

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Antecedentes

El uso del carbón en la última década ha aumentado con respecto al uso de otras fuentes de energía a nivel mundial. Como se puede apreciar en la figura (Fig. 1-1), mientras que el uso del crudo ha ido disminuyendo en los últimos 40 años respecto al mix global de energías, el carbón ha aumentado principalmente por los avances en la industrialización de países no pertenecientes a la OECD.

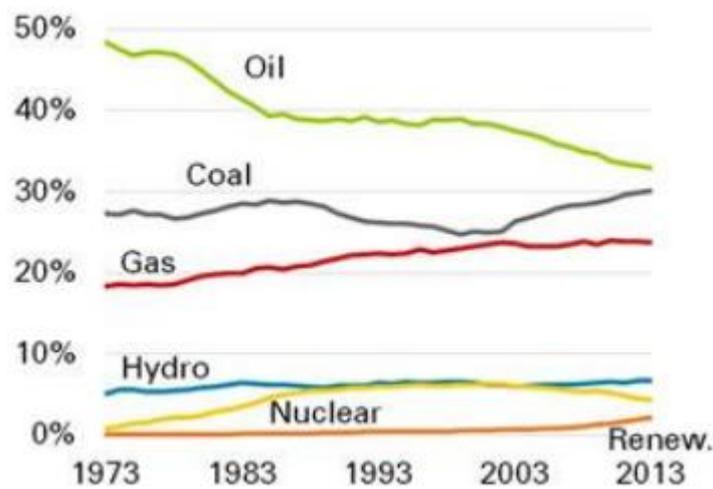


Fig. 1-1 Mix de energía global en el mundo desde 1973 a 2013. Rüh (2014)

El alto nivel tecnológico de los equipos de combustión de combustibles líquidos y gaseosos, así como la necesidad del uso racional y eficiente de los recursos energéticos no renovables ha dado lugar a una serie de requerimientos que deben cumplir los equipos de producción de energía vía combustión de carbón. Estos requerimientos son:

- La combustión de carbones de bajo grado con alto contenido en humedad, cenizas y azufre de forma efectiva y económicamente viable.
- La combustión eficiente de mezcla de residuos domésticos, industriales y biomasa.
- Conseguir altas eficiencias de combustión, superiores al 99%.
- Conseguir flexibilidad en las calderas en lo que al tipo y la calidad del carbón se refiere, de forma que se pueda asegurar la utilización de distintos combustibles en la misma caldera.

- Reducir las emisiones de dióxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas sólidas.
- Conseguir un amplio rango de ratio de carga.
- Obtener una energía cuyo precio sea competitivo en comparación con la energía obtenida a partir de combustibles líquidos o gaseosos.

En este sentido, la combustión con lecho fluido es la única tecnología comercialmente disponible que se puede comparar técnica y económicamente con las tecnologías energéticas convencionales y ofrecer mejores características en términos de emisiones y flexibilidad en el combustible utilizado.

Por otro lado, los reactores de lecho fluido circulante también se utilizan para la conversión de residuos y biomasa en productos gaseosos a través de la gasificación. Estos productos pueden utilizarse como gas combustible para la combustión directa en aplicaciones térmicas, gas para motores o turbinas, así como gas de síntesis.

En los sistemas de conversión en lecho fluido, tanto la combustión como la gasificación tiene lugar en un lecho caliente de material inerte que se fluidiza con la ayuda de aire. El material inerte no participa en la conversión, pero favorece las condiciones en las que se da el proceso. Dependiendo de la velocidad del gas de fluidización se pueden diferenciar regímenes de fluidización como pueden ser: lecho estacionario o burbujeante, lecho turbulento y lecho fluido circulante o de rápida fluidización. Algunos de los distintos comportamientos de los sólidos que componen un lecho en función de la velocidad del gas a la entrada se pueden apreciar en la figura (Fig. 1-2).

