se muestran las pautas que se han de seguir en un futuro para seguir ampliando los conocimientos en los campos mostrados en el trabajo.

Dentro de la parte de análisis numérico, es imprescindible separar el trabajo futuro en 2 partes. En la primera se trata lo relacionado al análisis óptico-energético. En esta parte, el trabajo realizado es sobre el α -SiC. Sin embargo, realizar el primer análisis con α -SiC es un buen comienzo, pues es un material transparente e incoloro.

Por tanto, comparándolo con las ferritas de níquel coloreadas y opacas, tiene una longitud de penetración mucho mayor. El análisis con α -SiC sirve para demostrar que por el hecho de tener una sustancia en estado de fluidización, aunque tenga unas propiedades ópticas perfectas para la penetración de la luz, no deja pasar claramente la radiación luminosa. Para seguir trabajando en este campo, es necesario obtener el índice de refracción complejo en función de la longitud de onda para las ferritas de níquel.

En la segunda parte se trata lo relacionado al análisis CFD. En esta parte se ha logrado con éxito visualizar un mapa de la distribución de flujo en un lecho fluidizado. El siguiente paso es comprender e implementar el modelo de radiación más adecuado al problema que se quiere resolver, intentando que se parezca lo máximo posible a un reactor irradiado real. Para ello, a la hora de definir las propiedades ópticas del sistema se usarán los resultados obtenidos en el análisis óptico-energético.

Dichas propiedades es necesario definir las manualmente al no ser un valor constante. Un problema parecido se encuentra con las propiedades típicas de calor (c_p , λ), que varían fuertemente con la temperatura. Para ello, es necesario elaborar un pequeño código en C e incorporarlo a Fluent.

También puede ser objeto de estudio la creación de una geometría más compleja. Algunas de las referencias mostradas en el epígrafe 2.3 han demostrado dar mejores resultados al refinar ciertos aspectos geométricos, como por ejemplo los aros interiores distribuidores de flujo y la velocidad de entrada.

Contemplando la parte de experimentación, la tecnología se encuentra en una fase muy temprana. El primer paso necesario para poder obtener resultados de producción de H_2 reales es conseguir una mayor temperatura dentro del reactor. Se debe minimizar al máximo la distancia entre el foco y la superficie libre de las partículas. Otra opción sería emplear un simulador solar de altos flujos de mayor potencia.

Una vez superado el problema de la temperatura, otro problema que se debe de estudiar es la ciclabilidad del proceso, es decir, la pérdida de capacidad de disociación de las partículas tras someterse a varios ciclos consecutivos de calentamiento-enfriamiento. Si la pérdida de ciclabilidad del proceso es muy acusada, debe contemplarse la posibilidad de realizar una modificación del proceso.

7. Bibliografía

- [1] Flamant G. Thermochimie solaire à hautes températures, résultats expérimentaux. Quelques perspectives d'application. *Rev Phys* 1980;15:503–11.
- [2] A. Steinfeld, A. Frei, P. Kuhn and D. Wüillemin. Solar thermal production of zinc and syngas via combined ZnO-reduction and CH₄-reforming processes. *Int. J. Hydrogen energy*, vol. 20, no. 10. 10 January 1995.
- [3] V. Nikulshina, C. Gebald, A. Steinfeld. CO₂ capture from atmospheric air via consecutive CaO-carbonation and CaCO₃-calcination cycles in a fluidized-bed solar reactor. *Chemical Engineering Journal* 146 (2009).
- [4] J. Carlos Abanades, Edward J. Anthony, Jinsheng Wang, John E. Oakey. Fluidized Bed Combustion Systems Integrating CO₂ Capture With CaO. *Environ. Sci. Technol.* 2005, 39.
- [5] N. Gokon, S. Takahashi, H. Yamamoto, T. Kodama. Thermochemical Two-Step Water-Splitting Reactor With Internally Circulating Fluidized Bed For Thermal Reduction Of Ferrite Particles. *International Journal Of Hydrogen Energy* 33 (2008)
- [6] N. Gokon, T. Mataga, N. Kondo, T. Kodama. Thermochemical two-step water splitting by internally circulating fluidized bed of NiFe₂O₄ particles: Successive reaction of thermal-reduction and water-decomposition steps. *international journal of hydrogen energy* 36 (2011)
- [7] M. Puig-Arnavat, E.A. Tora, J.C. Bruno, A. Coronas. State of the art on reactor designs for solar gasification of carbonaceous feedstock. *Solar Energy* 97 (2013) 67–84.
- [8] N. Piatkowski, A. Steinfeld. Solar-driven coal gasification in a thermally irradiated packed-bed reactor. *Energy Fuels* 22, 2043-2052 (2008).
- [9] N. Piatkowski, A. Steinfeld. Solar Gasification of Carbonaceous Waste Feedstocks in a Packed-Bed Reactor—Dynamic Modeling and Experimental Validation. February 28, 2011.
- [10] E. Alonso, M. Romero. Review of experimental investigation on directly irradiated particles solar reactors. *Renewable and sustainable energy reviews* (2015).
- [11] Wen-Ching Yang. *Handbook of fluidization*. 2003.
- [12] Andrew T. Nelson. Thermal Expansion, Heat Capacity, and Thermal Conductivity of Nickel Ferrite (NiFe₂O₄). *Journal of the American Ceramic Society*. March 2014.
- [13] R. Zenit, M. L. Hunt, C. E. Brennen. *Collisional particle pressure measurements in solid-liquid flows*. Cambridge University Press. 1997.
- [14] Y. Tamaura, A. Steinfeld, P. Kuhn, K. Ehrensberger. Production of solar hydrogen by a novel, 2-step, water-splitting thermochemical cycle. (1995).
- [15] Apuntes de Energía Solar III del máster en energías renovables, pilas de combustible e hidrógeno, curso 2014-15.

