

# Proyecto Fin de Grado

## Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Estado del arte de la generación de vapor  
mediante combustión en lecho fluido

Autor: Dña. María Luisa Orozco Moyá

Tutor: Profesor Dr. Antonio Muñoz Blanco

Dep. Ingeniería Energética. Grupo de Motores Térmicos  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016





Proyecto Fin de Grado  
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Estado del arte de la generación de vapor mediante combustión en lecho fluido**

Autor:

Dña. María Luisa Orozco Moyá

Tutor:

Profesor Dr. Antonio Muñoz Blanco

Catedrático

Dep. Ingeniería Energética. Grupo de Motores Térmicos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Proyecto Fin de Grado: Estado del arte de la generación de vapor mediante combustión  
en lecho fluido

Autor: Dña. María Luisa Orozco Moyá

Tutor: Profesor Dr. Antonio Muñoz Blanco

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal



*A mis padres*

# Agradecimientos

---

Quiero agradecerles a mis padres que hayan hecho posible que llegue hasta aquí, no solo al poner a mi disposición los medios para ello sino por haberse ocupado de darme la mejor educación académica que han podido y todo el apoyo moral que he necesitado.

También darle las gracias a mi tutor, Don Antonio Muñoz, por haberme ayudado con sus amplios conocimientos y experiencia.

*María Luisa Orozco Moyá*

*Sevilla, 2016*



# Resumen

---

El objetivo de este proyecto es el de hacer una revisión acerca del estado del arte de la tecnología de lecho fluido. Se comienza la revisión considerando los inicios y el desarrollo de estas tecnologías, así como las perspectivas de mejora y los elementos críticos que habría que optimizar. También se explican los fundamentos termodinámicos de la tecnología de lecho fluido, resaltando el control de emisiones y el amplio intervalo de combustibles utilizables. Asimismo se clasifican estas tecnologías en base a las distintas propiedades que las caracterizan, como son la velocidad del fluido a su paso por el lecho, el tipo de alimentación que tiene el lecho o la presión a la que opera la planta. La última sección de este proyecto muestra plantas comerciales, actualmente en funcionamiento, que utilizan distintas variedades de estas tecnologías.



# Abstract

---

In this paper we point out the state of the art of the technologies of fluidized bed combustion. The revision starts considering the beginnings and development of these technologies, in addition of the perspectives of improvement and the critical elements. There is also an explanation of the thermodynamic bases of this technology, evidencing the control of emissions and the wide range of fuels which can be burned in them. You will also be able to find a classification of these technologies based on the different properties which describe them like, the velocity of the flux through the bed, the way the fuel can be fed in the bed and the pressure at which the plant operates. The final section of this paper shows some commercial plants, using the different varieties of fluidized beds, which are operating nowadays.

# Índice

---

---

<b>Índice de Tablas</b> .....	<b>xiv</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>xvi</b>
<b>Fundamentos de lechos fluidos</b>	
<i>Historia</i> .....	17
<i>Comportamiento de los lechos fluidos</i> .....	29
Formación de burbujas en los lechos fluidos .....	31
Unión de burbujas en lecho fluido .....	33
Regímenes observados en el aire de entrada al lecho.....	37
Ventajas de la tecnología de lecho fluido .....	42
<i>Clasificación de lechos fluidos</i> .....	45
En función del tipo de alimentación.....	45
En función de la velocidad del aire .....	46
En función de la presión.....	55
<b>Centrales de lecho fluido actualmente en funcionamiento</b> .....	<b>61</b>
<b>Otras tecnologías representativas</b>	
<i>IGCC</i> .....	67
<i>CAC (CCS)</i> .....	73
<b>Conclusiones</b> .....	<b>75</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>75</b>

# Índice de Tablas

---

<b>Tabla 1.</b> Datos para tres modelos de tecnología de lecho fluido con una misma corriente de aire.....	28
<b>Tabla 2.</b> Clasificación de Geldart atendiendo al comportamiento de las partículas.....	42
<b>Tabla 3.</b> Detalles técnicos de la planta de lecho fluido a presión de Cottbus.....	61
<b>Tabla 4.</b> Garantía de emisiones para la central de Cottbus.....	62
<b>Tabla 5.</b> Composición del lignito extraído de Lausitz.....	63
<b>Tabla 6.</b> Características de la central de Värtan, Suecia.....	63
<b>Tabla 7.</b> Especificaciones de la planta de Osaki, Japón.....	64
<b>Tabla 8.</b> Especificaciones de las emisiones de la planta de Osaki, Japón.....	65
<b>Tabla 9.</b> Datos técnicos de la central de Río Bravo, Jasmin.....	66
<b>Tabla 10.</b> Datos de productos para tres centrales distintas usando el mismo combustible.....	69-70
<b>Tabla 11.</b> Contenido de emisiones por MWh de electricidad producida.....	71
<b>Tabla 12.</b> Composición de combustibles utilizados.....	73
<b>Tabla 13.</b> Características técnicas de la central de ELCOGAS S.A.....	73



# Índice de Figuras

---

<b>Figura 1.</b> Esquema de funcionamiento del proceso Winkler.....	19
<b>Figura 2.</b> Fábrica de papel de Saubrugs (Noruega).....	24
<b>Figura 3.</b> Proceso de combustión de lecho fluido a presión.....	27
<b>Figura 4.</b> Comparación de tamaños entre 3 tipos de lecho fluido.....	28
<b>Figura 5.</b> Modelo de Darton para la unión de burbujas con la altura del lecho.....	35
<b>Figura 6.</b> Patrón de la unión de las burbujas y circulación de los sólidos en grandes lechos industriales.....	36
<b>Figura 7.</b> Formación de burbujas para altas y bajas velocidades de salida.....	37
<b>Figura 8.</b> Combustión de partículas de carbón en un lecho fluido.....	40
<b>Figura 9.</b> Clasificación de Geldart sobre las propiedades de las partículas.....	41
<b>Figura 10.</b> Variación de las emisiones de NOx con la temperatura y el exceso de aire.....	44
<b>Figura 11.</b> Caldera en base de lecho fluido burbujeante.....	48
<b>Figura 12.</b> Oscilaciones de presión durante la transición del régimen burbujeante al turbulento.....	51
<b>Figura 13.</b> Esquema de un sistema de lecho fluido circulante.....	53
<b>Figura 14.</b> Comparación entre un lecho fluido burbujeante y circulante.....	55
<b>Figura 15.</b> Base de lecho fluido atmosférico.....	56
<b>Figura 16.</b> Separación ciclónica.....	57
<b>Figura 17.</b> Esquema de generador en base de lecho fluido a presión.....	58
<b>Figura 18.</b> Central de Cottbus y su ubicación dentro de Alemania.....	58
<b>Figura 19.</b> Esquema general de la planta de Osaki.....	61
<b>Figura 20.</b> Esquema del proceso de la tecnología de IGCC.....	65
<b>Figura 21.</b> Componente de planta de producción de potencia con tecnología de IGCC.....	67
<b>Figura 22.</b> Diagrama de método de captación CCS.....	71



## **FUNDAMENTOS DE LECHOS FLUIDOS**

### **Introducción**

La tecnología de lecho fluido es una de las establecidas a día de hoy para la generación de calor y potencia. No ha dejado de haber mejoras en la misma desde que alcanzó el nivel comercial en la década de los ochenta. Existen varios factores que hacen la tecnología del lecho fluido especialmente interesante, y la diferencian del resto de tecnologías de quemado de carbón. El primero de ellos, es la variedad de combustibles que se pueden quemar en la misma, este factor está incrementando su importancia debido a que cada vez hay más combustibles que es conveniente quemar, como pueden ser la biomasa y los combustibles derivados de ella. A lo largo de éste proyecto se presentarán los avances históricos que se han conseguido para la tecnología del lecho fluido desde sus orígenes, las perspectivas de mejora y los elementos críticos a optimizar. También se exponen las bases termodinámicas y físicas de dicha tecnología, así como la clasificación de sus distintas variables. Para concluir, se presentan algunas plantas, actualmente en funcionamiento, que utilizan las distintas variedades de la tecnología de lecho fluido explicada durante el proyecto.

### **Historia**

La tecnología de lecho fluido como método para la obtención de energía tuvo su origen en la patente de Winkler para la gasificación del lignito. El proceso Winkler se diseñó en Alemania en 1940 y su objetivo era gasificar carbones de bajo poder calorífico. El carbón, pulverizado en finas partículas, se mantenía en agitación constante debido al paso de un gas (oxígeno o aire) en sentido ascendente. En dicho proceso todas las zonas de la cámara de combustión se encontraban a una temperatura similar. Se obtenía un buen rendimiento para los lignitos y un rendimiento bajo con carbones con muchas cenizas. En la Fig (1) se puede ver un esquema del proceso Winkler.

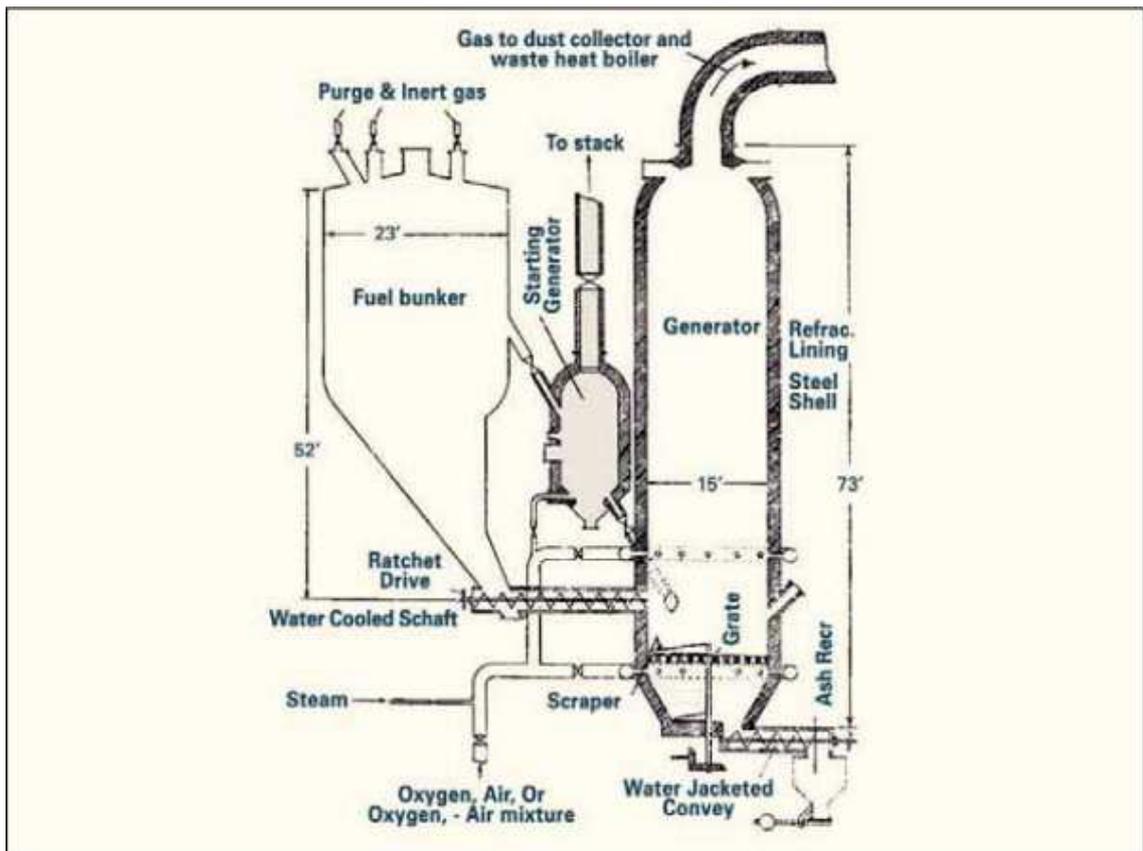


Fig. (1) Esquema de funcionamiento del Proceso Winkler

Los equipos que utilizaban combustibles gaseosos o líquidos habían alcanzado un alto desarrollo tecnológico. Si a esto se le une la necesidad de un uso eficiente y racional de las fuentes de energía no renovables, se hacía imprescindible desarrollar sistemas de quemado de carbón que satisficieran una serie de características muy exigentes a nivel tecnológico. Dichas características se indican a continuación:

- Quemado de carbón de alto contenido de humedad (60%), cenizas (70%) y azufre (6-10%) de manera efectiva y rentable.
- Una combustión efectiva de combustibles diversos, incluyendo biomasa, así como de desechos tanto industriales como domésticos
- Tener una eficiencia de combustión muy elevada (>99%)
- Flexibilidad en relación con el tipo de combustible que puede utilizarse y de su calidad. Es decir, asegurar la posibilidad de usar de forma alterna diferentes combustibles en el mismo generador.
- Proporcionar una protección medioambiental efectiva frente al  $SO_2$ ,  $NO_x$  y a las partículas sólidas ( $SO_2 < 400 \text{ mg/m}^3$ ,  $NO_x < 200 \text{ mg/m}^3$  y partículas sólidas  $< 50 \text{ mg/m}^3$ ).
- Permitir un arranque automático, así como un sistema de control automático de los parámetros operacionales de la planta.

Además de cumplir con los requisitos anteriores, los precios de la energía eléctrica producida debían ser competitivos con los de la energía eléctrica obtenida utilizando combustibles líquidos y gaseosos.

Las tecnologías convencionales de quemado de carbón no cumplían los requisitos anteriormente indicados y parecían haber llegado a su límite de desarrollo tecnológico a nivel de eficiencia. Por estas razones, no eran competitivas. Así, los generadores de combustión de carbón pulverizado llegaban a un máximo de 2000 MW<sub>th</sub> y ocupaban dimensiones del orden de 200 m<sup>2</sup> de área por 200 metros de altura. Dichos equipos no solo suponían un problema a nivel dimensional, sino que producían emisiones en cantidades muy por encima de lo deseado, por lo que era necesario el uso de un equipo adicional para reducir dichas emisiones y esto encarecía de forma importante los costes.

Cuando se requerían potencias intermedias, de entre 40-100 MW<sub>th</sub>, se solían utilizar grandes generadores. Éstos presentaban como desventajas una baja eficiencia de combustión y un uso limitado al carbón de alto rango, en forma de partículas grandes. Además, al igual que en el caso de los quemadores de carbón pulverizado, se hacía necesario el uso de un equipo adicional que redujera las emisiones y que, en ocasiones, podía llegar a costar más que el quemador en sí. Todo ello hacía que esta tecnología fuera muy poco competitiva a nivel de mercado. Por lo que se hacía imprescindible el desarrollo de una nueva tecnología más eficaz, lo que llevó a la investigación y posterior desarrollo de la tecnología de lecho fluido. Estas investigaciones no sólo se llevaron a cabo en Estados Unidos. Otros países como Gran Bretaña, Alemania, Japón, China o Finlandia también iniciaron programas destinados al estudio de esta tecnología. El objetivo común de todos estos países era quemar combustibles de baja calidad, con la mayor eficacia posible y manteniendo las emisiones en mínimos. Por ejemplo, a finales de los años cincuenta y principios de los sesenta, la junta Nacional del Carbón de Gran Bretaña inició estudios sobre la combustión de carbón en lecho fluido para incrementar el consumo de carbón e intentar paliar la pérdida de mercado que habían sufrido debido a la fuerte competencia de los combustibles líquidos. De esta forma, se podría utilizar el carbón como combustible en la industria en aquellos países productores de carbón. Además, la tecnología en lecho fluido presentaba como ventaja adicional el hecho de que permitía utilizar como combustible los desechos de carbón producidos en la separación, limpieza y enriquecimiento del carbón de alto rango. Todo ello condujo a un incremento del interés en realizar avances en

la tecnología de lecho fluido.

En 1962, un ingeniero llamado Michael Pope (presidente de Ingeniería Pope, Nueva York) visitó un generador de lecho fluido para incinerar granos de café, en una fábrica de Nestlé de producción de café instantáneo. Pope observó la velocidad y eficiencia del proceso de combustión y pensó en la posibilidad de introducir tuberías de agua en el lecho, con la finalidad de quemar carbón para producir vapor. Michael Pope, con la ayuda de su socio John Bishop, construyó el generador de lecho fluido utilizando como "hogar" un cubo de metal con el fondo perforado y con gravilla ordinaria como absorbente para el lecho. Al monitorizar las emisiones de este pequeño horno, se dieron cuenta de que las emisiones de  $\text{SO}_2$  eran mínimas. Esta observación la explicaron en base a la reacción entre la caliza presente en la gravilla y el azufre presente en el carbón. En 1965, en base a los resultados obtenidos en sus investigaciones, Pope obtuvo financiación para construir la primera planta piloto con tecnología de lecho fluido de 500 KW. La finalidad principal de esta planta era llevar a cabo diferentes experimentos que proporcionaran información sobre cómo controlar las emisiones de dióxido de azufre.

Las investigaciones sobre generadores de lecho fluido continuaron, aunque no suponían una prioridad debido al uso extensivo del petróleo como combustible que, en un principio, era barato. Sin embargo, en los años setenta comenzó la llamada crisis del petróleo, que supuso una subida muy importante del precio del mismo. Esta crisis se inició con la guerra del Yom Kippur, también llamada guerra árabe-israelí, que se desarrolló entre el 6 y el 25 de octubre de 1973, y enfrentó a la coalición de países árabes liderados por Egipto y Siria contra Israel. Egipto y Siria querían el Sinaí y los Altos del Golán respectivamente, y recibieron apoyo de Irak, Arabia Saudita, Libia, y otros países pertenecientes a la organización de países exportadores de petróleo (OPEP), así como de La Unión Soviética. Por su parte, Israel recibió apoyo de Estados Unidos, Francia y Reino Unido. Como resultado de ello, los países pertenecientes a la OPEP decidieron no exportar más petróleo a aquellos países que habían apoyado a Israel durante la guerra. Esto causó un aumento muy importante del precio del petróleo y del gas. Como resultado de ello, la investigación sobre el uso de otros combustibles pasó a ser prioritaria para los países importadores de petróleo e impulsó los estudios de generadores de lecho fluido.

En 1973 comenzó en Estados Unidos el programa de investigación de tecnología de lecho fluido burbujeante a presión atmosférica. Una

investigación en profundidad fue iniciada por la Administración de Desarrollo e Investigación (ERDA) de Estados Unidos en 1976. La introducción de una póliza de regulación del consumo público hizo que comenzase la aplicación de la tecnología de lecho fluido en el ámbito industrial. Dicha póliza establecía que para uso público, se obtuviese la energía de sistemas de producción de potencia a menor escala como podrían ser los sistemas de energías renovables, o las centrales de cogeneración de potencia. Según algunos expertos, estas medidas dentro de los Estados Unidos, resultaron en un aumento de la capacidad instalada de lechos fluidos en el sector de producción, del cual el 90% era de lecho fluido circulante. Simultáneamente a los estudios de lecho fluido, se comenzó a estudiar la combustión en base de combustible fluido, así como sobre la licuación y la gasificación de carbón. En 1978 se fundó en Estados Unidos la Agencia de Protección Medioambiental que dio prioridad al uso de centrales que utilizaran la tecnología de lecho fluido sobre aquellas que usaban combustión convencional de carbón, debido a la menor cantidad de emisiones de las primeras. Algunos ejemplos de procesos para los cuales se utilizó esta tecnología son la gasificación de carbón, la extracción de pirita y sulfato de zinc o la rotura catalítica de hidrocarburos. La ventaja principal de la utilización de generadores en base de combustible fluido era que dichos generadores permitían la utilización de combustibles con alto contenido de azufre, sin que por ello se incumplieran las estrictas medidas medioambientales referentes a los gases de salida o emisiones.

Desde la crisis del petróleo de los años 70 no se ha parado de investigar para la mejora de todos los aspectos relacionados con los generadores de lecho fluido. En lo que sigue, comentaremos algunos de los cambios que se han ido introduciendo en la tecnología del lecho fluido y aquellos países que han realizado un mayor esfuerzo en su desarrollo.