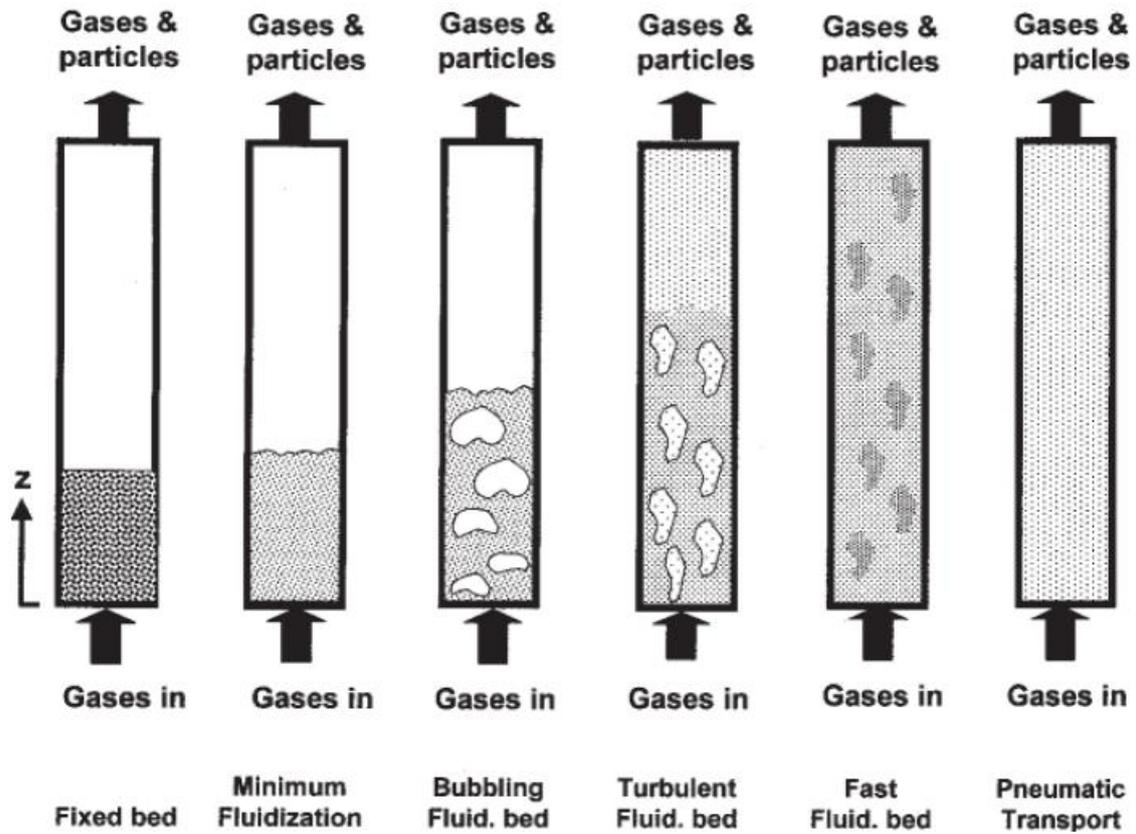


Fig. 1-2 Diferentes comportamientos de partículas en el lecho. Souza- Santos (2004)

En los reactores de lecho fluido circulante, la conversión tiene lugar en la cámara vertical denominada *riser*, que se divide en distintas zonas como se puede apreciar en la figura (Fig. 1-3): densa, splash, transporte y salida. Las paredes de la cámara suelen disponer de tubos con agua para la transferencia de energía durante la combustión y la parte inferior de la cámara está protegida contra la erosión. La combustión se suele producir a una temperatura de entre 800 y 900°C. El sistema dispone de uno o más ciclones donde el material sólido se separa de los productos de la combustión y son reintroducidos al reactor. De esta forma, la recirculación de las partículas sólidas (partículas de material inerte y partículas de combustible no convertido) se lleva a cabo en un circuito cerrado. La regulación del flujo de los sólidos recirculados se controla al final del *downcomer* a través de un sistema que se denomina *loop seal*.