8. Abreviaturas, unidades y acrónimos

Múltiplos y submúltiplos

Múltiplos		Submúltiplos	
Kilo (k)	10^3	Mili (m)	10^{-3}
Mega (M)	10^6	Micro (μ)	10^{-6}

Unidades

F: fuerza	L (pág. 53): longitud óptica
C_D : coeficiente de arrastre	Θ : colatitud
ρ : densidad	φ (pág.): azimut
U: velocidad	α (pág.): fracción volumétrica
A (pág.): área	$\hat{\rho}$: densidad real
Re: n° adimensional de Reynolds	\vec{v} : vector velocidad
Φ : esfericidad	\dot{m} : transferencia de masa
ε : porosidad	K_{ls} : coeficiente de intercambio entre fases
L (pág. 4): longitud	$\bar{\epsilon}$: tensor de tensiones de deformación
ΔP : caída de presión	λ (pág.): viscosidad volumétrica
g: módulo del vector gravedad	h_i : entalpía específica
μ : viscosidad dinámica	\bar{I} : tensor de inercia
Ar: n° adimensional de arquímedes	\bar{q} : flujo de calor
d: diámetro	S: término fuente externo
x(pág. 4): fracción en peso	Q (pág.): calor
K_e : constante de erosión	A(pág.): área interfacial
φ (pág.): factor de forma de partícula	Nu: n° adimensional de Nusselt
T: temperatura	Pr: n° adimensional de Prandtl
H: altura del lecho	Θ : temperatura granular
D: diámetro del lecho	e: coeficiente de restitución
Q (pág.): caudal	g_0 : distribución radial
K_x : coeficiente óptico	$K_{\Theta s}$: coeficiente de difusión de energía
F_v : fracción volumétrica	$\gamma_{\Theta s}$: disipación colisional de energía
Q_x : propiedad óptica	φ (pág.): intercambio de energía
I: intensidad de haz incidente	α (pág.): factor de subrelajación
X (pág. 53): distancia a superficie	

C_p : calor específico

λ (pág.): conductividad térmica

Subíndices

f: fluido

φ : azimutal

mf: mínima fluidización

x, y, z: coordenadas espaciales cartesianas

p (pág.): partícula

q: fase a analizar

sv: superficie-volumen

p (pág.): conjunto de fases

i: componente i-ésimo

s: sólido

mb: mínimo burbujeo

l: conjunto de fases sólidas

t: terminal

lift: sustentación

h: referido a agujero

vm: masa virtual

a: adimensional

td: dispersión turbulenta

ext: extinción

pq: interfase

abs: absorción

ls: entre fases sólidas

sca: dispersión

col: colisional

ϕ : referencia

kin: cinético

r: radial

fr: friccional

θ : colatitud

CARACTERIZACIÓN TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DE UN
REACTOR DELECHO FLUIDIZADO PARA OPERACIONES DE
TERMOQUÍMICA SOLAR

DOCUMENTO N° 2: ESTUDIO ECONÓMICO

Documento 2: Estudio económico del proyecto

En este documento se desglosan los costes totales de la realización del trabajo, tanto costes monetarios como no monetarios.

Primero se nombran los gastos asociados a adquisición de materiales, que se pueden clasificar en 2 grandes grupos: gastos de preparación y montaje de la instalación y gastos propios del experimento.

En los primeros se engloban todos aquellos que han sido necesarios para montar el experimento o realizar la preparación de las partículas.

En el experimento del reactor de lecho fluidizado irradiado se han usado 4 termopares y 2 bandejas cerámicas con sus correspondientes tapas, lo que hace un gasto total de 362,34 €.

Para la experimentación del lecho en frío se han comprado 2 tubos de PVC y sus correspondientes casquillos reductores, lo que hace un gasto total de 71,7 €.

Además, algunos de los recursos comprados son compartidos para diferentes propósitos en ambos experimentos. La malla de nylon se usa para tamizar las partículas del lecho irradiado, y para evitar el arrastre al exterior de partículas en el lecho frío.

En cuanto a los fungibles, debido a la dificultad que conlleva la obtención de un valor exacto de gasto de éstos, se ha dado un valor aproximado.

Por último, en gastos propios del experimento se incluyen aquellos que dependen exclusivamente del experimento a realizar y las circunstancias de éste. Aquí se incluyen las ferritas de níquel compradas y la cerámica porosa, necesaria para reemplazar la rotura de la parte inferior del lecho irradiado, lo que hace una suma de 479 €.

En la tabla 5 se recogen los gastos mencionados.

Tabla 5. Costes asociados a materiales en la realización del trabajo.

ITEM	CANTIDAD	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	TOTAL € Iva no Incl
1	2	406-670	Termopar tipo K, 0,75 x 150 mm (TC Direct)	23.70 €	47.40 €
2	1	405-273	Termopar tipo K, 1 x 300 mm (TC Direct)	17.10 €	17.10 €
3	1	405-278	Termopar tipo K, 1,5 x 300 mm (TC Direct)	16.40 €	16.40 €
4	1	11040	PVC GLAS TUBO D.40 PN 10 (COPLASTIC)	11.45 €	11.45 €
5	1	22705	REDUC. BOTELLA PVC MH 50 25 (COPLASTIC)	1.45 €	1.45 €
6	1	22903	CASQUILLO REDUCTOR 25-1/2 (COPLASTIC)	0.97 €	0.97 €
7	1	11090	PVC GLAS TUBO D.90 PN10 (COPLASTIC)	46.73 €	46.73 €
8	1	22718	REDUC. BOTELLA PVC MH 110 50 (COPLASTIC)	8.83 €	8.83 €
9	1	22809	CASQUILLO REDUCTOR PVC 50-25 (COPLASTIC)	1.29 €	1.29 €
10	1	22903	CASQUILLO REDUCTOR 25-1/2 (COPLASTIC)	0.98 €	0.98 €
11	1	NYLON	Malla de nylon de 5 µ. Cantidad: 1m x 1 m (NY-0031) (Labopolis)	96.05 €	96.05 €
12	1	637149-100G	IRON NICKEL OXIDE NANOPOWER, <50 nm (Sigma-Aldrich)	466.50 €	466.50 €
13	1		Fungibles laboratorio	50.00 €	50.00 €
14	2	KAD-4010	Bandeja redonda 10 mL (Nanoker)	17.47 €	34.94 €
15	2	KAT-10045	Bandeja rectangular 60 mL (Nanoker)	60.93 €	121.86 €
16	2	KAP-40	Tapa redonda 40 mm (Nanoker)	19.31 €	38.62 €
17	2	KAP-100	Tapa rectangular 100/45 mm (Nanoker)	43.76 €	87.52 €
18	1		P2: 76 x 10 - PLN Porous Ceramic Disc, Tols +/- 1.0mm (MANTEC)	12.50 €	12.50 €
				SUBTOTAL	1 060.59 €
				IVA	222.72 €
				TOTAL	1 283.31 €

A continuación se exponen los gastos derivados de la disponibilidad de equipos. Dichos gastos se calculan mediante la amortización de los distintos aparatos usados.