En los primeros diseños de generadores en base de lecho fluido, el material inerte del lecho se encontraba en un régimen burbujeante de fluidización. En él, las partículas que forman el lecho se encuentran moviéndose de manera caótica, pero el lecho como tal permanece inmóvil y estacionario. Este tipo de lecho se llama lecho estacionario burbujeante o también lechos fluidos de primera generación. La difusión de la tecnología de lecho fluido burbujeante se inició en Estados Unidos con el uso de combustibles que no necesitaban alteraciones importantes en sus componentes básicos. Aunque esta tecnología empezó a dejar de utilizarse alrededor de 1990, cuando fue sustituida por la de lecho fluido circulante (ver

más adelante). En el año 2000 se construyó el último generador de lecho fluido burbujeante en Estados Unidos. A finales de los años setenta, se introdujo un nuevo tipo de lecho fluido, llamado circulante. En ellos el material inerte que forma el lecho se encuentra en régimen de fluidización rápida. Los sólidos viajan hacia la parte superior del generador, siendo separados por un ciclón y siendo devueltos a la parte baja del horno. Este tipo de diseño se llama también lechos fluidos de segunda generación. La investigación y desarrollo de los lechos circulantes se inició en Europa y fue financiada casi en su totalidad por industrias privadas. El primer diseño de la tecnología de lecho fluido circulante se desarrolló en Alemania a mediados de los años setenta. Casi simultáneamente se desarrollaron otros diseños similares en Suecia, Finlandia y Estados Unidos. En el mismo periodo, países de Europa del este, sobre todo Polonia y la República Checa, desarrollaron nuevas tecnologías que les permitió cambiar las antiguas instalaciones por plantas de quemado de lecho fluido circulante. Hay que decir que la tecnología de lecho fluido circulante tenía inicialmente como principal finalidad la cogeneración de energía. Se empezó a construir plantas de lechos circulantes para generación de potencia en 1985 y, aunque se construyeron un menor número de unidades que para la cogeneración, el aumento de la potencia instalada para ambas fue igual hasta finales de los años 90. En 1998, la capacidad instalada de lechos circulantes aplicados a la producción de potencia, comenzó a ser dominante por encima de aquella aplicada al campo de la cogeneración.

El interés de países como China o Alemania en seguir los pasos de Estados Unidos e Inglaterra en el desarrollo de la tecnología de lecho fluido reside en que sus tierras son ricas en carbón de bajo rango, con un alto contenido en azufre, por lo que disponían de abundantes reservas de este combustible para la obtención de energía. Finlandia, Suecia o Noruega también se interesaron en la tecnología de lecho fluido. Se puede considerar que su utilización comenzó en Finlandia durante los años ochenta y en Suecia y Noruega durante los noventa. Es de relevancia comentar que las regiones escandinavas se diferencian de los demás países que desarrollaron estas tecnologías en el combustible utilizado. Su objetivo era quemar combustibles como turba (carbón ligero que se forma en lugares pantanosos debido a la descomposición de restos vegetales) o residuos de madera o fangos. Dichos combustibles se obtenían como residuos de las grandes fábricas de papel (Fig (2)). A estas la tecnología de lecho fluido podía aportar una doble ventaja dado que, no solo se verían favorecidas por un

aporte extra de energía, sino que al usar los residuos de las mismas como combustible se ahorraban tanto el espacio necesario para almacenar los residuos, como parte del combustible utilizado para la producción. Por estas razones en Escandinavia se priorizó las centrales de lecho burbujeante que quemasen biomasa. Hay que tener en cuenta, además, que un impuesto sobre el contenido de carbón en combustibles impuesto en Suecia favoreció el uso de otro tipo de combustibles.



*Fig. (2) Fábrica de papel en Saugbrugs (Noruega)*

En China se iniciaron los estudios sobre combustión en lecho fluido en 1960. Dichos estudios se focalizaron en lechos burbujeantes. En 1980 había en este país más de 2000 reactores en base de lecho fluido burbujeante, aunque en su mayoría tenían una potencia muy baja, por debajo de los 10 MW<sub>e</sub>. Sin embargo, en años posteriores la mejora de los generadores en China fue más progresiva, y se desarrollaron generadores de lecho circulante. Los avances alcanzados pueden dividirse en varias etapas. La primera de ellas abarca la década de los años ochenta y durante la misma los avances fueron muy lentos. Se empezaron a utilizar lechos circulantes que, en realidad, se podrían considerar como lechos burbujeantes con un horno mayor y con separadores. La capacidad de estos primeros lechos circulantes estaba por debajo de las 75 ton/h debido a que la eficiencia de los separadores era demasiado baja para satisfacer el equilibrio del sistema de recirculación, lo que hacía que dichos generadores solo pudiesen operar en régimen burbujeante, o turbulento con una cierta cantidad de recirculación

de las cenizas. El segundo periodo comprende los años noventa y durante el mismo se realizaron grandes avances gracias a la financiación del gobierno chino de dichos estudios. Lo que se hizo fue modificar la mayoría de los lechos construidos durante el primer periodo para que se pudiera alcanzar el nivel de generación requerido, y la capacidad se aumentó hasta llegar a 130 ton/h. Se descartó el uso de los antiguos separadores, pasando a utilizarse nuevos ciclones con una eficiencia de colección mayor. El tercer periodo va desde el año 2000 hasta el 2005, durante el cual los generadores en base de lecho fluido circulante alcanzaron un cierto grado de madurez tecnológica, dominando las plantas de cogeneración en China. Aun así, aún faltaban ciertas mejoras que permitieran alcanzar las necesidades de las industrias de 100MWe y una eficiencia en la generación de más del 35%. Los investigadores chinos diseñaron sus propios lechos circulantes, haciendo ciertas mejoras a los lechos importados de otros países. Con ello, consiguieron adaptarlos para el quemado del carbón propio del país.

Como se ha mencionado anteriormente, en Europa se inició una rápida expansión de plantas que quemaban carbón como fuente de energía. Sin embargo esta expansión se vio frenada a principios de los años 90. De hecho, en el periodo 1990-2003 no se aumentó prácticamente la potencia producida por el quemado de carbón. Este hecho tiene su origen en los planes de reestructuración económica de la industria del carbón en Alemania. La ejecución de dichos planes en un primer periodo 1994-96, y, posteriormente, en un segundo periodo 1997-98, resultó en una disminución de las ayudas del estado a la producción de carbón de bajo rango. Esto se ha traducido en que la capacidad de producir energía eléctrica mediante la tecnología de lecho fluido circulante en Alemania ha aumentado sólo ligeramente desde entonces, gracias al quemado de biomasa (<20 MWe) y al quemado de carbón bituminoso (<50 MWe). Ello se debe a la existencia de subvenciones y ayudas (IEA) para la construcción de pequeñas plantas de quemado de biomasa.

Otra medida de regulación influyó también en la capacidad de producción de energía eléctrica mediante lecho fluido circulante en Estados Unidos. Se obligó a mantener la capacidad media de una planta instalada de lecho fluido circulante en menos de 100 MWe hasta el año 2000. Para entonces, la tecnología se habían desarrollado lo suficiente como para producir los 400 MWe netos. Hay que decir que en el mismo periodo en el que se ralentizó el aumento de la capacidad de energía eléctrica utilizando el lecho fluido burbujeante en Estados Unidos, en Asia y en Escandinavia se

comenzó a incrementar su capacidad por las razones indicadas anteriormente.

En cuanto al desarrollo general y a la comercialización, a nivel mundial, de la tecnología de lecho fluido, puede decirse que en 1970 la industria del aluminio y el papel utilizaban tecnología de lecho fluido burbujeante de menos de 100 MW<sub>e</sub> de potencia. Varias plantas piloto y de demostración se construyeron por fabricantes del sector de potencia en el periodo 1976-1986. La primera aplicación real de dicha tecnología para una potencia de más de 100 MW<sub>e</sub> ocurrió en 1986, cuando una planta de 117 MW<sub>e</sub> fue abierta en Burnsville (Estados Unidos). En esas fechas la mayor parte de las plantas operativas se encontraban entre los 25 y los 100 MW de potencia eléctrica. Puede decirse que la tecnología de lecho burbujeante se comercializó y utilizó más frecuentemente en el sector de la industria que en el sector público. El primer lecho fluido circulante que salió al mercado fue comercializado por la empresa Foster Wheeler y constaba de una potencia de 5 MW<sub>e</sub>. En el sector público el primer uso de lechos circulantes fue en 1985 con un hervidor de 90 MW<sub>e</sub> en Duisburg (Alemania). En 1985 los generadores de lecho fluido ya eran producidos por 54 empresas distintas. 21 de ellas habían comprado licencias y 12 ofrecían generadores de segunda generación (CFB). Sin embargo, existían ya 2 empresas que ofrecían lechos a presión (Asea PFBC AB, Suecia y Babcock Power Ltd., Alemania). Los generadores de primera generación, con lecho burbujeante estacionario, tenían capacidades desde 1 hasta 150 MW<sub>th</sub> (excepcionalmente se podía encontrar alguno que ofreciera 200 o incluso 600 MW<sub>th</sub>). Los generadores de lechos fluidos circulantes tenían potencias desde los 30 a los 400 MW<sub>th</sub> (con unas condiciones de vapor vivo de 135 bar y 540°C). En 1987 se podían encontrar hasta 65 lechos fluidos circulantes en operación y 45 más se estaban construyendo. 94 de ellos eran unidades productoras de vapor, con un consumo total de carbón de unas 12 800 ton/h. La unidad más grande tenía 110 MW<sub>e</sub> de potencia. Tres años más tarde ya había 112 generadores en base de lecho fluido circulante operativos, el mayor de los cuales producía 397 MW<sub>th</sub> con unas condiciones para el vapor vivo de 135 bar y 540 °C. [1]

En los años 1970-1990, se prestó gran atención a la tecnología de lecho fluido a presión (PBFC), con el objetivo de reducir las emisiones del proceso de combustión. Éste tipo de tecnología se basa en que la combustión tiene lugar en un lecho a presión elevada, y se combina con una turbina de gas y otra de vapor, configurando lo conocido como ciclo combinado.

Fue a principios de los años 70 cuando, a la vez que se utilizaba la tecnología de lecho fluido para reducir las emisiones de los sistemas convencionales de quemado de carbón, se vió la posibilidad de mejorar la generación de vapor utilizando para ello procesos en lecho fluido presurizado. En un principio, los parámetros de diseño incluían la refrigeración por aire, aunque la necesidad de nuevos materiales que soportasen más altas temperaturas los hizo irrealizables.

En 1980 se puso de manifiesto el hecho de que los bancos de tubos que estaban sumergidos en el lecho y los álabes de la turbina de gas en aplicaciones de ciclos combinados, sufrían tanto erosión como corrosión. Se hicieron estudios acerca del comportamiento en dichas condiciones presurizadas tanto de combustibles como de absorbentes, llegando como mejora a los procesos de gasificación del carbón dentro de dicha tecnología de PFBC. Una de las mayores ventajas que presenta la tecnología de lecho a presión es que la eficiencia de la planta se mejora de manera muy significativa con la misma, combinando el ciclo de vapor de Rankine con el ciclo de gas de Bryton. Esto se debe a que, al ocurrir el proceso a presiones muy grandes, los gases calientes a presión pueden accionar la turbina de gas mientras que el vapor que se genera en la caldera se destina al accionamiento de la turbina de vapor como se puede observar en la Fig (3).

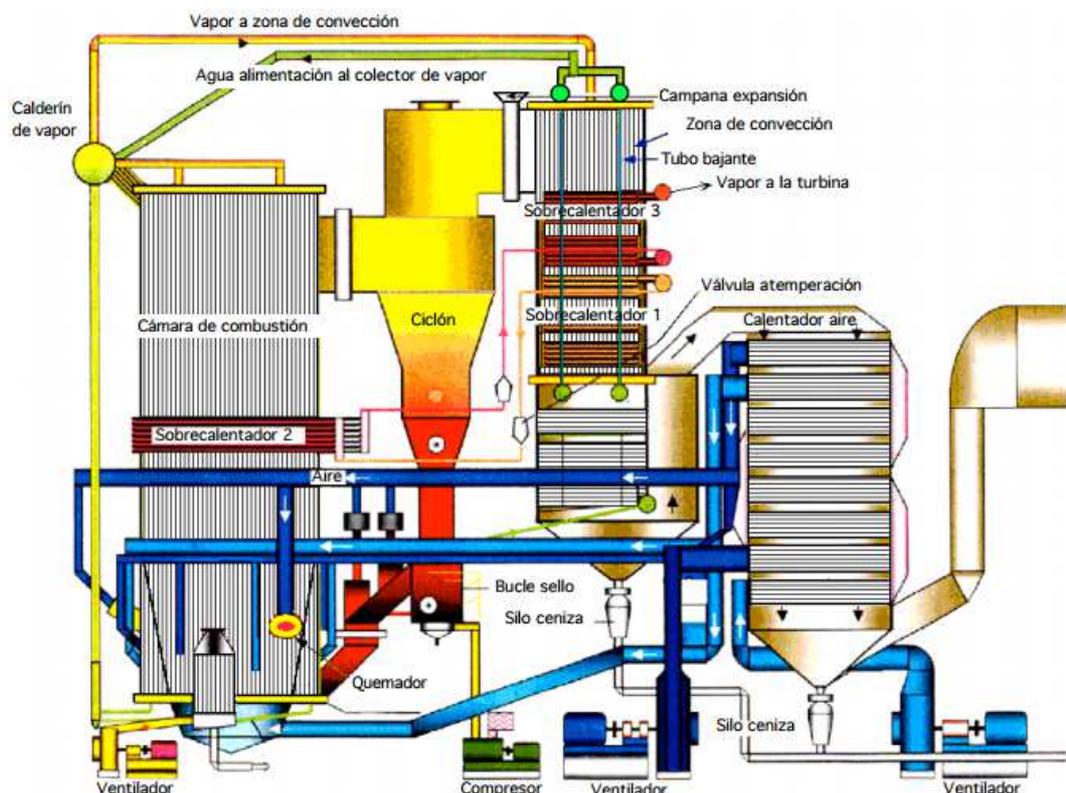


Fig (3) Proceso de combustión de lecho fluido a presión (PFBC)

Dentro del desarrollo de los lechos fluidos a presión se tienen dos generaciones. Los lechos de primera generación tenían eficiencias del orden del 40% y un consumo específico de 8500 Btu/KWh, lo que mejoraba los 9600 Btu/KWh de los lechos fluidos atmosféricos. La segunda generación de lechos fluidos a presión integrados en ciclos combinados tenían unos rendimientos del orden del 45% y un consumo específico de 7500 Btu/KWh.

Dentro de los lechos a presión, debido a la alta densidad correspondiente a los flujos de aire y humos, para un mismo flujo másico de aire se necesita una menor área del lecho fluido que en los generadores atmosféricos. De hecho, para un flujo de aire fijado, una unidad de lecho fluido presurizado burbujeante, operando a una presión de 1200 KPa y con una velocidad superficial de 0.9 m/s, necesitaría un 28% menos de área que un lecho fluido atmosférico burbujeante y hasta un 56% menos que un lecho fluido atmosférico circulante. Asimismo, la menor velocidad superficial del lecho reduce significativamente tanto la altura del mismo, como el espacio superior necesario. En la Figura (4) se puede apreciar la diferencia de tamaño entre los tres modelos antes mencionados.

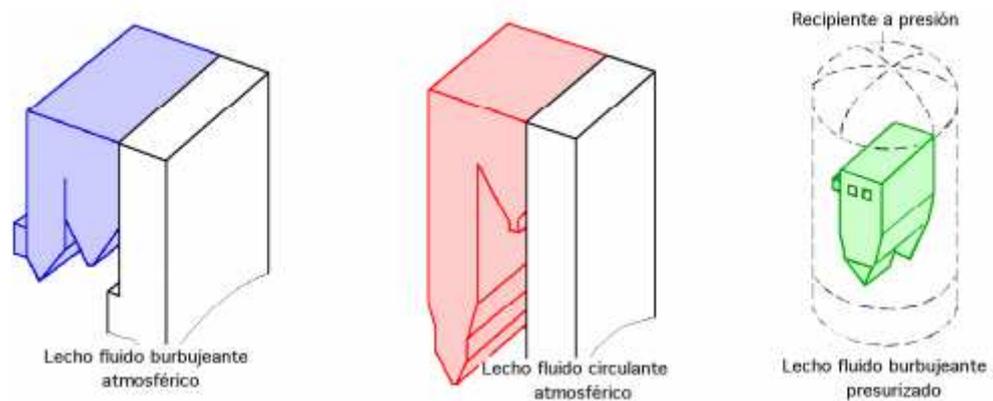


Fig (4) Comparación de tamaños entre tres tipos de lecho fluido

En la tabla (1) se representan los datos para los tres modelos de tecnología de lecho fluido antes mencionados, para una misma corriente de aire.

	<b>LFAtmosférico</b>	<b>LFCirculante</b>	<b>LFPresurizado</b>
<b>Presión</b>	1 atm	1 atm	12 atm
<b>Velocidad</b>	3 m/s	6 m/s	0.9 m/s
<b>Tiempo de residencia</b>	6 s	4,5 s	6 s

Tabla (1) Datos para los tres modelos de tecnología de lecho fluido

Conviene indicar que, a pesar de la necesidad de mejorar la eficiencia, el rango de combustibles utilizables y el coste de los equipos para que la tecnología de lecho fluido circulante siguiera siendo competitiva en el mercado y sus características como medio de producir energía eran muy interesantes. De acuerdo con Minchener *et al.* 1130, en el año 2000 se podían encontrar en el mundo numerosas instalaciones con tecnología de lecho fluido circulante con una capacidad térmica total cercana a los 65.5 GWth. La mayor parte de dichas centrales se encontraban en China, unas 830, que suponían unos 25 GWth de potencia producida. En general, las unidades instaladas en Asia representaban el 52% de la capacidad térmica total, seguidas por América del Norte, con un 26%, y en tercer lugar Europa, con un 22%. Engstrom y Pai indicaron que casi 300 proyectos de centrales con de lechos fluidos circulantes estaban operativas o en construcción en 1999 y para los lechos fluidos burbujeantes, aproximadamente 200 en el año 2002. Según Hupa, en 2003 el número de centrales con tecnología de lecho fluido burbujeante y de lecho fluido circulante instaladas en el mundo eran de unas 200 para las primeras, lo que suponía unos 15 GWth, y de unas 360 para las segundas, lo que implicaba unos 50 GWth. Se estima que para el año 2020 haya una producción de potencia mediante la tecnología de lecho fluido del orden de 150 GWth y que proceda, fundamentalmente, del quemado de carbón. La mayor parte de las centrales estarían localizadas en China (125 GWth), América del Norte (17 GWth) e India (6 GWth).

La OECD (Organización para la Cooperación Económica y del Desarrollo) y la IEA (Agencia Internacional de la Energía) estiman que la capacidad eléctrica generada mediante el quemado de carbón para el periodo entre 2003-2030 ascienda a unos 1400 GWe. Se espera que la mayor parte de las centrales se construyan en Asia (150 GWe), India y China (550 GWe). En relación con la capacidad de generar energía eléctrica mediante el quemado de biomasa y desechos, las estimaciones son de una producción de 70GWe, mediante el uso de la tecnología de lecho fluido burbujeante. La idoneidad de los lechos burbujeantes para quemar este tipo de combustibles podría resultar en un incremento a nivel mundial del uso de esta tecnología en los próximos años. Las previsiones de demanda de energía a nivel mundial de la mayoría de las fuentes de producción, son crecientes a corto y medio plazo. En el 2050 se espera que el uso de carbón para la producción de energía eléctrica sea primordial, sobre todo en los

países asiáticos en vías de desarrollo.

Para finalizar puede decirse que el interés que durante todos estos años ha despertado la tecnología de lecho fluido para la producción de electricidad, se debe a varios factores que supusieron una mejora respecto del uso de otros procesos de combustión. Las emisiones de  $\text{SO}_2$  pueden ser controladas sin necesidad de equipos adicionales y las emisiones de  $\text{NO}_x$  son mucho menores. Además, los generadores de lecho fluido son muy flexibles en relación al combustible utilizado, teniendo capacidad de quemar un amplio intervalo de combustibles sólidos con distintos rangos de poder calorífico, porcentaje de humedad y cenizas. En relación a estos últimos, el rango de combustibles usados en los lechos fluidos circulantes ha sido amplio desde un principio. Inicialmente se utilizó lignito y carbones bituminosos. Más tarde se usó antracita, carbón sub-bituminoso, coque de petróleo, biomasa y residuos. Aunque parece que el quemado de biomasa y residuos va cobrando importancia, el combustible más utilizado sigue siendo el carbón bituminoso.

