



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

**Biomasa; alternativa de combustible para el
funcionamiento de una caldera.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniera Química

P R E S E N T A :

María Guadalupe Cruz Jiménez

ASESOR:

I.Q. Carlos Orozco Hernández

Cuautitlán Izcalli, Estado de México. 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

RESUMEN	4
OBJETIVOS	5
METODOLOGÍA	5
JUSTIFICACIÓN	5
INTRODUCCIÓN	6
Capítulo 1. Biomasa como fuente de energía	7
1.1 Biomasa y su composición	7
1.2 Tipos de biomasa	7
1.2.1 Biomasa sólida (biocombustible sólido)	8
1.2.2 Biogás	9
1.2.2.1 Rellenos sanitarios como fuente de obtención de biogás	10
1.2.3 Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU)	11
1.2.4 Biocarburantes (biocombustibles líquidos)	12
1.3 Energía renovable: la biomasa	12
1.4 Gasificación de biomasa para producción de energía	14
1.4.1 Proceso de gasificación	16
1.4.2 Clasificación de los procesos de gasificación	18
1.4.2.1 Agentes gasificantes	18
1.4.3 Tipos de gasificadores	19
Capítulo 2. Calderas	0
2.1 Funcionamiento de una caldera	1
2.2 Partes de una caldera	2
2.3 Clasificación de las calderas	4
2.3.1 Clasificación según la disposición de los fluidos	4
2.3.2 Clasificación según las necesidades energéticas	5
2.3.3 Clasificación según el tipo de combustible	6
2.3.4 Clasificación según el tiro	7
2.4 Funcionamiento de calderas con biomasa	8
2.4.1 Calderas de biomasa según su tecnología	8
Capítulo 3. Lechos fluidizados para el funcionamiento de una caldera con biomasa ...	9
3.1. Fluidización y lechos fluidizados	9
3.1.1 Fluidización y principios de fluidización	9
3.1.2 ¿Qué son los lechos fluidizados?	10
3.1.3 Fenómenos de comportamiento de los lechos fluidizados	12

3.1.4 Comportamiento de un lecho fluidizado	15
3.2 Aplicaciones de los lechos fluidizados.....	16
3.2.1 Reacciones químicas.....	17
3.2.1.1 Reacciones catalíticas	17
3.2.1.1.1 Craqueo	17
3.2.1.1.1.2 Cloruros de alquilo.....	19
3.2.1.1.1.3 Anhídrido ftálico.....	19
3.2.1.1.1.4. Acrilonitrilo.....	20
3.2.1.1.1.5 Síntesis Fischer-Tropsch.....	20
3.2.1.1.1.6 Otros procesos catalíticos	21
3.2.1.2 Reacciones no catalíticas.....	21
3.2.1.2.1 Reacciones homogéneas	21
3.2.1.2.2. Reacciones heterogéneas	21
3.2.1.2.2.1 Calcinación.....	22
3.2.1.2.2.2 Carbón	23
3.2.1.2.2.3 Incineración.....	23
3.2.1.2.2.4 Contacto físico	25
3.3 Calderas de lecho fluidizado	25
3.4 Etapas a las que se somete la biomasa en la caldera.....	26
3.4.1 Etapa de secado.....	26
3.4.2 Etapa de pirólisis	27
3.4.3 Etapa de reducción	27
3.4.4 Etapa de oxidación	28
3.4.5 Etapa de equilibrio.....	28
3.4.6 Etapa de combustión completa	29
3.5 Proceso de funcionamiento de una caldera con biomasa.....	31
3.5.1 Descripción de etapa del proceso de combustión en el hogar	32
3.5.2 Descripción de etapa en la zona de intercambio de calor.....	33
3.6 Comparativa de los diferentes combustibles de una caldera	33
3.7 Análisis de potencia o capacidad y consumo de energía en calderas utilizando biomasa como combustible	35
Capítulo 4. Gasificación de biomasa en plantas piloto.....	36
4.1. Gasificador de biomasa en lecho fijo.....	36
4.2. Gasificador de biomasa de lecho fluidizado.....	42
CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS	50

RESUMEN

La biomasa, una alternativa de combustible, un tema que aún no se toma demasiado en cuenta siendo una fuente de energía renovable, esto por los altos costos de mantenimiento y en general de implementación de esta, sin embargo, estos últimos años se ha tomado mayor interés en buscar alternativas de energía renovable y contribuir a la reducción de los causantes del calentamiento global.

En este trabajo se pretende dar a conocer la biomasa y en que podemos usarla, explicar el funcionamiento de esta y cómo podemos aplicarla para obtener energía renovable.

Actualmente el tema ambiental más preocupante es la emisión de gases de efecto invernadero, uno de los principales gases de efecto invernadero es el dióxido de carbono.

La actividad principal del ser humano que emite dióxido de carbono es el uso de combustibles fósiles para generar energía y con fines de transporte, así también como ciertos procesos industriales.

En esta tesis se aborda también el tema de las calderas, que justo estas son muy usadas en los procesos industriales por ser uno de los sistemas térmicos de mayor uso en la industria en el territorio nacional. Las calderas a grandes rasgos son dispositivos que aplicando el calor de algún combustible sólido líquido o gaseoso libera por combustión vapor de agua, y este a su vez puede ser utilizado para generación de energía a través de una turbina.

De este modo en esta tesis se pretende explicar el uso de la biomasa como alternativa de combustible en una caldera para que así de esta manera se reduzca el impacto ambiental en cuanto a reducción de emisión de gases de efecto invernadero.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Explicar el funcionamiento de una caldera utilizando biomasa como combustible con el fin de que sea un apoyo para investigaciones futuras y así se pueda desarrollar e implementar las mismas en nuestro país y ayudar a ser amigable con el medio ambiente.

Objetivo(s) particular(es)

- Exponer y dar a conocer la importancia de utilizar un combustible alternativo para el funcionamiento de una caldera y que es amigable con el medio ambiente.
- Comprender a fondo el funcionamiento de una caldera usando como combustible la biomasa aplicada a un campo de desarrollo en operaciones unitarias.
- Aclarar el proceso de gasificación de la biomasa, principal proceso por el cual pasa la biomasa para usarse como biocombustible.

METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo de tesis se basa principalmente en la búsqueda de información actualizada y en su respectivo análisis.

Basándose en las siguientes etapas [1]:

- Definición del problema: se refiere a tener en claro el tema que se desea investigar.
- Búsqueda de la información: investigación de diferentes fuentes como lo son libros, revistas de divulgación o de investigación científica, sitios web, trabajos de tesis, etc.
- Organización de la información: estructurar y comparar de manera sistemática la información encontrada.
- Análisis de la información: examinar detalladamente la información ya organizada, indagando sobre cuáles son los documentos más útiles para la temática en estudio.
- Redactar el trabajo final como formato de tesis.

JUSTIFICACIÓN

Esta recaudación de información se realiza con el propósito de aportar al conocimiento existente sobre el uso de biomasa como alternativa de combustible para el funcionamiento de una caldera, dando un poco de hincapié a la aportación del uso de energías renovables dado que se tiene que poner más atención a el

cuidado del medio ambiente y a la reducción de emisión de gases de efecto invernadero.

INTRODUCCIÓN

El término biomasa es generalmente usado para describir materias provenientes de plantas, tales como madera sin tratar, madera de demolición, residuos forestales, cultivos y sus residuos, etc., aunque también se incluyen algunos residuos municipales e industriales, que contienen importantes cantidades de materia orgánica. La composición de la biomasa presenta, principalmente, carbono, oxígeno, hidrógeno, algo de nitrógeno y una cantidad variable de cenizas, desde muy baja (inferiores a un 0.5% p/p) en los combustibles de tipo maderero, hasta muy alta (cercanas al 50% p/p) para algunos residuos [2].

La biomasa tiene el potencial para llegar a ser una de las principales fuentes de energía primaria a nivel mundial durante el presente siglo, estimándose que para el año 2050 su contribución a la matriz energética global puede estar comprendida entre 100 y 400 EJ/año [3].

De las distintas fuentes de energía renovable, en la mayoría de los países, la biomasa es el primer o segundo recurso (tras la hidráulica) más abundante [4]. Esto aumenta la seguridad en el suministro energético, disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles, los cuales se explotan, generalmente, en países sometidos a una elevada inestabilidad política.

Además, el uso de biomasa presenta una importante contribución a la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero causantes del calentamiento global, una de las mayores preocupaciones sociales en materia energética.

Por último, el uso de biomasa también conlleva una aportación al desarrollo de mercados industriales, favoreciendo a las economías locales [5].

En los últimos años se ha intentado poner especial atención en el cuidado del planeta, es interesante que se puedan crear nuevas formas de crear energías de manera económica y que no conlleven demasiado daño al medio ambiente. Una forma es el tener fuentes de energía eléctrica renovables.

El uso de calderas para la producción de energía eléctrica no es un tema muy nuevo ya que en años anteriores en otros países se han hecho uso de estas fuentes de energía, aun con los altos costos de mantenimiento y en general de implementación de estas. Puede ser un alto costo, pero lo que importa aquí es que dado que, en los últimos años, el daño que se ha hecho al planeta ya es muy grande, un pequeño cambio como lo es la producción de energía eléctrica, pero de manera sustentable sería un tema de importancia actual.

Es por ello que la generación de energía eléctrica mediante calderas de vapor conectadas a una turbina, en donde se pueda utilizar biomasa como combustible, podría ser uno de los siguientes pasos a una mejora considerable en los aspectos sociales, ambientales y económicos del planeta.

Capítulo 1. Biomasa como fuente de energía

1.1 Biomasa y su composición

La definición de biomasa que se utiliza en las directivas de la Unión Europea (UE) es la siguiente [6]:

«Biomasa es la fracción biodegradable de productos, desechos y residuos de la agricultura (incluyendo substancias vegetales y animales), silvicultura e industrias relacionadas, así como la fracción biodegradable de los residuos municipales e industriales».

De acuerdo con la definición anterior se puede decir que es de carácter muy amplio, ya que dentro de ella se engloban diversas de fuentes energéticas que comparten determinadas características, pero que son diferentes entre sí en cuanto a las tecnologías para su obtención y aplicación en la producción energética.

Así pues, de manera general, la biomasa abarca todo un conjunto de materias orgánicas, ya sea por su origen o por su naturaleza. En el *contexto energético*, el término biomasa se emplea para denominar a una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica en un pasado inmediato o de los productos derivados de ésta. También tienen consideración de biomasa la materia orgánica de las aguas residuales y los lodos de depuradora, así como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU), aunque dadas las características específicas de estos residuos se suelen considerar como un grupo aparte [7].

1.2 Tipos de biomasa

El observatorio que realiza el mejor seguimiento de la situación de las energías renovables en la Unión Europea distingue dentro de la bioenergía, o biomasa en sentido amplio, cuatro fuentes energéticas diferentes [6]:

- ❖ biomasa sólida.
- ❖ biogás.
- ❖ fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU).

❖ biocarburantes (también llamados biocombustibles líquidos).

1.2.1 Biomasa sólida (biocombustible sólido)

Los más importantes son los de tipo primario, constituidos por materias lignocelulósicas (compuesto por polímeros de carbohidratos, celulosa y/o hemicelulosa, y un polímero aromático, lignina) procedentes del sector agrícola o forestal y de las industrias de transformación que producen residuos de dicha naturaleza. La paja y los restos de poda de vid, olivo y frutales, la leña, las cortezas y los restos de podas y aclareos de las masas forestales son materia típica para la elaboración de biocombustibles sólidos de origen agrario [7].

También las cáscaras de frutos secos y huesos de aceituna y otros frutos, los orujillos procedentes de la extracción del aceite de orujo en las almazaras y los restos de las industrias del corcho, la madera y el mueble, constituyen una buena materia prima para la fabricación de biocombustibles sólidos.

Otro grupo de biocombustibles sólidos lo constituye el carbón vegetal, hablando en resumen estos resultan de un tratamiento térmico con bajo contenido en oxígeno de la biomasa leñosa, pero al ser el resultado de una alteración termoquímica de la biomasa primaria, debe ser considerado de naturaleza secundaria.

Una parte importante de la biomasa se utiliza directamente, como por ejemplo la leña en hogares y chimeneas, esto se hace desde tiempos inmemorables, modernamente hablando los biocombustibles sólidos requieren un tratamiento especial. Generalizando, las formas en las que más se utiliza este tipo de combustibles son astillas, aserrín, pellets y briquetas.

Las astillas son un material adecuado para ser empleado de manera más común en hornos (cerámicos, panadería, viviendas como calefacción) pero esto de preferencia en lugares rurales o en pequeñas industrias.

Se obtienen a partir de restos leñosos de procesos mediante el cual las cosechas (o masa arbórea) que constituyen un bosque son cuidadas, removidas y sustituidas por nuevas (tratamientos silvícolas) [8].

Cuando las astillas se van a utilizar en quemadores específicos (que necesiten inyectores, por ejemplo), previamente hay que molerla para obtener un combustible más fino y a fin de eliminar restos (piezas metálicas, arena, piedras o vidrios).

Algunas de las presentaciones en las que se pueden presentar la biomasa sólida son las briquetas, según Francisco Marcos Martín [9] estas tienen una característica en

común que es su alta densidad, y su forma suele ser cilíndrica pero no lo es así siempre, y su tamaño varía de diámetro de 2 a 20 cm y de 15 a 50 cm de longitud. Se fabrican por medio de prensas, en las que el material es sometido a altas presiones y se calienta, produciendo en su interior procesos termoquímicos que generan productos adherentes que favorecen la cohesión del material. También se pueden añadir adherentes artificiales para facilitar la cohesión y reducir la presión de prensado. Es una forma normal de tratar el serrín procedente de las industrias del mueble y la madera.

Los pellets (o pellets) son cilindros más pequeños. Según Nojek J. [10] los pellets son un combustible a base de madera comprimida de forma cilíndrica. Se preparan mediante prensas de granulación, análogas a las utilizadas para la fabricación de los piensos compuestos. La compactación se consigue de forma natural o mediante la adición de elementos químicos que no contengan elementos contaminantes en la combustión. La materia prima, al igual que en el caso de las briquetas, debe tener poca humedad y baja granulometría. Es un producto muy manejable que puede servir para automatizar instalaciones de pequeño o mediano tamaño.

1.2.2 Biogás

Los biocombustibles gaseosos que se pueden obtener a partir de la biomasa son el gas de gasógeno, el biogás y el hidrógeno.

La digestión de la biomasa en condiciones anaerobias da origen al llamado "biogás", a razón de unos 300 L por kg de materia seca, con un valor calórico de unas 5,500 kcal/m³ [7].

La composición de biogás es variable, pero está formado principalmente por metano (55-70 %) y CO₂ (30-45 %); y, en menor proporción por sulfuro de hidrógeno (trazas) [11].

El biogás se suele utilizar para generar electricidad. En el caso de los vertederos, su uso para este fin tiene como ventajas la quema del metano y su transformación en CO₂ y agua. De esta forma se reduce el efecto perjudicial del metano como gas de efecto invernadero (su potencial de absorción de la radiación infrarroja es muy superior al del CO₂) [7].

La digestión anaerobia es un proceso típico de depuración, por lo que también se emplea para el tratamiento de aguas residuales y efluentes orgánicos de industrias agrarias o de explotaciones ganaderas. La población microbiana juega un importante papel en las transformaciones de estos residuos orgánicos considerando que disponen de un amplio rango de respuestas frente a la molécula de oxígeno, componente universal de las células, permitiendo establecer bioprocesos en función

de la presencia o ausencia de oxígeno, con el objeto de tratar adecuadamente diversos residuos orgánicos.

1.2.2.1 Rellenos sanitarios como fuente de obtención de biogás

Se denomina relleno sanitario al espacio donde se depositan los residuos sólidos de una ciudad después de haber recibido determinados tratamientos.

El objetivo principal de todo relleno es el de almacenar la basura en áreas o terrenos grandes lejos de las ciudades, disponiéndose en capas de determinado espesor, las cuales se van cubriendo con ciertos materiales aptos para esto, como puede ser, por ejemplo, arcilla o hule polietileno con ciertas características específicas para este uso, sobre todo para lograr tener un adecuado manejo de los olores y gases que se generan después de cubrir dichos residuos [12].

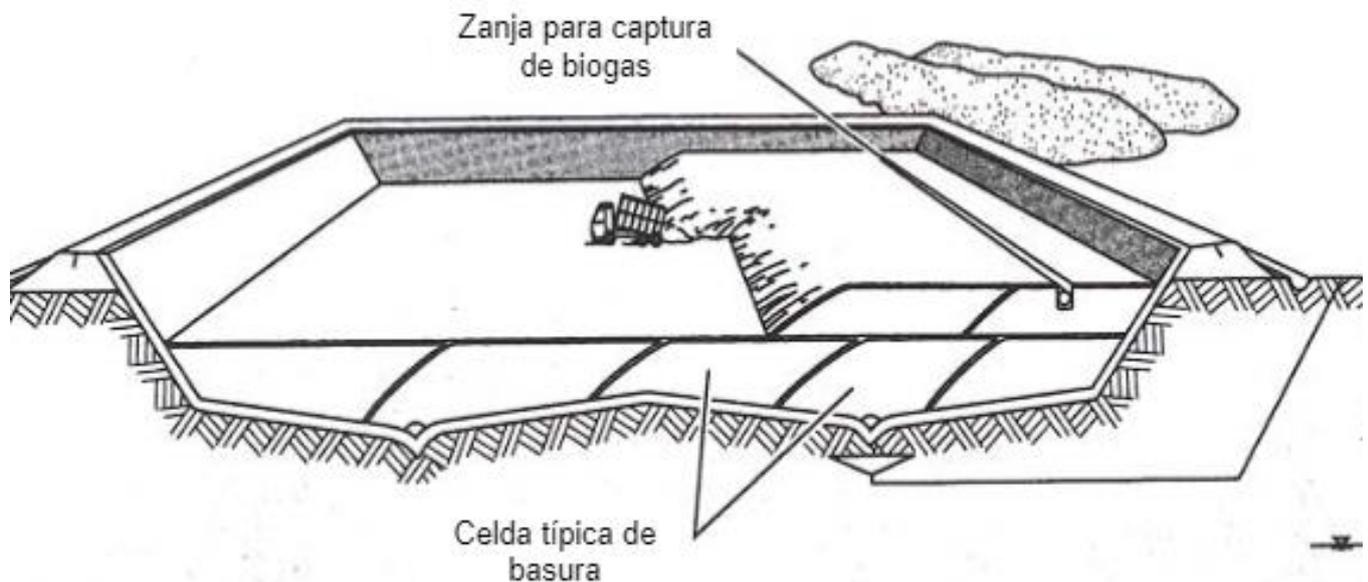


Fig. 1.1 Diagrama ilustrador de un relleno sanitario [12].

Las normas mexicanas aplicadas en este caso son la NOM-083-SEMARNAT-2003 que contiene las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de espacios para la disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial (relleno sanitario).

En la figura 1.1 se puede observar de manera general cómo se conforma un relleno sanitario. Los rellenos sanitarios se conforman de celdas, las cuales protegen el suelo mediante un *liner* (barrera que impide el paso), ésta canaliza los lixiviados (líquidos altamente contaminantes que se generan por la descomposición orgánica de los

residuos). El sistema de drenaje es de suma importancia para que los lixiviados no lleguen al subsuelo ni a la superficie donde la presión del agua y la presión atmosférica son iguales (mantos freáticos), evitando su contaminación.

Siguiendo también todo lo que indica las normas correspondientes de acuerdo con la SEMARNAT, estos espacios también deben contar con la infraestructura necesaria a base de pozos, que capten el gas metano producido por los desechos y así realizar un adecuado manejo de dichos gases; debido a este proceso la colocación de tubos para ventilación es prioritario.

Es importante mencionar, que la separación de la basura es primordial para evitar la generación excesiva de gas metano. Aunque en algunas ocasiones el gas puede recuperarse y ser procesado para crear otras fuentes de energía, tal como la electricidad.

1.2.3 Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU)

Los residuos sólidos urbanos (RSU) de vertederos municipales constituyen una fuente de biogás.

La generación creciente de residuos sólidos urbanos (RSU), fundamentalmente en las grandes urbes, constituye un motivo de preocupación por los graves problemas de salud y ambientales que acarrea su gestión ineficiente. Sin embargo, la valorización (compostaje, lombricultura, digestión anaerobia, entre otros métodos) de la fracción orgánica de los RSU (FORSU) puede contribuir a disminuir esos problemas, al disminuir la cantidad de residuos que se disponen y lograr obtener subproductos útiles a partir de ellos, tales como compostaje, vermicompostaje (uso de lombrices de tierra para descomponer los residuos domésticos y del jardín), biogás y biosólido, lo cual tiene impactos positivos tanto en el medio ambiente como en la economía [13].