El periodo de amortización que se ha establecido es de Febrero de 2015, mes en el que dieron comienzo las prácticas en empresa en IMDEA Energía, hasta Diciembre de 2015, mes en el que se llevó a cabo el último experimento, lo que hace un total de 11 meses.

Para calcular la vida útil de los equipos empleados, se ha estimado según el coste de adquisición del mismo. Si el coste es menor de 300 €, la vida útil se fija en 3 años. Para los equipos de más de 5000 € se ha fijado una amortización en 10 años. Y para el resto, se ha tomado una vida útil de 4 años.

En cuanto a los gastos derivados de la caracterización previa de materiales, no se ha podido establecer un coste de los equipos. Sin embargo, se ha tomado como referencia la tarifa de precios del servicio de caracterización de Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (ICTP) del CSIC en 2012. Dichos gastos son 3 análisis de difracción de rayos X (DRX), 2 análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) de 1 hora de duración cada uno y 3 análisis termogravimétricos (TGA).

En la tabla 6 se recogen los gastos asociado a la disponibilidad y uso de equipos.

Tabla 6. Costes asociados a disponibilidad y uso de equipos.

ITEM	CANTIDAD/ HORAS	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	AMORTIZACIÓN (años)	PRECIO FINAL (sin IVA)
1		CEM: Caudalímetro argón	1 365.81 €	4	313.00 €
2		CEM: Caudalímetro vapor	2 253.03 €	4	516.32 €
3		CEM: Generador de vapor	2 541.99 €	4	582.54 €
4		CEM: Controlador-display electrónico	1 583.40 €	4	362.86 €
5		Caudalímetro 0/20 Nl/min	1 500.00 €	4	343.75 €
6		Caudalímetro 0-10 kg/h	2 094.89 €	4	480.08 €
7		Medidor presión relativa	198.00 €	3	60.50 €
8		Medidor presión diferencial 0-100 mbar	271.75 €	3	83.03 €
9		Medidor presión diferencial 0-500 mbar	488.32 €	4	111.91 €
10		Analizador de gases	15 358.80 €	10	1 407.89 €
11		Equipo de refrigeración Chiller	2 024.00 €	4	463.83 €
12		Simulador solar de alto flujo	9 407.82 €	10	862.38 €
13		Lámpara de simulador solar	1 065.00 €	4	244.06 €
14	3	Análisis DRX (€/muestra)	60.00 €		180.00 €
15	2	Análisis SEM (€/hora)	60.00 €		120.00 €
16	3	Análisis TGA (€/muestra)	190.00 €		570.00 €
SUBTOTAL					6 702.16 €
IVA 21%					1 407.45 €
TOTAL					8 109.61 €

En cuanto a los gastos de personal, se estiman como las horas totales empleadas en la realización del proyecto, tanto durante la estancia en prácticas como al acabar dicha estancia, con un coste monetario cada hora.

La estancia en prácticas suma un total de 480 horas de trabajo. Adicionalmente, se añaden 150 horas de trabajo de creación del modelo CFD, análisis de resultados y redacción fuera de dicha estancia, lo que hacen 630 horas.

Tomando la referencia de 10 €/h, las horas de trabajo hacen un total de 6300 € añadidos.

En cuanto al tema de las licencias de software usadas, se aclara anteriormente que la licencia de ANSYS Fluent usada es académica, por lo que su uso no conlleva ningún coste adicional. La licencia usada de TracePro es comercial, pero no se ha podido determinar la cuantía de su adquisición.

A continuación, se adjunta el diagrama de Gantt de la fase final de experimentación (figura 62). No se ha incluido la fase previa de caracterización de materiales.

A continuación se explica cada una de las líneas temporales mencionadas en el diagrama.

- Recepción de elementos:

Esta línea temporal está marcada por la recepción de diversos elementos del banco de ensayos. Así, el 18 de Agosto de 2015 se recibe el nuevo filtro-soporte para el reactor de lecho fluidizado (el anterior sufrió una rotura de gran tamaño durante unos ensayos). Posteriormente, el reactor de lecho fluidizado fue entregado de nuevo por el CIEMAT el 9 de Octubre. Esta línea temporal acaba con la recepción de todos los elementos necesarios.

- Montaje

En esta línea temporal se engloban los preparativos previos a cualquier ensayo. Destacar que esta línea temporal está fuertemente marcada por la disponibilidad del simulador solar de alto flujo. Así, aunque la recepción de elementos acabe en Octubre, el montaje no puede llevarse a cabo hasta la primera semana de Noviembre, donde se monta el filtro-soporte (2 días), se instala el reactor en el banco de ensayos (1 día), se coloca el nuevo espejo (1 día) y se realizan las conexiones pertinentes en la sala del simulador.

En la segunda semana de Noviembre se montan los caudalímetros, el equipo de generación de vapor y el medidor de presión en 2 días. Los 3 días restantes de la semana se emplean en diseñar el software de control del banco de ensayos usando LabView.

- Pruebas previas:

Durante la tercera semana de Noviembre se llevan a cabo una serie de pruebas para comprobar el correcto funcionamiento del banco de ensayos. Además, se realizan algunas pequeñas modificaciones para optimizar el funcionamiento del equipo, como el centrado del reactor.