### **Comportamiento de los lechos fluidos**

La fluidización como tal, es un método mediante el cual se mezcla un combustible determinado con aire, en una proporción definida, para realizar la combustión. Si se hace circular un gas a través de un lecho de sólidos, con dirección descendente, no tiene lugar ningún movimiento relativo entre las partículas si la orientación inicial de las mismas fuese inestable. Si el gas circula a través del lecho en dirección ascendente, la caída de presión a través del lecho será directamente proporcional a la velocidad de flujo, aumentando más rápidamente a grandes velocidades. Cuando la resistencia por rozamiento sobre las partículas es igual a su peso aparente (peso real menos empuje), estas sufren una reordenación para ofrecer una resistencia menor al desplazamiento del gas y el lecho empieza a expandirse. Este proceso continúa al ir aumentando la velocidad. La fuerza debida a la fricción iguala al peso de las partículas hasta que el lecho adquiere una forma más dispersa. Si entonces se aumenta aún más la velocidad, las partículas del sólido se mantienen en suspensión en la corriente gaseosa, y el lecho está fluidizado. Al valor de la velocidad superficial necesaria para que se inicie la fluidización (caudal de gas/sección total) se le denomina velocidad mínima de fluidización. Posteriores aumentos de la velocidad hacen que las partículas se separen aún más unas de otras, permaneciendo la diferencia de presiones aproximadamente igual al peso

por unidad de área del lecho.

La fluidización uniforme se obtiene únicamente a velocidades relativamente bajas. A velocidades elevadas se puede considerar que se forman dos fases separadas. La fase continua se denomina fase densa o de emulsión, y la discontinua, fase ligera o de burbujas. En este caso se habla de fluidización de agregación. El lecho toma el aspecto de un líquido en ebullición, los sólidos se mueven rápidamente y grandes burbujas ascienden a través del lecho. El gas en exceso sobre el correspondiente a la velocidad mínima pasa a través del lecho en forma de burbujas ("lecho de borboteo"). Cuando se aumenta el flujo del gas, su velocidad relativa a las partículas en la fase densa no varía apreciablemente. Es decir, el flujo relativo a las partículas puede continuar siendo laminar incluso a velocidades de flujo muy elevadas. Si el lecho es profundo y la velocidad del gas es alta tiene lugar la coalescencia de las burbujas, pudiendo fraccionarse el lecho. Esto resulta en la formación de tapones de gas que ocupan la sección transversal. Estos tapones de gas se alternarían con zonas de sólidos fluidizados que son transportados hacia arriba. Una vez se deshacen estos sólidos, caen de nuevo (lecho fragmentado). Si se sigue aumentando la velocidad, disminuye la densidad del lecho y las partículas pueden ser arrastradas. Esta velocidad máxima se denomina terminal o free-fall velocity. Cuando se alcanza esta velocidad la resistencia por rozamiento que el gas ascendente ejerce sobre una partícula se iguala a la fuerza de gravedad (peso efectivo).

Antes de abordar los fundamentos de los lechos fluidos, se va a considerar de forma concisa la combustión en general. La velocidad del proceso de combustión depende de la temperatura, de la concentración, del estado y distribución de los reactivos y de la turbulencia mecánica. Hay que tener en cuenta que todos aquellos factores que resulten en un mayor contacto entre las moléculas de los reactivos, favorecerán la combustión. Cuando aumenta la temperatura, se incrementa la velocidad del movimiento molecular, lo que resulta en un contacto más frecuente entre las moléculas y, con ello, en un aumento de la velocidad de la reacción. El número de choques entre las moléculas será proporcional a la concentración de los reactivos, por lo que un aumento de ésta hará más rápido el proceso. Por la misma razón, es de esperar que a mayor turbulencia mecánica aumente la velocidad de combustión, puesto que se favorece el contacto entre los reactivos. El estado y la distribución de los reactivos también son relevantes. Un combustible finamente dividido y distribuido

homogéneamente favorecerá el proceso de combustión. Hay que tener en cuenta que en el proceso de producción de vapor, los hornos aportan una conversión controlada y eficiente de la energía química del combustible a energía térmica. Dado que los factores antes mencionados afectan al rendimiento de esta conversión, su control es importante. A continuación se considerarán qué parámetros son más relevantes en los generadores en base de combustible fluido.

La principal característica de los generadores en base de combustible fluido, FCB, es que dentro del horno durante la combustión, se encuentran partículas de material inerte moviéndose. Además, en los FCB la combustión tiene lugar a temperaturas entre los 800-900°C, mientras que en generadores convencionales la combustión se produce a temperaturas del orden de 1000-1200°C. Esta diferencia de temperaturas supone una ventaja de los generadores en base de combustible fluido. Además, hay que tener en cuenta que en los FCB el intervalo de temperatura de trabajo se mantiene uniforme, debido a la gran cantidad de material inerte que se encuentra mezclado dentro del horno. Hay que tener en cuenta que se produce una transferencia de calor muy efectiva entre las partículas de dicho material, y entre estas y los gases de combustión. Esto favorece que las condiciones del horno se mantengan homogéneas.

### **Formación de burbujas en los lechos fluidos**

Se comprobó de manera experimental que la formación de burbujas en un lecho fluido se comporta de manera muy similar a la formación de las mismas en un fluido no viscoso. Cuando la velocidad a la que cruza el gas el lecho es muy baja, la frecuencia de formación de las burbujas y el tamaño de las mismas son función, principalmente, de la tensión superficial y de la fuerza de flotación que experimentan las burbujas. La inercia del líquido o fuerza de arrastre creada por las burbujas que viajan hacia arriba va ganando importancia a medida que aumenta la velocidad del gas. Es en este tipo de régimen cuando la formación de burbujas en el lecho fluido y aquella en un líquido no viscoso son más similares, dado que la tensión superficial en un lecho fluido puede considerarse nula. Cuando la velocidad del gas que sale de los orificios de impulsión es elevada, el momento de dicho gas puede resultar en la formación de chorros que, posteriormente, se dividirán en burbujas. [2]

Usando la analogía de la formación de burbujas en un líquido no viscoso, Davidson y Harrison (1963), derivaron ecuaciones para describir tanto la frecuencia de burbujas como su tamaño (volumen). Estos autores postularon que un lecho fluido gas-sólido se comporta como un continuo con una fase emulsionada o densa (partículas y gas intersticial) y una fase discreta de burbujas que transportan una parte del fluidizante mientras ascienden. La fase densa se supone que tiene el comportamiento de un fluido no viscoso e incompresible. En base a lo anterior, el volumen de las burbujas se puede obtener mediante la ecuación:

$$V_b = 1.378 \left( \frac{G^{1.2}}{g^{0.6}} \right) \quad (1)$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $G=(u_o-u_{mf}/U_{orf})$ , siendo  $u_o$  la velocidad superficial del gas a la entrada del distribuidor (caudal/sección total),  $u_{mf}$  la velocidad mínima de fluidización y  $U_{orf}$  el número de orificios por unidad de superficie del distribuidor por donde entra el gas. Conviene indicar que cuando el sistema gas+lecho llega al equilibrio dinámico, las burbujas alcanzan un diámetro medio.

A velocidades de gas altas, para las que el tamaño de las burbujas formadas es independiente de la viscosidad del lecho, la teoría del líquido no viscoso puede predecir de manera bastante precisa el volumen de las burbujas formadas en el lecho fluido con la ecuación (1). Sin embargo, a velocidades del gas más pequeñas, donde los efectos de la viscosidad son más importantes, dicha teoría predice unos tamaños más pequeños que los reales para las burbujas formadas. Por ello, para calcular el volumen de las burbujas a velocidades del gas relativamente bajas, se usa la ecuación (2), hallada por David y Schuler en 1960.

$$V_b = 1.378 * \left( \frac{G^{1.2}}{g^{0.6}} \right) \quad (2)$$

donde  $g$  y  $G$  tienen el mismo significado que anteriormente.

Se sabe que se producen pérdidas no despreciables a través de las burbujas hacia la fase de emulsión, sobre todo para partículas grandes. Nguyen y Leung en 1972 realizaron experimentos en un lecho de dos dimensiones, usando para ello una velocidad del gas de 1.2 veces la mínima de fluidización y encontraron que el volumen de las burbujas podría ser aproximado adecuadamente mediante la ecuación:

$$V_b = 0.53 * \frac{G}{f_n} \quad (3)$$

siendo  $f_n$  la frecuencia de formación de las burbujas.  $G$  tiene el mismo

significado que anteriormente.

En 1994 Yates *et al.* basándose en el tratamiento de la ascensión de burbujas dentro de lechos fluidos mediante imágenes digitales, propusieron que las burbujas están rodeadas por una región, emulsión, en la que la concentración de sólidos es menor que la existente en zonas de la emulsión que se encuentran alejadas de las burbujas. Esta región la denominaron "cáscara" o *shell*. La relación entre el volumen de gas en la burbuja y el volumen de la "cáscara" cumplen la ecuación:

$$V_s = 16 * V_b^{0.42} \quad (4)$$

donde  $V_s$  es volumen de gas presente en la "cáscara".

### **Unión de burbujas en lecho fluido**

Las burbujas que se forman en los lechos fluidos aumentan su tamaño debido, principalmente, a tres factores:

- La disminución de la presión hidrostática efectiva hacia la parte superior del lecho.
- Las burbujas pueden unirse a otras vecinas en dirección vertical.
- Las burbujas pueden unirse a otras vecinas en dirección horizontal.

El efecto de la presión hidrostática en la unión de las burbujas es, normalmente, pequeño y las burbujas suelen aumentar en tamaño debido, principalmente, a la unión de unas burbujas con otras. Hay varios modelos que describen el proceso de unión entre burbujas. A continuación consideraremos algunos de ellos.

Geldart descubrió en 1972 que para partículas de combustible tipo arena, su fluidización era independiente de su tamaño y de su distribución en el lecho. En este caso, el tamaño medio de las burbujas que se forman depende, fundamentalmente, del tipo de distribuidor de gas utilizado, de la distancia por encima de la placa de distribución ( $H$ ), y del exceso de velocidad del gas ( $U$ ) con respecto a la velocidad mínima que establece la condición de fluidización ( $u_{mf}$ ). Matemáticamente, se expresa este hecho como:

$$D_b = D_{bo} + K H^n (U - U_{mf})^m \quad (5)$$

siendo  $D_b$  el diámetro final de la burbuja,  $D_{bo}$  el diámetro inicial de las

burbujas (antes de la unión),  $K$  un parámetro experimental del orden de 1, y  $m$  y  $n$  parámetros hallados de forma experimental.

Otra de las teorías utilizadas habitualmente para tratar la unión de las burbujas en los lechos fluidos es la desarrollada por Mori y Wen (1975). Estos autores supusieron en su modelo que todo el gas que viaja a una velocidad mayor que la de mínima fluidización se dispone en una fila de burbujas que ascendería por la parte central del lecho. El diámetro medio de estas burbujas se puede calcular como:

$$D_{bm} = 0.652 * \left( A * (u - u_{mf}) \right)^{\frac{2}{5}} \quad (6)$$

En esta ecuación  $A$  es el área del lecho,  $u$  es la velocidad de las burbujas y  $u_{mf}$  es la velocidad mínima de fluidización.

En el caso de que el distribuidor sea de placa perforada, el diámetro inicial de las burbujas se puede calcular como:

$$D_{bo} = 0.347 * \left( \frac{A * (U - U_{mf})}{N_o} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (7)$$

donde  $N_o$  el número total de orificios de la placa perforada y el resto de las magnitudes tiene el significado indicado anteriormente. La validez de las ecuaciones anteriores fue comprobada para valores del diámetro de la burbuja y de la velocidad de mínima fluidización comprendidos entre los siguientes intervalos:

$$30 < D < 130 \text{ cm}$$

$$0.5 < U_{mf} < 20 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

La Figura (5) muestra el modelo propuesto por Darton *et al.* (1977) para la unión de las burbujas en función de la altura del lecho, válido para distribuidores de placa perforada.

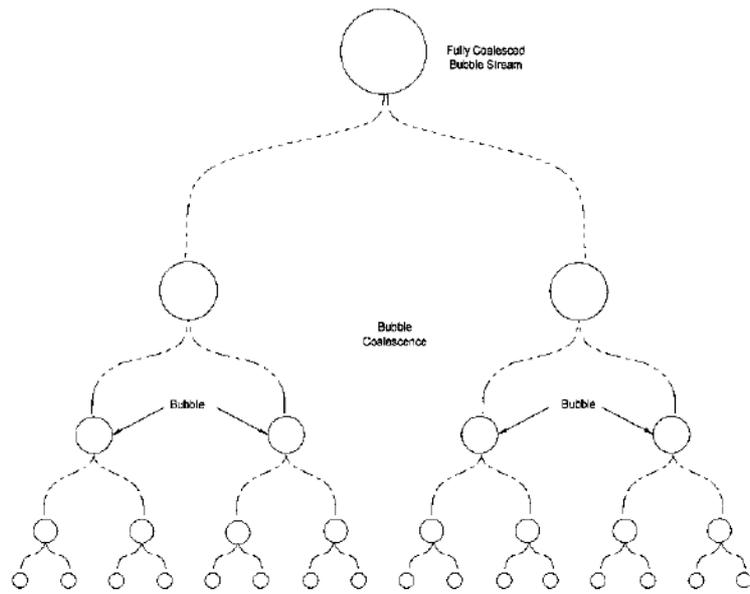


Fig. (5) Modelo de Darton para la unión de burbujas con la altura del lecho

Whitehead (1979) propuso un modelo para la unión de burbujas en lechos fluidos de grandes industrias, que se basa en considerar que el mecanismo de unión de las mismas es independiente del movimiento de los sólidos en el lecho. Whitehead dedujo un comportamiento patrón para la unión de burbujas y para la circulación de los sólidos y demostró que ambos dependen tanto de la profundidad del lecho, como de la velocidad del gas. Este comportamiento se puede observar en la Fig. (6) para partículas de combustible tipo arena, con placas de distribución de tipo industrial.

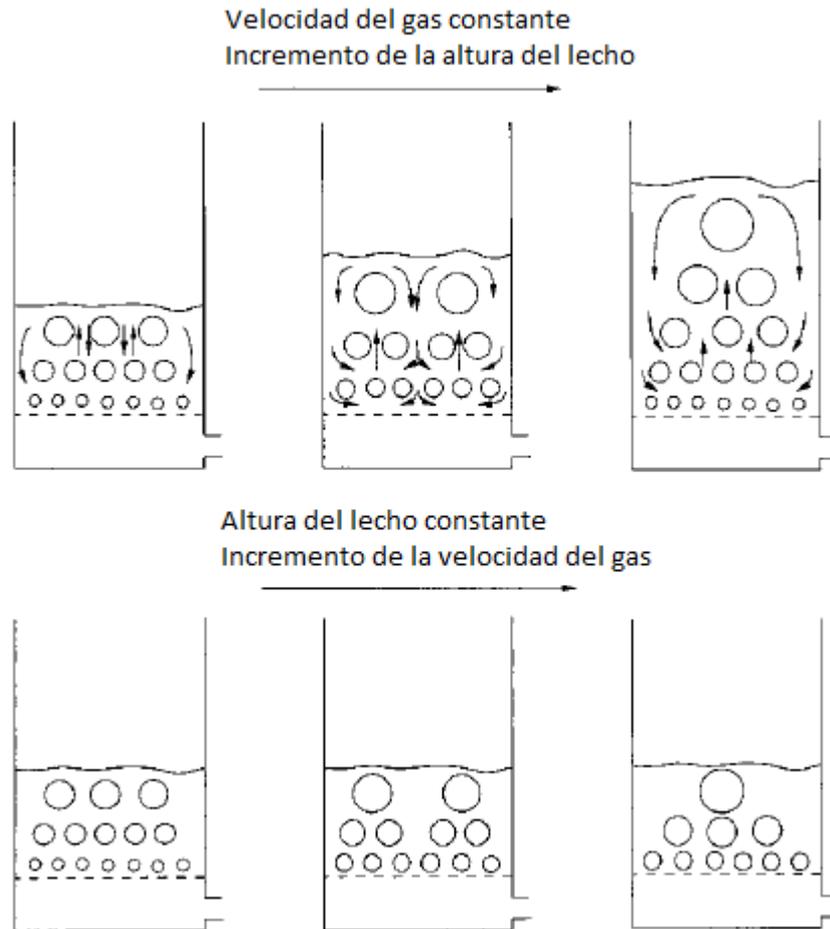


Fig. (6) Patrón de unión de las burbujas y circulación de los sólidos en grandes lechos industriales.

La unión de burbujas en lechos con orificios múltiples de entrada fue estudiada por Yates *et al.* (1995) usando partículas de combustible pequeñas y/o de baja densidad. El mecanismo de unión se investigó con tecnología de rayos x. Se encontró que:

$$h_c = 39.6 * \left( \frac{U}{U_{mf}} \right)^{-\frac{1}{3}} * l_s \quad (8)$$

donde  $h_c$  es la altura media sobre los orificios a la cual la unión de las burbujas se había completado y  $l_s$  es la distancia de separación entre orificios.  $u$  y  $u_{mf}$  tienen el significado habitual.

Hay otros tratamientos del mecanismo de unión de burbujas, aunque en este trabajo se han considerado los utilizados más frecuentemente. [3]

## Regímenes observados en el aire de entrada al lecho

Usando distintas configuraciones del lecho, diferentes materiales y distintas condiciones de operación se pueden observar diferentes regímenes en los lechos fluidos.

Cuando la velocidad del gas es baja, el material del lecho denso y el tamaño de partícula pequeño, la corriente de gas que entra por los orificios suele convertirse en burbujas justo a la salida de los mismos. Este fenómeno es similar al que se produce si se inyecta gas en un líquido. Tsukada y Horio (1990) estudiaron el comportamiento del movimiento de un gas, así como la formación de burbujas en el mismo, a la altura del dispensador de un lecho semicircular con pared transparente. Las observaciones experimentales les permitieron concluir que se formaban, fundamentalmente, dos regiones sobre la zona de dispensación (ver Figura (7)). Una de ellas, llamada "jet stream región", o región de corriente

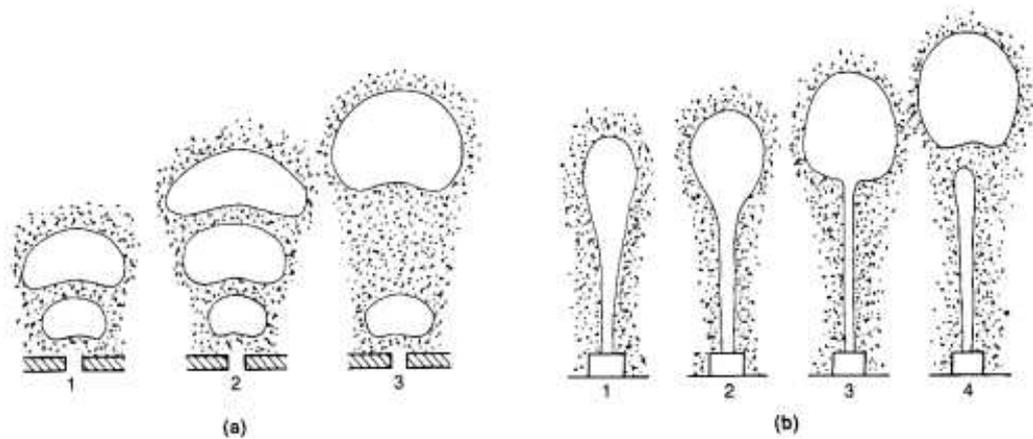


Fig (7) Formación de burbujas para bajas velocidades de salida (a) y altas velocidades de salida (b)

en chorro, se caracteriza por la existencia de flujos estables. La otra zona es en la que se forman las burbujas. La altura de la zona de formación de burbujas es del mismo orden de magnitud de la burbuja inicial. La fracción de la zona burbujante es mayor cuando el material del lecho está formado por partículas pequeñas en comparación con las que forman el combustible.