Cerdá [6] menciona que se incluye como bio-residuos los residuos orgánicos procedentes de jardines y parques, los residuos procedentes de las cocinas y de los alimentos de los hogares, bares, restaurantes, proveedores y redes de distribución de alimentos y residuos procedentes de las plantas de tratamiento de los alimentos. Es importante mencionar que su transformación en energía se realiza por incineración.

También menciona que la valorización energética de los residuos sólidos urbanos reduce las emisiones de gases de efecto invernadero por dos vías:

- mediante la generación de energía térmica y eléctrica en sustitución de combustibles fósiles
- evitando emisiones de metano en vertederos.

1.2.4 Biocarburantes (biocombustibles líquidos).

Cerdá [6] denomina biocarburantes a los combustibles líquidos de origen biológico que por sus características fisicoquímicas resultan adecuados para sustituir a la gasolina o al gasóleo, bien sea de manera total, en mezcla con estos últimos o como aditivo.

Agregando un poco más a la definición anterior, Fernández J. y col. [14] mencionan que estos se utilizan en motores, estos pueden ser tanto en los motores de explosión de encendido por chispa (ciclo Otto) como en los de combustión interna por compresión (ciclo diésel).

Fernández J. y col [14] también engloban dos tipos de productos de los biocombustibles:

- Bioetanol: etanol obtenido por vía biológica mediante procesos de fermentación como lo es la fermentación de mostos azucarados (zumo natural frutal).
- Biodiesel: se obtiene a partir de aceites vegetales o derivados de estos, pueden utilizarse en motores diésel en sustitución parcial o total del gasóleo de automoción. Es recomendable usar en motores de inyección indirecta.

1.3 Energía renovable: la biomasa

El cambio climático es uno de los problemas ambientales más graves. El Marco de las Naciones Unidas exige una "estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que evite la interferencia antropogénica peligrosa con el sistema climático ...". Las concentraciones de CO_2 en la atmósfera continuarán aumentando a menos que se realicen cambios importantes en la forma en que los combustibles fósiles se utilizan para proporcionar servicios de energía [15].

También Berndes G. y col. [15] mencionan que la biomasa tiene el potencial de convertirse en una de las principales fuentes mundiales de energía primaria durante el próximo siglo (considerando que esta información es tomada de su publicación en el año 2003), y sugieren que los sistemas de bioenergía modernizados contribuyan de manera importante a los futuros sistemas de energía sostenible y al desarrollo sostenible en los países industrializados y en los países en desarrollo.

La biomasa tiene carácter de energía renovable ya que su contenido energético procede de un proceso meramente natural como lo es la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético, esto siendo energía que se libera al romper los enlaces de los compuestos orgánicos en el proceso de combustión, dando como productos finales dióxido de carbono y agua.

Por este motivo, los productos procedentes de la biomasa que se utilizan para fines energéticos se denominan biocombustibles.

Es importante mencionar que la biomasa sólida es la mayor fuente de energía renovable en el mundo, esto, porque existe una cantidad significativa de biomasa tradicional en los países en vías de desarrollo. Hablando estadísticamente supone el 9.2 % de la oferta total de energía primaria en el mundo y el 70.2 % de la oferta total de energía renovable [16].

La biomasa actualmente funciona con mejores niveles de eficiencia y es utilizada para generar energía eléctrica, para producir calor y refrigeración en los hogares y en la industria y para producir biocarburantes para el transporte.

La biomasa está en expansión en el mundo., esto considerando que actualmente se busca encontrar formas de erradicar el uso de combustibles fósiles porque generan emisión de gases de efecto invernadero así también por tratarse de recursos no renovables. mientras que la biomasa trata de un recurso renovable.

La biomasa contribuye de manera importante en la oferta de energía que actualmente se consume en el mundo, llegando a cerca del 11 % del consumo total mundial. En muchos de los países en vías de desarrollo la biomasa es la fuente más importante de energía, llegando a cerca del 35 % del total. En total, se estima que 46 Exajoules (EJ) de la energía primaria global se derivan de la biomasa; con 85 % por uso "tradicional" (leña, abono), y 15 % en uso industrial, como combustibles, procesos de calor y electricidad [16].

Los siguientes datos muestran la importancia del uso de bioenergía en el mundo [14]:

- ❖ 11 millones de hogares se iluminan con biogás
- ❖ 250 millones de estufas eficientes de leña
- ❖ 38,000 MWe de capacidad instalada para producción de electricidad
- ❖ 30 mil millones de litros/año de etanol
- ❖ 180 millones de personas viven en países con normas para mezclar etanol con gasolina

Los países desarrollados están incrementando el uso de la biomasa con el fin de reducir sus emisiones de CO_2 y respetar así los convenios adquiridos en el marco del protocolo de Kyoto firmado en 1997 y que entró en vigor en el año 2005. Se estima

que la participación en cuanto a producción de energía por biomasa vaya en aumento en los próximos años hasta conformar en el próximo siglo el 25 % del total mundial.

Masera, O y col. [16] menciona que en nuestro país la bioenergía representa el 8 % del consumo final de energía, pero debemos considerar que esto data en el año 2005.

Tomando en cuenta todo lo anterior mencionado la biomasa es una fuente importante de energía renovable que puede generar múltiples beneficios en los Estados y Municipios de nuestro país. Las estimaciones indican que se pueden tener potenciales aprovechables de 1.519 hasta 3.034 PJ/año en combustibles leñosos, 168 PJ/año para la obtención de etanol y biodiesel mediante desechos de azúcar/almidón y oleaginosas; y 886 PJ/año por los subproductos agrícolas y agroindustriales [16].

Las estimaciones que Masera O. y col. muestran el gran potencial que tiene México para poder utilizar la biomasa como combustible energético y que abre campos de oportunidades tanto en el ramo tecnológico, económico y político para el mejor aprovechamiento de dichos recursos.

1.4 Gasificación de biomasa para producción de energía

La gasificación de biomasa es un conjunto de reacciones termoquímicas que se produce en un ambiente con presencia de oxígeno en forma controlada que da como resultado la transformación de un sólido en un gas combustible [17].

Dicho de otra manera, la gasificación de la biomasa es un proceso térmico en el cual la biomasa (madera, residuos agrícolas, etc.) son convertidos en un gas combustible con el objeto de producir el llamado “gas de síntesis” o también llamado “gas producido” que puede ser quemado en motores de combustión interna, turbinas o en equipos de producción de calor y potencia.

Se tiene entendido que en el proceso de gasificación de biomasa tienen lugar varias reacciones cuyo orden e importancia depende de las condiciones de operación, del combustible y de los elementos del agente gasificante utilizado. Garay y col., lo agrupan en tres etapas principales que podrían esquematizarse como se muestra en la figura 1.2.

Siguiendo la figura 1.2 se puede observar que la biomasa que entra en un gasificador sufre primeramente por un proceso de secado, derivado de este proceso se obtendrán residuos secos y vapor. Seguido de esto le precede un proceso de descomposición térmica (pirólisis o volatilización), después de esto pueden tener lugar diversas reacciones sólido-gas o gas-gas entre todos los componentes presentes y esto

dependerá del agente gasificante y los productos de la etapa de secado y la descomposición térmica, estos pueden ser sólidos, vapores y gases.

El orden en que las etapas del proceso de gasificación se produzcan y la importancia relativa de ellas, está determinado principalmente por el tipo de reactor y el agente gasificante utilizados.

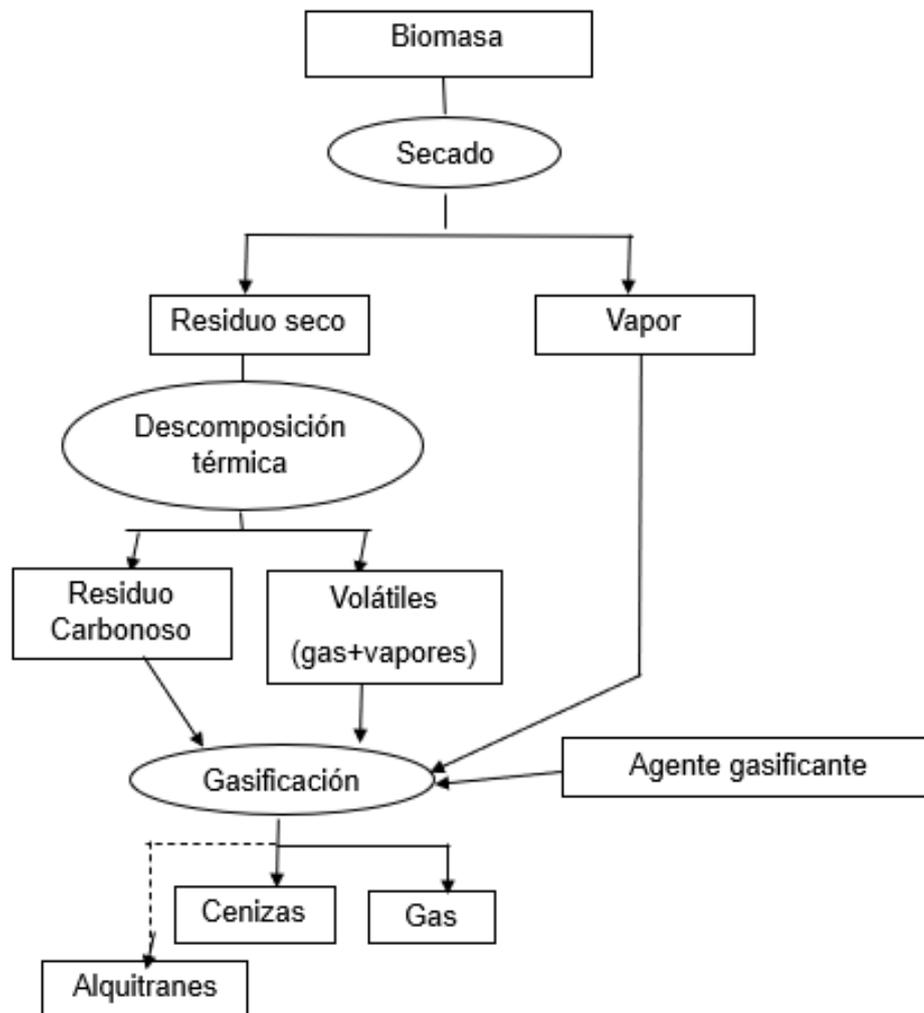


Fig. 1.2 Proceso de gasificación [18].

Al combustible derivado de la gasificación de la biomasa se les define como gases combustibles con bajo poder calorífico y éstos se prevén como combustibles alternativos para diferentes aplicaciones como son calderas, motores de combustión interna, quemadores y turbinas de gas [19].

Augusto C. y col. [19] menciona que para un sistema de gasificación que produzca calor y potencia básicamente consiste en un gasificador, un limpiador de gas y un convertidor de energía que generalmente es un motor o una turbina. La dificultad de la gasificación de biomasa radica en el filtrado del “sinter gas”, pues se requiere de equipos especiales ya que deben tener la capacidad de operar con gases a elevadas

temperaturas, con partículas en suspensión de diferentes tipos y algunas veces altos flujos de masa.

En el presente existe una creciente preocupación en el medio ambiente, que ha hecho generar una serie de cuestionamientos sobre continuar usando combustibles fósiles y por ello la necesidad de producir energía sostenible ha incrementado la investigación en este campo y especialmente en el campo de la gasificación, es importante recalcar que la gasificación de biomasa se perfila como una fuente de energía muy importante a futuro.

1.4.1 Proceso de gasificación

Este proceso se cumple en una cámara cerrada y sellada que opera un poco por debajo de la presión atmosférica. Este proceso se desarrolla en varias etapas como sigue [19]:

- ❖ Secado: En este proceso el agua contenida en la biomasa es removida a una temperatura superior a los 100°C [20].
- ❖ Pirólisis: Es el proceso en el cual la biomasa experimenta una descomposición térmica en ausencia de oxígeno. La pirólisis habitualmente está dividida en pirólisis lenta y pirólisis rápida. En procesos lentos y temperaturas de 300 a 500°C, el producto obtenido es carbón vegetal, mientras que en procesos rápidos (segundos) y temperaturas entre 800 a 1200 °C se obtienen mezclas de compuestos orgánicos de aspecto aceitoso y de bajo pH, denominado aceite de pirólisis [17]. El combustible se descompone en una mezcla de sólido, líquido y gas, véase tabla 1.1.

Sólidos	Líquidos	Gaseosos
leña astillas carbón vegetal	alquitranes aceites aldehídos alcoholes cetonas ácidos orgánicos	biogás hidrógeno

Tabla 1.1 Contenido de la mezcla del combustible por biomasa

Cabe mencionar que también se incluye el proceso de secado y precalentamiento que tiene lugar al entrar la biomasa al gasificador, sin embargo, este proceso no implica ninguna reacción química. Esto porque solo consta de biomasa húmeda y el calor que dará como resultados la biomasa seca y generación de vapor.

- ❖ Oxidación: Dado que es introducido aire en el proceso implica el conjunto de reacciones de oxidación tanto homogénea como heterogénea, fundamentalmente exotérmica, mediante las que se genera dióxido de carbono, agua y sales minerales (cenizas) y el calor necesario en forma de gases para que el proceso se mantenga [17].

A continuación, en la tabla 1.2 se muestran las reacciones químicas presentes en esta etapa [21]:

Reacciones Homogéneas	Reacciones Heterogéneas
$C_{(s)} + 2H_{2(g)} \rightarrow CH_{4(g)}$ (1)	$CO_{(g)} + H_2O_{(l)} \rightarrow CO_{2(g)} + H_{2(g)}$ (1)
$C_{(s)} + H_2O_{(l)} \rightarrow CO_{(g)} + H_{2(g)}$ (2)	$CO_{(g)} + 3H_{2(g)} \rightarrow CH_{4(g)} + H_2O_{(l)}$ (2)
$C_{(s)} + CO_{2(g)} \rightarrow 2CO_{(g)}$ (3)	

Tabla 1.2 Reacciones químicas presentes en la etapa de oxidación.

En las reacciones homogéneas el carbono sólido es convertido en fase gaseosa en presencia de hidrógeno y oxígeno, la reacción (1) es exotérmica y favorece la formación de metano, la reacción (2) es endotérmica conocida como *Water Gas Shift*, en la cual el vapor de agua se convierte en hidrógeno mientras se da la reacción (3) para la formación de monóxido de carbono, conocida como la reacción de Boudouard.

- ❖ Reducción: En la zona de reducción, numerosas reacciones químicas a alta temperatura se presentan (600 a 1500 °C). En esta etapa se obtiene principalmente un gas combustible formado por monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno y metano. La reducción está constituida por las reacciones sólido-gas o en fase gas, aquí el sólido remanente se convierte en gas. Principalmente se trata de reacciones endotérmicas, algunas de las cuales sólo tienen lugar en determinadas condiciones, como ocurre con algunas reacciones de hidrogenación y/o reformado.

Las etapas de oxidación y reducción pueden considerarse conjuntamente en una sola etapa de gasificación en la que tienen lugar todo tipo de reacciones posibles entre el carbono en estado sólido y la mezcla gaseosa presente. Las reacciones principales de la etapa de reducción son endotérmicas ya que necesitan absorber energía, por lo tanto, la temperatura de reacción disminuirá durante la reducción [17].

Para obtener más detalle de lo que sucede en cada una de las etapas véase el capítulo 3.4. *Etapas a las que se somete la biomasa en la caldera.*

1.4.2 Clasificación de los procesos de gasificación

Generalmente se consideran dos criterios para clasificar los procesos de gasificación de biomasa, según el agente gasificante utilizado y según el movimiento relativo entre el agente gasificante y el sólido [18].

1.4.2.1 Agentes gasificantes

Se entiende como agente gasificante al gas que se utiliza en el proceso termoquímico de gasificación para producir gas combustible a partir de un sustrato carbonoso.

El agente gasificante afecta a la calidad del gas generado y a la economía del proceso. Según el agente gasificante que se emplee se producen efectos distintos en la gasificación, y el gas de síntesis (producto final) varía en su composición y poder calorífico [22].

La operación autotérmica de un gasificador implica la necesidad de aportar oxígeno, para generar el calor necesario para los procesos de gasificación. La opción más sencilla y económica para esto, es el empleo de aire [17].

Sin embargo, si se gasifica con aire, parte de la biomasa procesada se quema con el oxígeno presente y el resto de la biomasa sufre la reducción. No obstante, el 50% del gas de síntesis es nitrógeno y, por ende, esto disminuye su poder calorífico y la eficiencia global del proceso.

La posibilidad de utilizar exclusivamente oxígeno por medio de unidades de destilación o adsorción de aire elimina la ineficiencia asociada a la dilución, pero es, por el contrario, difícil de justificar económicamente.

Dependiendo del tipo de agente gasificante se obtienen diferentes calidades de gases, si es aire se logra gas pobre (gas de síntesis) y si es oxígeno se logra gas rico, con mayor poder calorífico.

Hablando de "innovación", también se puede hacer uso de vapor como agente gasificante. Esta opción cuenta con la ventaja de que el vapor es un reactivo en las reacciones de gasificación y reformado, y su costo de generación es considerablemente inferior al del oxígeno. Sin embargo, el uso de vapor cuenta con el inconveniente de la necesidad de aportar calor al reactor de manera indirecta. Por lo tanto, aunque el uso de vapor es tecnológicamente viable para la generación de un gas producto de buena calidad y sin dilución asociada al nitrógeno, sigue presentando una economía desfavorable. La puesta en práctica de este concepto de gasificación

se ha orientado desde dos enfoques distintos: el uso de mezclas oxígeno vapor y el uso de gasificadores indirectos [2].

Hablando de la configuración sólido-agente gasificante, si se considera el movimiento relativo del agente gasificante y el sólido gasificado, se establece otra clasificación según el tipo de reactor utilizado en la gasificación de la biomasa. Existen diferentes configuraciones de reactores que definen distintos modos de contacto entre la biomasa y el agente, las cuales se ven reflejadas en la distribución de productos obtenidos de cada equipo como se muestra en la Tabla 1.3.

Agente Gasificante	Poder calorífico superior (MJ/m ³)	Composición del gas obtenido (% en volumen)						Uso
		H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	C ₂	
Aire	<6	16	20	12	2	50	-	combustible
Oxígeno	10 a 20	32	48	15	2	3	-	combustible gas de síntesis
Vapor de agua	10 a 20	50	20	22	6	-	-	combustible gas de síntesis
Hidrógeno	>30	-	-	-	-	-	-	Sustituto del gas natural

Tabla 1.3 Mezcla de gases obtenida del proceso de gasificación. [17, 23]

1.4.3 Tipos de gasificadores

Existe una amplia variedad de reactores que se utilizan para los procesos de gasificación de biomasa. Su elección depende de varios factores, como pueden ser la granulometría de la biomasa residual, la humedad, la limpieza del gas de síntesis requerida o según el manejo del combustible [17].

Los gasificadores pueden ser clasificados de acuerdo con su configuración y al movimiento relativo entre el reactor y la materia prima. Existen cuatro clases principales de gasificadores: lecho fijo, lecho fluidizado, flujo de arrastre y lecho móvil. Los de lecho fluidizado y lecho fijo se subdividen por el tipo de corriente que poseen [24].

Los gasificadores más conocidos utilizados para la biomasa son los de lecho fijo y lecho fluidizado.

- ❖ Lecho fijo: la biomasa permanece estática dentro del gasificador y el proceso de pirólisis va consumiendo la totalidad de la carga ingresada. Estos a su vez se subdividen en si son de flujo ascendente o descendente, esto está dado por el sentido relativo de las corrientes de la biomasa y el agente gasificante, esto se resume en la siguiente tabla (Tabla 1.4):

Flujo ascendente (updraft)	Flujo descendente (downdraft)
<ul style="list-style-type: none"> • Corrientes circulan en sentido opuesto, el sólido (biomasa) entra por la parte superior. • Desciende lentamente en contracorriente con el flujo de gas generado por el agente gasificante. • El agente gasificado se introduce por el fondo del gasificador. 	<ul style="list-style-type: none"> • Corrientes paralelas • El sólido (biomasa) entra por la parte superior. • El oxidante y el vapor arrastran las partículas de carbón cuando fluyen a través del gasificador.

Tabla 1.4 Descripción resumida de gasificadores de lecho fijo.