- Experimentación:

Desde la última semana de Noviembre hasta el 23 de Diciembre se suceden los diversos experimentos de los que se han mostrado los resultados. Por orden cronológico, el 25 de Noviembre se realizó un ensayo con SiC en frío (sin encender el simulador solar). El 3 de Diciembre se realiza el ensayo de SiC usando aire y argón como gas de fluidización. El 4 de Diciembre se hacen los ensayos con ferritas de níquel, tanto en frío como en caliente, con argón como gas de fluidización. Por último, el 23 de Diciembre se realiza un ensayo de SiC con una mayor carga de SiC y una nueva posición del reactor

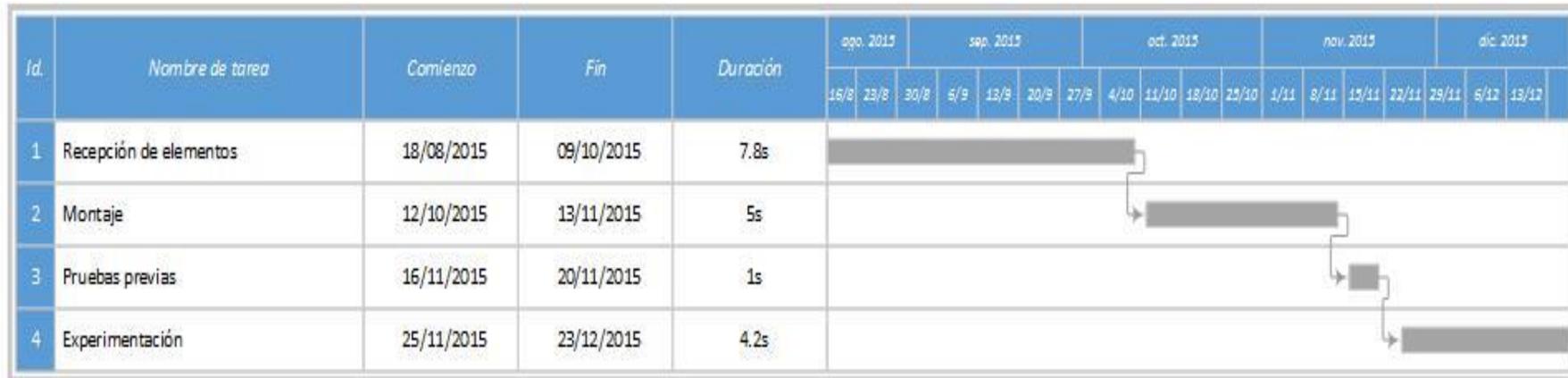


Figura 62. Diagrama de Gantt del proceso de experimentación.

Por último, se adjunta un diagrama de Gantt general del trabajo completo (figura 63). Destacar que uno de los grandes limitadores del trabajo ha sido la disponibilidad de diversos equipos.

Algunas de las líneas temporales aparecen divididas, debido a que se trata de un mismo trabajo que se ha realizado con una determinada separación temporal. En algunos casos, por la mencionada disponibilidad de equipos. En otros casos, por tratarse de un trabajo del mismo índole pero se tratan de temas diferentes. Esto sucede en las tareas de *Lectura* o *Redacción*.

La tarea 3 (*Experimentación con simulador solar*) tiene un tiempo de interrupción tan elevado debido a que el reactor de lecho fluidizado sufre una avería importante en el filtro-soporte de la base como consecuencia de un experimento con SiC, lo que hace que se tenga que detener la experimentación hasta que se remplace la pieza dañada.

En cuanto a la tarea 6 (*Estudio CFD*), la reanudación de la tarea a principio de Noviembre está condicionada por la oportunidad de poder usar la licencia legal académica del software.

No se han representado determinadas dependencias entre los diferentes apartados. Por ejemplo, la tarea 4 (*Caracterización de materiales*) no puede empezar hasta que el segundo tramo de la tarea 1 (*Lectura*) ha finalizado. Así mismo, la última tarea de todo el proyecto es necesario que sea la tarea 2 (*Redacción*).

Todas las tareas necesitan una labor previa de lectura o adquisición de conocimientos en el trabajo a realizar. Sin embargo, en la tarea 1 (*Lectura*) sólo se han incluido los esfuerzos de revisión bibliográfica en los que ha sido necesario buscar información acerca de un tema con detalle en diversas bases de datos digitales y contrastar la información de diversas publicaciones acerca del tema.

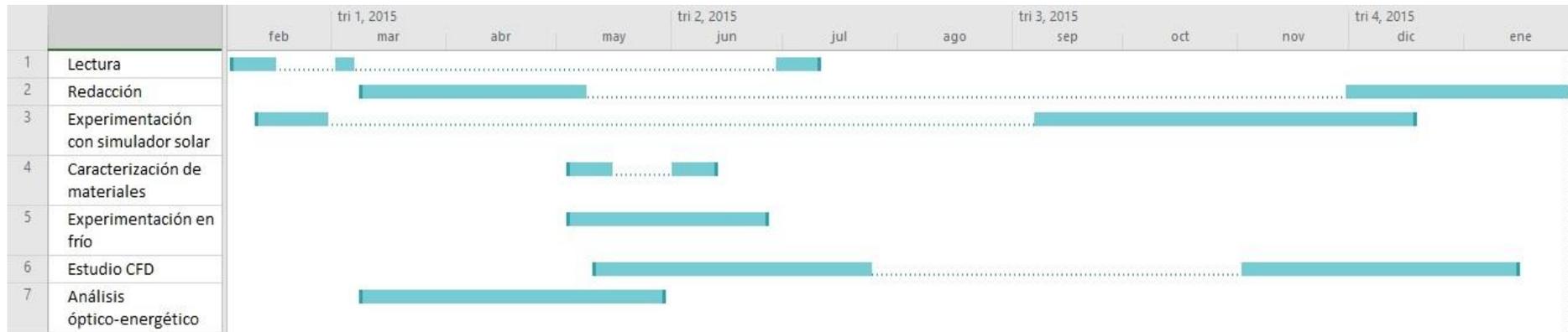


Figura 63. Diagrama de Gantt completo.

CARACTERIZACIÓN TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DE UN
REACTOR DELECHO FLUIDIZADO PARA OPERACIONES DE
TERMOQUÍMICA SOLAR

DOCUMENTO N° 3: ANEXOS

Documento 3: Anexos

Anexo A: Protocolo de experimentación

En este anexo se detalla el protocolo a seguir para poder realizar un experimento. Incluye 4 fases: montaje, puesta en marcha, transcurso del experimento y apagado. La fase de transcurso contiene una serie de indicaciones sobre como monitorizar el experimento y, en caso de ser necesario, observar el experimento. Las otras 3 fases incluyen una serie de instrucciones a seguir en orden.