Cuando aumenta la densidad del gas, por ejemplo operando a alta presión, o bien cuando la corriente del gas tiene un momento alto, por ejemplo si es dirigida mediante transporte neumático en una línea que

contenga sólidos, la corriente que entra en el lecho se muestra como una pluma oscilante. Las burbujas se forman al final de la corriente, cuando el momento del flujo de la misma disminuye. Esta oscilación de la corriente fue observada por Knowlton y Hirsan (1980) en un lecho presurizado de un pie de diámetro, que operaba a una presión de 53 atm. Yang y Keairns (1978) también observaron esas oscilaciones cuando utilizaron esferas huecas de resina epoxi, o poliepóxido (polímeros termoestables), de densidad en torno a 210 Kg/m<sup>3</sup> en un lecho fluido a presión atmosférica de 1 pie de diámetro. Las mismas observaciones experimentales fueron realizadas por Kececioğlu et al. (1984) en un proceso de transporte de sólidos a chorro.

Otros tipos de corrientes, llamadas permanentes, han sido observadas principalmente en lechos bidimensionales, como se muestra en el trabajo de Kozin y Baskakov (1967), Zenz (1968) y Wen et al. (1977). También fueron observados por Yang y Keairns (1980) en lechos fluidos semicirculares con partículas de combustible tipo grava, grandes y/o pesadas.

Teniendo en cuenta las observaciones realizadas por los distintos investigadores, se puede concluir que hay diferentes parámetros que pueden influir en la forma y el tamaño de la corriente de gas que entra en el lecho. Se pueden destacar las características del material del lecho (tamaño de las partículas, densidad de las mismas y en cierta medida la distribución según su tamaño), la densidad del gas, la velocidad a la que sale el gas del orificio dispensador, la cantidad de sólidos adheridos a la corriente de gas, y la configuración del lecho.

## **Clasificación de las partículas de fluidización**

Cuando las partículas de combustible entran en el lecho fluido, se distribuyen en el interior del horno. La uniformidad de su distribución depende de la densidad y del tamaño de las partículas, así como de la porosidad del lecho y de la uniformidad de la fluidización. Conviene indicar que para ciertos combustibles no se alcanza la uniformidad en el interior del horno, de forma que la combustión sólo se produce en la mitad alta del lecho o en la superficie del mismo. Aún así, hay que destacar que en todo momento, las partículas de combustible están chocando constantemente con las partículas de inertes y en contacto con el aire que aporta el oxígeno para la combustión. Esto es importante porque cuando una partícula de combustible entra en un FBC, su temperatura es baja. Sin embargo, sus

choques con las partículas de inertes, que se encuentran a la temperatura del horno (800-900°C), posibilitan que de forma efectiva las partículas de combustible alcancen su temperatura de ignición, pudiendo así comenzar el proceso de combustión. A continuación pasaremos a describir cómo se produce este proceso de transferencia de calor entre los inertes y el combustible.

Desde el momento que una partícula de combustible entra en el lecho de partículas inertes calientes, ésta sufre una serie de cambios físicos, químicos y fisicoquímicos. Es complicado hacer un estudio de cada uno de estos cambios por separado debido a que suelen ocurrir de manera simultánea. Debido a la gran diferencia de temperatura existente entre las partículas que forman el lecho y las de combustible que se introducen, la temperatura de éstas últimas se incrementa rápidamente nada más entrar en el horno. Cuando la temperatura alcanza los 100°C un proceso de evaporación y desecación comienza a producirse. Conforme la temperatura sigue subiendo, se produce una degradación térmica de los hidrocarburos, acompañada de la expulsión de volátiles. Esta expulsión comienza alrededor de los 450° C. La expulsión de humedad y volátiles puede causar la fragmentación de las partículas de combustible, debido a que los gases se pueden producir en el interior de las mismas. Si los poros de la partícula de combustible no son capaces de permitir que los gases formados salgan de su interior, el aumento de presión interna hará que dicha partícula se fragmente en muchos pedazos. En la (Fig.(8) ) puede verse un esquema de los cambios que sufre una partícula de combustible en el lecho.

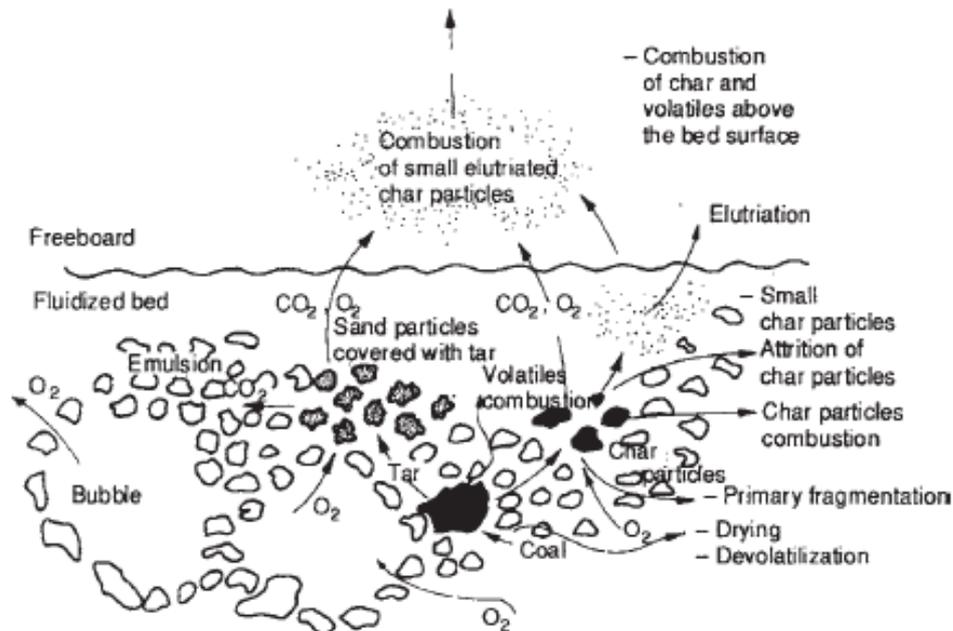


Fig. (8) Combustión de partículas de carbón en un lecho fluido

Es interesante indicar que el coeficiente de transferencia del FBC a partículas de combustible de 5-10 mm de diámetro es del orden de  $300 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Para una diferencia de temperatura entre el horno y las partículas en torno a  $800^\circ\text{C}$ , la transferencia de calor a la superficie de las mismas es de  $240 \text{ KW/m}^2 \text{ K}$ . Las partículas de combustible utilizadas pueden tener, en muchos casos, un diámetro de unos 50 mm. Por ello, el flujo de las partículas de combustible se calienta a una velocidad de  $100^\circ\text{C/s}$ . La desvolatilización del combustible va a depender del tipo de carbón y del tamaño de sus partículas y suele durar de 10-100 s.

Es interesante considerar en mayor profundidad algunos parámetros que afectan a la transferencia de calor en el lecho. El tamaño de las partículas de combustible ya ha sido mencionado en el párrafo anterior. Las partículas pueden en función de su tamaño en cuatro grupos, según la clasificación de Geldart, que está basada en observaciones del comportamiento de un lecho en condiciones de temperatura y presión ambientales. Estos cuatro grupos tienen distintos comportamientos de fluidización, lo que hace que puedan ser distinguidos claramente. No obstante, se debe tener en cuenta que la operación a temperaturas y presiones por encima de la ambiente puede suponer que una partícula, en concreto, muestre un comportamiento típico de un grupo diferente al que realmente pertenece.

El **grupo A** está formado por partículas con tamaños entre 30 y 100  $\mu\text{m}$ . Al ser fluidizadas por aire en condiciones ambiente muestran un estado de fluidización no burbujeante. Son partículas aereables, de baja densidad, que flotan con facilidad y fluidizan con facilidad, sin que se formen muchas

burbujas, incluso cuando la velocidad del gas es elevada.

El **grupo B**, corresponde a partículas con tamaños comprendidos entre 100 y 1000  $\mu\text{m}$ , tipo arena. Fluidizan bien con un fuerte borboteo y burbujas de gran tamaño.

El **grupo C** incluye partículas con tamaños menores de 30 $\mu\text{m}$ . Son partículas muy finas y cohesivas (polvos), que no son capaces de fluidizar en sentido estricto. Las fuerzas entre partículas son grandes comparadas con las fuerzas de inercia debidas al gas de fluidización. Así, las partículas no son capaces de alcanzar la separación necesaria y la fluidización como tal no se produce. Sin embargo, la fluidización se puede conseguir con la ayuda de agitadores mecánicos o mediante vibración.

El **grupo D** incluye partículas de tamaños mayores de 1000  $\mu\text{m}$  (piedras o gravas). Se caracterizan por formar lechos de chorro estables, lo que en inglés se llama spoutable, de ahí el nombre dado a las partículas de este grupo en la clasificación original. La desventaja de este grupo es que al tener tamaños mayores se necesitan grandes flujos de aire para conseguir la fluidización.

En la ( Fig. (9)) se puede observar una gráfica en la que aparecen los cuatro tipos de partículas y se representa el diámetro de las mismas en función de su densidad. En la Tabla (2) se explica la clasificación de Geldart de acuerdo con diversas características de las partículas y otros aspectos relativos a su fluidización.

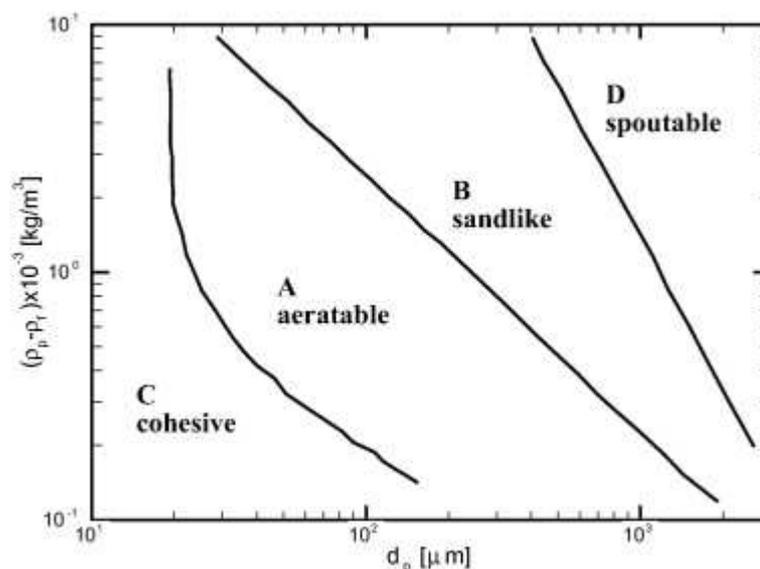


Fig.(9) Clasificación de Geldart sobre las propiedades de las partículas

	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Características principales	Ideales para fluidización Muestran un rango de no burbujeo	Comienzo del burbujeo a $U_{mf}$	Cohesivas, dificultad para fluidizar	Tamaño elevado
Partículas típicas	Catalizadores de craqueo	Arena de construcción	Harina Cemento	Grava Granos de café
Expansión del lecho	Alta	Moderada	Baja por aparición de canales	Baja
Velocidad de desaireación	Lenta, lineal	Rápida	Inicialmente rápida, luego exponencial	Rápida
Propiedades de burbujas	Formación y coalescencia de burbujas hasta tamaño máximo	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite	No hay burbujas, sólo canales	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite
Mezcla de partículas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Mezcla de gas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Aparición de chorros	No	Sólo en lechos poco profundos	No	Sí, incluso en lechos profundos

Tabla (2). Clasificación de Geldart atendiendo al comportamiento de las partículas

Asimismo, la densidad de sólidos suspendidos en el lecho generalmente es un factor de influencia en la transferencia de calor.

### **Ventajas de la tecnología de lecho fluido**

Los métodos de combustión en base de lecho fluido tienen varias ventajas desde el punto de vista medioambiental. La primera podría ser el hecho de que el dióxido de azufre puede ser eliminado sin necesidad de un extrusor adicional, simplemente añadiendo piedra caliza al lecho. El dióxido de calcio formado, debido a la calcinación de la piedra caliza, reacciona con el dióxido de azufre creando sulfato cálcico. Este compuesto es fácilmente extraíble de la corriente de gases de salida usando un dispositivo de extracción, por lo que no supone ninguna limitación o desventaja.

Otra de las ventajas de la combustión en base de lecho fluido, que ya se mencionó anteriormente, es la diferencia de temperatura de trabajo en relación con la utilizada en los sistemas convencionales. Estos últimos trabajan a temperaturas del orden de 1000-1200°C, mientras que en el lecho fluido la temperatura se sitúa en el intervalo 800-900°C. Hay que tener en cuenta que el hecho de trabajar a temperaturas más bajas hace que la concentración necesaria de piedra caliza para eliminar el dióxido de azufre sea menor, ya que a menores temperaturas la formación de éste último disminuye. Por otra

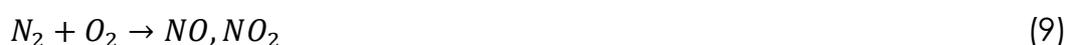
parte, al trabajar a temperaturas más bajas, no suele superarse la temperatura de fusión de las cenizas, lo que evita los problemas de fouling encontrados en los generadores de carbón pulverizado. Por último, al ser la temperatura del calderín menor que en otros sistemas de combustión, la reacción entre el nitrógeno del aire y el oxígeno para dar NO<sub>x</sub> durante la combustión se da en menor medida, reduciéndose así de forma significativa las emisiones de NO<sub>x</sub>. Esto supone una gran ventaja dado que la contaminación del medio ambiente disminuye sustancialmente.

Conviene indicar que el fouling, al igual que el slagging, son dos mecanismos de deposición de cenizas en las superficies de intercambio de calor dentro de un horno. El slagging se define como la formación de depósitos derretidos o parcialmente líquidos de cenizas en las paredes del horno o en superficies convectivas expuestas a calor radiante. El fouling se define como la formación de depósitos de cenizas en superficies de convección, como pueden ser los recalentadores. El fenómeno de fouling está causado generalmente por la vaporización de los elementos inorgánicos volátiles presentes en el carbón durante la combustión. Cuando el calor es absorbido para bajar la temperatura del horno y las zonas convectivas del mismo se enfrían, los compuestos formados por dichos elementos inorgánicos volátiles condensan en forma de partículas de ceniza en las superficies de transferencia, formando una especie de pegamento que dificulta la transferencia de calor. [4]

Es interesante discutir brevemente tanto la formación de óxidos de nitrógeno, por su impacto medioambiental, como la descomposición del sulfato de calcio.

Los óxidos de nitrógeno en los gases de combustión a la salida del reactor pueden proceder tanto del nitrógeno orgánico presente en el combustible, como de la oxidación del N<sub>2</sub> del aire. La cantidad de emisiones de NO<sub>x</sub> en un determinado lecho depende de la temperatura del mismo, del tiempo de residencia de las partículas y del exceso de aire que se introduce en el generador.

Las emisiones de NO<sub>x</sub> se pueden producir cuando la temperatura es elevada mediante la reacción:



Las emisiones de NO<sub>x</sub> no se producen en cantidades significativas hasta que la temperatura de combustión alcanza ciertos valores, del orden de los 1100 °C. Sin embargo, una vez alcanzado este umbral, la cantidad de

óxidos de nitrógeno emitidos crece de manera exponencial con un aumento de la temperatura. Uno de los factores que afectan a la temperatura de la combustión es el precalentamiento del aire de alimentación, aumentando la temperatura de la combustión de manera proporcional al mismo.

El exceso de aire en el interior del reactor también influye en las emisiones de NO<sub>x</sub>. Cuando el exceso de aire no es grande, la reacción de combustión no transcurre con un exceso significativo de O<sub>2</sub> durante la fase de desvolatilización, por lo que las emisiones no son excesivamente importantes dado que no hay suficiente oxígeno para la formación de los NO<sub>x</sub>. Cuando se aumenta el exceso de aire se encuentra que, en un principio, también aumentan las emisiones de óxidos de nitrógeno. Sin embargo, si se sigue incrementando dicho exceso, se encuentra una disminución de las emisiones de NO<sub>x</sub> debido a que se produce una disminución de temperatura dentro del reactor debido a la presencia del exceso de aire (ver la Figura (10)).

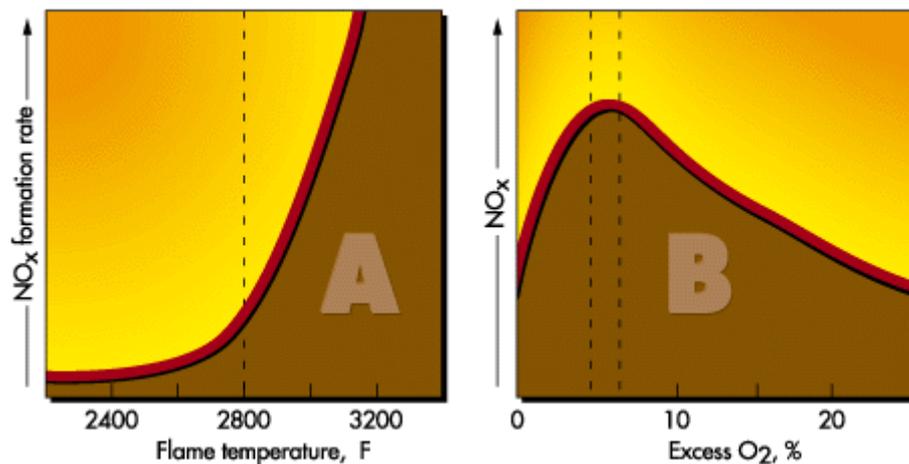


Fig. (10) Variación de las emisiones de NO<sub>x</sub> con la temperatura y el exceso de aire

La descomposición térmica del sulfato de calcio, producida a más de 1200 °C, se puede describir mediante la reacción:



En una atmósfera rica en carbón, el papel del monóxido de carbono será dominante. La interacción de éste con el sulfato de calcio quedaría descrita por las siguientes ecuaciones:



La primera de ellas es endotérmica, con una entalpía de reacción de  $\Delta h = 181.6 \text{ KJ/mol}$ , y la segunda exotérmica, con una entalpía de reacción de  $\Delta h = -202.5 \text{ KJ/mol}$ . El hecho de que la temperatura de la combustión en base de lecho fluido sea menor que en los generadores convencionales supone que la primera reacción es menos probable, por lo que se evita la descomposición no deseada del sulfato de calcio.

## **CLASIFICACIÓN DE LECHOS FLUIDOS**

### **EN FUNCIÓN DEL TIPO DE ALIMENTACIÓN**

Los generadores en base de combustible fluido se pueden clasificar en función del tipo de alimentación. Dentro de los quemadores en lecho atmosférico se puede distinguir dos tipos de alimentación del combustible, aquella que se realiza sobre el lecho y la que, en contraposición, se lleva a cabo bajo el mismo.

En la alimentación sobre lecho, los dispensadores se utilizan para distribuir combustible sobre el mismo. Este tipo de alimentación es menos compleja que la de bajo lecho y minimiza la erosión y entaponamiento en el dispensado. Sin embargo, presenta ciertas desventajas, como es el hecho de que se pueda producir combustión parcial sobre el lecho. Esto reduce la oportunidad de atrapar los óxidos de azufre que se producen. Para intentar mitigar este problema, el tamaño de las partículas de combustible se limita a 3 cm, como máximo. No obstante, incluso con restricciones del combustible y un sistema de reciclado de ceniza, la eficiencia de estos sistemas de alimentación es menor que aquella del de bajo lecho.