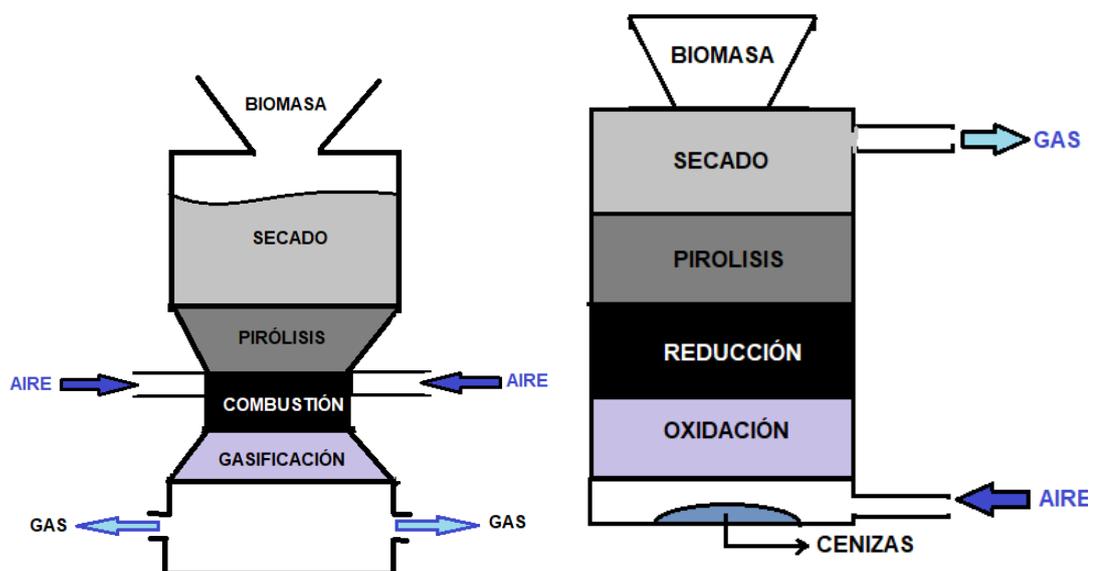


Fig. 1.3 Gasificador udraft (derecha) y gasificador downdraft (izquierda).

- ❖ **Lecho fluidizado:** En este tipo de gasificador fluye aire a través de un lecho de partículas sólidas a velocidad suficiente para mantenerlas en estado de suspensión, y en donde se comienza por calentar externamente el lecho. La biomasa se introduce tan rápido como se alcanza una temperatura suficientemente elevada. Las partículas del combustible se introducen en el lecho del reactor, se mezclan rápidamente con el material del lecho y se calientan casi instantáneamente, alcanzando así la temperatura de este. Como resultado de este tratamiento, el combustible realiza la etapa de pirólisis muy rápidamente, dando como resultado una mezcla de componentes con una cantidad relativamente elevada de materiales gaseosos. En la fase gas se reproduce una nueva gasificación y reacciones de los alquitrans [25]. En el proceso de gasificación por lecho fluidizado el agente gasificante mantiene en suspensión inerte a la biomasa, hasta que las partículas de éste se gasifican, se convierten en cenizas volátiles y son arrastradas por la corriente del gas de síntesis. De este tipo de gasificadores se pueden mencionar dos: burbujeante y circulante, sus características se describen en la tabla 1.5 y se ilustran en la fig. 1.4.

Lecho fluidizado burbujeante	Lecho fluidizado circulante
<ul style="list-style-type: none"> • velocidad del gas es relativamente baja • Los sólidos inertes permanecen en el gasificador. • La interfase muestra un comportamiento similar a las burbujas de gas. • Mezcla al interior del reactor donde no se distinguen ninguna de las zonas de secado, pirólisis o reducción 	<ul style="list-style-type: none"> • presentan una dirección de flujo similar a los gasificadores de lecho fluidizado burbujeante • La biomasa se quema en un régimen de fluidización rápida. • La velocidad del gas es suficiente para retirar todos los sólidos del reactor. • El material particulado que abandona el gasificador es capturado por un gas separador de sólidos.

Tabla 1.5 Descripción de lechos fluidizados.

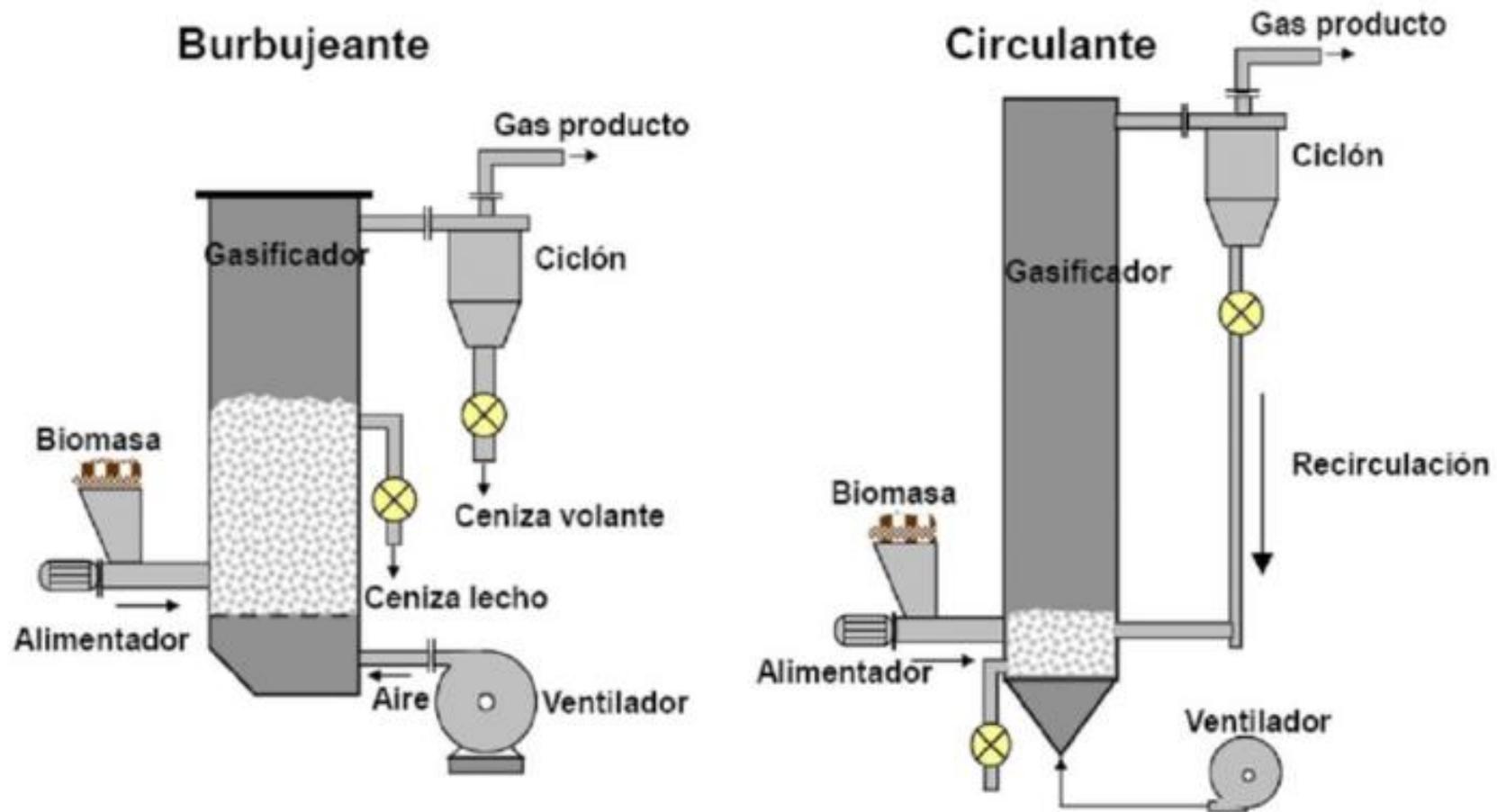


Fig.1.4 Lecho fluidizado burbujeante y circulante [25].

Capítulo 2. Calderas

Una caldera es un recipiente metálico cerrado que, aplicando el calor de algún combustible sólido, líquido o gaseoso libera por combustión, produce vapor o calienta un fluido a una temperatura superior a la del ambiente y presión por encima de la atmosférica. Por tratarse de un recipiente a presión, suele ser de acero al carbono y dispone de diversos dispositivos de seguridad [26].

Las calderas constituyen uno de los sistemas térmicos de mayor uso en la industria en el territorio nacional. A continuación, en la tabla 2, se presenta una estimación de cuántos equipos pueden existir en operación en todo el territorio nacional. Se indican los rangos de eficiencia energética que los caracterizan, un rango de consumo energético en GJ anuales que considera dos turnos de operación por día para equipos menores (incluida una hora adicional de puesta en marcha de la caldera) y tiempo completo de trabajo para equipos mayores [27].

Equipo térmico	Potencia	No. de equipos En operación	Eficiencia		Consumo de energía (GJ/año)		Consumo Nacional (TJ/año)	Consumo en PyME (%)
			De	a	De	a		
Calderas	10 a 300 caballos caldera (CC)	500,000 en operación 750,000 en respaldo	60%	90%	1,500	125,000	260.28	58.77

Tabla 2 Caldera como sistema térmico en las PyME's.

Hablando también en cuanto a potencial de ahorro energético, las calderas son uno de los principales sistemas térmicos que permiten un potencial de ahorro satisfactorio. En la siguiente tabla (tabla 2.1) se presenta información acerca de la medida principal para ahorrar energía, el potencial de ahorro, el ahorro económico que puede producir (expresado en pesos mexicanos) y además se indica el tiempo de retorno que puede esperarse.

Sistema térmico	Medida de ahorro	Potencial de ahorro por sustitución o reconversión	Ahorro económico	Costo	Tiempo de retorno (años)
Calderas	Sustitución de caldera eficiencia <75 %	13%	\$13,500/CC	\$30,000/CC	4
	Sustitución de caldera eficiencia 75 % a 80 %	5%	\$9,200/CC	\$30,000/CC	2

Tabla 2.1 Potencial de ahorro energético en los sistemas térmicos: caldera.

La Secretaría de Energía [27] menciona que existen acciones derivadas de realizar diagnósticos energéticos y que han permitido a las empresas reducir sus pérdidas de energía y fomentar el funcionamiento eficiente de los equipos como por ejemplo la distribución eficiente de carga en calderas en función de la eficiencia de planta, utilización eficiente del mínimo de equipos, regular la relación aire–combustible, utilizar quemadores de alta eficiencia, instalación de equipos de recuperación de calor (economizadores), recuperar o incrementar el retorno de condensados, aprovechar pérdidas de calor por radiación, cogeneración de energía, etc.

2.1 Funcionamiento de una caldera

El principio básico del funcionamiento de las calderas consiste en una cámara donde, con la presencia de aire como comburente y un combustible, se produce la combustión y un intercambiador de calor donde el calor producido por esta combustión se transmite al fluido caloportador, encargado a su vez de llevar el calor a los puntos de consumo. En el calentamiento del fluido caloportador de una caldera intervienen los tres mecanismos de transmisión de calor reconocidos [26].

- ❖ **conducción:** por contacto directo entre la llama y el cuerpo de la caldera que contiene el fluido caloportador. Se presenta una transferencia de energía de la región de alta temperatura a la de baja temperatura [28].
- ❖ **radiación:** mecanismo que implica la transferencia de energía radiante de una fuente a un receptor, cuando esto sucede parte de la energía es absorbida por el receptor, lo que genera un aumento de temperatura en el mismo, en la caldera esto se da desde la llama a las paredes del hogar donde tiene lugar la combustión [28].
- ❖ **convección:** transferencia de calor entre las partes relativamente frías y calientes de un fluido por mezclado [28]. En este caso estaríamos hablando

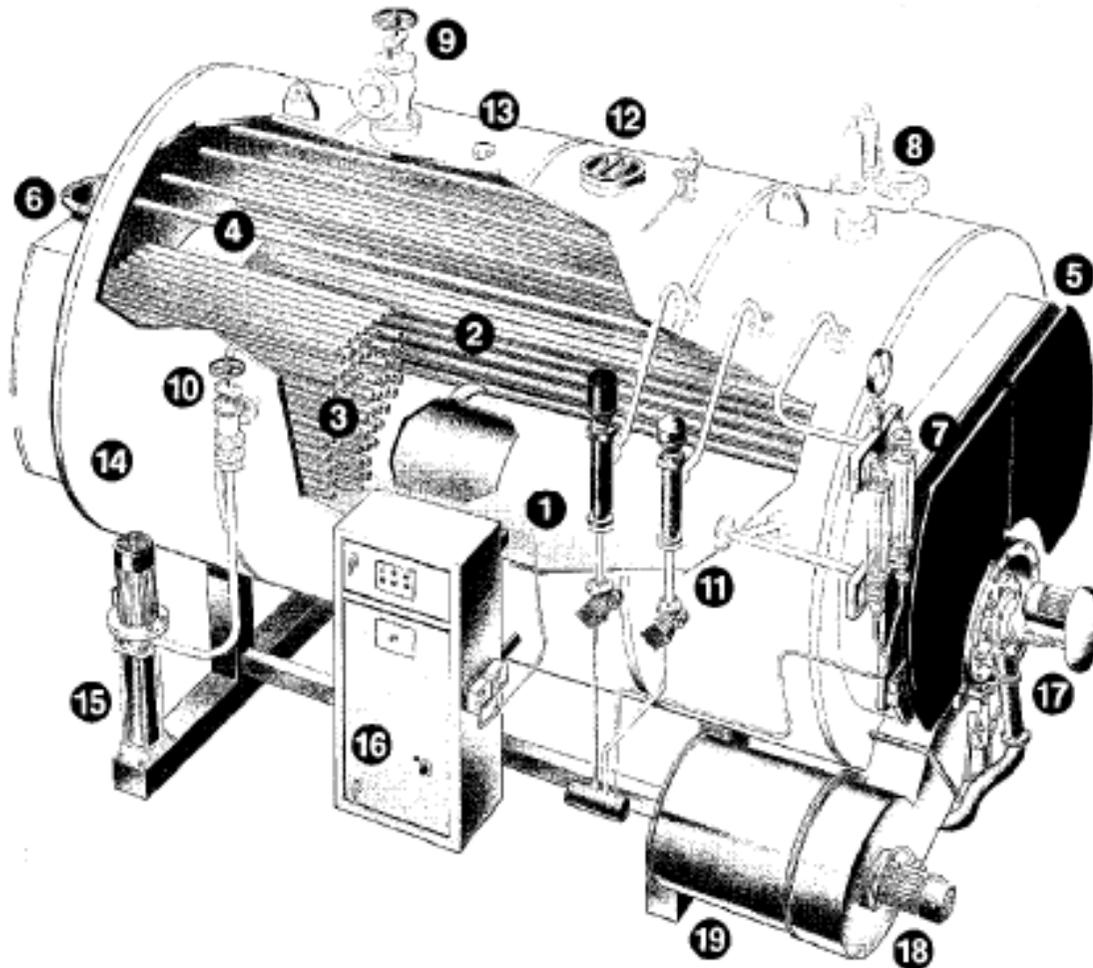
que es desde los humos calientes producidos en la combustión a las partes metálicas de la caldera.

2.2 Partes de una caldera

Aunque la estructura real de una caldera dependerá del tipo, de forma general todas las calderas constan de las siguientes partes [26]:

- ❖ **Quemador:** sirve para quemar el combustible y producir la llama.
- ❖ **Hogar o cámara de combustión:** aquí se encuentra el quemador, en su interior se realiza la combustión (en este caso de la biomasa) y la generación de los gases calientes. Es donde se alcanzan las temperaturas más altas, próximas a los 2000 °C.
- ❖ **Tubos de intercambio de calor:** a través de su superficie se efectúa el flujo de calor desde los gases generados en la combustión hasta el fluido caloportador. Suelen incluir elementos (retardadores) o características específicas en la forma del combustible con el fin de mejorar el coeficiente de transmisión de calor humos-fluido.
- ❖ **Chimenea:** es la vía de escape de los humos y gases de combustión hacia el exterior después de haber cedido calor al fluido caloportador. Su trazado es vertical prácticamente en su totalidad y presenta una envoltura aislante y resistente.
- ❖ **Salida de fluido caliente:** desde donde el vapor o el fluido caliente se envía hacia los puntos de consumo de la instalación.
- ❖ **Bomba:** es el equipo encargado de introducir el fluido frío en estado líquido en la caldera para reemplazar el volumen de fluido caliente que ha abandonado la misma. Para un funcionamiento eficiente, se aconseja que el fluido frío entre en la caldera a una temperatura superior a la del ambiente.
- ❖ **Carcasa:** contiene el hogar y el sistema de tubos de intercambio, se encuentra recubierta por una envoltura con material aislante térmico, con el fin de disminuir las pérdidas de calor y proteger a los operarios contra quemaduras.

En la figura 2.1 se ilustra de manera general algunos de los componentes que hay en una caldera, se pueden ver que además de las principales partes que debe contener una caldera también se observa algunos accesorios más que dependen del tipo de caldera que se tenga.



- 1 Hogar.
- 2 Tubos (2do paso).
- 3 Tubos (3er paso).
- 4 Cámara de combustión.
- 5 Caja de humos frontal.
- 6 Caja de salida posterior.
- 7 Visor.
- 8 Válvula de seguridad.
- 9 Válvula de salida de vapor.
- 10 Válvula de retención de agua.
- 11 Controles de nivel.
- 12 Entrada de hombre.
- 13 Conexión de repuesto.
- 14 Carcaza.
- 15 Bomba agua.
- 16 Panel de control.
- 17 Quemador
- 18 Ventilador
- 19 Silenciador ventilador

Fig. 2.1 Imagen Ilustrativa de los componentes de una caldera. [29]

2.3 Clasificación de las calderas

2.3.1 Clasificación según la disposición de los fluidos

Según la posición relativa entre el fluido a calentar y los gases de combustión, las calderas se clasifican en acuotubulares y pirotubulares [26], en la tabla 2.2 se resumen las principales características de cada uno.

Caldera acuotubulares	Calderas pirotubulares
<ul style="list-style-type: none">● el fluido a calentar se desplaza por el interior de los tubos● gases de combustión circulan por el exterior de los tubos● se requieren presiones de trabajo elevadas (mayor a 22 bar).● recomendado para volúmenes pequeños de agua.● velocidad del agua considerablemente altas por ende hay transmisión de calor eficiente● capacidad de producción de vapor elevada● Es necesario alimentarlas con agua de gran pureza para evitar incrustaciones en el interior de los tubos.● costos elevados	<ul style="list-style-type: none">● El gas de combustión circula por el interior de los tubos que se encuentran sumergidos en el agua.● presión de trabajo inferior a 22 bar.● calienta gran volumen de agua● mejor adaptación a fluctuaciones en la demanda de vapor de la instalación● La exigencia de calidad del agua de alimentación es menor.● se clasifican según la disposición del haz tubular:<ul style="list-style-type: none">-verticales: de parte inferior a superior de la caldera.-Horizontal: si va de la parte delantera a la trasera● se clasifican según del número de haces tubulares:<ul style="list-style-type: none">-de un paso de recorrido de los gases-de varios pasos de gases.

Tabla 2.2 Clasificación de las calderas de acuerdo con disposición de fluidos.



Fig. 2.2 Ejemplo de caldera acuotubular (izquierda) y de caldera pirotubular de dos pasos de humo (derecha) [30].

2.3.2 Clasificación según las necesidades energéticas

Esta clasificación está dada según la naturaleza del fluido caloportador y la temperatura a la que éste se va a emplear en el proceso, la información se resume en la tabla 2.3 [26]:

calderas de agua caliente	calderas de agua sobrecalentada	calderas de vapor	calderas de fluido térmico
<ul style="list-style-type: none"> -El fluido caloportador es el agua. -Temperatura máxima de servicio menor a 100 °C. -Pueden ser acuotubulares y pirotubulares. 	<ul style="list-style-type: none"> -El fluido caloportador es agua sometida a presión. -La temperatura máxima de servicio es superior a 110 °C. -Pueden ser acuotubulares y pirotubulares. 	<ul style="list-style-type: none"> -El fluido caloportador es vapor de agua. -Pueden ser acuotubulares y pirotubulares. 	<ul style="list-style-type: none"> -El fluido caloportador es distinto al agua. -Únicamente pueden ser acuotubulares.

Tabla 2.3 Clasificación de calderas según sus necesidades energéticas.