Montaje

- Si hay que cambiar el material alojado en el reactor, desatornillar la tapa superior metálica del reactor. Mucho cuidado al desapretar los últimos tornillos, ya que la ventana puede quedar suelta y caerse. Colocar tanto la ventana como la tapa en una superficie segura y limpia.
- En caso de ser necesario, descargar el reactor de experimentos previos y limpiar cuidadosamente para eliminar el máximo de partículas indeseadas posible. Una vez limpio, cargar con el nuevo material.
- Limpiar la cara interna de la ventana usando acetona.
- Colocar la ventana en posición y cerrar la tapa. A la hora de apretar las tuercas, no se tienen que apretar en exceso. Se podría romper la ventana de cuarzo.
- Colocar el espejo y fijar su posición. Si se ve suciedad o marcas, limpiar con acetona.
- En caso de haber sido necesaria alguna desconexión de una línea de gas, volver a colocar en su posición de funcionamiento.
- Realizar prueba en vacío, con una presión de entrada de aire de, aproximadamente, 3 bares.
- Comprobar todos los tubos por los que puedan efectuarse fugas de gas. En el primer uso es necesario comprobar todos. Para sucesivos experimentos, basta con comprobar las conexiones al caudalímetro y al reactor. Además, se comprobarán las juntas de la ventana
- Por último, comprobar que la extracción está funcionando.

Puesta en marcha

- Comprobar que el software de monitorización está funcionando correctamente y los dispositivos están listos (analizador de gases, pirómetro y cámaras).
- Fijar el caudal del caudalímetro y comprobar que el caudal del analizador de gases está calibrado.
- Encender la refrigeración del espejo. Si fuera necesario, añadir agua destilada al equipo de refrigeración si el nivel de agua está por debajo del recomendado.
- Comprobar caídas de presión (si son mayores de 1 bar podrían romper la ventana).
- Subir los interruptores magnetotérmicos del simulador solar de alto flujo para dar corriente a la lámpara solar. Apagar las luces para evitar interferencias.
- Empezar las grabaciones de los distintos software (cámaras y Labview) y encender un cronómetro para seguir el tiempo completo del experimento.
- Abrir ventana del simulador, encender ventilador y, por último, encender la lámpara.

Trascurso del experimento

- El experimento se monitorizará a través del banco de ensayos, evitando en la medida de lo posible la entrada al recinto del experimento.

- En caso de ser necesario, es obligatorio usar gafas de protección. Si se prevé una estancia en el recinto del experimento superior a 30 segundos, es recomendable ponerse la escafandra.
- Si se pretende manipular con las manos en el entorno del reactor, es obligatorio colocarse los guantes aislantes.
- Debido al ruido generado por el ventilador y la visión reducida por el uso de las gafas, si es necesario entrar dentro del recinto del experimento y realizar alguna manipulación, es recomendable la presencia de una segunda persona en el banco de ensayos para hacer de guía y dar indicaciones.
- Extremo cuidado con las líneas de corriente o gases que puedan yacer en el suelo. No adentrarse demasiado en el recinto del experimento si no se tiene una visión clara del camino.
- Desde fuera de la habitación controlar el transcurso del experimento y anotar periódicamente en un cuaderno de bitácora algunas variables características del sistema y las posibles incidencias que ocurran.
- Los termopares colocados dentro de la lámpara no deben dar una lectura que exceda los 60 °C. En caso de sobrepasarlos por un margen amplio, valorar la posibilidad de detener el experimento.

Apagado

- Con la ventana de la lámpara abierta, apagar sólo la lámpara y mantener el ventilador encendido unos 10 minutos tras el apagado. A los 10 minutos, se puede apagar el ventilador y cerrar la ventana de la lámpara si las temperaturas del simulador son próximas a 25 °C.
- Dejar que el sistema enfríe (30 minutos aprox.). Realizar el seguimiento del enfriamiento según la lectura que ofrezcan las cámaras.
- Comprobar la temperatura del agua de refrigeración mediante la lectura que ofrece el equipo. Si es superior a 35 °C, es necesario añadir agua destilada antes de realizar el siguiente experimento.
- Una vez esté frío el sistema, parar el cronómetro y detener las grabaciones de los diferentes softwares.
- Comprobar el estado de las partículas si se han alcanzado altas temperaturas. Puede que sea necesario reemplazarlas si han sufrido sinterización o se han fundido.

Anexo B: Descripción del banco de ensayos

En este apartado se muestra la configuración final del banco de ensayos junto a una breve explicación de los elementos mostrados (figuras 64 y 65).

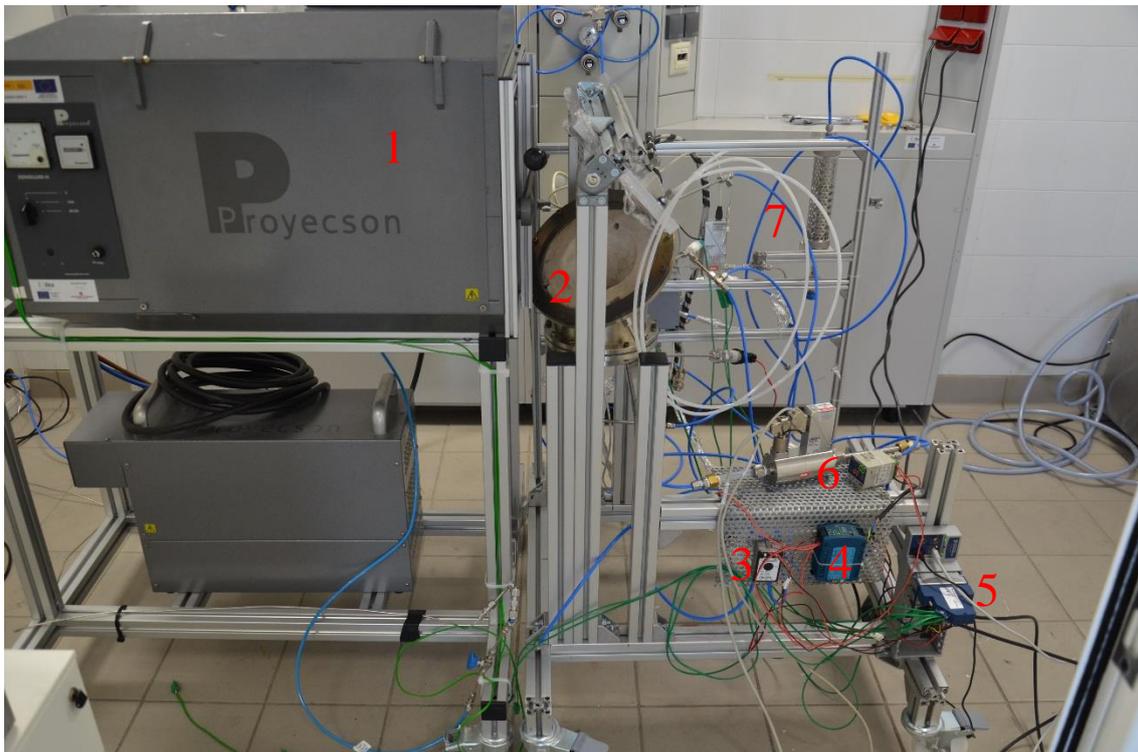


Figura 64. Banco de ensayos (Vista frontal)