Los sistemas que utilizan una alimentación bajo lecho usan normalmente transporte neumático para dispensar el combustible y la caliza al combustor. Es por ello que el tamaño de las partículas de combustible está limitado al intervalo 0.6-1.2 cm, dado que así se facilita su transporte, pudiéndose introducir por pequeñas cavidades dispuestas justo encima del distribuidor de aire. Con alimentación bajo lecho, las partículas más pequeñas pueden combustionar totalmente, la eficiencia de la combustión y la captura de los óxidos de azufre producidos en la misma también son mejores que en el caso de alimentación sobre lecho. Una de las desventajas de este sistema de alimentación es el hecho de que la erosión y la posible colmatación del lecho se incrementan y se necesitan muchos dispensadores. Para conseguir una buena distribución del combustible, es necesario

disponer de un dispensador por cada 0.3-1.9 m<sup>2</sup> de área de lecho. Otra desventaja reside en la necesidad de trituradoras y secadores que permitan controlar tanto el tamaño de las partículas de combustible, como la humedad que contienen. Hay que tener en cuenta que la cantidad de humedad en el combustible de alimentación está limitada al 6% para evitar la colmatación del lecho. Pese a que la alimentación bajo lecho tenga una mejor eficiencia que la de sobre lecho, conviene indicar que es más compleja y necesita de un mayor mantenimiento.

### **EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL AIRE**

La velocidad a la que viaja el aire o gas por dentro del generador es un parámetro cuyo conocimiento es indispensable para conocer el funcionamiento del mismo. Ello se debe a que conforme sube la velocidad del gas, más partículas viajan con la corriente y más "fluido" se podría decir que es el lecho. Es por ello que los generadores pueden clasificarse en función de la velocidad del aire o gases en su interior, así como de la presión a la que se encuentre el horno. En lo que sigue nos ocuparemos de la clasificación en función de la velocidad.

Vamos a partir de considerar la velocidad mínima de fluidización ( $u_{mf}$ ), que es aquella velocidad que si es superada por el aire, se puede considerar que el lecho es fluido. Si la velocidad del gas es menor que la mínima de fluidización, el lecho se considerará fijo. Una vez que la velocidad de dicho gas alcanza la velocidad mínima de fluidización, se podrá considerar que el lecho es fluido. Para velocidades mayores que la mínima de fluidización, cuando comienzan a aparecer burbujas, se tienen los lechos fluidos burbujeantes. Una vez que se supera la velocidad terminal de las partículas, el lecho deja de tener una superficie homogénea y definida, este tipo de lecho se denomina turbulento. Por último, para velocidades del gas mucho mayores que  $u_{mf}$ , se produce un arrastre de los sólidos fuera del lecho y estos se denominan circulantes. Se puede definir un parámetro  $R$ , que sería el cociente entre la cantidad de sólidos recirculados y aquella que se introduce en el reactor, para los lechos fluidos circulantes, este parámetro varía entre 1 y 20; mientras que para el resto de lechos descritos varía entre 0 y 1.

La clasificación en función de la velocidad del gas puede realizarse de otra manera, en base a la clasificación de Geldart para las partículas, que fue descrita con anterioridad. Así, para las partículas de los grupos B y D, (burbujeantes y spoutables respectivamente), el lecho pasa de ser fijo a ser

burbujeante cuando la velocidad del gas aumenta por encima de la velocidad mínima de fluidización del sistema ( $U_{mf}$ ). Para las partículas del grupo A, aquellas que pueden ser aireadas, no se observará formación de burbujas, sino que el lecho se expandirá de manera homogénea. En este caso las burbujas solo aparecerán cuando la velocidad del gas aumente por encima de la mínima velocidad de burbujeo. Así, la transición entre el régimen de lecho fijo y el burbujeante se produce a la velocidad mínima de fluidización para los grupos B y D, y para el grupo A será la velocidad mínima de burbujeo.

A continuación se hará una breve descripción de la transición entre régimen burbujeante y turbulento. Cuando la velocidad del gas se incrementa, las burbujas crecen debido a que burbujas pequeñas se fusionan entre ellas creando burbujas de mayor tamaño. Esto hace que el lecho se transforme en uno al vacío, si el diámetro del mismo es pequeño y el diámetro de las partículas grande, o en un lecho de flujo turbulento, si el diámetro del lecho es grande y el diámetro de las partículas pequeño. El régimen al vacío consta de burbujas de aproximadamente  $2/3$  del diámetro del lecho, en este caso el lecho entraría en régimen de vacío con grandes fluctuaciones de la presión, que coincidirían con la frecuencia de formación de las burbujas. Es por ello, que si se midiese la desviación estándar de las fluctuaciones en la presión y se representase en función de la velocidad de fluidización superficial, se encontrarían dos velocidades características. La primera velocidad, denominada como  $U_c$  corresponde al lecho en régimen de vacío en el cual las fluctuaciones son máximas debido a que el tamaño de las burbujas es el mayor. Si se siguiese aumentando dicha velocidad, se llegaría a la segunda velocidad encontrada  $U_k$ , para la que las grandes burbujas se habrían roto en burbujas de menor tamaño con, por tanto, menor fluctuación de presiones. Dicha velocidad es una referencia para el régimen de transición entre el lecho burbujeante y el turbulento. A continuación, y una vez hecho el análisis de transición de unos regímenes a otros, se procederá a describir cada régimen en mayor profundidad. [5]

### **Sistemas de combustión en base de lecho fluido burbujeante**

La Fig. (11) representa una caldera en base de lecho fluido burbujeante. Como corresponde con la tecnología de combustión de lecho fluido, en la parte inferior del horno, sobre la bandeja de distribución, hay un lecho fluido de material inerte dividido en partículas. El aire necesario para

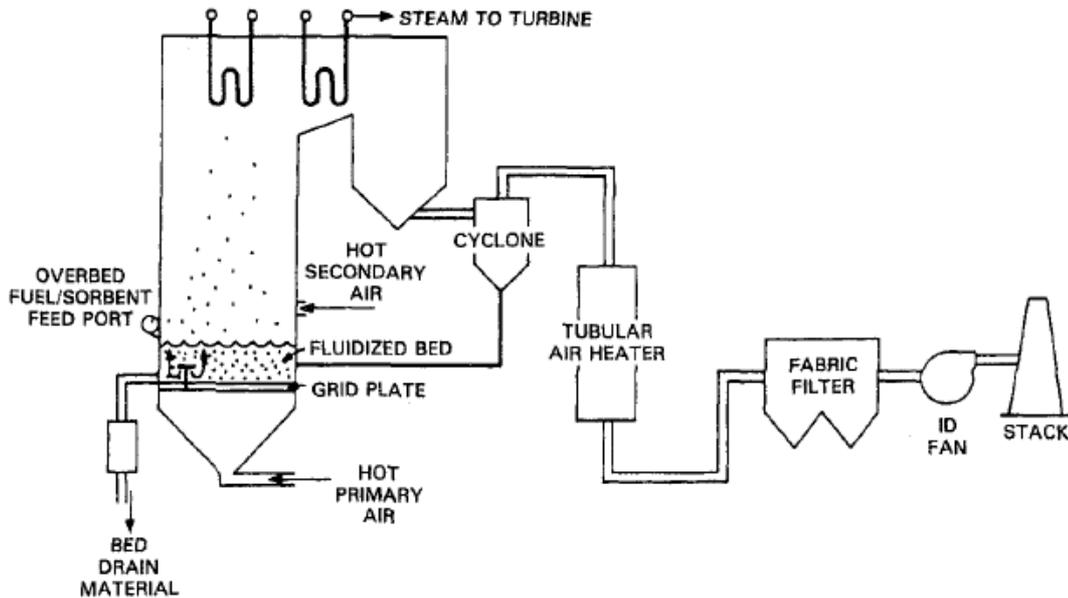


Fig.(11) Caldera en base de lecho fluido burbujeante

que se cree la combustión entra por la bandeja de distribución a una velocidad mayor que la mínima de fluidización, fluidizando así las partículas del lecho de material inerte. La velocidad del aire es menor que aquella necesaria para transportar las partículas, por lo que el lecho tiene una superficie horizontal perfectamente definida. El quemado de combustible se produce, por tanto, en este lecho fluido de material inerte. [6]

Como se ha visto con anterioridad, existen dos maneras posibles de alimentar con combustible al lecho, sobre la superficie del mismo o bajo ella. Para carbones ásperos y reactivos, con solo una reducida cantidad de partículas de pequeño tamaño, se usa la alimentación y separación del combustible sobre el lecho. De esta forma se consigue la distribución del combustible sobre una mayor área de la superficie del lecho. Por el contrario, para partículas de carbón de entre 3 y 6 mm o menos, se suele usar la alimentación bajo lecho. La caliza para la desulfuración se introduce de igual manera que el combustible, incluso algunas veces se introduce con el mismo carbón. Los sistemas de lecho fluido burbujeante se usan principalmente para potencias de unos 25 MW<sub>e</sub>, suelen tener una eficiencia térmica en torno al 30%.

Los generadores en base de lecho fluido burbujeante pueden quemar combustibles con un 60% de humedad y hasta un 70% de cenizas, aquellos con una capacidad de quemado baja, residuos carbonosos de la

producción de carbón de alta calidad, biomasa de distintos orígenes, residuos domésticos, etc. La temperatura de combustión es baja, de 800-900°C y más baja que aquella a la que funden las cenizas, por lo que los fenómenos de slagging y fouling se evitan. Además, el carbón se puede quemar sin tener excesiva preparación anterior, lo que simplifica y abarata los mecanismos de este tipo de reactor.

Sobre el lecho en los generadores de lecho fluido burbujeante se puede encontrar una zona de combustión libre con una concentración de partículas sólidas muy pequeña, donde se continúa la combustión de pequeñas partículas de combustible y de volátiles. La energía perdida por los sólidos que no han sido quemados, y que acompañan a los gases de salida, se puede reducir utilizando para ello un sistema de recirculación que las devuelve a la caldera para repetir el proceso de combustión. Este es el avance que presentan con respecto a los lechos fluidos burbujeantes, los circulantes, de los que se hablará más adelante. [7]

### **Emisiones en lechos fluidos burbujeantes**

La eliminación del  $\text{SO}_2$  de los productos de combustión durante esta, mediante la adición de caliza al lecho, es una de las mayores ventajas que presentan los lechos burbujeantes. Mediante la reacción de la caliza con el  $\text{SO}_2$ , este último se convierte en un producto inerte y sólido, que no es contaminante. Esta metodología supone una ventaja importante, ya que no existe una maquinaria específica para la desulfuración de los gases de combustión. El grado de desulfuración depende de dos parámetros fundamentales, los parámetros operacionales y las características de la caliza. Los parámetros operacionales que afecta a la desulfuración incluyen las condiciones de combustión, el ratio molar de Ca/S en la caliza, el diseño del quemador y la temperatura del lecho.

Los esfuerzos para conseguir la mejor eficiencia posible en la combustión aseguran también una disminución de las emisiones de CO, lo que es lo mismo que una reducción de las pérdidas debido a combustión incompleta. La concentración de CO en los gases de combustión depende de la temperatura de la misma, el exceso de aire, la cantidad de partículas de combustible que no se han quemado, el contenido de volátiles en el carbón y, quizás uno de los parámetros más significativos, de la intensidad del mezclado dentro del generador. El estudio más detallado de la influencia

de las condiciones de combustión en las emisiones de CO fue llevado a cabo en una planta de 4 MWth en Apeldoorn, Holanda. [8]

### **SISTEMAS DE COMBUSTIÓN EN BASE DE LECHO FLUIDO TURBULENTO**

Como se ha mencionado anteriormente en relación con la clasificación de los sistemas de lecho fluido en función de la velocidad del gas que atraviesa el lecho, cuando las rotura de las grandes burbujas que definen el régimen burbujeante comienza a dominar el lecho, se dice que se está produciendo la transición de burbujeante a turbulento. El lecho tiende a homogeneizarse y es desprovisto de grandes burbujas. De manera ocasional se pueden formar grandes burbujas, las cuales viajarían hacia arriba dentro del generador hasta desaparecer. Lo mismo ocurre con régimen de vacío. Puede producirse vacío en ciertas ocasiones, pese a que esté reinando el flujo turbulento, aunque este vacío desaparecería al poco tiempo. Según se puede ver en los estudios experimentales acerca de este régimen de cambio, la transición del régimen burbujeante al turbulento presenta grandes oscilaciones de la presión. [9]

El régimen turbulento dentro del lecho se mantiene desde la velocidad de  $U_k$ , la cual ha sido descrita con anterioridad como la que determina la rotura de las grandes burbujas, hasta aquella denominada velocidad de transporte  $U_{tr}$ , a partir de la cual el número de partículas que salen del lecho aumenta de manera brusca. En el régimen turbulento, pese a que la salida de partículas es mayor que en el burbujeante, la densidad del lecho es grande, lo que significa que queda definida la superficie del lecho, aunque no tan definida como en el caso del régimen burbujeante. En la Fig.(12) se puede apreciar el paso de régimen burbujeante al turbulento. [10]

La concentración de sólidos sobre el lecho disminuirá con la altura hasta que se alcance un valor fijo. Debido a la velocidad del gas a su paso por el lecho, éste empezará a estar formado por dos capas, una con las partículas más pequeñas que serán arrastradas por la corriente de gas, y otra con conjuntos de partículas adheridas unas a otras formando el lecho sólido. Pese a que conste de dos fases, se podría decir que se hace más homogénea. La interacción entre partículas es, en este caso, mayor que aquella que se da en el régimen burbujeante. Se forman, como se ha mencionado anteriormente, uniones de partículas pequeñas formando una

más grande, las cuales vuelven a caer al lecho ya que su velocidad de caída es mayor que aquella de fluidización del lecho. La salida de algunas partículas del lecho debido a la velocidad se da cuando dichos conjuntos de partículas se erosionan debido a la combustión.

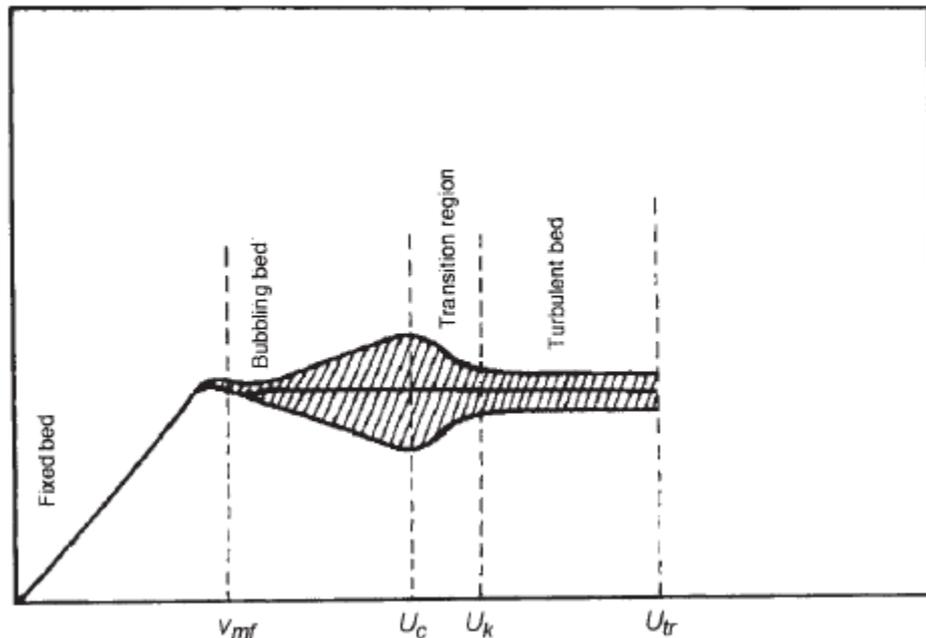


Fig. (12) Oscilaciones de presión durante la transición del régimen burbujeante al turbulento

Si va subiendo la velocidad del gas, una vez que se alcanza la velocidad de caída de las partículas combinadas, la salida de partículas del lecho aumenta con rapidez, llegando a la velocidad de transporte de partículas antes descrita, alcanzando así el régimen de recirculación o también llamado régimen de rápida fluidización.

### **SISTEMAS DE COMBUSTIÓN EN BASE DE LECHO FLUIDO CON RECIRCULACIÓN**

La tecnología de la combustión en un lecho fluido circulante, o también llamada régimen de rápida fluidización, ha evolucionado a partir de los lechos fluidos burbujeantes como medida para mejorar algunas de las desventajas asociadas a los mismos.

La tecnología de lecho fluido circulante utiliza el principio del lecho fluido en el que, como ya se ha descrito con anterioridad, se inyectan partículas de entre (6-12 mm) de combustible y un lecho de caliza en un

horno. Las partículas se suspenden en una corriente que entra desde abajo hacia arriba del horno por unos dispensadores dispuestos para ello. La velocidad habitual para los lechos circulantes oscila en un rango de 3.7 a 9 m/s. La combustión tiene lugar en torno a los 840-900 °C, y las partículas más finas, (<450  $\mu\text{m}$ ) son expedidas del recipiente con una velocidad del gas de 4-6 m/s.

Una vez que las partículas abandonan el recipiente, son recogidas por los separadores y recirculadas dentro del horno de nuevo. El sólido reciclado es del orden de 50 a 100 kg por kg de combustible quemado. El cociente entre la cantidad de combustible recirculado y aquella que alimenta el lecho oscila para estos lechos entre 1 y 20. [11] No hay tubos de vapor inmersos en el lecho, como a veces se encuentra en otros tipos de lecho. Los lechos circulantes están diseñados para mover muchos más sólidos fuera del horno y para llegar a la mayor parte del calor intercambiado fuera de la zona de combustión, en la zona de convección, que se encuentra al final del recipiente. Algunos de los lechos circulantes pueden tener intercambiadores de calor fuera del horno, ya que las partículas recirculadas pueden aportar un eficiente aporte de calor, así como un mayor tiempo de residencia para la caliza y el carbón utilizado.

Los parámetros de diseño de los procesos de combustión dentro de los lechos circulantes son, principalmente, la temperatura, el tiempo de residencia y la turbulencia. Para unidades grandes, el hecho de que el recipiente sea alto aporta una mejor utilización del espacio y un mayor tiempo de residencia para las partículas de combustible y de absorbente. Esto aporta una combustión más eficiente y una mejor captación del  $\text{SO}_2$  formado, así como una mejor aplicación de técnicas de reducción de los  $\text{NO}_x$  que en los lechos burbujeantes.

Normalmente la separación de las partículas de combustible no quemadas se produce de manera externa al reactor, en un separador de ciclón, descrito con anterioridad. Las partículas se devuelven a la parte baja del reactor, formando así un lazo de recirculación. Las partículas suelen circular por este lazo muchas veces antes de dejar el sistema, mientras que el fluido pasa una sola vez. Una disposición típica de este tipo de lecho se muestra en la Fig. (13), aunque pueden utilizarse otras muchas configuraciones geométricas diferentes.

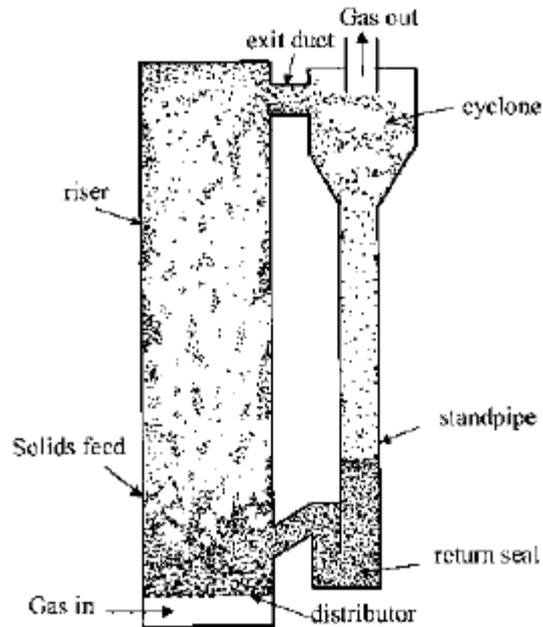


Fig.(13) Esquema general de un sistema de lecho fluido circulante

Existen ciertas ventajas de los sistemas de lecho fluido circulante en comparación con los lechos burbujeantes y otros tipos de generadores de combustible sólido.