2.3.3 Clasificación según el tipo de combustible

Según el tipo de combustible empleado para producir calor, las calderas se clasifican en calderas de combustibles sólidos, combustibles líquidos y calderas de combustibles gaseosos, sus características se resumen en la tabla 2.4 que se presenta a continuación [26]:

calderas de combustibles sólidos	calderas de combustibles líquidos	calderas de combustibles gaseosos
<p>-Ejemplos de este tipo de combustible: carbón, bagazo o material vegetal.</p> <p>-Combustibles de bajo costo, en algunos casos gratis (trátase de subproductos de un proceso, como bagazo de caña de azúcar).</p>	<p>-Ejemplos de este tipo de combustible: gasolinas, gasóleos y fuelóleos.</p> <p>-Se deben atomizar para facilitar su mezcla con el aire comburente.</p> <p>-En algunos casos se precalientan para mantener la fluidez y permitir su bombeo desde el lugar de almacenamiento al quemador.</p>	<p>-Ejemplos de este tipo de combustible: gas natural y gases licuados del petróleo (propano y butano).</p> <p>-Fácil control de combustión y requieren menos frecuencia de mantenimiento.</p> <p>-Los gases se transportan por la propia presión del sistema.</p> <p>-costo de operación elevado.</p> <p>-Se requiere un cuidado especial por tratarse de combustibles explosivos.</p>

Tabla 2.4 Clasificación de calderas según el combustible a implementar.

2.3.4 Clasificación según el tiro

Esta clasificación consta de acuerdo con la forma como se genera el caudal de aire necesario para iniciar y mantener el proceso de combustión y tras éste evacuar los productos originados, sus características resumidas se presentan en la tabla 2.5 siguiente [26, 31]:

Tiro natural	Tiro forzado	Presurizado
<p>-El flujo se da por circulación natural debido a la diferencia de densidad entre los fluidos (aire ambiente y productos de combustión).</p> <p>-No requieren sistemas de ventilación adicionales para evacuar los gases de combustión.</p>	<p>-Requieren sistemas de ventilación adicionales para evacuar los gases de combustión, como lo son uno forzado y uno inducido.</p> <p>- Ventilador de tiro forzado inyecta el aire de combustión al hogar</p> <p>-Ventilador de tiro inducido extrae de la cámara los gases generados, manteniendo la presión del hogar ligeramente negativa (presión de succión).</p>	<p>-Un ventilador de tiro forzado inyecta el aire de combustión al hogar</p> <p>-Los gases producidos salen por la presión generada en el hogar.</p>

Tabla 2.5 Clasificación de calderas según el tiro.

2.4 Funcionamiento de calderas con biomasa

Las calderas de biomasa funcionan de forma similar a cualquier otro tipo de caldera, su singularidad radica en el tipo de combustible que emplea, es decir, que está clasificada como una caldera de combustible sólido, en este caso refiriéndose a la biomasa.

Al igual que otro tipo de calderas convencionales, el calor generado durante la combustión se transmite a un intercambiador de calor mediante un circuito de agua caliente.

La alimentación de las calderas de biomasa se realiza mediante un contenedor donde es almacenado el biocombustible. Desde este contenedor sale un tornillo sin fin que conduce la biomasa al interior de la caldera donde sucederá la combustión y la generación de energía térmica.

El residuo de la combustión son las cenizas. Las cenizas se acumulan en la parte inferior denominada cenicero. Este debe vaciarse y limpiarse [32].

2.4.1 Calderas de biomasa según su tecnología

Actualmente podemos clasificarlas en cuatro grupos [32], estos se muestran en la tabla 2.6 que se presenta a continuación:

Caldera estándar de biomasa	Calderas adaptadas a biomasa	Calderas de pellet condensación	Calderas mixtas
<ul style="list-style-type: none"> -Alcanzan rendimientos de un 92 %. -Diseñados para biomasa específica (leña, astillas o pellets). -Sistemas automáticos de alimentación de biomasa, de limpieza del intercambiador y extracción de cenizas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Rendimientos entre el 75 y 85 %. -Calderas preparadas para combustibles como carbón o gasóleo modificadas para poder usar biomasa. 	<ul style="list-style-type: none"> -Rendimientos de hasta un 103 % -Empleo de combustible exclusivo como el Pellet. -Calderas de tamaño pequeño. 	<ul style="list-style-type: none"> -Rendimientos en torno al 92 %. -Alimentación de combustible automática.

Tabla 2.6 Calderas de biomasa según su tecnología.

Capítulo 3. Lechos fluidizados para el funcionamiento de una caldera con biomasa

El proceso por el que pasa la biomasa en una caldera es llamado “gasificación” (véase capítulo 1.4) , durante este proceso ocurren varios fenómenos, esto dependiendo del tipo de caldera que se esté utilizando, uno de estos fenómenos es la fluidización y lo que esto conlleva a su vez, porque puede darse de diferentes maneras dependiendo del tipo de lecho que sea.

El lecho fluidizado es un concepto que se usa cuando se habla de biomasa en calderas, es por eso que en este capítulo se hablará precisamente de los conceptos primordiales para que se pueda entender un poco más como es el proceso de gasificación de la biomasa.

3.1. Fluidización y lechos fluidizados

3.1.1 Fluidización y principios de fluidización

La fluidización ocurre cuando pequeñas partículas sólidas son suspendidas por una corriente de un fluido que se dirige de abajo hacia arriba venciendo el peso de estas. La velocidad del fluido debe ser lo suficientemente alta como para suspender las partículas, pero a la vez no tan elevada como para expulsar las partículas fuera del recipiente. Las partículas sólidas rotan en el lecho rápidamente, creando un excelente mezclado [33].

La fluidización o fluidificación convierte un lecho de partículas sólidas en una masa suspendida y expandida que posee muchas de las propiedades de un líquido. Esta masa tiene un ángulo de reposo igual a cero, busca su propio nivel y adopta la forma del recipiente que la contiene [34].

En el tema de la fluidización por lo general (en la mayoría de los casos) el material que se fluidiza es casi siempre sólido y el medio que fluidiza puede ser tanto líquido como gas. Las características y comportamiento de los lechos fluidizados dependen fuertemente de las propiedades del sólido y del fluido.

La técnica de fluidización es generalmente aplicable a materiales granulares; esto se refiere a sólidos dentro de un rango de tamaño de entre 10 micras y 3 mm, lo que incluye dos clases principales, sólidos en polvo y granulares. Sólidos en polvo se refiere a sólidos compuestos de partículas de hasta 100 micras, con más de subdivisiones tales como polvos ultrafinos (0-1 micras), superfinos (1-10 micras) o

granulares (10-100 micras). Un sólido granular, está compuesto de material de entre 100 y 300 micras de tamaño [35].

En la fluidización se logra una mezcla homogénea entre partículas y el fluido. Cuando las velocidades de gas son mayores a la velocidad mínima de fluidización, algunos de los gases fluyen como paquetes de gas llamados burbujas. Este movimiento de burbujas conduce a [36]:

- Mezclas sólidas rápidas
- buen contacto entre partículas y gas
- uniformidad axial en temperatura y composición

Estas propiedades hacen que la fluidización sea útil en operaciones tales como:

- reacciones químicas
- intercambio de calor
- transferencia de masa
- mezclado de sólidos

La adición de partículas de un tamaño más fino a un lecho de partículas gruesas, o bien la de las partículas gruesas a un lecho de fines, generalmente dan como resultados una mejor fluidización.

3.1.2 ¿Qué son los lechos fluidizados?

Para explicarlo de una manera sencilla, imaginemos que tenemos un lecho de partículas sólidas (por ejemplo; arena) dentro de un cilindro vertical e inyectamos aire a una cierta velocidad por la parte inferior del mismo, debajo de esta cama de partículas existe una “base” que tendrá orificios donde podrá entrar el flujo de aire a través de las partículas [37].

Como lo describen Kunii y Levenspiel [38], si el fluido en movimiento asciende a baja velocidad, en principio éste se filtra a través de los espacios entre las partículas, que permanecen estacionarios; este estado se denomina “lecho fijo”.

Con un incremento en la velocidad del fluido (aire), las partículas se mueven de forma independiente por medio de pequeñas vibraciones, en este momento ya deja de ser un lecho fijo, si se sigue aumentando la velocidad, se alcanza un punto donde todas las partículas se encuentran suspendidas por el flujo ascendente del fluido. En este punto la fuerza de fricción entre el fluido y las partículas se equilibra con el peso de éstas, desapareciendo entonces la fuerza de compresión entre partículas vecinas o que están próximas unas a otras. Este estado se denomina “lecho en comienzo de fluidización”, este punto marca la transición entre el lecho fijo y el lecho plenamente

fluidizado. Todo lo anterior se puede observar de manera visual y gráfica en la figura 3.1.

Algo muy importante que debe mencionarse, relacionando los lechos fijos, es que están muy relacionados con la caída de presión; la caída de presión de un lecho fijo aumenta a medida que la velocidad del fluido se incrementa (fig. 3.2)

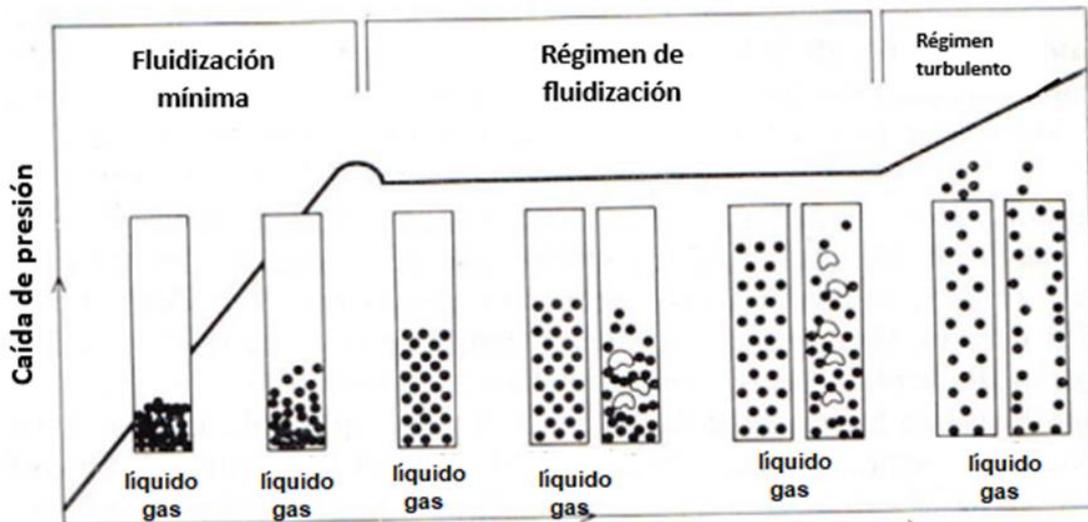


Fig. 3.1 Respuesta de un lecho fluidizado a un flujo de fluido hacia arriba. [38]

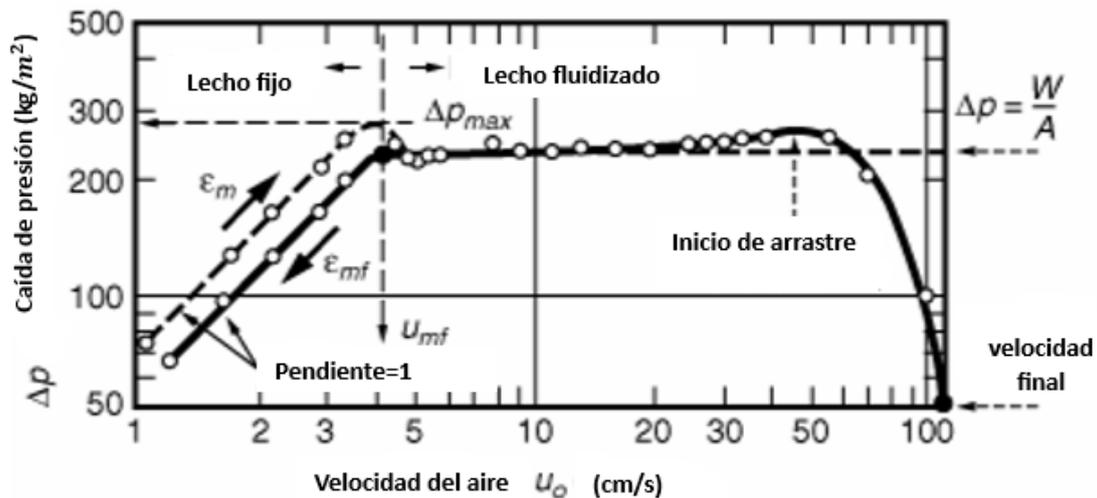


Fig. 3.2 Caída de presión en función de la velocidad de fluidización. Partículas de tamaño uniforme [38].

3.1.3 Fenómenos de comportamiento de los lechos fluidizados

De acuerdo con Kunii y Levenspiel [38], si se considera el lecho vertical relleno de partículas sólidas mostrado en la figura 3.3. se pueden describir los siguientes comportamientos:

- ❖ Si la velocidad del gas de fluidización (u) es muy baja no podrá contrarrestar el peso de las partículas y el lecho se comportará como un lecho fijo (Figura 3.3a).
- ❖ Existirá un valor de velocidad (velocidad mínima de fluidización) a partir de la cual el lecho se fluidizará (Figura 3.3b).
- ❖ Velocidades mayores de fluidización conducen a una expansión del lecho, pudiéndose dar una fluidización homogénea (Figura 3.3c). Cuando se fluidiza con gas este comportamiento puede observarse sólo en condiciones especiales (partículas livianas y gas denso a alta presión).
- ❖ Los lechos gas-sólido presentan burbujas y canalización de gas cuando la velocidad se aumenta sobre la de mínima fluidización (Figura 3.3d). Cuando las burbujas aparecen la agitación del lecho es vigorosa, y el lecho no se expande mucho más allá de la altura de mínima fluidización, a este tipo de operación se la denomina comúnmente fluidización burbujeante. En muy raras ocasiones un sistema líquido-sólido se comporta como lecho burbujeante.
- ❖ Las burbujas pueden unirse y crecer a medida que ascienden por el lecho, y eventualmente pueden ser lo suficientemente grandes como para expandirse a lo ancho del lecho. Si se trata de partículas pequeñas, ellas fluyen hacia abajo en las cercanías de la pared, alrededor de los paquetes de gas que ascienden (Figura 3.3e). Si las partículas son más grandes, el lecho que queda debajo de una burbuja es empujado como con un pistón. Los sólidos se reintegran al lecho por qué “llueven” a través de los paquetes de gas (Figura 3.3f). Este comportamiento suele presentarse en lechos de pequeños diámetros.
- ❖ Cuando el lecho se fluidiza a altas velocidades la velocidad terminal de las partículas puede superarse, en este caso la superficie superior del lecho se desdibuja. El gas se lleva material particulado y en lugar de burbujas se observa un movimiento turbulento de paquetes de sólidos y espacios llenos de gas de varias formas y tamaños (Figura 3.3g). En estas condiciones el lecho se denomina lecho fluidizado turbulento.
- ❖ Si la velocidad aumenta aún más, los sólidos son arrastrados fuera del lecho, existe un transporte neumático de los sólidos. (Figura 3.3h).

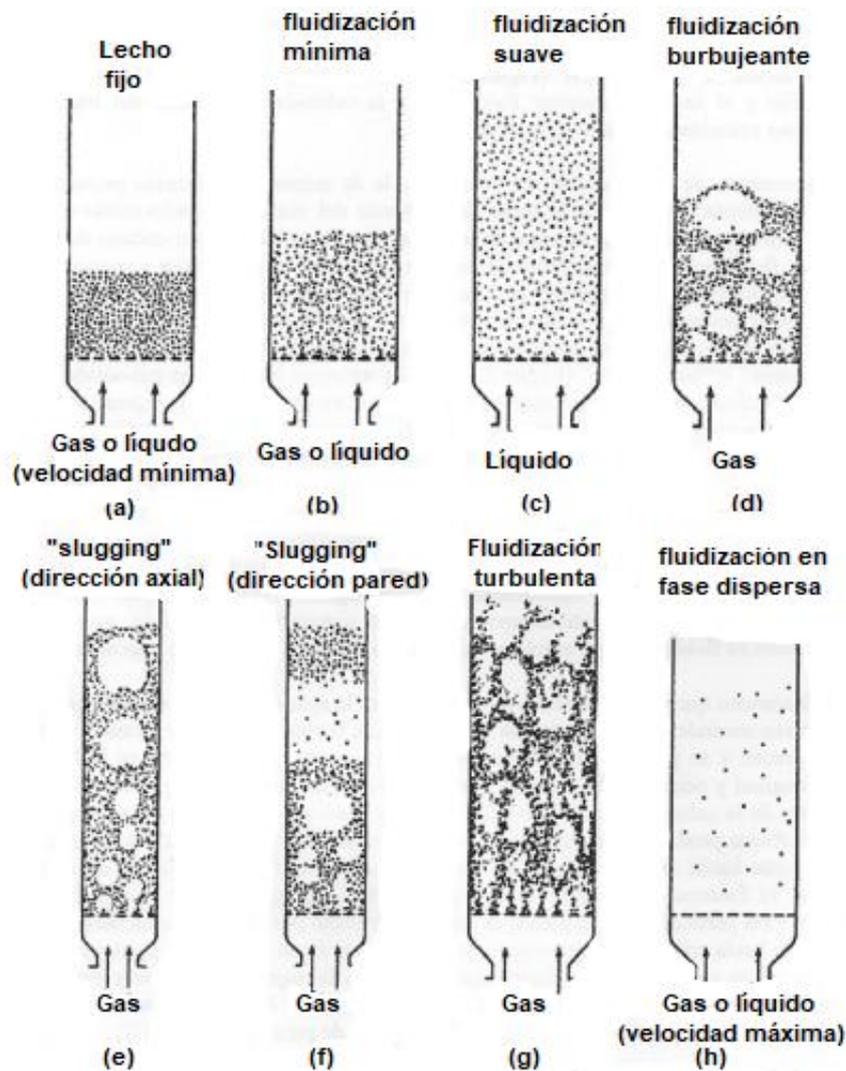


Fig. 3.3 Tipos de contacto sólido-fluido. [38]

Es importante mencionar que tanto en la fluidización turbulenta como en la fase dispersa se pueden arrastrar grandes cantidades de partículas que es necesario recuperar y devolver al lecho. En los lechos en los que se utilizan estos regímenes se emplean sistemas que devuelven las partículas arrastradas al interior con la ayuda de ciclones (elementos de sedimentación por fuerza centrífuga). En los lechos fluidizados turbulentos con arrastre moderado de partículas se utilizan ciclones internos (Fig. 3.4a).

Por otro lado, también están los lechos fluidizados de fase dispersa, en donde el arrastre de partículas es mayor, normalmente se emplean grandes ciclones fuera del lecho (Fig. 3.4b).

En general, en los lechos fluidizados circulantes es necesario para el correcto desarrollo de las operaciones que la recirculación de las partículas a través de los elementos de retención sea suave y uniforme. Los sistemas que emplean ciclones para la recuperación de partículas se conocen con el nombre de lechos fluidizados circulantes.

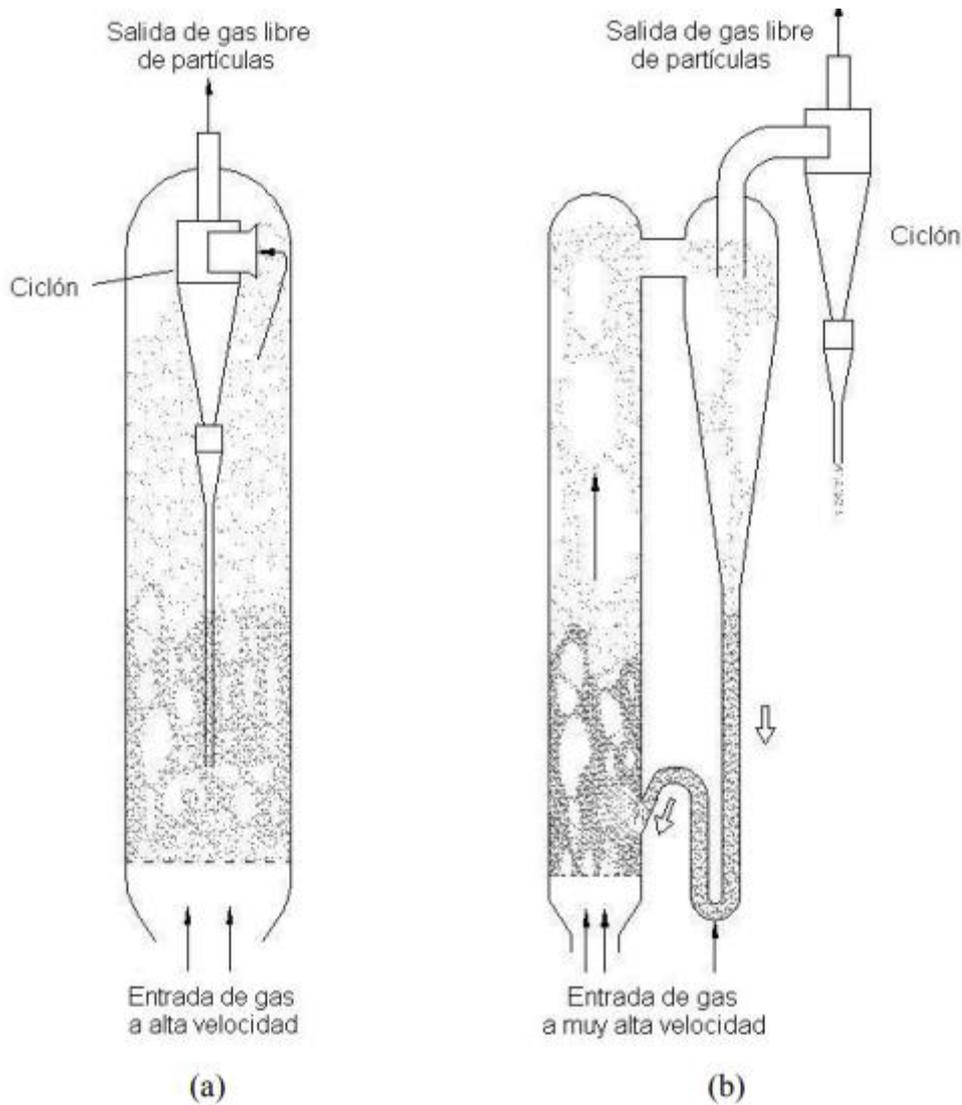


Fig. 3.4 Sistemas de recuperación de partículas. [38]

Otro fenómeno que se puede producir en el contacto gas-sólido es un chorro de gas que se abre paso entre el lecho. Esto es denominado "lecho de chorro" o "spouted bed" (Fig. 3.5). Sucede cuando se opera el gas a alta velocidad que logra penetrar a través del lecho de partículas transportando así algunas de ellas hasta la parte alta del lecho. El resto de las partículas caen lentamente alrededor del chorro y entre el gas que se filtra con suavidad hacia arriba. En ocasiones se observa una combinación de comportamientos entre burbujeante y de chorro, que se le suele denominar "lecho fluidizado de chorro".