Figura 65. Banco de ensayos (Vista lateral)

1. Simulador solar: se trata de una lámpara de arco de Xenón de 7 kW de potencia eléctrica y 2 kW de potencia lumínica. En su interior tiene un concentrador óptico parabólico para canalizar la mayor parte de esa radiación lumínica en un punto, el foco. La distancia desde la salida del simulador hasta el foco es de 27 cm. Para controlar el estado del simulador solar se cuenta con una pareja de termopares que monitorizan su temperatura. Dispone, también, de ventilador interno para operar durante periodos de tiempo más largos.
2. Reactor de lecho fluidizado: cedido por CIEMAT, consta de una carcasa metálica y un interior de ladrillo cerámico refractario JM28 poroso. En la parte superior se coloca una ventana de cristal de cuarzo. Posee una entrada de gas fluidizador por la parte inferior con su correspondiente salida en la parte superior y diferentes ranuras para instrumentación: 2 en la ventana, una para colocar un termopar que mida la temperatura de la ventana y otra para medir la presión absoluta. La otra ranura se encuentra a media altura del reactor donde se introduce un termopar para controlar la temperatura de las partículas y desde donde se mide la presión diferencial. El otro punto de medición de presión diferencial se encuentra antes de la entrada del gas fluidizador al reactor.
3. Medidor de presión diferencial: Sensor que mide la diferencia de presión entre la entrada al reactor y el orificio situado a la mitad de la altura del reactor. Su objetivo es medir la caída de presión provocada por el lecho fluidizado. Tiene un rango de medición de 0 a 500 mbar.
4. Fuente de alimentación: Sirve para abastecer de la tensión adecuada al medidor de presión diferencial y al caudalímetro pequeño.
5. Adquisición de datos: Se pueden ver las 2 tarjetas de adquisición de datos y el puerto de conexión de las tarjetas. Las tarjetas de adquisición de datos sirven para poder agrupar las señales eléctricas de salida de los sensores y transformarlas en un flujo de información informática, con las ventajas de hacer posible la monitorización y el almacenamiento de los datos. El puerto de conexión de las tarjetas es el intermediario entre las tarjetas de adquisición de datos y el soporte informático.
6. Caudalímetros: 2 unidades de control de caudal de gases. El caudalímetro situado a la izquierda se trata de una unidad de mayor rango de caudal (0 – 10 kg/h) que necesita control externo, pero pierde precisión a caudales bajos. Por ello, en el caso de necesitar bajos caudales se emplea el caudalímetro de la derecha que es más compacto y tiene un rango de caudal menor (0 – 20 l/min).
7. Equipo de argón/vapor: cuenta con los dispositivos necesarios para la alimentación del sistema en el ensayo realizado con argón y vapor. Se tratan de 2 caudalímetros (uno para el agua y otro para el vapor) y un equipo de generación de vapor.
8. Espejo de aluminio de alta reflectividad: sirve para reconducir los rayos de la lámpara solar al interior del reactor. Aunque absorba una parte muy pequeña de la radiación incidente, es necesario establecer algún tipo de refrigeración líquida por el interior del espejo para evitar un sobrecalentamiento de éste. Se aconseja limpiar la superficie del espejo con acetona antes de cada uso.
9. Medidor de presión relativa: como su nombre indica, se encarga de medir la presión relativa del sistema. El punto de medida se encuentra en la ventana y se usa para controlar la sobrepresión que tiene que aguantar la ventana. Al ser una ventana de cristal de cuarzo, es necesario controlar dicha presión para evitar que se rompa o fracture.

Anexo C: Guía de uso del software ‘Mieplot’

Mieplot es un programa diseñado para obtener diversas propiedades ópticas a través de la resolución de las ecuaciones de Mie. Dichas ecuaciones dependen de los parámetros a estudiar. Se aplicará la teoría de Mie a pesar de no ser el mejor ajuste.

Antes de empezar con el uso de *MiePlot*, hay que hacer incidencia en que este programa está apenas optimizado. Por lo tanto, la interfaz es ‘poco amigable’ con el usuario, y la definición de un parámetro que lleve al programa a error hará que se cierre automáticamente, perdiendo todo el trabajo realizado.

Las propiedades ópticas se obtienen en formato de gráfica, que posteriormente se pueden pasar a un fichero de texto modificado para facilitar su procesado. Los datos de entrada del programa son una distribución de partículas, una longitud de onda y una serie de valores del índice de refracción complejo del material en función de la longitud de onda.

Las instrucciones para introducir los datos del índice de refracción complejo se encuentran en otros ficheros con la misma finalidad. Para verlo, hay que abrir un “.rix” con el bloc de notas de Windows para que lo asemeje a un archivo de texto. Dentro del fichero se muestra cómo se organizan las filas y en cuáles hay que introducir los datos. Es necesario introducir el valor de refracción real e imaginario para una serie de longitudes de onda. El rango de las longitudes de onda tiene que ser lo suficientemente amplio, porque *MiePlot* no ejecutará ningún cálculo fuera de ese rango.

Los datos del índice de refracción se han obtenido del siguiente enlace: (http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-article_query?bibcode=1988A%26A...194..335P&db_key=AST&page_ind=3&plate_select=N&data_type=GIF&type=SCREEN_GIF&classic=YES).