- Tiempo de residencia de las partículas largo y controlable.
- Uniformidad de temperatura, sin "puntos calientes"
- Funcionamiento adecuado con un amplio rango de tamaños, densidades y formas de las partículas
- Alta producción de gas
- Un contacto efectivo entre las partículas de combustible y las del gas

También se pueden citar una serie de desventajas que presentan estos sistemas, como por ejemplo:

- Se necesitan recipientes muy altos, ya que los procesos de lecho fluido circulante con recipientes bajos no son casi nunca viables.
- No es viable el acoplamiento de áreas interiores de transferencia (tubos por donde circula agua inmersos en el lecho) debido a la erosión.
- Los gradientes laterales son considerables. [12]

### COMPARATIVA DE LOS SISTEMAS CON RECIRCULACIÓN Y LOS BURBUJEANTES

Se va a hacer primero una comparación, a grandes rasgos, de las características más diferenciadas entre los lechos circulantes y los

burbujeantes. En los lechos burbujeantes, la velocidad del aire está en torno a 1-2 m/s, se tiene una temperatura de combustión más baja, lo que disminuye la formación de  $\text{NO}_x$ , y se favorece la transferencia de calor dentro de la caldera. En estos generadores es posible usar un mayor rango de combustibles, como carbones ricos en cenizas y combustibles de difícil ignición. En los lechos fluidos circulantes, sin embargo, la velocidad del gas es del orden de 5-6 m/s, y consta de una complejidad técnica mayor que los burbujeantes, al necesitar un sistema de recirculación de las partículas (ciclón de recirculación). No existen intercambiadores de calor dentro del lecho. Aunque es cierto que hay menores pérdidas de carga en el hogar y menores emisiones de  $\text{NO}_x$ , al ser la temperatura del ciclo constante y tener una combustión escalonada.

Se puede tratar de hacer una comparación entre las emisiones de  $\text{SO}_2$  y las de  $\text{NO}_x$  en los lechos burbujeantes y en los circulantes. Sería de esperar, que al ser los lechos circulantes más avanzados tecnológicamente hablando, estos tuvieran unas emisiones menores tanto de  $\text{SO}_2$  como de  $\text{NO}_x$ . Sin embargo, la diferencia en las condiciones de operación, los distintos tipos de carbón utilizado y los diferentes diseños del horno de cada uno de ellos hacen difícil la comparación y no permiten sacar conclusiones. [13]

Se ha realizado una comparación entre un generador en lecho burbujante (16  $\text{MW}_{\text{th}}$ , Chalmers University, Göteborg) y un generador con recirculación (40  $\text{MW}_{\text{th}}$ , Nyköping). En ambos casos se usó el mismo carbón (2% S) y se hizo un esfuerzo para conseguir las mismas propiedades de combustión (exceso de aire, temperatura de combustión, mismo tipo de caliza y con el mismo ratio molar Ca/S) en ambos. La Fig. (14) muestra los cambios en el grado de desulfuración para ambos generadores, para un ratio molar Ca/S que varía de 0 y 5.5. Como se observa en la figura, el generador en lecho burbujante requiere un ratio considerablemente más alto, esto es, una cantidad más elevada de caliza, para alcanzar el mismo grado de desulfuración que el generador en lecho recirculante.

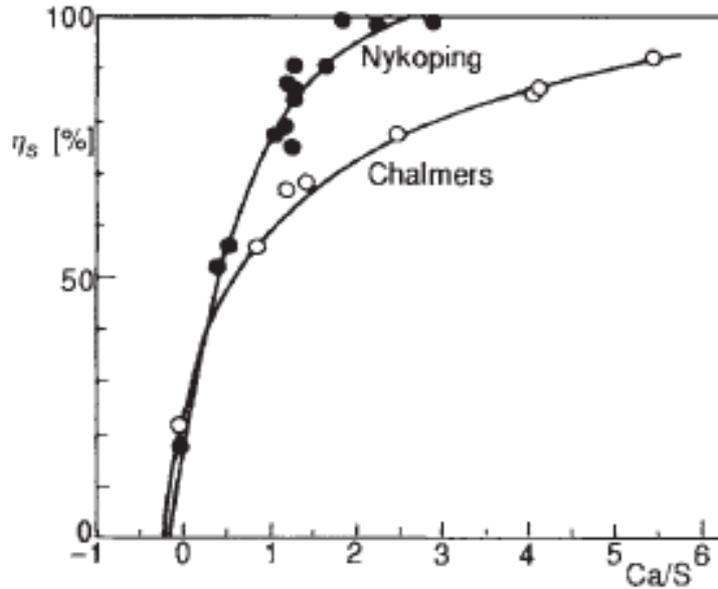


Fig (14).-Comparación entre un lecho fluido burbujeante y circulante.

Sin embargo, también se compararon las emisiones de  $\text{NO}_x$  para ambos generadores y se encontró que el incremento en el ratio  $\text{Ca/S}$  hace que se incrementen las emisiones de  $\text{NO}_x$  en el generador de lecho circulante.

### EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN

En este apartado, nos ocuparemos de la clasificación de los generadores en función de la presión en el interior.

### SISTEMAS DE COMBUSTIÓN EN BASE DE LECHO FLUIDO ATMOSFÉRICO

Para velocidades bajas, entre los 0.9 y los 3 m/s, las partículas más grandes se quedan estáticas en el lecho mientras que las demás se dispersan. Los generadores en base de lecho fluido que suelen operar en este rango de velocidades son los de lecho fluido atmosféricos, cuya presión, como su propio nombre indica es la atmosférica.

En la Fig. (15) se presenta un esquema general de un lecho fluido atmosférico. El combustible y el absorbente pueden ser introducidos bien por encima o bien por debajo del lecho, como se ha mencionado con anterioridad. En el ejemplo ilustrativo, el combustible se introduce por encima del lecho. El lecho, formado por aproximadamente un 97% de caliza o

materia inerte y un 3% de combustible prendido, se encuentra suspendido por un caudal de aire primario que entra por la parte baja de la cámara de combustión. La temperatura del lecho se controla mediante tubos inmersos en el mismo y/o variando la cantidad de combustible. Conforme el tamaño de las partículas de carbón disminuye como resultado de la combustión, más cantidad de las mismas sale de la cámara de

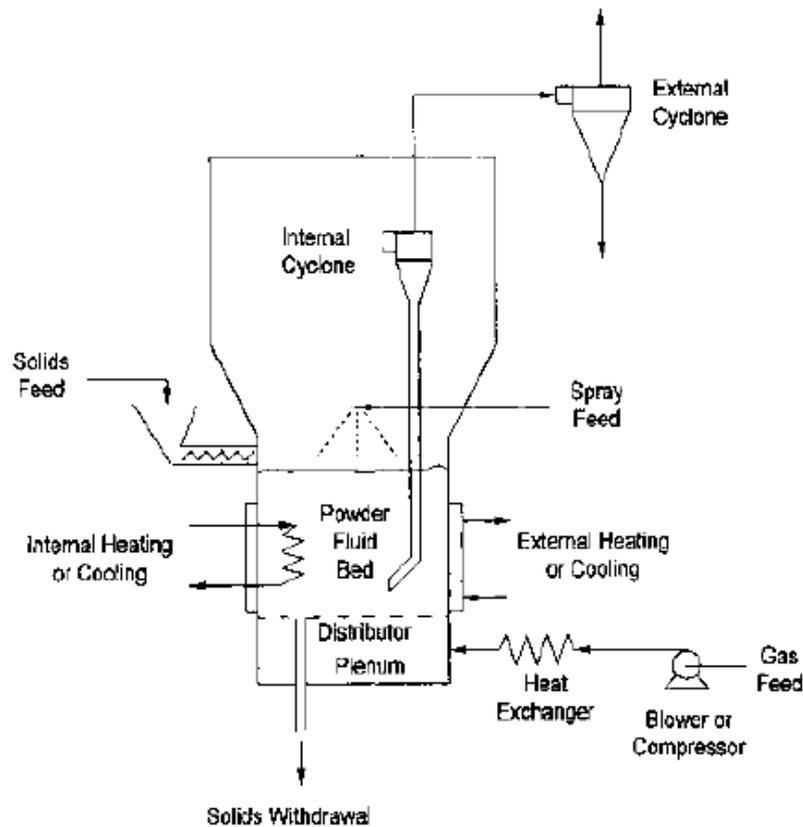
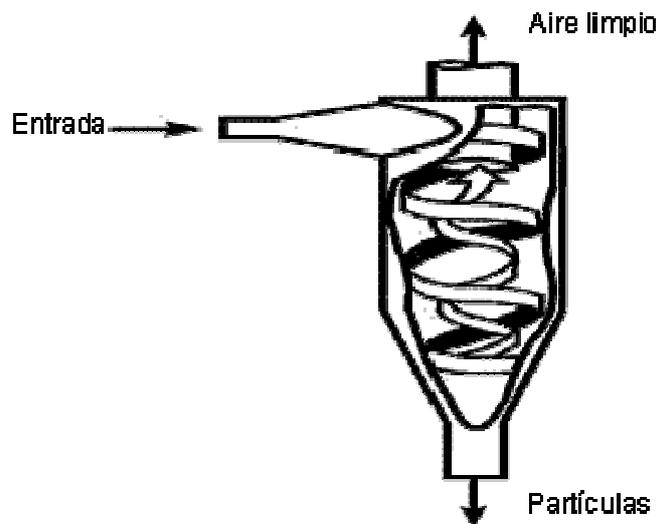


Fig. (15) Base de lecho fluido atmosférico

combustión arrastradas por la corriente de aire. En caso de que el sistema de lecho fluido conste de recirculación, una porción de dichas partículas son recogidas por un colector de ciclón (o multiciclón) aguas abajo del paso convectivo y se devuelven al lecho con el objetivo de mejorar la eficiencia de la combustión.

Es de importancia describir los ciclones o sistemas de separación ciclónica, los cuales se usan en los lechos fluidos con recirculación, que se explicarán más adelante. Los ciclones o separación ciclónica es un método cuya función es separar partículas sólidas de una corriente de aire o gas sin necesidad de utilizar filtros para ello. La separación ciclónica se consigue estableciendo un flujo rotativo dentro de un contenedor de forma cilíndrica o

cónica. El aire fluye siguiendo una trayectoria elíptica desde el extremo ancho al estrecho del contenedor. Las partículas mayores o más densas presentes en el flujo rotativo ganan demasiada inercia como para poder seguir las curvas cerradas que sigue el flujo de aire, por lo que quedarían pegadas a la pared del contenedor, bajando hacia el lado estrecho del cono, de donde serían recogidas. El radio rotativo del ciclón puede ser reducido de manera que permita separar partículas de menor tamaño cada vez. En la Fig. (16) se puede observar el diseño habitual de un aparato para separación ciclónica.



*Fig (16). Separación ciclónica*

Dentro de los lechos fluidos a presión atmosférica, se puede distinguir entre lechos burbujeantes y lechos circulantes. A continuación se hace una descripción de cada uno de ellos, así como una comparación que aporta claridad acerca de las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

#### **SISTEMAS DE COMBUSTIÓN EN BASE DE LECHO FLUIDO A PRESIÓN**

Los generadores en base de lecho fluido pueden trabajar a presiones elevadas, en torno a las 10-12 atm. Fue el programa de "Clean Coal Technology" llevado a cabo por el departamento de energía de los Estados Unidos, el responsable de la entrada en el mercado de lo que llamaron la primera generación de tecnología en lecho fluido a presión, con una estimación de 1000 MW instalados por todo el mundo. Estos sistemas someten a presión al lecho para generar suficiente energía con el gas de salida para accionar una turbina de gas que opere en un ciclo combinado. Esta primera generación de lechos fluidos a presión, trabajan con una tecnología de lecho burbujeante, se usan también ciclones para separar las partículas que

viajan en los gases de salida del generador con el objetivo de que estas partículas no entren en la turbina de gas, la cual está diseñada para aceptar solo un pequeño porcentaje de materia sólida.

La segunda generación de lechos fluidos a presión utiliza lechos fluidos circulantes, y una serie de medidas para la mejora de su eficiencia. La tecnología de lecho circulante tiene la capacidad de mejorar ciertas características operacionales usando corrientes de aire mayores que, como se ha visto anteriormente, hacen que los materiales del lecho se comporten de una manera más "fluida", recirculando después casi todo el material del lecho. Estas medidas teóricamente simplifican el diseño de la alimentación, mejora el contacto entre el adsorbente y el combustible, mejora la captura de partículas de SO<sub>2</sub> a la par que la eficiencia de la combustión. [14]

En la Fig. (17) se puede observar un esquema típico de un generador en base de lecho fluido a presión. Vemos que el gas de combustión de salida del generador, que se encuentra a alta temperatura y presión, entra en una turbina de gas para producir energía eléctrica. También, se puede recuperar calor del horno usando para ello vapor de agua a altas presión y temperatura, que entran en una turbina de vapor para producir energía eléctrica, al igual que en el caso de la turbina de gas. La tecnología de lecho fluido a alta presión se ha desarrollado como una manera altamente eficiente de conseguir energía a partir de la combustión de carbón. Además, estos generadores presentan ventajas medioambientales: a) se reduce la emisión de SO<sub>x</sub>, debido a la

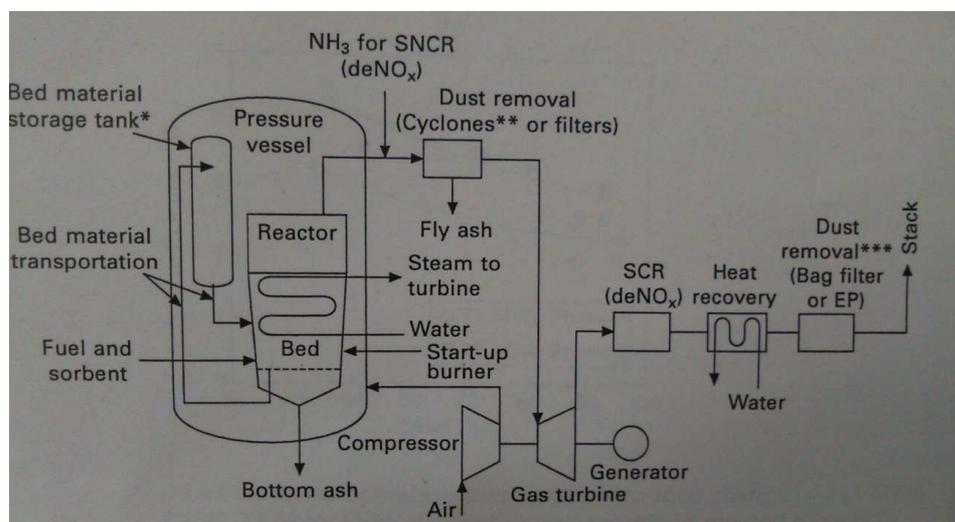


Fig. (18) Esquema de generador en base de lecho fluido a presión

desulfuración que tiene lugar dentro del lecho; b) se reducen las cenizas por la instalación de filtros de tubos de cerámica; y c) se reduce el CO<sub>2</sub> emitido gracias a un incremento en la eficiencia de la combustión. [15]

Algunas características más interesantes de los generadores en base de combustible fluido a presión son:

- Los gases de combustión calientes se utilizan para producir energía eléctrica a partir de una turbina de gas. Además, se pueden utilizar en combinación con una turbina de vapor, de forma que también se produce energía utilizando vapor de agua a altas condiciones de presión y temperatura.

- Con una presión parcial de oxígeno alta, las velocidades de reacción deben subir si la reacción tiene lugar bajo condiciones cinéticas controladas.

- El generador tiene un área pequeña en comparación con la cantidad de energía eléctrica producida. Esto es debido a un diseño más compacto por el incremento de presión, así como a la eliminación de la unidad de desulfurización externa. [16]

La combustión en los lechos a presión se puede conseguir con tamaños del lecho pequeños, en unidades compactas. Al igual que en los lechos atmosféricos, hay dos formatos posibles, uno de lecho burbujeante y otro con recirculación. A día de hoy, las unidades a escala comercial que están en operación tienen todas un sistema de lecho burbujeante. En estos sistemas, el horno y los ciclones de gas caliente están dispuestos en un recipiente a presión. Tanto el carbón como el absorbente, son alimentados por una válvula de presión, teniendo las cenizas un sistema de recogida parecido. Para aplicaciones de HARD COAL el carbón y la caliza se amasan juntos creando una pasta con un 25% de agua, que es lo que se alimenta al lecho. Al igual que en los lechos atmosféricos, la combustión se produce entre 800-900 °C, esto hace que se formen una menor cantidad de NO<sub>x</sub>. Las emisiones de SO<sub>2</sub> pueden ser reducidas inyectando un absorbente y luego retirándolo con las cenizas.

Como se indicó con anterioridad, los generadores de lecho fluido a presión operan en un intervalo de 10-12 atm y con unas temperaturas de combustión de alrededor de 800-900 °C. La temperatura de combustión está limitada por las características de fusión de las cenizas y por esta razón la máxima temperatura de combustión es del orden de 900 °C. Los gases calientes provenientes de la combustión se alimentan a una turbina de gas, por lo que la limpieza del gas es un punto esencial del sistema. También lo es

la capacidad de la turbina para funcionar con cierta cantidad de sólidos residuales. Es de importancia mencionar que la necesidad de presurizar el carbón de alimentación, la caliza y el aire de combustión para luego despresurizar los gases de combustión y el sistema de recogida de cenizas, añade una serie de complicaciones tecnológicas al diseño de estos quemadores.

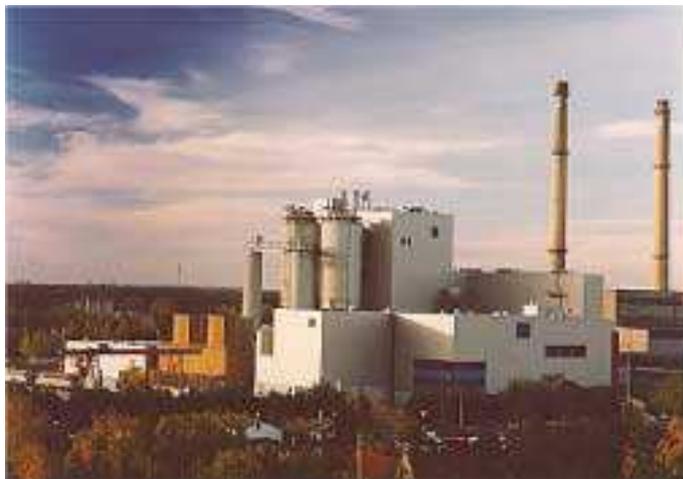
Los sistemas de lecho fluido a presión pueden ser particularmente útiles con combustibles que contengan un alto porcentaje de cenizas, así como con aquellos que son heterogéneos, en el sentido de que presentan características variables. No obstante, este tipo de generadores han sido utilizados, por ejemplo, tanto en Suecia como en Japón, donde los carbones son de alta calidad, debido a las ventajas citadas con anterioridad. Se suelen utilizar con un ciclo combinado que incorpora una turbina de gas y otra de vapor y el calor producido por unidad de área del lecho es mucho mayor en los sistemas a presión que en los atmosféricos. Se ha realizado un esfuerzo considerable por mejorar este tipo de generadores, particularmente durante los años 90, como puede verse en diferentes unidades de demostración en países como Alemania, España o los Estados Unidos. Las unidades de demostración existentes son todas del orden de 80 MW, pero dos unidades de mayor potencia han empezado a ser construidas en Japón, en las ciudades de Karita y Osaki, con una capacidad de 360 y 250 MW<sub>e</sub>, respectivamente. [17] Los generadores de lecho fluido a presión presentan rendimientos de hasta un 40%, y bajas emisiones. Se espera que en un futuro usando ciclos más avanzados se consigan rendimientos del orden del 45%. [18]

## CENTRALES DE LECHO FLUIDO ACTUALMENTE EN FUNCIONAMIENTO

A continuación se exponen algunos ejemplos de plantas comerciales operando actualmente con distintas tecnologías de lecho fluido.