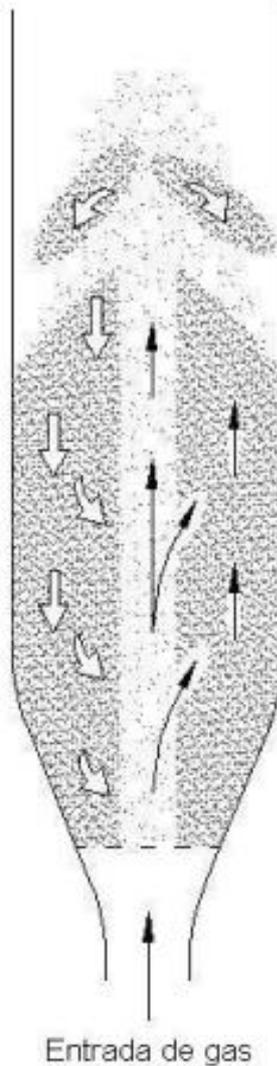


Figura 3.5 Spouted Bed. [38]

3.1.4 Comportamiento de un lecho fluidizado

Kunii y col. [38] describen el comportamiento de un lecho fluidizado como un lecho de partículas de fase densa fluidizado con gas asemejándose mucho a un líquido en ebullición mostrando un comportamiento similar al de un fluido. De esta manera, un objeto de tamaño grande y poca densidad que se sumerge en el lecho fluidizado aparece inmediatamente en la superficie al dejarlo libre y flota. Al contrario, si tenemos un lecho fluido e introducimos un objeto de mayor densidad éste se hundirá rápidamente. Si tenemos un recipiente con líquido y lo inclinamos éste iguala el nivel de su superficie permaneciendo horizontal. De igual forma, en un lecho fluido la superficie permanece horizontal si lo inclinamos (Fig.3.6a). Ahora, si consideramos el

comportamiento del flujo de un líquido cuando hacemos un orificio en el recipiente que lo contiene, éste sale en forma de chorro. Ocurre lo mismo en un lecho fluido en el que practicamos un agujero (Fig. 3.6b). En el caso de tener dos lechos fluidizados comunicados entre sí, se iguala el nivel de ambos. Además, la diferencia de presión entre dos puntos del lecho es proporcional a la diferencia de altura entre ellos, igual que ocurre en fluido-estática (Fig. 3.6c).

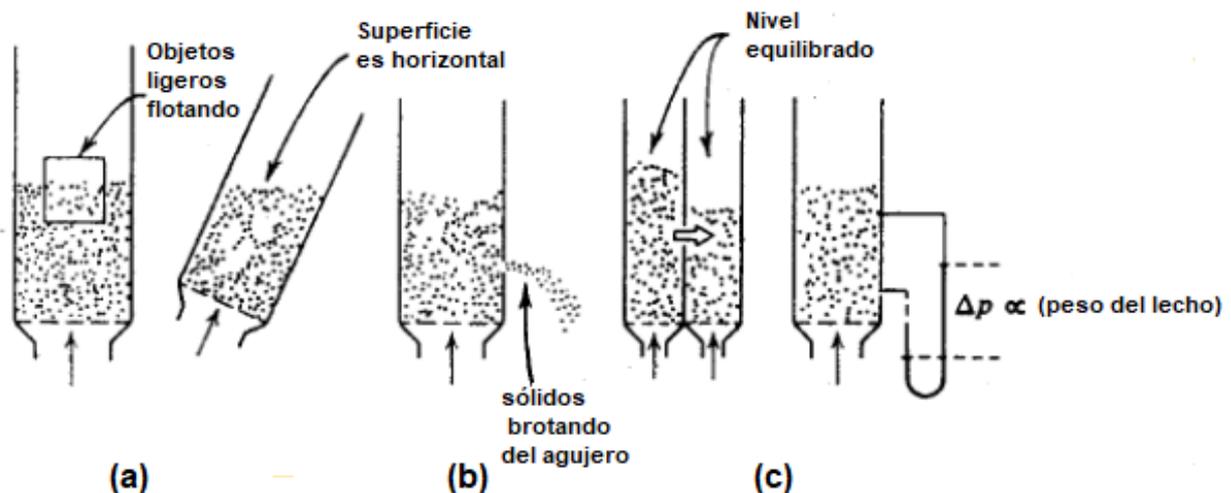


Fig. 3.6 Comportamiento de los lechos fluidizados similar al de los líquidos. [38]

3.2 Aplicaciones de los lechos fluidizados

Los lechos fluidizados se utilizan de forma satisfactoria en distintos tipos de procesos, tanto catalíticos como no catalíticos. Entre los usos catalíticos están el craqueo catalítico y el reformado de hidrocarburos, la oxidación del naftaleno a anhídrido ftálico y la amoxidación del propileno a acrilonitrilo. Algunos de los usos no catalíticos son el “tostado” de sulfuros minerales, la coquización de residuos del petróleo, la calcinación de la piedra caliza, la incineración de lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales, el secado y la clasificación. Considerables esfuerzos y un gran interés se centran actualmente en las áreas de combustión de carbón y de residuos para la generación de vapor [38].

Así, se emplean lechos fluidizados en diversos procesos físicos como intercambiadores de calor, recubrimientos de objetos metálicos, adsorción de componentes u operaciones de secado. Además, se usan en procesos químicos de distinta naturaleza como reacciones de síntesis, craqueo de hidrocarburos, combustión e incineración, gasificación, calcinación o tratamiento de minerales. Una

aplicación particular de los lechos fluidizados, en el campo de la biología, es el cultivo de microorganismos [39].

Los empleos posibles de los lechos fluidizados son muy numerosos. Los usos o las características especiales se indican a continuación [40]:

-Reacciones químicas

*Catalíticas

*No catalíticas

+Homogéneas

+Heterogéneas

3.2.1 Reacciones químicas

3.2.1.1 Reacciones catalíticas

3.2.1.1.1 Craqueo

La alta velocidad en la transferencia de los sólidos entre el regenerador y el reactor permite equilibrar la combustión exotérmica del carbono y de los alquitranes en el regenerador y el craqueo endotérmico del petróleo en el reactor, de manera que la temperatura en ambas unidades se controla casi siempre sin recurrir a mecanismos auxiliares [40].

El uso de reactores de lecho móvil dio como resultados una menor retromezcla de gases y sólidos, permitiendo una aproximación al flujo pistón.

La primera unidad fluidizada de craqueo catalítico se puso en marcha en 1942, en Baytown, Texas y fue una unidad de baja presión. En 1960 con el uso del craqueo con lecho móvil, fue necesario la utilización de catalizadores más activos y recientemente se han utilizado fracciones más pesadas de crudo obteniéndose altos rendimientos [41, 42].

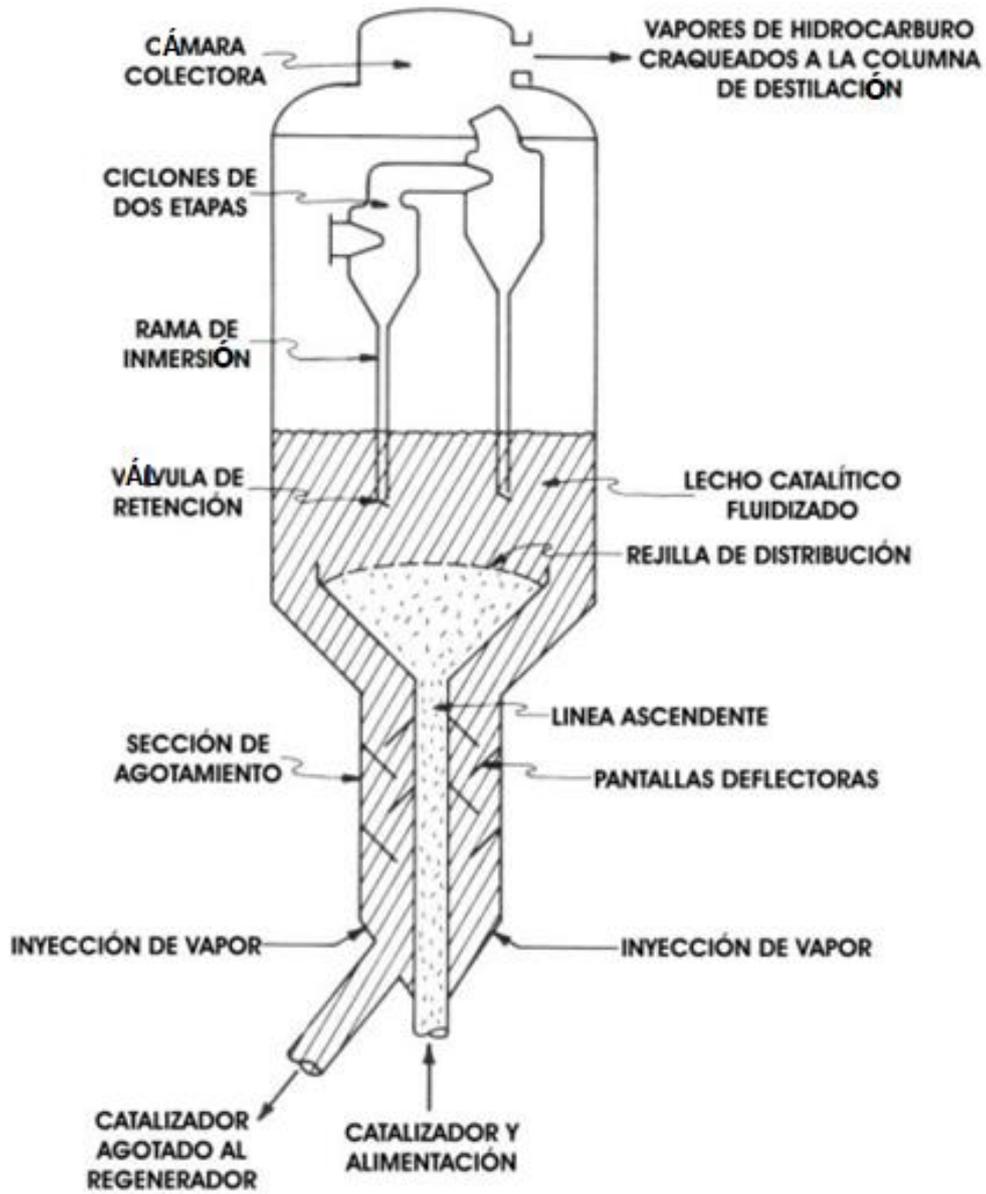


Fig. 3.7 Diagrama esquemático del craqueo catalítico Thermofor (CCF) [41].

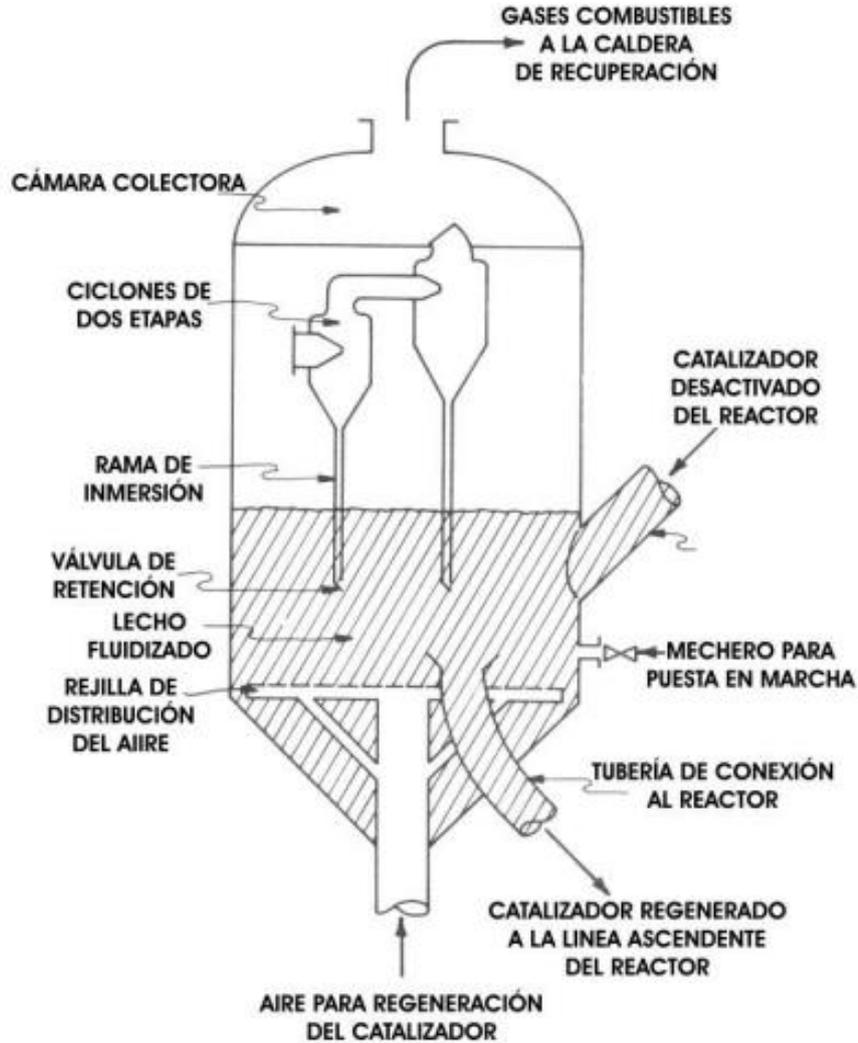


Fig., 3.8 Regenerador característico del craqueo catalítico Termofor [41].

3.2.1.1.1.2 Cloruros de alquilo

Las olefinas son clorados para obtener cloruros de alquilo en un lecho fluidizado de una sola etapa. En este proceso, desarrollado por la Shell Development Co. Se utiliza la recirculación de los finos del catalizador mediante una solución acuosa de HCl para controlar la temperatura [40].

3.2.1.1.1.3 Anhídrido ftálico

El naftaleno se oxida por medio de aire para producir anhídrido ftálico en un reactor fluidizado de burbujeo. El control de la temperatura se logra mediante la eliminación de calor a través de unos tubos verticales localizados en el lecho, permitiendo la generación de vapor [43].

3.2.1.1.1.4. Acrilonitrilo

Se produce al hacer reaccionar propileno, amoniaco y oxígeno (aire) en un lecho fluidizado de una etapa con un catalizador compuesto. Este proceso conocido como SOHIO, operó por primera vez de forma comercial en 1960 [44].

3.2.1.1.1.5 Síntesis Fischer-Tropsch

Kellog Co. Desarrolló un reactor para la síntesis de Fischer-Tropsch, basado en el concepto de base diluida o reactor de transporte. Este proceso tuvo éxito y se instaló una planta en la South African Synthetic Oil Limited (SASOL) en la República de Sudáfrica, donde las condiciones políticas y económicas favorecían la conversión de carbón a gasolina y a otros hidrocarburos [40].

La primera planta de producción de polietileno en lecho fluidizado comercial fue construida por la Union Carbide en 1968. El lecho es fluidizado mediante etileno 0.5 m/s y opera prácticamente en un régimen cercano al de fluidificación turbulenta. (Fig. 3.9).

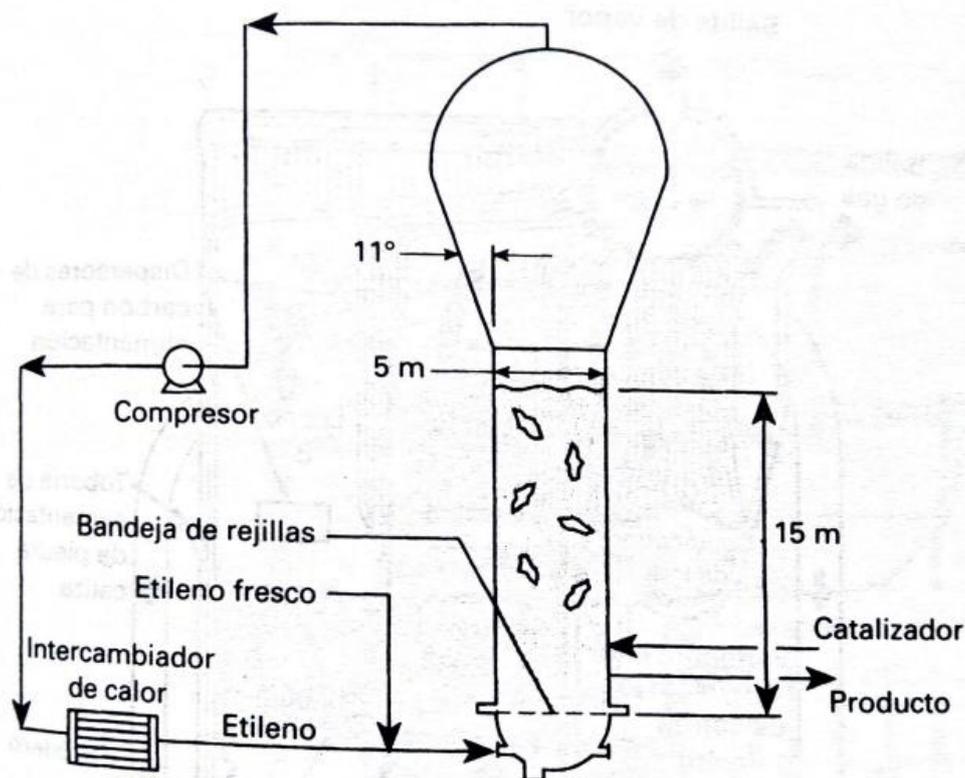


Figura 3.9 Reactor para polietileno a alta presión [41].

3.2.1.1.1.6 Otros procesos catalíticos

A continuación, se mencionan algunos otros procesos catalíticos donde se pueden usar los lechos fluidizados [40]:

- El nitrobenzeno se hidrogena para obtener anilina
- La melamina y el isoftalonitrilo se producen en reactores catalíticos de lecho fluidizado.
- Du Pont describió un proceso con lecho circulante para la producción de anhídrido maleico.
- Mobil oil desarrolló un proceso comercial para la conversión de metanol en gasolina

3.2.1.2 Reacciones no catalíticas

3.2.1.2.1 Reacciones homogéneas

Se realizan normalmente en un reactor de lecho fluidizado para lograr un buen mezclado de los gases y un control de la temperatura [41].

3.2.1.2.2. Reacciones heterogéneas

Entre las reacciones heterogéneas presentes en el fenómeno de lecho fluidizado se encuentran:

- La calcinación de minerales sulfurosos, arsenicales y/o antimoniales para facilitar la liberación de elementos como el oro y la plata.
- la tostación de la pirina, la pirrotita o los minerales de azufre naturales para obtener SO_2 para la elaboración del ácido sulfúrico, y la calcinación de minerales de sulfuro de cobre, cobalto y zinc.

En la Fig. 3.10 se esquematizan los componentes básicos del sistema.