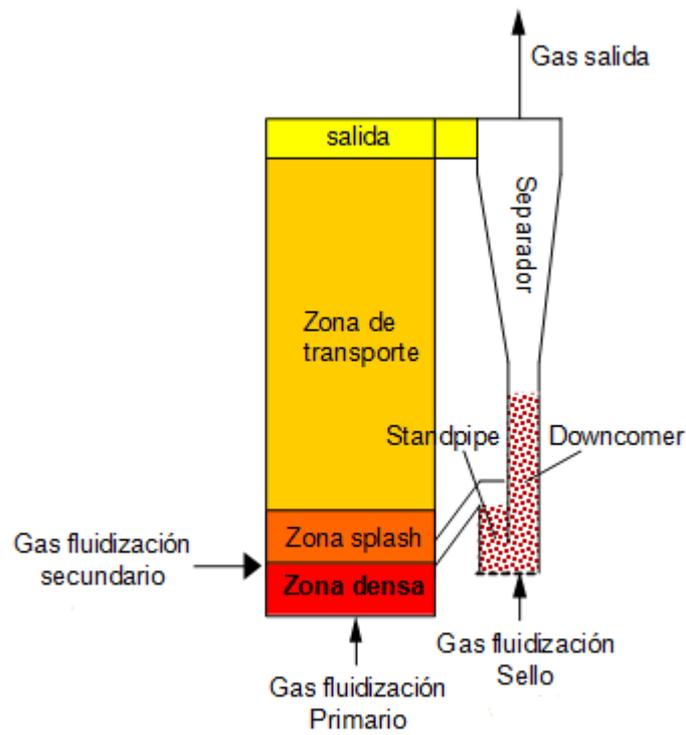


Fig. 1-3 Distintas partes de un reactor de lecho fluido circulante

Los gases que dan lugar a los productos de la conversión y que abandonan en ciclón entran en la zona convectiva de la caldera donde se intercambia calor con las diferentes superficies de transferencia como se puede apreciar en la figura (Fig. 1-4).

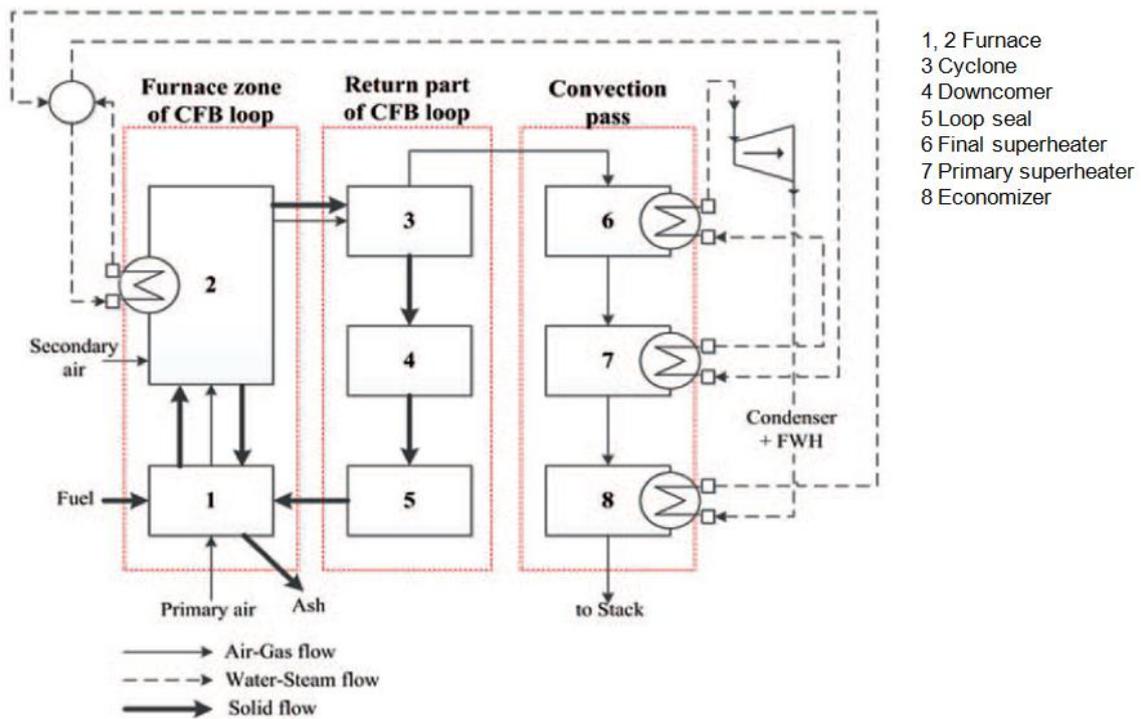


Fig. 1-4 Sistema global para la combustión en lecho fluido circulante. Kim et al. (2014)

Las calderas de combustión que disponen de un sistema de lecho fluido circulante suelen emplear partículas inertes con un tamaño de entre 50 – 300  $\mu\text{m}$  y la velocidad de fluidización suele estar entre 3 – 6 m/s. Por otro lado, el tamaño de la partícula de combustible suele estar entre 6 – 10 mm. Para disminuir las emisiones de productos de la combustión se suele añadir caliza en el lecho fluido o en la zona *bottom* del *riser* con un ratio molar Ca/S de hasta 5. De esta forma es posible conseguir una retención de dióxido de azufre de hasta el 95 % en el lecho. Por otro lado, la división del aire de combustión entre una línea de aire primario y otra de aire secundario da lugar a una reducción muy representativa de óxidos de nitrógeno.