### COTTBUS PFBC PLANT, ALEMANIA

El municipio de Cottbus, ubicado en Alemania del este Fig (19), decidió en abril de 1996 instalar una planta con tecnología de lecho fluido a presión en un área cercana al centro del pueblo. El objetivo de dicha planta era el de reemplazar una central antigua de quemado de carbón pulverizado, con una alta cantidad de emisiones, y que estaba al borde del cierre. La planta en base de lecho fluido a presión abastece ahora el municipio y sus alrededores tanto de electricidad, como de vapor de agua para la calefacción. La producción máxima de dicha central es de 71 MWe, en relación con la electricidad, y de 40 MWth en reacción a la calefacción. El combustible usado por el sistema es el lignito, que se extrae de las propias minas de la región, de las minas de Lausitz. [19]



*Fig.(19) Central de Cottbus y su ubicación dentro de Alemania*

La planta consta de un módulo P200 que opera con turbinas de vapor separadas en cuerpo de alta y cuerpo de media y baja. El módulo en base de lecho fluido a presión consiste en una turbina de gas conectada al generador en base de lecho fluido, donde, además de gases de combustión, se genera vapor de agua, el cual alimenta a las turbinas de vapor para generar potencia y abastece al sistema de calefacción del municipio. Además del módulo P200, la central consta de dos hervidores alimentados con gas para aquellos momentos de demanda punta de calefacción, en los que dichos hervidores hacen incrementar la salida de

calor hasta 220 MWth. Los detalles técnicos de la central de Cottbus, incluyendo la potencia generada en sus distintos modos de carga, así como la temperatura de su proceso, están descritos en la Tabla. (3).

<b>Detalles técnicos de la planta de Cottbus (Alemania)</b>	
Tipo de planta	1 x P200, potencia y energía térmica
Turbina de gas	1 x GT35P
Turbina de vapor	1 x G32 + 1 x VEE63
Potencia producida	71 MWe/40 MWth
	62 MWe / 90 MWth
	74MWe/220MWth (usando hervidores)
Alimentación de carbón [Kg/s]	11.3
Alimentación de caliza [Kg/s]	1.8
Temperatura de Combustión	840-860
Condiciones del vapor [bar/°C]	142 / 537
Presión de condensación [bar]	0.07

Tabla (3). Detalles técnicos de la planta de lecho fluido a presión de Cottbus

Con respecto a las emisiones de dicha central, los valores de la concentración de los componentes presentes en las emisiones son lo que se muestran en la Tabla. (4), para un exceso de oxígeno del 7%. [20]

<b>Garantía de emisiones (media semanal)</b>	
SO <sub>2</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ] [mg/Nm <sup>3</sup> ]	115
NO <sub>x</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]	115
CO [mg/Nm <sup>3</sup> ]	50
Polvo [mg/Nm <sup>3</sup> ]	20

Máximo contenido de carbón en la ceniza [%]	5
---	---

Tabla (4). Garantía de emisiones para la central de Cottbus

Las características del lignito con el que opera la planta de Cottbus se muestran en la Tabla. (5)

<b>Poder calorífico inferior [KJ/Kg]</b>	19 000
<b>Agua [%]</b>	18.5
<b>Cenizas [%]</b>	5.5
<b>Volátiles [%]</b>	41
<b>Carbón sólido [%]</b>	34.5
<b>Azufre [%]</b>	<0.8

Tabla (5). Composición del lignito extraído en Lausitz

### VÄRTAN, SUECIA 2 x P200

La central de Värtan está situada en la ciudad de Estocolmo (Suecia). Está formada por un hervidor de 220 MW de quemado de aceite convencional, una turbina de vapor de 220 MW y dos turbinas de gas de tipo GT35B de 17 MW cada una. El combustible usado en esta central es carbón bituminoso, de bajo contenido en azufre, <1%. Las características de esta central se describen en la tabla (6), el aceite para los hervidores es aceite pesado. Esta central abastece prácticamente a todo Estocolmo de calefacción. [21]

<b>Detalles técnicos de la planta de Värtan (Suecia)</b>	
Tipo de planta	1 x P200, potencia y energía térmica
Turbina de gas	2 x GT35B
Turbina de vapor	1 x 220
Temperatura de Combustión	830

Condiciones del vapor [bar/°C]	137 / 530
Presión de condensación [bar]	0.07

Tabla (6). Características de la central de Värtan (Suecia)

### OSAKI, JAPÓN

La compañía de electricidad Chugoku, junto con el grupo de investigación Hitachi, desarrollaron la primera planta comercial con tecnología de lecho fluido a presión de 250 MW en Osaki. La operación comercial de dicha planta comenzó en noviembre del 2000. Dicha planta consta de un ciclo combinado con una turbina de gas, una de vapor y un generador en base de lecho fluido a presión, que genera vapor para abastecer a la turbina de vapor. El gas que se genera en el lecho fluido, se direcciona a un ciclón de dos etapas que abastece a la turbina de gas. Utiliza caliza como absorbente, lo que permite desulfurar el gas del horno reduciendo así de manera significativa las emisiones de SO<sub>x</sub>. Es de interés indicar que el combustible que alimenta el lecho lo hace en forma de pasta de carbón, agua, caliza y material del lecho. Esto se debe a que, pese a que una de las ventajas principales de los lechos fluidos reside en el amplio rango de combustibles con los que se puede producir energía, algunos combustibles deben someterse a una serie de tratamientos antes de ser alimentados en lechos fluidos a presión, debido principalmente al sistema de alimentación. Una de las medidas más habituales es, por tanto, un sistema de alimentación del combustible en forma de pasta. [22]

Las principales especificaciones de la planta se muestran en la Tabla. (7)

<b>Especificaciones de la planta de Osaki</b>	
Potencia de la planta [MW]	250
Potencia de la turbina de vapor [MW]	215
Potencia de la turbina de gas [MW]	44
Condiciones del vapor [MPa / °C]	16.6 / 566-593
Eficiencia térmica de la planta [%]	41.5

Tabla (7). Especificaciones de la planta de Osaki, Japón

La temperatura del lecho es de 865 °C y su altura varía entre los 2.5 y los 4 m, permitiendo así cambiar el área efectiva de los tubos dispuestos dentro del lecho para el intercambio de calor. El gas de combustión que se produce en el lecho es tratado primero para eliminar el polvo y el hollín, por ciclones de dos etapas, hasta que la concentración de los mismos baja de los 1000 mg/Nm<sup>3</sup>. Posteriormente se conduce hacia la turbina de gas. Los óxidos de azufre son desulfurados mediante caliza, que se alimenta al lecho junto con el carbón. [23]

Una vez descrito el funcionamiento de la planta, se puede ver el esquema de su configuración en la Fig (20) para una mejor comprensión.

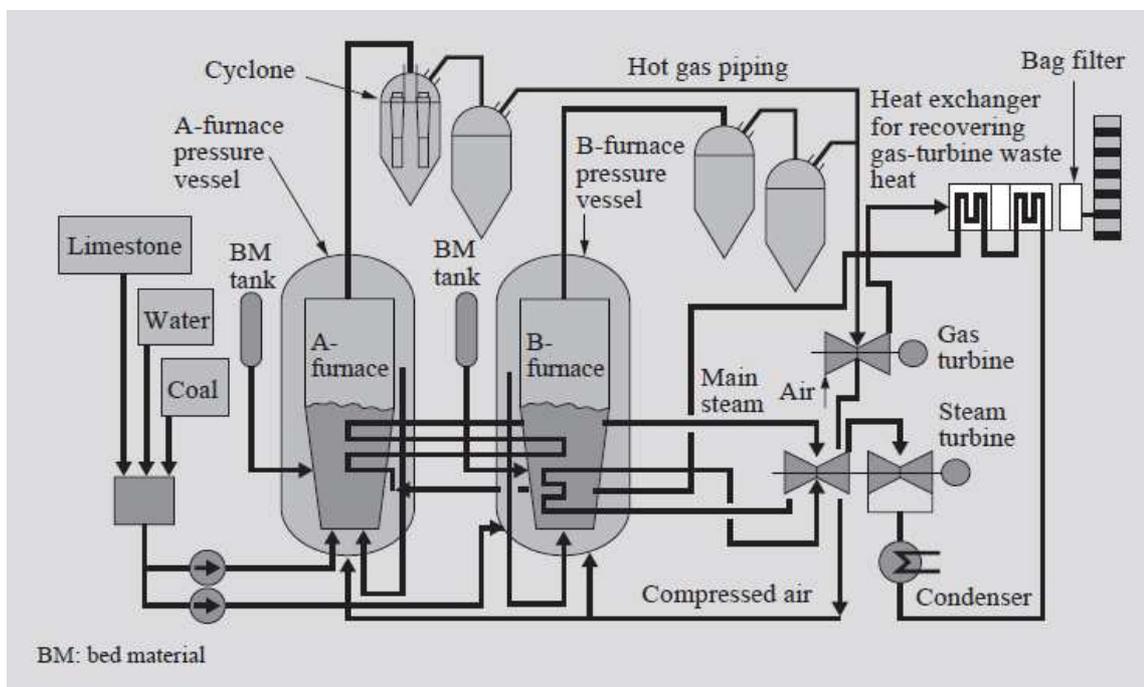


Fig. (20) Esquema general de la configuración de la planta de Osaki

Durante el mes de mayo del año 2000 se sometió a la planta a un periodo de pruebas. En la tabla (8) se muestran los datos obtenidos en la inspección de la planta. [24]

<b>Eficiencia térmica de la planta</b>	41.5%
<b>Concentración de SO<sub>x</sub> en el flujo</b>	7.1 ppm
<b>Eficiencia de desulfuración</b>	97.7%

<b>Eficiencia de desnitrificación no catalítica</b>	38 %
<b>Eficiencia de desnitrificación catalítica</b>	88.3%
<b>Concentración de NOx en el flujo</b>	14.4 ppm
<b>Eficiencia de ciclones</b>	97.2 %

Tabla (8). Especificaciones de las emisiones de la planta de Osaki, Japón

### **RIO BRAVO FRESNO, CALIFORNIA**

Rio Bravo Jasmin se encuentra en California, en el centro de la región productora de aceite, Kern County. La central de Rio Bravo Jasmin opera durante la estación calurosa y supe su pico de demanda. Es una central de 40 MW que utiliza tecnología de lecho fluido circulante para la producción de potencia, así como un sistema de control térmico para las emisiones de NO<sub>x</sub>. Se quema en ella coque de petróleo y carbón. Esta central es un proyecto conjunto de IHI Power Generation y North American Power Group. En la Tabla. (9) se recogen los datos técnicos de la central, incluidas las emisiones.

<b>Rio Bravo Jasmin, California</b>	
Empresa propietaria	Rio Bravo Jasmin
Sociedad controlante	Constellation Energy
Capacidad	38.2 MW
Producción de electricidad	291 375 MWh
Emisiones CO2	347 196 ton
Emisiones SO2	49 ton
Emisiones de NOx	144 ton

Tabla (9). Datos técnicos de la planta Rio Bravo Jasmin

## OTRAS TECNOLOGÍAS REPRESENTATIVAS

### IGCC

IGCC es la denominación para los ciclos combinados que tienen gasificación integrada. Se llama gasificación al proceso una que, mediante una serie de reacciones termoquímicas en un ambiente pobre en oxígeno, se transforma un sólido, en este caso el combustible de carbón, en una serie de gases, con el objetivo de usarlos en una caldera, turbina o motor para producir energía. Hace 20 años que la tecnología de IGCC está considerada como el futuro para la combustión de carbón. Dicha tecnología transforma el carbón en gas (la mayoría del mismo en forma de  $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$ ), utilizando para ello un gasificador de alta presión. El azufre, las cenizas, el mercurio y otros contaminantes son eliminados para que se pueda alimentar la central con gas limpio. Posteriormente, se pueden eliminar las impurezas del gas producido. En la Fig. (21) se muestra el esquema de funcionamiento de una planta con tecnología IGCC, para una mejor comprensión de su funcionamiento.

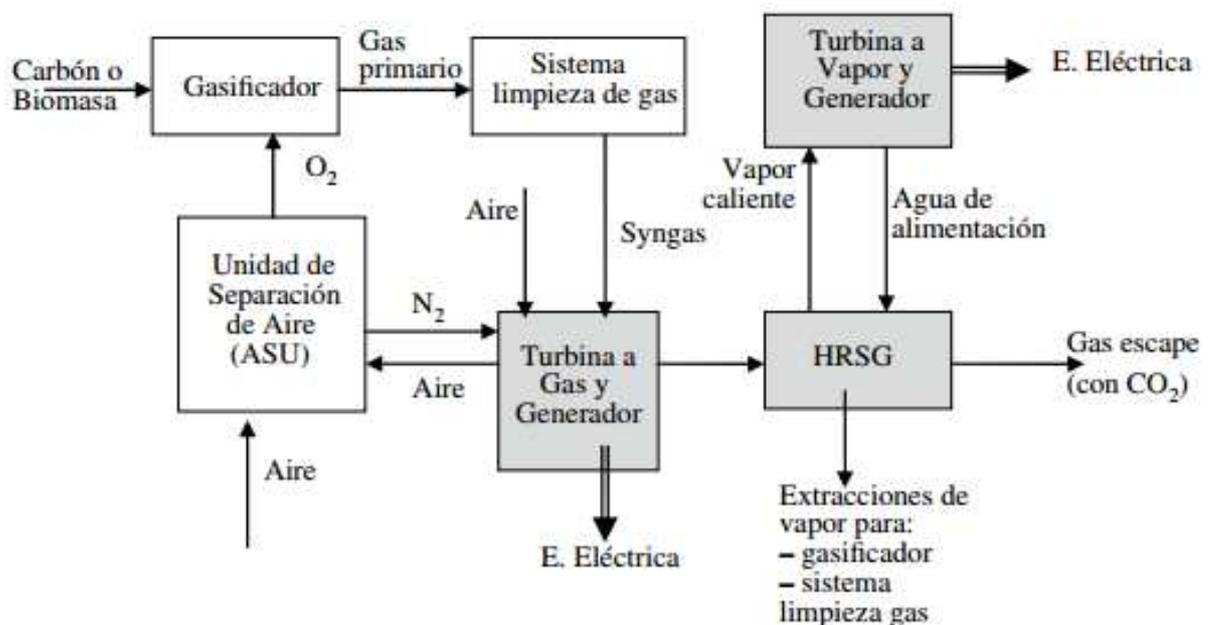


Fig. (21) Esquema de proceso de tecnología IGCC

La tecnología de gasificación integrada permite un control más simple de las emisiones de  $\text{CO}_2$ . Estos procesos, además, permiten que las plantas en las que se instala esta tecnología puedan tener una gran variedad de configuraciones. Hay varias plantas que utilizan la gasificación integrada como tecnología repartidas por el mundo, aunque son de especial interés la

planta de Buggenum (Países Bajos) de 252 MWe, la de Polk County (Florida) de 250 MWe y la de Puertollano (España) de 335 MWe. Esta última será descrita más en profundidad en los párrafos siguientes.

La eficiencia de estas centrales está en el intervalo de 35-42%, aunque el coste a escala comercial es en torno al 40-60% mayor que el de una planta de carbón pulverizado convencional. IGCC es la tecnología más limpia para el quemado de carbón, tiene la cantidad de emisiones más pequeña de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, así como la menor cantidad de deshechos y de agua corrosiva. También se caracteriza por disponer del método más barato de separación del CO<sub>2</sub>. Todas las plantas en operación usando esta tecnología han tenido problemas de funcionamiento. Esto se relaciona con el todavía reducido número de plantas operativas que usan esta tecnología, lo que supone que aún quedan muchos aspectos de las mismas por estudiar.

Las plantas de IGCC constan de varias ventajas que deben ser mencionadas:

- Constan de una alta eficiencia en comparación con otras tecnologías de generación de potencia que utilizan carbón como combustible
- Tienen una flexibilidad de alimentación bastante alta, pudiendo utilizar distintos tipos de carbón.
- Tiene la posibilidad de uso de un combustible secundario

Aparte de la flexibilidad en el uso de combustibles mencionada en el párrafo anterior, este tipo de sistema también cuenta con una flexibilidad en la producción, que las hace más atractivos desde el punto de vista económico, dado que esto ayudaría a minimizar riesgos. La variedad de productos son:

- Energía eléctrica
- Hidrógeno
- CO<sub>2</sub>
- Metanol
- NH<sub>3</sub>
- Gasolinas

Cuando se compara esta tecnología con la de lecho fluido, esta última presenta la ventaja de poder utilizar un rango de combustibles aún mayor. Además, la tecnología de lecho fluido tiene un coste menor para la misma cantidad de emisiones y una eficiencia comparable, o incluso más alta. En la

Tabla (10) se muestran los datos obtenidos al comparar la tecnología de lecho fluido, con la de carbón pulverizado y la de IGCC, para una potencia de 300 MWe, usando como combustible carbón bituminoso de Illinois con un 4% de azufre en su composición.

La pureza de la caliza para las tres plantas es igual, así como la eficiencia de extracción de azufre, que es igual y del 95%. La central de IGCC, como se puede apreciar observando los datos de la Tabla (10), produce significativamente menos sólidos que las otras dos plantas. Estas medidas no son excesivamente representativas ya que si en vez de un combustible con un porcentaje de azufre contenido de 4% se hubiese usado un combustible con menos contenido de azufre, la comparación habría sido más favorable para las plantas con tecnología de lecho fluido y de carbón pulverizado.

	<b>Planta de carbón pulverizado</b>	<b>Planta de lecho fluido</b>	<b>Planta con tecnología IGCC</b>
<b>Datos de operación de la planta</b>			
<b>Potencia [MWe]</b>		300	300
<b>Factor de capacidad anual [%]</b>		65	65
<b>HEAT RATE Btu/KWh</b>		9750	9400
<b>Alimentación de combustible [Ton/día]</b>		3 480	3 360
<b>Alimentación de caliza [Ton/día]</b>		466	1 104
			-
<b>Propiedades del combustible</b>			
<b>HHV, btu/lb</b>		10 100	10 100
<b>Azufre [%]</b>		4	4
<b>Cenizas [%]</b>		16	16
<b>Carbón [%]</b>		57.6	57.6
<b>Extracción de azufre</b>			
<b>Sorvente</b>		Caliza	Caliza
			MDEA

Ratio molar Ca/S	1.02	2.5	-
Sólidos generados [Ton/día]			
Cenizas secas	557	538	0
Escorias	0	0	515
Cenizas de carbón	20	19	19
Azufre elemental	0	0	126
CaSO <sub>4</sub> deshidratado	562	542	0
CaO	10	363	0
Inertes de caliza	23	55	0

Tabla. (10) Datos de productos para tres centrales distintas usando el mismo combustible [25]

Los datos de la tabla también permiten una comparación entre la central que utiliza carbón pulverizado y aquella de combustible fluido. Se puede apreciar que la alimentación de combustible diario para el caso de la central de carbón pulverizado es bastante mayor que la que utiliza lecho fluido para una producción de potencia igual. Asimismo, la de lecho fluido no varía mucho de la que se le añade a la planta de IGCC. Los componentes utilizados en las plantas que constan de tecnología IGCC pueden verse en la Fig. (22).

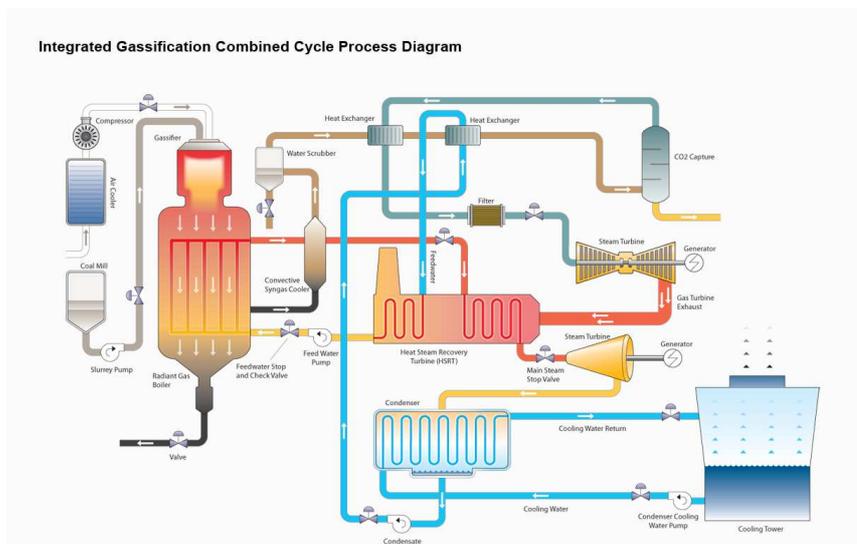


Fig. (22) Componente de planta de producción de potencia con tecnología IGCC

Para poder observar la diferencia de producción de emisiones entre las tecnologías alternativas que se están estudiando, junto con el lecho fluido se presenta la siguiente tabla, Tabla. (11), En ella se observan las emisiones, por megawatio hora de electricidad producida, para una planta de carbón pulverizado natural y una de gasificación de carbón.