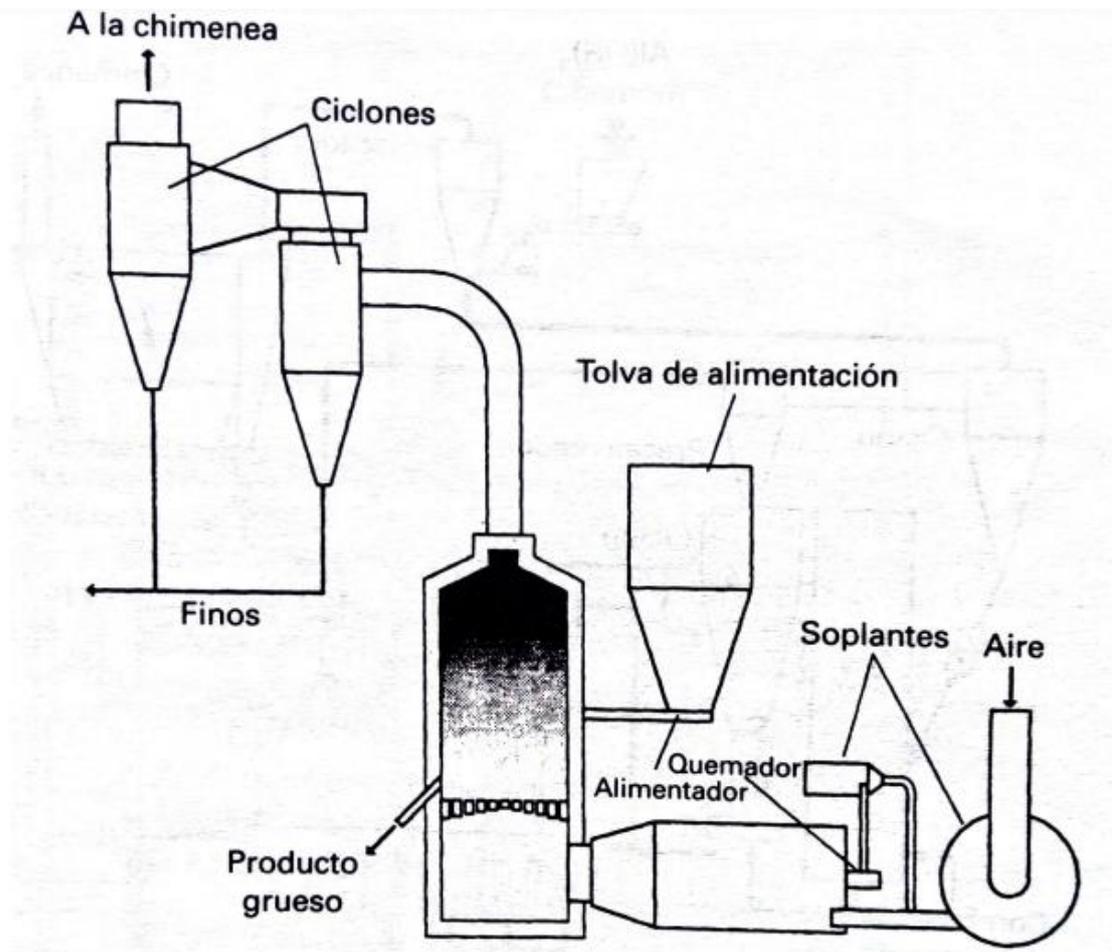


Fig. 3.10 Calcinador o secador de una sola etapa FluoSolids (Dorr-Oliver, Inc.)[40].

3.2.1.2.2.1 Calcinación

- La calcinación térmica de cal, dolomita y arcilla puede realizarse en un lecho fluido multi compartimento (Fig. 3.11). Los combustibles se queman en un sistema de lecho fluido con el producto para generar el calor necesario (gas natural y carbón).
- La roca fosfórica se calcina para eliminar el material carbonoso previo a su digestión con ácido sulfúrico. La arena para fundición también se calcina, con objeto de eliminar los aglomerados orgánicos y liberar los finos.
- La calcinación del hidróxido de aluminio a Alumina en un proceso fluidizado de lecho circulante permite la obtención de un producto de alta calidad.

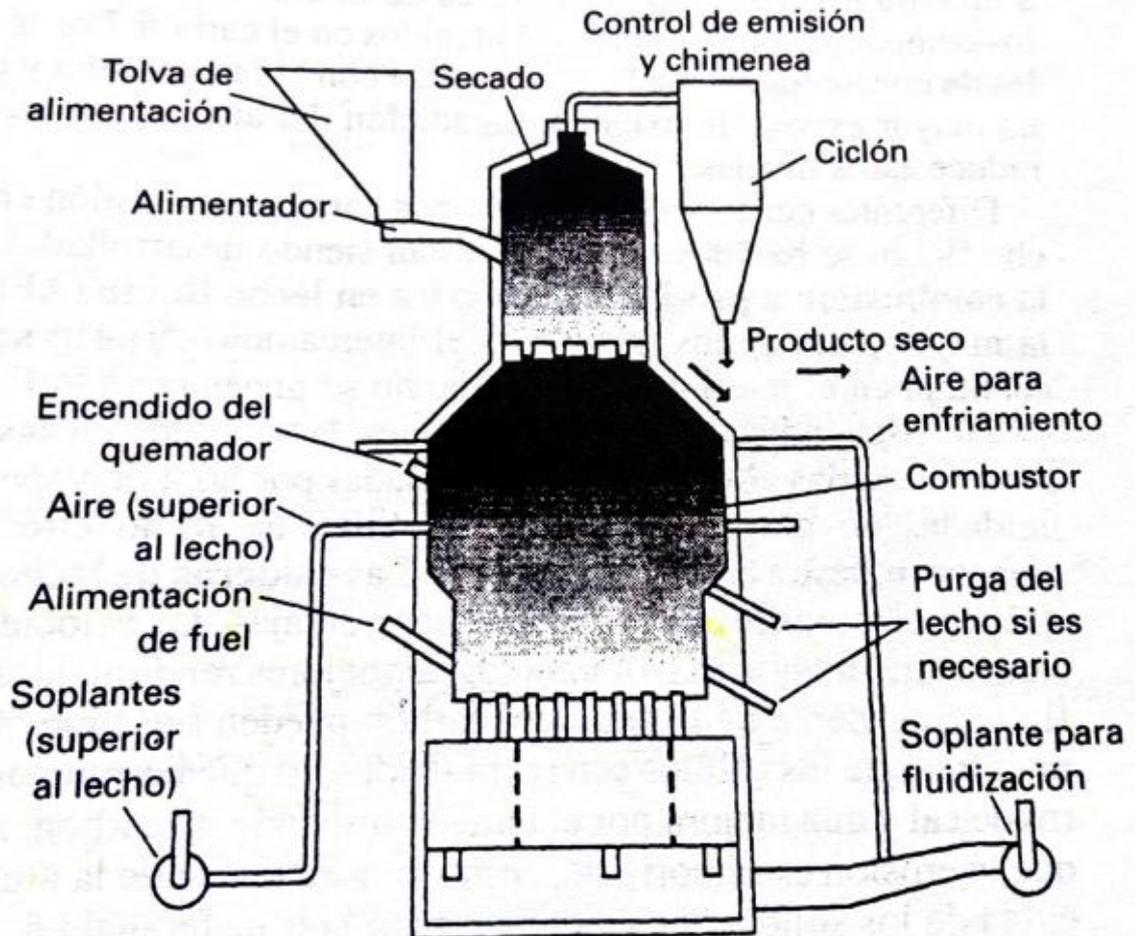


Fig. 3.11 Lecho fluidizado multicompartmentado Fluo Solids (Dorr-Oliver, Inc.) [40].

3.2.1.1.2.2.2 Carbón

El carbón se puede quemar en un lecho fluidizado de manera tal que se disminuyan las emisiones de contaminantes mediante la adición de piedra caliza o dolomita al lecho que reacciona con el dióxido de azufre para formar sulfato de calcio [40].

3.2.1.2.2.3 Incineración

Se utiliza para la incineración de fangos procedentes de las unidades de depuración biológica. Dependiendo del poder calorífico de la alimentación, el calor puede recuperarse como vapor por medio de calderas para gases de salida o mediante una combinación de estas y una superficie de intercambio térmico en el interior del lecho fluidizado. Varias unidades se utilizan para la eliminación de residuos líquidos en plantas de producción de papel con blanqueo mediante sulfito.

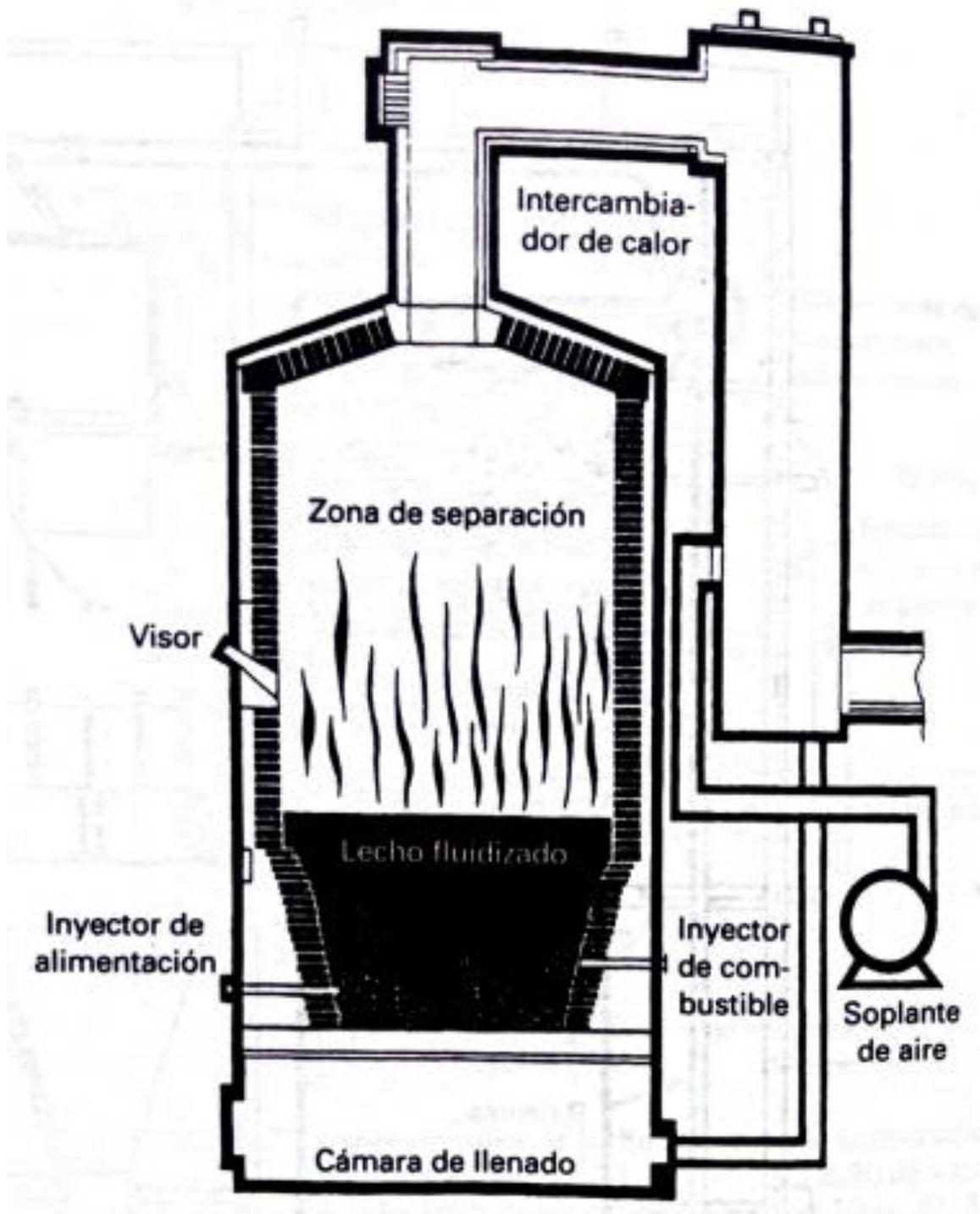


Fig. 3.12 Reactor/Incinerador con cámara para soplado de aire precalentado (Dorr-Oliver, Inc.)[40].

3.2.1.2.2.4 Contacto físico

En la tabla 3.1 se mencionan algunos de los procesos industriales de contacto físico donde se hace uso del lecho fluidizado [40]:

Secado	Clasificación	Recubrimientos
Para el secado de sólidos como carbón, cemento, rocas y piedra caliza.	Separación de partícula finas de mayor tamaño separación de finos de una corriente de gas.	También llamado <i>coating</i> utilizado en lechos fluidizados de resinas termoplásticas para facilitar el recubrimiento de piezas metálicas.

Tabla 3.1 Procesos Industriales de contacto físico con lecho fluidizado.

3.3 Calderas de lecho fluidizado

En las centrales de lecho fluidizado se utiliza la tecnología para inyectar caliza directamente dentro de la caldera para capturar y remover el azufre de la biomasa como un subproducto seco. La temperatura del gas dentro de la caldera va de 820°C a 840°C.

La tecnología de lecho fluidizado se utiliza principalmente para quemar carbón; sin embargo, permiten quemar combustibles de baja calidad como la biomasa. La capacidad de las calderas de lecho fluidizado atmosférico es de 150 MW a 300 MW y sus costos de US \$1,000 a US \$1,300 dólares/KW [45].

Los lechos fluidizados presurizados operan a una presión mayor a la atmosférica, va de 0.2 MPa a 2 MPa.

Remueven más del 90% de SO_2 a una relación molar calcio-azufre (Ca/S) de 1.5 a 3.0; las emisiones de NO_x van de los 100 ppm a 200 ppm, las cuales pueden reducirse a través de equipos de reducción catalítica. Su eficiencia es de 40 a 42% en ciclos combinados. Los costos de estos equipos oscilan entre \$1,150 a \$1,250 dólares/KW [45].

Cuando las calderas funcionan con biomasa como combustible, debe existir algo llamado sistema de combustión de lecho fluidizado, que no es más que el lugar donde se produce el proceso de combustión de la biomasa para así poder producir el gas de síntesis mediante el proceso de gasificación (véase capítulo 1.4).

Para ponerlo de manera sencilla, lo que pasa en las calderas que usan biomasa como combustible es que en la fase del proceso de generación y aplicación de calor se le inyecta aire que fluidifican el combustible sólido junto con un lecho de partículas, manteniéndolo en suspensión para un óptimo tiempo de permanencia y una adecuada combustión.

Cabe destacar que el lecho fluidizado se localiza en el interior del hogar de combustión, justo antes del cuerpo de recuperación de calor en forma de aceite térmico, agua o vapor, al que le cede todo el calor generado por la biomasa o residuo.

3.4 Etapas a las que se somete la biomasa en la caldera

3.4.1 Etapa de secado

El primer proceso que experimenta la biomasa es la eliminación de la humedad que contiene.

El contenido de humedad presente en la biomasa se expresa como un porcentaje de la masa total de biomasa [46]. Una vez que la biomasa entra en el hogar, se calienta por radiación y convección de las llamas y paredes calientes que la rodean. Al llegar a la temperatura de evaporación, la humedad es liberada en forma de vapor, incorporándose a la corriente gaseosa ascendente [47].

Hay que tener en cuenta que un alto nivel de humedad es preocupante, especialmente si la biomasa se quema con fines energéticos como en este caso, ya que cada kilogramo de humedad absorbe al menos 2260 kJ del proceso de gasificación para evaporarse. Por ello, altos porcentajes de humedad conllevan pérdidas destacables de energía [48].

3.4.2 Etapa de pirólisis

Durante esta etapa se produce la descomposición térmica de la lignina (sustancia natural de las células vegetales) y la celulosa que conforman la biomasa, originando moléculas gaseosas de menor tamaño. Estas moléculas, aunque incluyen una gran variedad de especies químicas, pueden clasificarse principalmente en dos tipos: volátiles ligeros (asimilables a moléculas de metano) y volátiles pesados o *tars* (asimilables a moléculas de benceno).

En esta etapa la biomasa se descompone en una mezcla de sólido, líquido y gas como [15]:

Sólidos (*char*): Leña, astillas, carbón vegetal

Líquidos (*tar*): Alquitranes, aceites, aldehídos, alcoholes, cetonas y ácidos orgánicos

Gaseosos: Biogás, hidrógeno.

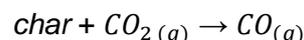
La palabra *char* viene traducida del inglés, en español se refiere a “carbonizar”, mientras que *tar* de igual manera traducido al español se refiere a “alquitranes” y sus derivados.



Cabe señalar que es en esta etapa donde la biomasa pierde la mayor parte de su masa, además las ecuaciones químicas son no ajustadas.

3.4.3 Etapa de reducción

En esta etapa, se produce la reacción heterogénea (sólido-gas) endotérmica de parte del *char* obtenido como resultado de la pirólisis con el dióxido de carbono generado en la oxidación del *char* (ver siguiente etapa). Como producto de la reacción se obtiene monóxido de carbono, que reacciona en una etapa posterior para completar la combustión [49].

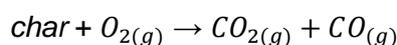


De acuerdo con Rezeau [47], las reacciones químicas heterogéneas implican, además de la cinética química, ciertos fenómenos de transporte de, al menos, una de las fases que intervienen. Por ello, de acuerdo con Bardi y col. [50] las reacciones heterogéneas tienen lugar en cinco etapas sucesivas:

- ❖ Difusión del gas hasta la superficie del combustible.
- ❖ Absorción de dicho gas en lugares activos de la superficie del combustible.
- ❖ Reacción sólido-gas y formación de productos.
- ❖ Desorción de los productos de la reacción de la superficie del combustible.
- ❖ Transporte de los productos de la reacción.

3.4.4 Etapa de oxidación

En esta etapa, se produce la reacción heterogénea (sólido-gas) exotérmica del char restante tras el proceso de reducción con el oxígeno presente en los gases que atraviesan el lecho. Como producto de la reacción se obtiene monóxido y dióxido de carbono, en unas proporciones variables en función de la temperatura que se alcance durante el proceso (reacción no ajustada) [51].

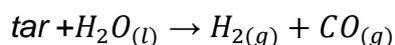


En esta etapa, las cenizas y la parte que permanezca intacta tras el proceso caerán, debido a su pequeño tamaño, a través de la parrilla e irán a parar al cenicero.

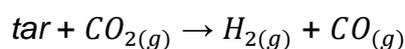
3.4.5 Etapa de equilibrio

En esta etapa los productos que resultan de la pirólisis (volátiles ligeros y pesados) se incorporan a la corriente de aire primario y abandonan la zona del hogar, sin embargo, antes de eso interaccionan con algunos de los gases presentes en dicha corriente, dando lugar a las siguientes reacciones de descomposición (no ajustadas) [52]:

Descomposición del *tar* con vapor de agua:



Descomposición del *tar* con dióxido de carbono:

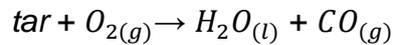


Además de las descomposiciones anteriores también se presenta una descomposición térmica del *tar*. Basu P. [48] menciona que, aunque el *tar* puede

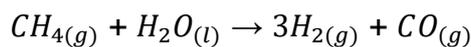
descomponerse térmicamente (cracking), no es un proceso recomendable ya que requiere temperaturas superiores a los 1100 °C y produce hollín.

Otras reacciones que se presentan durante esta etapa e incluyendo el proceso de descomposición del *tar* se presentan a continuación [48]:

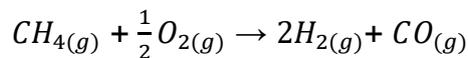
Combustión parcial del tar (reacción no ajustada):



Descomposición del metano con vapor de agua:

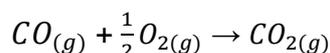
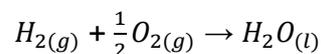


Combustión parcial del metano:

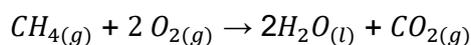


3.4.6 Etapa de combustión completa

A diferencia del resto de las etapas, esta última fase en la que se completa el proceso de combustión tiene lugar en el hogar superior. Allí, la corriente de aire que proviene del hogar inferior se mezcla con el aire secundario introducido, y tienen lugar las siguientes reacciones químicas exotérmicas [48]:



Basu P. [48] menciona que se supone que en la etapa anterior los volátiles pesados o *tar* son eliminados. En cuanto a los volátiles ligeros, si no han desaparecido por completo terminan de descomponerse en la presente fase, experimentando la siguiente reacción química exotérmica:



Una vez completada la combustión, los gases resultantes abandonan el hogar y pasan a la zona de intercambio de calor. Rezeau [47] señala que el exceso de aire tiene un papel clave para encontrar el equilibrio entre una combustión completa y un mínimo de pérdidas de calor sensible. Para controlar la calidad de la combustión se

puede recurrir a analizar los humos que se generan, pudiéndose dar 3 situaciones indeseadas que se describen en la tabla siguiente (tabla 3.2):

Elevada concentración de monóxido de carbono (CO)	Elevada concentración de oxígeno (O_2)	Elevadas concentraciones de monóxido de carbono y oxígeno
Implica defecto de aire en la combustión.	Implica un gran exceso de aire.	Implica un mal funcionamiento del equipo o una mala preparación del combustible (tamaño y humedad relativa).