Al trabajar en el espectro visible, basta con introducir los 15 primeros datos para acotar bien la simulación. Recordar que cuando se vaya a guardar el nuevo archivo creado, hay que cambiar de formato “.txt” a “.rix”.

Una vez creado el fichero con las propiedades, se pueden cargar en el programa a través de *Advanced – Refractive Index – Sphere – Data from file...*

Para la distribución de partículas se puede seguir un procedimiento análogo, siendo un fichero de formato “.dis” y teniendo que introducir tamaños característicos y frecuencias de dichos datos. Sin embargo, para conseguir una distribución bien definida, el número de datos a introducir es demasiado alto. Por tanto, se ha aproximado a través de *Drop Size – Disperse – Multimodal* y se han añadido 3 puntos característicos de la distribución. Para cada uno, es necesario definir el radio característico, la desviación típica y la concentración relativa.

Una vez se han definido la distribución de partículas y el índice de refracción del material, hay que seleccionar la gráfica que queremos ver. Se selecciona *Qext/Qsca/Qabs vs diameter*. Al realizar esta acción, los inputs del programa se modifican de acuerdo a la gráfica que se pide.

Se introduce la longitud de onda buscada en la sección *light* y la distribución de partículas en *drop size*. La sección *diameter* para definir el rango del eje de abscisas y el número de ‘pasos’ que ejecutará a lo largo de la simulación. Un paso se define como una serie de datos al barrer el rango del diámetro de partícula que se ha definido. Por tanto, un número de pasos elevado disminuirá el error de la gráfica pero aumentará el tiempo de cálculo. Se intuye que *MiePlot* debe emplear algún proceso iterativo, pues el tiempo empleado entre pasos es cada vez menor a medida que avanza el proceso.

Para obtener los índices $k_{\text{ext}}/k_{\text{sca}}/k_{\text{abs}}$ se usará la siguiente fórmula (49):

$$k_x = \frac{3F_v Q_x}{2d_p} \quad (49)$$

Donde:

K_x : cualquiera de los 3 coeficientes ópticos (ext/sca/abs)

F_v : Fracción volumétrica

Q_x : Propiedad óptica asociada a k_x

d_p : Diámetro de partícula

Se ha fijado una fracción volumétrica de 0,6 , correspondiente a un lecho en estado fluidizado.

Se han obtenido los coeficientes ópticos frente al tamaño de partícula y frente a la longitud de onda. Para el ensayo frente a longitud de onda se ha supuesto un tamaño de partícula de 300 μm .

Para cada caso se representará L , espesor óptico, como la inversa de k .

A continuación se muestran los resultados obtenidos (figuras 66, 67, 68 y 69):

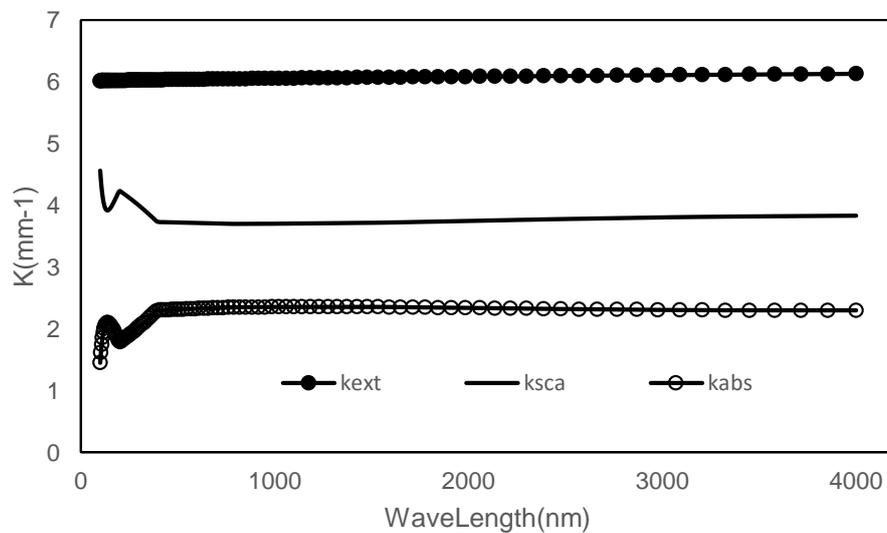


Figura 66. K vs Longitud de onda.