	<b>Carbón Pulverizado</b>	<b>IGCC</b>
<b>CO<sub>2</sub> [Kg/MWh]</b>	1 000	735
<b>SO<sub>2</sub> [Kg/MWh]</b>	1.6	0
<b>NO<sub>x</sub>[Kg/MWh]</b>	2.1	0.25-0.45

Tabla (11). Contenido de emisiones por MWh de electricidad producida

Como ejemplo de ciclo combinado que utilice la tecnología de IGCC, existe la planta de ELCOGAS S.A. situada en la carretera Calzada de Calatrava, Puertollano (Ciudad Real). Dicha central utiliza tecnología de gasificación en ciclo combinado y es la mayor central del mundo con combustible sólido (335 MWe). Esta central está formada por tres unidades principales denominadas unidad de gasificación (generación de gas de síntesis), la cual trata 2500 Ton/día, unidad de fraccionamiento de aire (generación de oxígeno y nitrógeno), que produce 70000 Nm<sup>3</sup>/h y unidad de ciclo combinado (producción de energía eléctrica) con una turbina de gas de 200 MWe. Estas tres unidades están completamente integradas haciendo posible una elevada eficiencia de la central.

El objetivo de la utilización de la tecnología de IGCC en esta central es el aumento del rendimiento y la reducción de las emisiones frente a aquellas de las plantas con tecnología de lecho fluido convencional. El sistema consta de una caldera de recuperación con tres presiones, esto implica una mejora en el aprovechamiento del calor de los gases de combustión debido a que provoca que haya una diferencia de temperatura menor a lo largo de todas las etapas de calentamiento del vapor entre el vapor de agua y los gases de combustión.

La central de ELCOGAS consta de tecnología de última generación para la reducción de emisiones. Utiliza filtros cerámicos (de candelita) y un compresor de reciclo en el gas de cola. [27]

Los filtros cerámicos son una nueva tecnología de filtración con la cual se han podido conseguir menores niveles de emisión de partículas sólidas a la

atmósfera. Sus principales ventajas son, entre otras, la capacidad de filtrar a temperaturas más elevadas, en torno a 900°C, una mayor eficacia en la filtración, y una vida más larga de los cartuchos cerámicos, así como velocidades de filtración más elevadas. [28]

En la tabla (12) se disponen las características de los combustibles utilizados en la central de ELCOGAS, con sus porcentajes máxicos de cada elemento.

	<b>Carbón</b>	<b>Coque</b>	<b>Mezcla (50:50)</b>
<b>Humedad (%p)</b>	11.8	7.00	9.40
<b>Cenizas (%p)</b>	41.10	0.26	20.68
<b>C(%p)</b>	36.27	82.21	59.21
<b>H(%p)</b>	2.48	3.11	2.80
<b>N(%p)</b>	0.81	1.90	1.36
<b>O(%p)</b>	6.62	0.02	3.32
<b>S(%p)</b>	0.93	5.50	3.21
<b>PCI (MJ/Kg)</b>	13.10	31.99	22.55

*Tabla (12) Composición de los combustibles utilizados*

Asimismo, en la tabla (13) se pueden apreciar los datos de potencia, así como de emisiones y de eficiencia de la planta.

La central de ELCOGAS abrió en 1992 y en 2015 ha llegado a un estado de endeudamiento (con unas deudas acumuladas a lo largo de la vida de la planta de 217 millones de euros) en el que la situación era "insostenible". El ERE extintivo culmina el 22 de febrero de este año 2016, con el cierre de la planta.

	<b>Neta</b>
<b>Potencia eléctrica turbina de gas [MW]</b>	182.3
<b>Potencia eléctrica turbina de vapor [MW]</b>	135.4
<b>Potencia eléctrica total neta [MW]</b>	282.7

<b>Eficiencia Neta</b>	42.2 %
<b>Emisiones de SO<sub>2</sub> [mg/Nm<sup>3</sup>]</b>	25
<b>Emisiones de NO<sub>x</sub> [mg/Nm<sup>3</sup>]</b>	150
<b>Emisiones de partículas [mg/Nm<sup>3</sup>]</b>	7.5

*Tabla (13) Características técnicas de la central de ELCOGAS*

## **CAC (CCS)**

Es necesario mencionar el proceso de CCS (siglas correspondientes a Carbon Capture and Storage), o en español CAC (Captura y Almacenamiento de Carbón). Entre las alternativas que plantean el IPCC y la Agencia Internacional de la Energía para la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (EI), está la Captura y Almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CAC). Esta alternativa se considera que presenta un alto potencial para la producción de energía limpia, equivalente al uso de energías renovables. Hay que tener en cuenta que, a pesar de un aumento en la eficiencia energética y a un mayor uso de las energías renovables, esto no será suficiente para disminuir las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero), dadas las expectativas de crecimiento de los países en vías de desarrollo, especialmente los asiáticos. En Europa se está impulsando la CAC a través del denominado SET PLAN (Strategic Energy Technology Plan).

En el proceso de CAC se capturan las emisiones o residuos de CO<sub>2</sub> procedentes de centrales como las de carbón, que han sido estudiadas a lo largo de este documento, y se trasladan a un lugar de almacenamiento, evitando así que escapen hacia la atmósfera. Se suelen utilizar formaciones geográficas subterráneas Fig. (23). El objetivo de esta medida es prevenir la emisión de una cantidad considerable de CO<sub>2</sub> a la atmósfera proveniente del uso de combustibles fósiles en la generación de potencia y otras industrias. Es una medida efectiva para reducir las emisiones causantes del calentamiento global y la acidificación de los océanos. La captura de dióxido de carbono incrementa notablemente el coste de producción de electricidad, debido a los equipos adicionales que tendrían que ser instalados. Es por ello, que es más factible que dicho sistema sea instalado en plantas de potencia nuevas, una vez hayan empezado a ser económicamente rentables, que adaptar centrales antiguas a esta tecnología. Esto último tendría un coste más

elevado. Esto se debe a que la modernización de una planta no suele estar calculada como inversión inicial e implica una suma considerable de capital, lo que causaría que algunas plantas pudiesen resultar ineficientes antes del final de su vida útil debido a esta medida. [29]

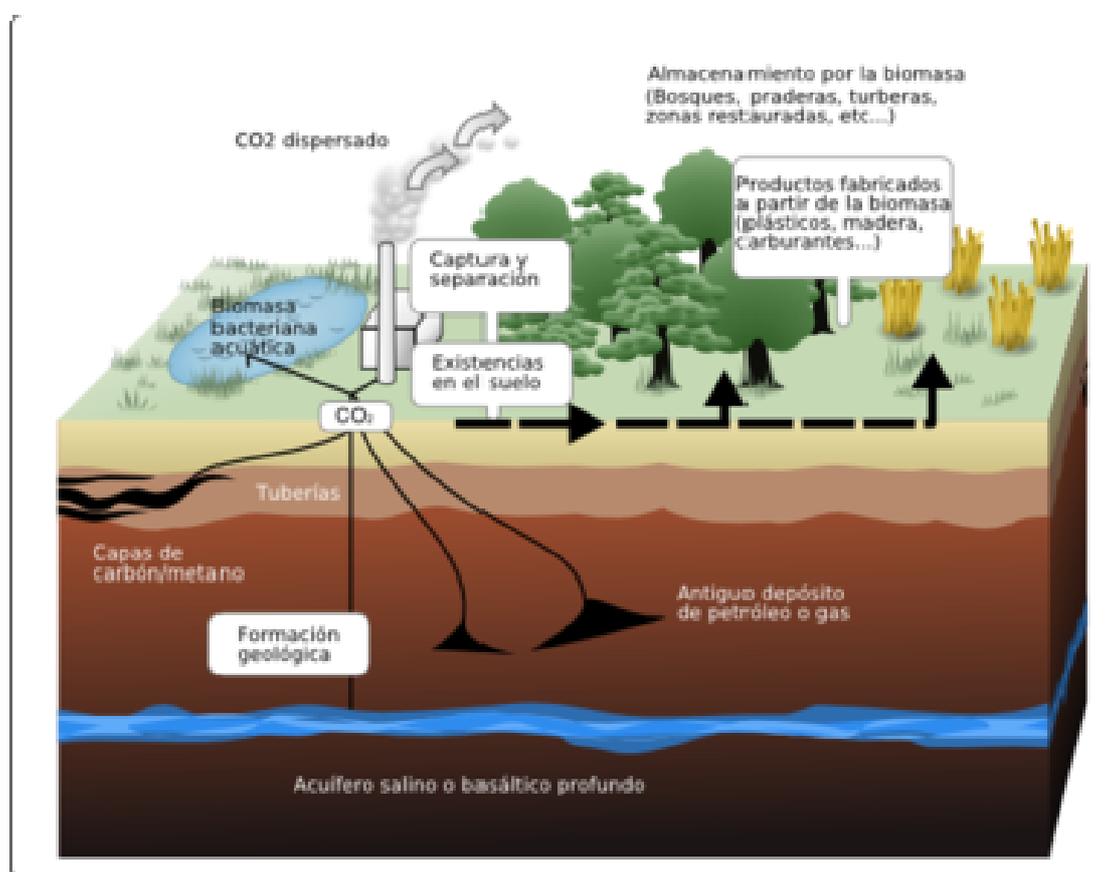


Fig. (23) Diagrama de método de captación CCS

La implantación de la tecnología de CCS supone una inversión adicional, así como costes de operación y mantenimiento. Además, hay costes adicionales de combustible, no solo para el sistema de captación, sino también para el de almacenamiento y transporte. La tecnología de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> puede ser aplicada tanto en centrales de IGCC, como en aquellas de lecho fluido. El coste diferencial para plantas con y sin CCS se puede apreciar a continuación en los costes aproximados de producción de un kilowatio hora para centrales, con distinta tecnología, para la producción de electricidad. Para las centrales de carbón pulverizado (sin CCS), el coste de un kilowatio hora es aproximadamente de 1.48 cents/KWh, para aquellas que constan de una tecnología de gasificación IGCC, el coste sería de 2.2 cents/KWh. Esto supondría un aumento sobre el coste base de un 60% para las plantas de carbón pulverizado y un 50% para aquellas que utilizan tecnología IGCC.

## CONCLUSIONES

Para concluir este proyecto se va comentar de manera breve lo ya visto en secciones anteriores, haciendo un razonamiento sobre las tendencias futuras que puede tener esta tecnología. La tecnología de lecho fluido es una de las más utilizadas en la actualidad. Aún así, al ser las normativas medioambientales cada vez más restrictivas, será necesario revisar y modificar los principios en los que se basa en un medio o largo plazo, para que se cumplan las limitaciones establecidas.

La tecnología de lecho fluido burbujeante se desarrolló en un primer momento enfocada a la combustión de carbón. Después de varias décadas de experimentos, se llegó a la conclusión de que la tecnología de lecho circulante era mejor para ello que esta, debido a su mayor eficiencia en la combustión, en la captura de azufre y a la gran corrosión que sufrían los tubos de intercambio inmersos en el lecho burbujeante. Estos inconvenientes descritos, no son importantes para el quemado de biomasa y otros residuos, por lo que para esto la tecnología de lecho burbujeante es muy conveniente.

La diferencia entre la combustión del carbón y la de la biomasa reside en el hecho de que el carbón tiene normalmente un contenido de humedad y volátiles menor y por ello tiende a quemarse y a desprender su calor en el lecho, mientras que en el caso de la biomasa y otros combustibles de residuos, su calor se desprende a través de la combustión de los volátiles por encima del lecho. Esto permite que los lechos que queman combustibles como biomasa puedan mantener en su interior una temperatura razonable sin necesidad de la inmersión de tubos en su interior, lo que evitaría la corrosión. Es por ello, que los inconvenientes descritos anteriormente para el quemado de carbón en los lechos burbujeantes no se manifiestan en el quemado de biomasa y otros residuos en los mismos.

La biomasa como combustible lleva siendo usada aproximadamente 30 años y los diseños de quemadores están bastante desarrollados. El tamaño de las plantas de quemado de biomasa está limitado por el transporte y disponibilidad de residuos de biomasa en los alrededores de la planta. El quemado de la biomasa produce bajas emisiones tanto de NO como de SO<sub>2</sub>, los problemas principales de dicha combustión son la aglomeración del lecho y la formación de depósitos dañinos en los tubos de intercambio de calor. Actualmente, aunque se han desarrollado algunos métodos para evitar los depósitos y la aglomeración del lecho, se necesitará una investigación más a

fondo para poder aumentar el uso de la tecnología de lecho fluido en el quemado de un rango incluso mayor de combustibles tipo bio y residuos. Para conseguir esto, se necesita un mayor conocimiento de la interacción entre distintos combustibles y en particular entre sus cenizas.

La tecnología de lecho fluido circulante por su parte, se ha desarrollado rápidamente en los últimos treinta años y está plenamente comercializada hasta potencias del orden de 600 MW. Pese a esto, la tecnología de carbón pulverizado sigue siendo la más utilizada para generar potencia a partir de combustibles primarios. La tecnología de CFBC se usa principalmente para combustibles que no se pueden quemar en las calderas de carbón pulverizado. Análisis económicos indican que para potencias de hasta 500 MW las plantas de lecho fluido circulante muestran muchas ventajas tanto térmicas como económicas con respecto a las de carbón pulverizado, incluso cuando se queman combustibles de alta calidad, esta ventaja se debe a su capacidad de quemar combustibles de bajo coste.

Para carbones sub bituminosos de bajo contenido en azufre, el coste de la electricidad para unidades de lecho circulante de 150 MW y 500 MW de potencia, es 8.4 y 2.3 % respectivamente más bajo que para las unidades de carbón pulverizado. Aún no se ha probado que esta tendencia se cumpla para potencias más altas.

Para poder trabajar con combustibles de menor calidad, los lechos fluidos circulantes se tienen que construir de manera más resistente, lo que hace que aumente su coste, aunque el hecho de que la planta pueda quemar combustibles más rentables hace que disminuyan sus costes de operación. Dicha tecnología también tiene una actuación medioambiental muy buena debido a sus bajas emisiones tanto de SO<sub>2</sub> como de NO<sub>x</sub>. Además, los avances en las tecnologías de captura del CO<sub>2</sub> como pueden ser la oxidación o el lazo de calcio, prometen una reducción del coste de captura del CO<sub>2</sub>, haciendo esta tecnología más rentable.

Para que la tecnología de lecho fluido circulante sea capaz de competir con aquella de carbón pulverizado de potencias por encima de 750 MW en años futuros, esta deberá ser construida y utilizada para mayores tamaños con condiciones del vapor más altas para mejorar la economía de escala y mejorando su eficiencia, hay muchas investigaciones en curso con dicha tecnología por lo que las expectativas de mejora son altas.

En cuanto a la tecnología de lecho fluido a presión, para la combustión de carbón, es, en la actualidad, la tecnología de mayor eficiencia para la

generación de potencia basada en el quemado directo de carbón. Esta tecnología puede ser especialmente útil en regiones con poca disponibilidad de agua debido a su tecnología de captura de azufre "in-situ", en vez de una de "fregado" con agua.

Uno de los problemas de la tecnología de lecho fluido a presión es el alto coste de sus plantas, otro es la erosión que sufren los tubos inmersos en el lecho, como sucede en los lechos burbujeantes. Es por ello que se necesita una mejora en los sistemas de lecho fluido a presión para hacer frente a estos problemas. Además de la combustión de carbón, se ha propuesto su uso para la combustión del barro en aguas residuales con reactores de pequeño tamaño que operan a presiones moderadas. Se ha estudiado que el uso de lechos fluidos a presión para el tratamiento de aguas residuales puede reducir en gran medida la potencia necesaria para ello, así como las emisiones de gases de efecto invernadero como  $N_2O$ . Se espera que esta tecnología sea implantada en un corto plazo.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Joris Koornneef, Martin Junginger Y André Faaij, "Development Of Fluidized Bed Combustion- An Overview Of Trends, Performance And Cost", Editorial Elsevier. Pág. 11
- [2] Wen-Ching Yang, "Handbook Of Fluidization And Fluid-Particle Systems", Editorial Marcel Dekker, Inc. Pág 82
- [3] L.L. Faulkner, "Fluidized Bed Combustion", Editorial Marcel Dekker, Inc. Pág. 82
- [4]<http://Www.Boilercleaning.Org/Applications/Knowledgebase/Mechanism/Mechslagging.Htm>
- [5] Wen-Ching Yang, "Handbook Of Fluidization And Fluid-Particle Systems", Editorial Marcel Dekker, Inc. Pág 69
- [6]<http://Www.lea-Coal.Org.Uk/Site/leacoal/Databases/Ccts/Bubbling-Fluidized-Bed-Combustion-Bfbc-At-Atmospheric-Pressure>
- [7]<http://Www.Electrical4u.Com/Fluidized-Bed-Combustion-Types-And-Advantages-Of-Fluidized-Bed-Combustion/>
- [8] Lawrence F. Drbal, Patricia G. Boston, Kayla L-Westra Y R. Bruce Erickson, "Power Plant Engeneering", Editorial Black & Veatch. Páginas 34 a la 41.
- [9] L.L. Faulkner, "Fluidized Bed Combustion", Editorial Marcel Dekker, Inc. Pág 87.
- [10] L.L. Faulkner, "Fluidized Bed Combustion", Editorial Marcel Dekker, Inc. Pág. 85.
- [11] Unep, "Technical Study Report; Biomass Fired Fluidized Bed Combustion Technology For Cogeneration." Pág. 23.
- [12] Wen-Ching Yang, "Handbook Of Fluidization And Fluid-Particle Systems", Editorial Marcel Dekker, Inc. Pág. 491.
- [13] L.L. Faulkner, "Fluidized Bed Combustion", Editorial Marcel Dekker, Inc. Pág. 536.
- [14]<http://Energy.Gov/Fe/Science-Innovation/Clean-Coal-Research/Advanced-Combustion-Technologies/Fluidized-Bed-Technology>
- [15] L.L. Faulkner, "Fluidized Bed Combustion", Editorial Marcel Dekker, Inc. Pág. 536.

- [16] [http://Www.Jcoal.Or.Jp/Eng/CctinJapan/2\\_2a6.Pdf](http://Www.Jcoal.Or.Jp/Eng/CctinJapan/2_2a6.Pdf)
- [17] Encontrados En Uno De Los Documentos De Sciencefinder
- [18] <http://Www.Iea-Coal.Org.Uk/Site/2010/Database-Section/Ccts/Pressurized-Fluidized-Bed-Combustion-Pfbc>
- [19] <http://Www.Pfbceet.Com/Systems.Asp>
- [20] <https://Library.E.Abb.Com/Public/Efee40c94bed1d80c1256ddd00346d60/04-12m219.Pdf>
- [21] <http://Www.Industcards.Com/St-Coal-Sweden.Htm>
- [22] Hidaki Komatsu, Masakatsu Maeda Y Masaru Muramatsu, "A Large-Capacity Pressurized-Fluidized-Bed-Combustion-Boiler Cobined-Cycle Power Plant", Hitachi Review Vol. 50 (2001), No.3
- [23] [http://Nett21.Gec.Jp/Jsim\\_Data/Air/Air\\_3/Html/Doc\\_089.Html](http://Nett21.Gec.Jp/Jsim_Data/Air/Air_3/Html/Doc_089.Html).
- [24] <http://Www.Ihipower.Com/Plants/Rio-Bravo-Jasmin.Php>
- [25] <http://Www.Netl.Doe.Gov/Research/Coal/Energy-Systems/Gasification/Gasifipedia/Comparison-Byproducts>
- [26] <http://Www.Climatetechwiki.Org/Technology/Ngcc>
- [27] <http://Www.ElcoGas.Es/Es/Tecnologia-Gicc/Tecnologia-Diseno>
- [28] <http://Www.Fivemasa.Com/Linea-De-Productos/Sistemas-De-Control-De-La-Contaminacion-Atmosferica/Filtros-Ceramicos-De-Alta-Temperatura/>
- [29] Innovation For Sustainable Electricity Systems, Barbara Praetorius, Dierk Bauknecht, Martin Cames, Corinna Fischer.