Tabla 3.2 Control de calidad de la combustión

A continuación, se presenta de manera esquemática cómo es el proceso de combustión de la biomasa [53]:

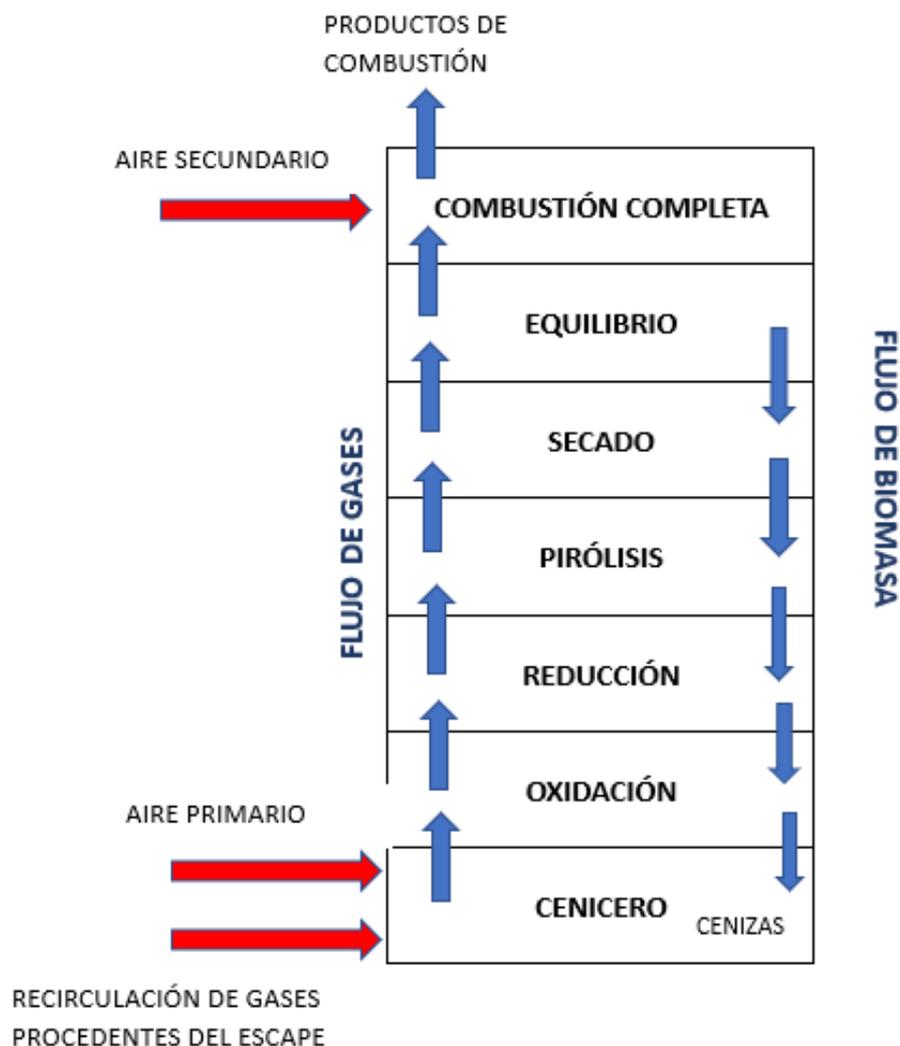


Fig. 3.12 Flujos y zonas en el lecho (volumen de la caldera) [53].

3.5 Proceso de funcionamiento de una caldera con biomasa.

El proceso de funcionamiento de una caldera con biomasa no cambia mucho dependiendo de la caldera que se esté utilizando. En este capítulo se tomará como ejemplo una caldera en la que se produce la combustión de biomasa (pellets)

El modelo **Ciderplus TP200** (fig. 3.13) de la empresa **Cidaut**, es capaz de proporcionar una potencia térmica superior a los 210 kW, está destinada a su uso en comunidades de vecinos, sector terciario y sector industrial [54].

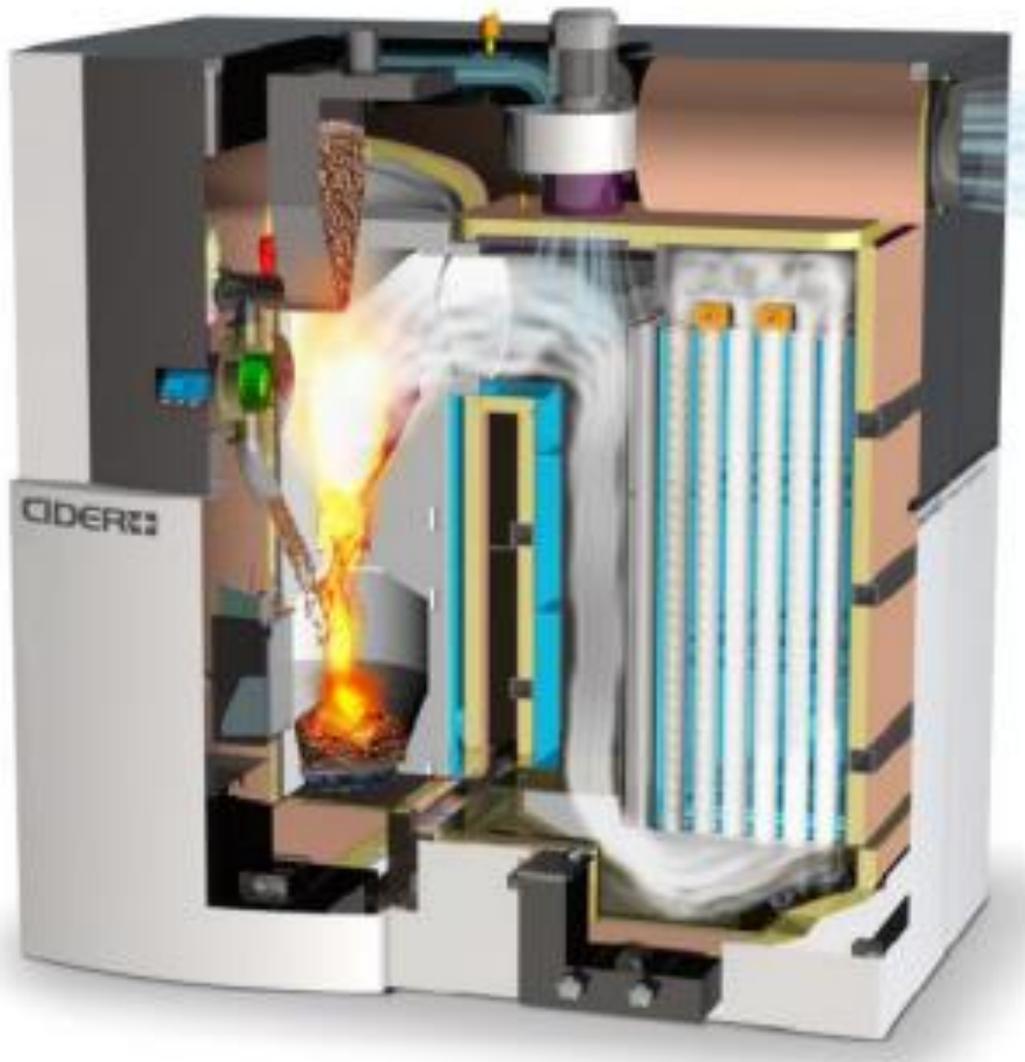


Fig. 3.13 Modelo 3D de la caldera CIDERPLUS TP 200 [54].

3.5.1 Descripción de etapa del proceso de combustión en el hogar

La zona de combustión puede dividirse para su descripción en cuatro subconjuntos [53]:

- Sistema de alimentación.
- Entrada de aire primario, cenicero y parrilla.
- Hogar inferior.
- Hogar superior y entrada de aire secundario.

En la tabla 3.3 que se muestra a continuación se hace una breve descripción de cada uno de los subconjuntos:

Sistema de alimentación	Aire primario, cenicero, parrilla	Hogar inferior	Hogar superior
<p>Suministro de la biomasa al hogar</p> <p>Desde aquí se introducen al hogar inferior y caen a la parrilla mediante un dosificador</p>	<p>Aire primario: para llevar a cabo la gasificación de la biomasa (por parte inferior) junto con los gases procedentes del escape (EGR: Exhaust Gas Recirculation”).</p>	<p>Tiene lugar la gasificación o combustión incompleta de la biomasa.</p>	<p>Se completa el proceso de combustión gracias a la introducción del aire secundario, antes de que los gases pasen al sistema intercambiador de calor.</p>

Tabla 3.3 Descripción de etapas del proceso de combustión en el hogar.

3.5.2 Descripción de etapa en la zona de intercambio de calor

El modelo CIDERPLUS TP200 consta de dos intercambiadores de calor dispuestos en serie: un intercambiador en cascada y uno tubular [54].

Intercambiador en cascada: limita el avance de partículas que se encuentren en suspensión en los gases de combustión, cuenta con un cenicero para recoger dichas partículas, que estará cubierto por una camisa de agua para reducir las pérdidas de calor por radiación.

Intercambiador tubular: tiene tres pasos de humos para maximizar su rendimiento, así como un sistema de limpieza automático.

A la salida del intercambiador tubular se dispone un extractor que garantiza el paso del aire a través de los intercambiadores y su expulsión al exterior.

3.6 Comparativa de los diferentes combustibles de una caldera

Se entiende como combustible a cualquier material capaz de liberar energía en forma de calor cuando reacciona con el oxígeno, habitualmente contenido en el aire, transformando su estructura química. En general, se trata de sustancias susceptibles de quemarse [55].

Independientemente del tipo de combustible, estos se definen por una serie de propiedades genéricas, una de las más importantes es el poder calorífico. El *Poder calorífico* se entiende como la cantidad de energía (calor) desprendida por una unidad de combustible en su combustión completa [56].

El poder calorífico de los combustibles líquidos y gaseosos más habituales en la producción térmica en la industria, están indicados en la tabla 3.4 que a continuación se presenta:

Combustible	Unidad	Poder calorífico inferior (Hi)	Poder calorífico superior (Hs)
Gas natural	kWh/ kg	13.05	14.43
Propano comercial	kWh/ kg	12.82	13.92

Butano comercial	kWh/ kg	12.69	13.74
Gasóleo C	kWh/ kg	11.56	12.23

Tabla 3.4 Poder calorífico de los combustibles [55].

A continuación, en la tabla 3.5 se muestra una tabla comparativa donde nos podemos dar una idea rápida de los aspectos principales de algunos combustibles en algunas calderas [57]:

	Caldera de gas	Caldera de gas LP	Caldera de gasoil	Caldera Pellets	Caldera de leña	Caldera eléctrica
Fuente de energía	Gas natural	Gas LP	Gasóleo	Pellets	Leña	Electricidad
Distribución	Canalizada	Canalizada	a granel	a granel	a granel	Red eléctrica
Precio combustible	1.18 \$/KWh	2.47 \$/KWh	2.11 \$/KWh	1.05 \$/KWh	-	3.79 \$/KWh
Rendimiento	95-105 %	95%	95%	90%	80%	95%
Calificación energética	A	A	B	A+	C	D

Tabla 3.5 Comparativo de caldera con diferentes combustibles.

Los precios del combustible descritos anteriormente están referidos a pesos MXN al día 27 de junio de 2022.

La etiqueta energética (calificación energética) indica la eficiencia con letras de la A (inmueble eficiente energéticamente) hasta la G (inmueble sin eficiencia energética). Estas muestran el nivel de eficiencia del objeto.

Se puede ver de manera muy rápida que en cuestión de precio y rendimiento una caldera de gas o gas LP es casi idéntica a una caldera que utiliza biomasa como combustible (pellets). Como se ha venido mencionado a lo largo de esta tesis, la alternativa de poder cambiar a un tipo de caldera más amigable con el medio ambiente, como lo sería la caldera con biomasa, y hablando económicamente no se ve tan alejada de la realidad.

3.7 Análisis de potencia o capacidad y consumo de energía en calderas utilizando biomasa como combustible

De manera general se puede presentar un análisis de potencia o capacidad y consumo de energía en las calderas. Se realizan consideraciones como que en el mercado actual español existen calderas generadoras de vapor con uso de biomasa como combustible que llegan a producir hasta 15, 000 KW [58] que son el equivalente a 12,897,678.6 Kcal/h, esto considerando que esta cantidad de energía sería en una industria considerablemente grande que serían aproximadamente 1,528 CC (caballos caldera). Si se requiere saber más a detalle sobre potencia térmica en calderas en el anexo de este trabajo se presenta en forma de tabla una relación entre potencia de salida y producción de vapor.

Puede que ya haya un mercado español que proporcione calderas de vapor de gran escala (hablando de potencia) que use como combustible la biomasa, sin embargo, no en todas partes del mundo. Existe un gran campo de calderas que funcionan con biomasa como combustible estas están en un campo específico de venta, ya que en la actualidad son equipos especialmente diseñados para maximizar su rendimiento y poder atender a distintas necesidades energéticas.

En el mercado mexicano existen solo una mínima cantidad de fabricantes de calderas que funcionan con biomasa como combustible, entre ellos está "ECOVIS", es una empresa Española pero que tiene sucursales en varias partes del mundo, entre ellos está México. En ECOVIS México desarrollan proyectos y equipos para la generación, transferencia, ahorro de energía, así como generación de vapor por medio de biomasa agrícola industrial y forestal.

Sus equipos cumplen óptimamente con el máximo aprovechamiento del combustible consumido, la mínima pérdida del calor generado y el mayor rendimiento de los equipos donde se aprovecha el calor recibido.

Fabrican calderas de biomasa en capacidades de 74 kW a 2,237 kW, que equivale aproximadamente de 74 a 228 CC, y presiones hasta 42 kg/cm². Fabricadas y estampadas bajo el código ASME.

Se fabrican en tipo piro-tubular, acuo-piro-tubular y acuo-tubular, esto dependiendo de la aplicación y presión de diseño.

La biomasa que se ha quemado en estas calderas son cáscara de arroz, cáscara de nuez, olote, bagazo de agave, madera, coco, carbón, entre otros y con posibilidad de que se le envíen muestras de material para hacer pruebas de quemado.

ECOVIS cumple con los requisitos mínimos que conlleva el fabricar calderas con biomasa que sean funcionalmente adquiridas. De acuerdo con los datos del capítulo anterior en cuanto a potencia o capacidad, estas calderas fabricadas específicamente

en esta empresa cumplen con el rango de potencia necesaria por las PyME's en nuestro país.

Hablando puntualmente, si estas calderas cumplen con los requerimientos de potencia que se logra con otros combustibles como lo son el diésel, Gas LP, o gas natural, la opción de utilizar como combustible la biomasa, no está muy alejado de la realidad y que se pueda tener mayor consumo en un futuro cercano.

Capítulo 4. Gasificación de biomasa en plantas piloto.

En este capítulo se mostrarán algunos trabajos realizados en planta piloto presentando datos estadísticos como gráficas con resultados de sus experimentaciones con respecto a la gasificación de biomasa como son perfiles de temperatura, presión y concentraciones de los gases resultantes.

4.1. Gasificador de biomasa en lecho fijo

En el trabajo presentado por Acosta P. y col. [22] nombrado como "*Modelación del proceso de gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo con calentamiento indirecto*", ellas nos presentan un modelo matemático donde se tiene el uso de ecuaciones de gobierno de masa y energía teniendo en cuenta los fenómenos que se presentan dentro del reactor, en este caso solo tomando en cuenta la pirólisis y la gasificación, así mismo dentro del reactor no tomó en cuenta el proceso de secado, esto a partir de la suposición (condición) de que la biomasa cuente con una humedad menor al 3 %.

En cuanto a la pirólisis las condiciones que se presentan son la degradación térmica de la biomasa en un rango de temperaturas comprendido entre 200 y 500°C, en ausencia de aire o un suministro muy limitado del mismo, obteniendo productos sólidos, líquidos y gaseosos. Mientras tanto en la etapa de gasificación oxidación parcial del carbonizado de la pirólisis el reactor necesita una temperatura que oscila entre 700 y 1100°C utilizando como agente gasificante el vapor de agua.

Las consideraciones de tipo matemático se describen a continuación.

- Modelamiento a través de coordenadas cilíndricas, que permiten observar la variación de temperatura para un modelo bidimensional.
- Presión equivalente a 1 atm.

- Tamaño de partícula equivalente a 2 mm.

Las consideraciones respecto a los fenómenos se describen a continuación.

- Proceso en estado estacionario, quiere decir que el comportamiento del sistema permanece inalterable con el tiempo en un punto determinado.
- Como el suministro energético corresponde a una chaqueta alrededor del reactor, se espera que al interior del mismo se origine un perfil de temperatura donde la biomasa reacciona siguiendo el patrón del perfil, así que se puede asumir que en el centro del gasificador la biomasa reacciona con menor velocidad con respecto a otros puntos del reactor.
- Debido a que la presión se consideró constante (el reactor posee una válvula de escape en la zona inferior) el comportamiento de la fase volátil es de gas ideal. Las caídas de presión son despreciables.
- Se consideró que las propiedades térmicas y estructurales para el sólido son constantes y no presentan alteración alguna cuando se varía la temperatura.

Los resultados que ellas nos muestran en su trabajo van desde los perfiles de temperatura presentados como los perfiles de concentración de los gases presentados en el combustible final.

Ilustran su comportamiento gráficamente en la fig. 4 donde se observan los perfiles de temperatura obtenidos para la cama de partículas en un determinado radio, donde se aprecia como la temperatura aumenta de manera directa respecto a la longitud, al ser por calentamiento indirecto se observa el perfil de temperatura marcado y el cambio de las curvas desde la posición más cercana a la pared del reactor hasta la más alejada. Para la construcción de la gráfica se escogieron los radios 0, $R/2$ y R , a causa de que son los puntos críticos donde la variación de la temperatura muestra comportamientos distantes y para los cuales se puede realizar una comparación detallada, para la posición $r=0$ se observa que, al ser la posición más alejada de la pared, ya que esta coordenada se encuentra ubicada justo en el centro del reactor.

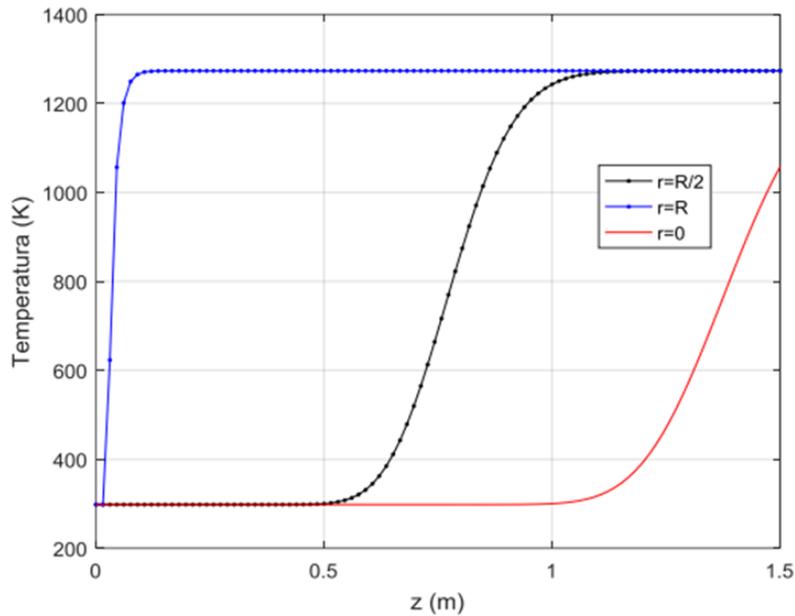


Fig. 4 Perfil de temperatura de la cama de partículas a una temperatura de pared de 973.15 K [22].