La velocidad del gas en las calderas de lecho fluido circulante es mucho mayor que la velocidad de las partículas; las partículas se mueven hacia arriba de una forma aleatoria y caótica, de forma individual o en grupos dando lugar a *clusters* y muchas de ellas vuelven hacia abajo. Esta mezcla de partículas tan intensa da lugar a una temperatura constante en el horno desde el plato distribuidor hasta la salida del reactor. Debido a esto, a las altas velocidades relativas entre el gas y las partículas sólidas, a la presencia de partículas sólidas de material inerte y a la transferencia de calor debida al contacto de las partículas se puede afirmar que las condiciones de la combustión son muy favorables. Si a esto se añade la recirculación de las partículas

sólidas tras la separación de los gases de combustión en el ciclón es fácil conseguir eficiencias de combustión de hasta 99.5% en las calderas de lecho fluido circulante ya que las partículas están en el horno hasta que se queman completamente o hasta que su tamaño es tan pequeño que son arrastradas con los gases de combustión en el ciclón.

## 1.2. Objetivos

En este documento se pretende estudiar algunos parámetros de interés en lo que se refiere a la fluidodinámica de lechos fluidos circulantes para, posteriormente, poder compararlos con los resultados presentes en la literatura y con resultados propios obtenidos tras la experimentación en la unidad fría a escala piloto construida en los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla. Estos parámetros afectan directamente a la fluidodinámica del sistema y se caracterizan por modelarse de forma semiempírica en la mayoría de los casos. Los parámetros de interés que se van a estudiar son los siguientes:

- Reparto de aire en el *loop seal*: El *loop seal*, como se ha comentado anteriormente, tiene como función la regulación del flujo de sólidos desde el *downcomer* al *riser*. Este sistema está fluidificado en su parte inferior para favorecer el flujo de sólidos de un lado a otro variando su valor en función del caudal de aire que se esté introduciendo. El flujo de aire se va a dividir en dos de forma que una parte se dirigirá a la zona del *downcomer* y la otra atravesará el *standpipe*. Inicialmente se suele suponer que si la sección del *downcomer* tiene el mismo valor que la del *standpipe* el flujo de aire se dividirá al 50% entre ambas partes, pero factores como el tipo de sólido que constituye el material inerte, sus propiedades y el efecto de la propia circulación de sólidos influye en esta distribución de aire no siendo tan sencilla su predicción. Es por ello por lo que este parámetro merece ser estudiado en profundidad.
- Flujo de sólidos a la salida del *riser*: El flujo de sólidos se puede calcular a partir de la densidad de los sólidos a la salida del *riser*. Esta densidad es un parámetro difícil de calcular. En general, se suele utilizar como cota inferior la densidad  $\rho_{\infty}$  (calculada a partir de la constante de elutriación) que es la densidad de la suspensión que se alcanzaría en una hipotética unidad suficientemente alta como para que el flujo y la densidad de la corriente ascendente dejaran de variar con la altura, pero existen numerosas correlaciones en la literatura para su cálculo como se mostrará más

adelante. Estas correlaciones semiempíricas son muy dependientes de las condiciones de experimentación con las que se obtuvieron por lo que hay que estudiar la forma en la que se va a llevar el cálculo y comparar con resultados experimentales para obtener un valor lo más representativo posible y poder comprender de qué depende para después escalar los resultados.

El estudio de estos parámetros así como la finalización y puesta a punto de una unidad fría a escala piloto van a ser los objetivos principales de este proyecto. La razón de la construcción de la unidad fría de lecho fluido circulante es la obtención de resultados experimentales para poder validar el modelo fluidodinámico desarrollado y entender mejor el funcionamiento interno del sistema.