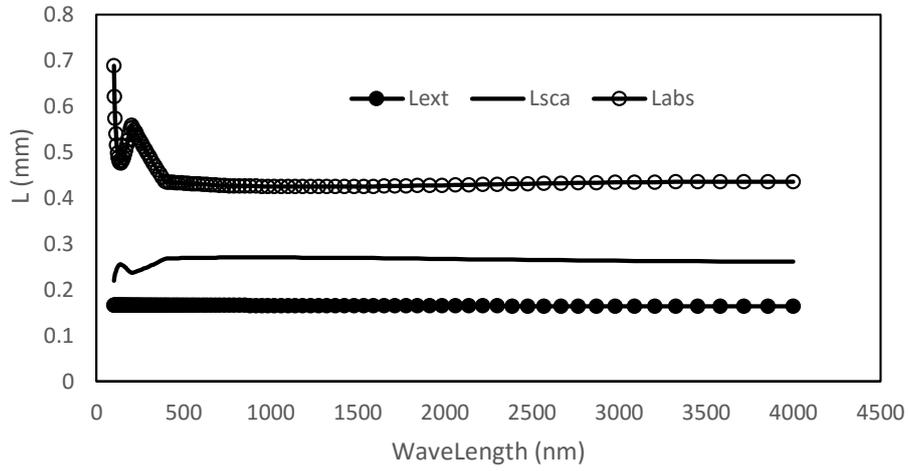


Figura 67. L vs Longitud de onda

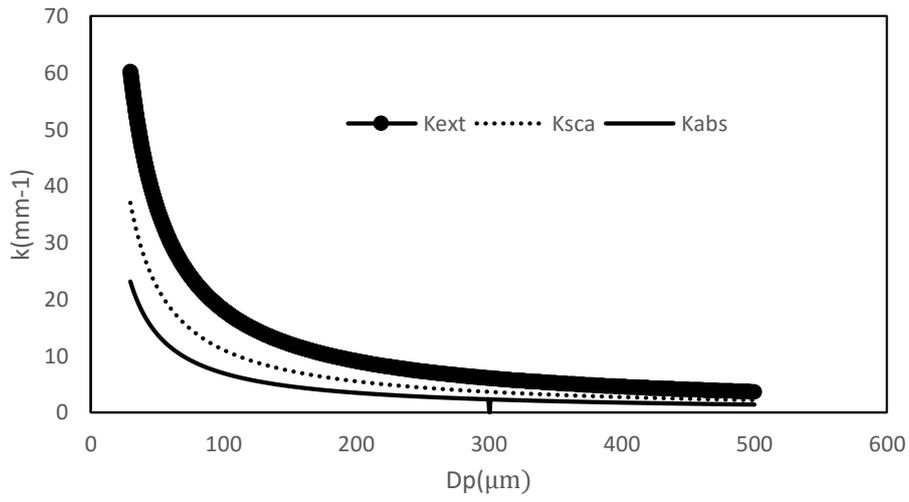


Figura 68. K vs Diámetro de partícula

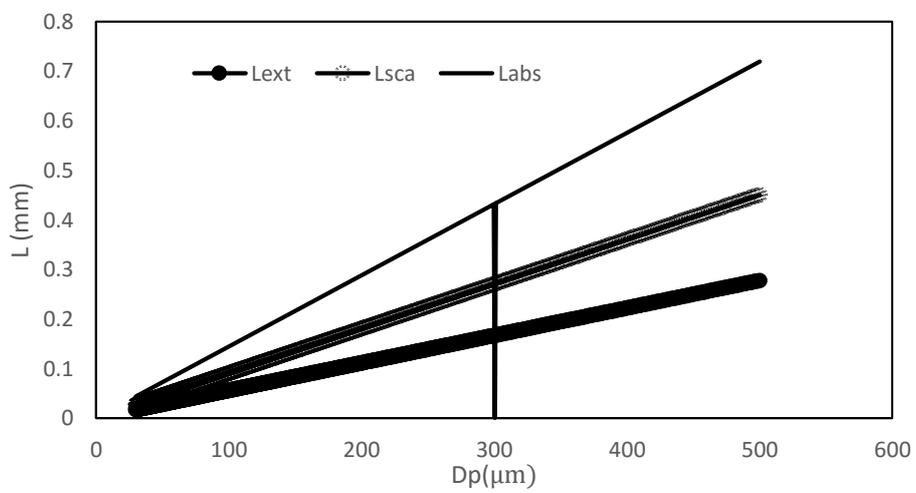


Figura 69. L vs Diámetro de partícula

Para comparar resultados, vamos a escoger el valor de 546 nm de longitud de onda y 300 μm de diámetro de partícula. Ambas gráficas muestran el mismo valor de K_{ext} (aproximadamente 6 mm^{-1}), por lo que será indiferente tomar valores de una u otra. Se obtiene un valor de L_{ext} de 0,16 mm.

Fijando un diámetro de partícula (300 μm), se puede obtener una distribución de los coeficientes ópticos en función de la fracción volúmica (figuras 70 y 71)

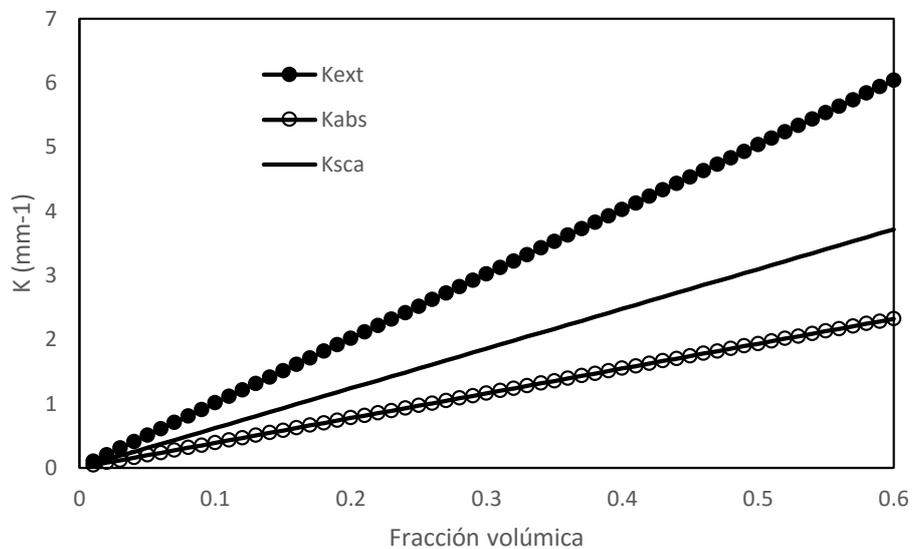


Figura 70. K vs Fracción volúmica

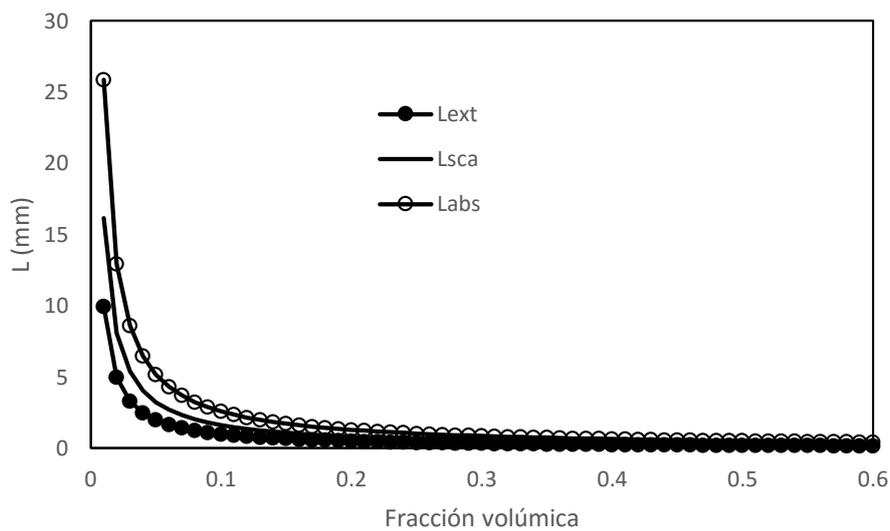


Figura 71. L vs Fracción volúmica

Anexo D: Planos del reactor