En la fig. 4.1 se muestra gráficamente el comportamiento de la temperatura a medida que la longitud del gasificador aumenta, el perfil es muy marcado, puesto que se realizó este mismo procedimiento para tres diferentes temperaturas de pared correspondientes a 700°C, 900°C y 1100°C (gráficamente se muestran en Kelvin), las partículas que se encuentran en la posición $r=0$ (en la mitad del reactor) reaccionaron hasta el instante que la longitud del reactor corresponda a 1.35 m, puesto que antes permanecen a temperatura ambiente o incluso a una temperatura muy baja ya que no alcanza la temperatura equivalente a 473.15K la cual es la mínima necesaria para poder iniciar el proceso correspondiente a la pirólisis. Lo que quiere decir que cualquier partícula que se encuentre por encima de esa longitud en esa posición radial, no reacciona, marcando el perfil de temperaturas. También se puede deducir que si el reactor en lugar de 1.5 m tuviera una longitud igual a 1 m ninguna de las partículas que se encuentran situadas en la zona central del gasificador reaccionaría.

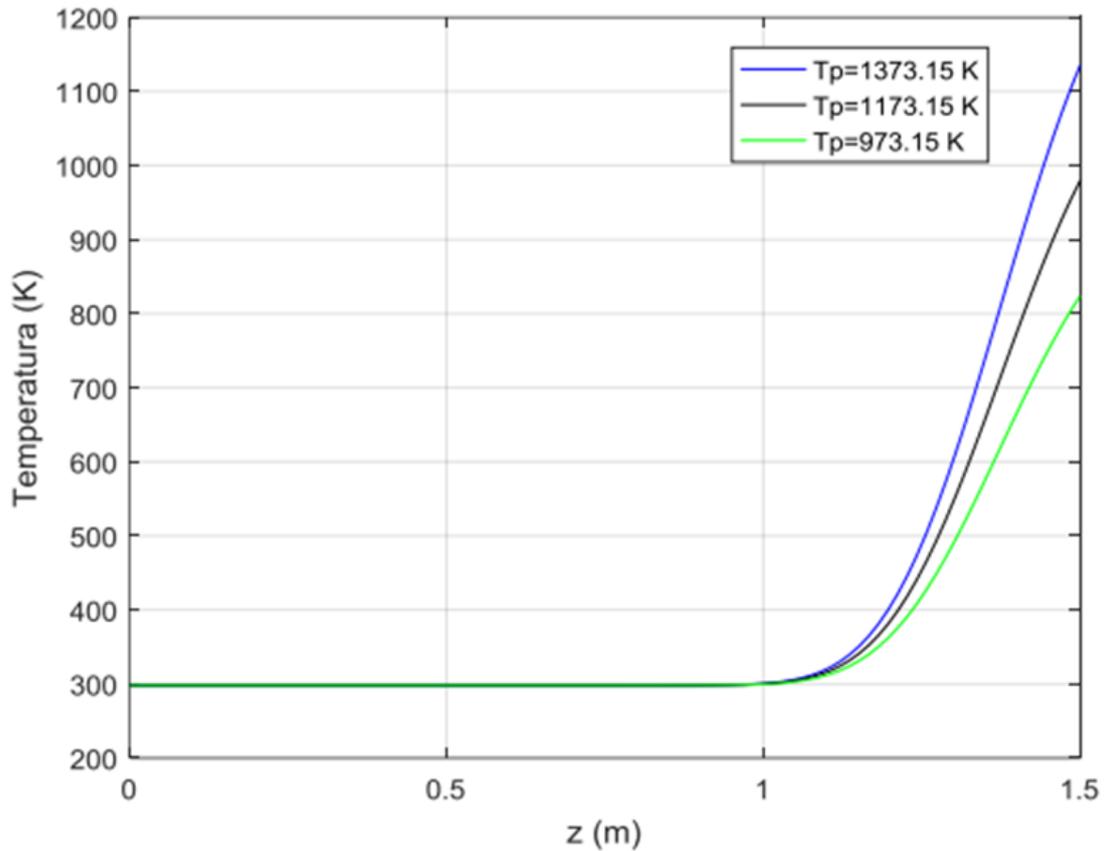


Fig. 4.1 Perfil de temperatura de la cama de partículas en la posición $r = 0$ del reactor a diferentes temperaturas de pared [22].

Hablando ya del perfil de concentraciones, se ilustran en la Fig. 4.2 se encuentra el consumo de biomasa y la formación de fase volátil en donde se puede observar la influencia de la temperatura: a una temperatura de alrededor $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ la velocidad de generación de la fase volátil disminuye y a medida que aumenta la temperatura ésta vuelve a aumentar, lo que significa que las altas temperaturas favorecen las reacciones de gasificación.

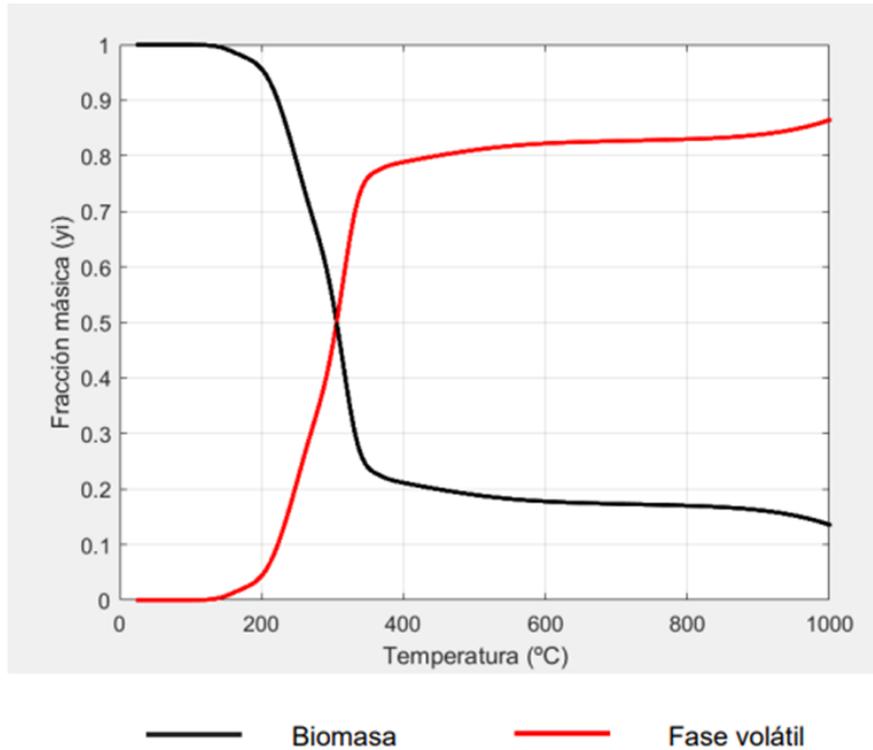


Fig. 4.2 Composición másica de la biomasa y la fase volátil en función de la temperatura [22].

Por otro lado, las altas temperaturas desplazan las reacciones a la formación de CO y H_2 lo que significa que aumenta el poder calorífico del gas de síntesis producido y que la proporción de alquitranes, que es el contaminante, disminuye.

En la fig. 4.3 se observa que a medida que se aumenta la concentración de agente oxidante a 1000 °C la fracción másica de la biomasa disminuye porque promueve que se den las reacciones de gasificación, lo que significa que la conversión de aumenta y de esta forma incrementando la concentración de hidrógeno en el gas de síntesis, esto producto de la reacción agua – biomasa.

Se puede concluir que a un metro en la longitud del reactor se empiezan a dar las reacciones de gasificación ya que se observa un consumo tanto de H_2O como de CO_2 y a su vez un crecimiento acelerado de la conversión de los productos de interés de las reacciones de gasificación, el CO y el H_2 .

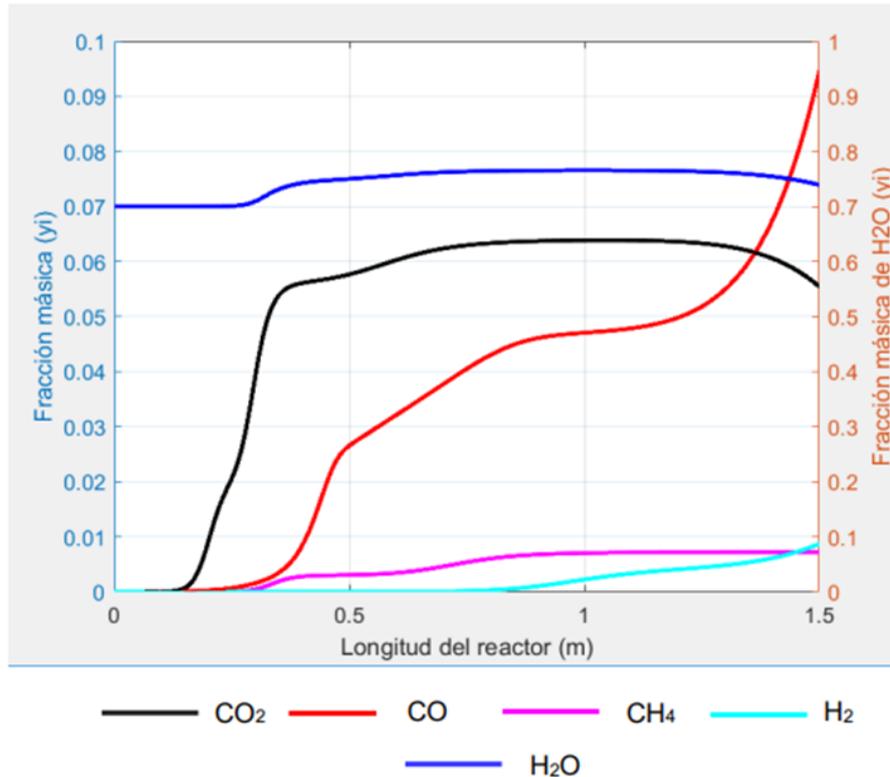


Fig. 4.3 Fracción másica de los diferentes componentes gaseosos formados [22].

En la Fig. 4.4 se analiza la temperatura requerida para el consumo total de la biomasa, en donde ya no se van a producir más reacciones heterogéneas, pero se pueden llegar a producir reacciones homogéneas entre los compuestos.

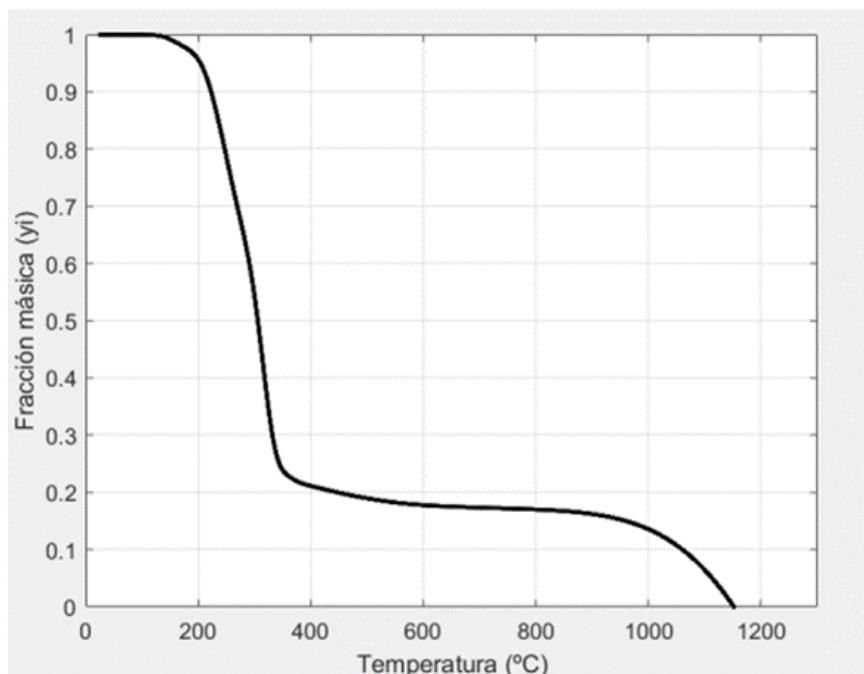


Fig. 4.4 Descomposición completa de la biomasa [22].

En la Fig. 4.5 se muestra la conversión máxima de los componentes gaseosos a esta temperatura cuando ya se ha consumido por completo la biomasa.

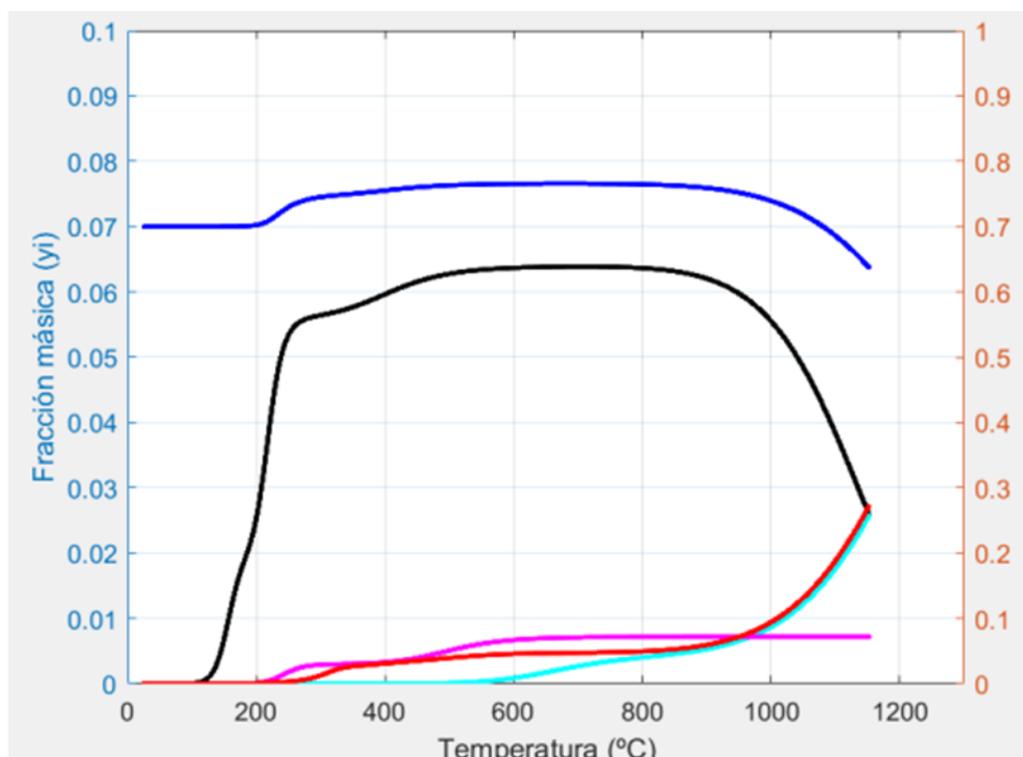


Fig. 4.5 Composición final del gas de síntesis (final del proceso de gasificación de biomasa) [22].

4.2. Gasificador de biomasa de lecho fluidizado.

En el trabajo presentado por Macías R. y col. [59] nombrado como “*Gasificación del bagazo de caña y carbón en planta piloto*”, nos presentan los resultados de las pruebas que realizaron acerca de la gasificación de carbón y co-gasificación de carbón-bagazo de caña en una planta piloto que opera en régimen de lecho fluidizado. Para cada prueba se midió la composición de gas de síntesis producido con cada materia prima, mediante cromatografía de gases; se registraron los perfiles de temperatura para cada prueba con el fin de evaluar la estabilidad del reactor, las condiciones de fluidización y el poder calorífico de cada gas. Se encontró que la co-gasificación del bagazo de caña con carbón a una relación de 5:1 % w/w; produjo el gas con mayor poder calorífico inferior (2.28 MJ/kg), lo que demuestra el efecto de sinergia cuando se procesan de manera simultánea dos tipos de materia prima.

Las condiciones de operación planteadas para las pruebas de gasificación fueron establecidas para garantizar que los parámetros entre pruebas sean comparables, por ello las relaciones de aire (ER) permanecen aproximadamente constantes. Los rangos de temperatura se variaron de acuerdo con el tipo de combustible. En la tabla 4 se presentan los parámetros empleados para las diferentes pruebas de gasificación

COMBUSTIBLE	Carbón-bagazo de caña	Bagazo de caña	Carbón
kg aire/kg biomasa	2.82	1.811	4.13
Temperatura de operación (°C)	800-900	800-850	850-1000
Alimentación combustible (kg/h)	7.63	6.1	7.12
Flujo de aire (kg/h)	7.42	5.63	8.7

Tabla 4. Condiciones de operación [59].

En la tabla 4.1 se muestra la variación de la relación aire-combustible (ER) para cada prueba manteniendo constante la entrada de vapor (SB).

Prueba	ER1	ER2	ER3	SB
Bagazo	0.3	0.4	0.5	0.5
Carbón	0.3	0.4	0.5	0.5
Co-gasificación (BC)	0.3	0.4	0.5	0.5

Tabla 4.1. Relaciones aire-combustible.

La medición se realizó durante 80 minutos para cada prueba mediante los tres primeros termopares (T1, T2 y T3) ubicados en el primer módulo del reactor (figura 4.6) con el fin de conocer la estabilidad en la temperatura y operar en rangos de gasificación. Se presentan los perfiles de temperatura sólo para cada lecho (fig. 4.7).

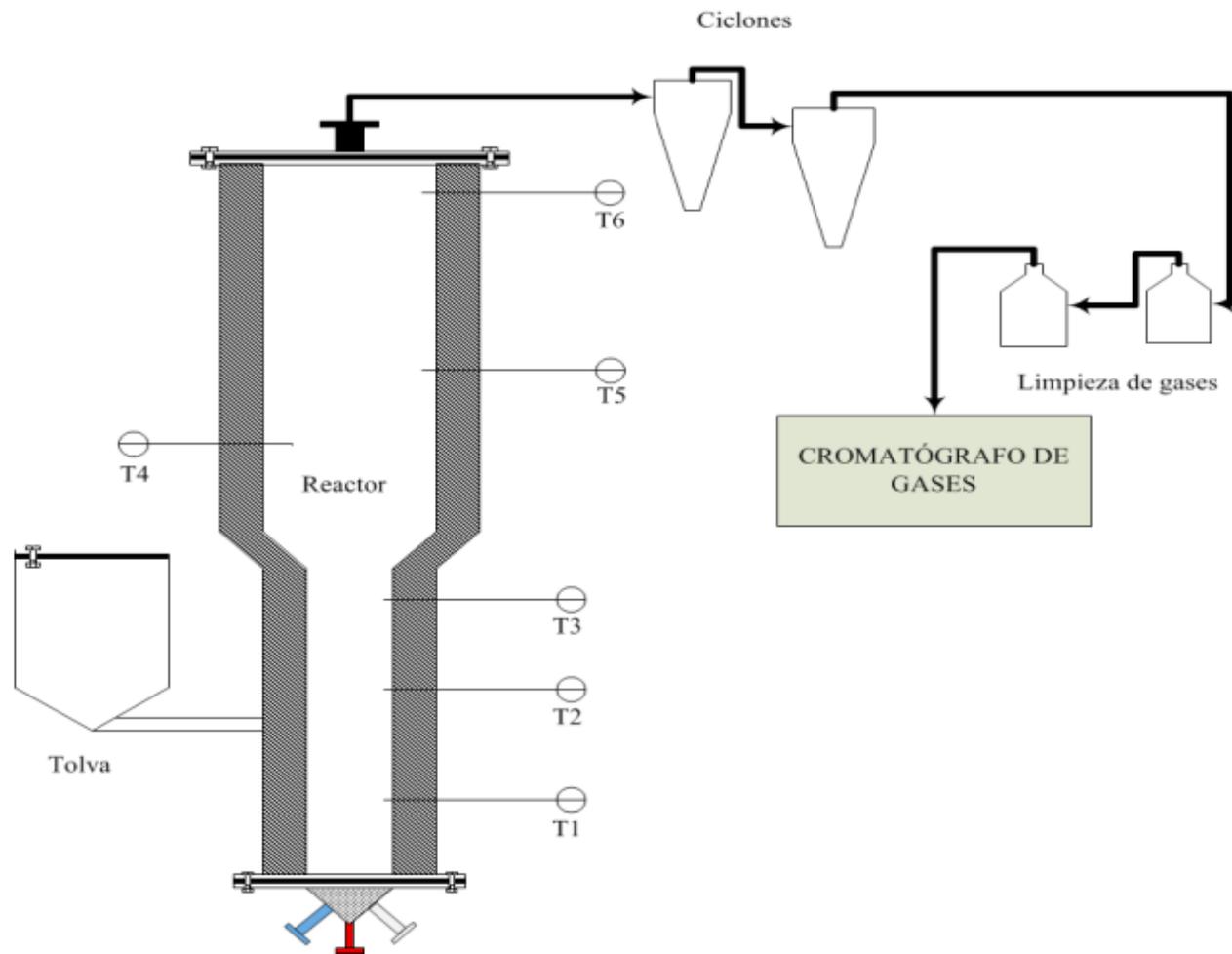


Fig. 4.6 Gasificador piloto [59].

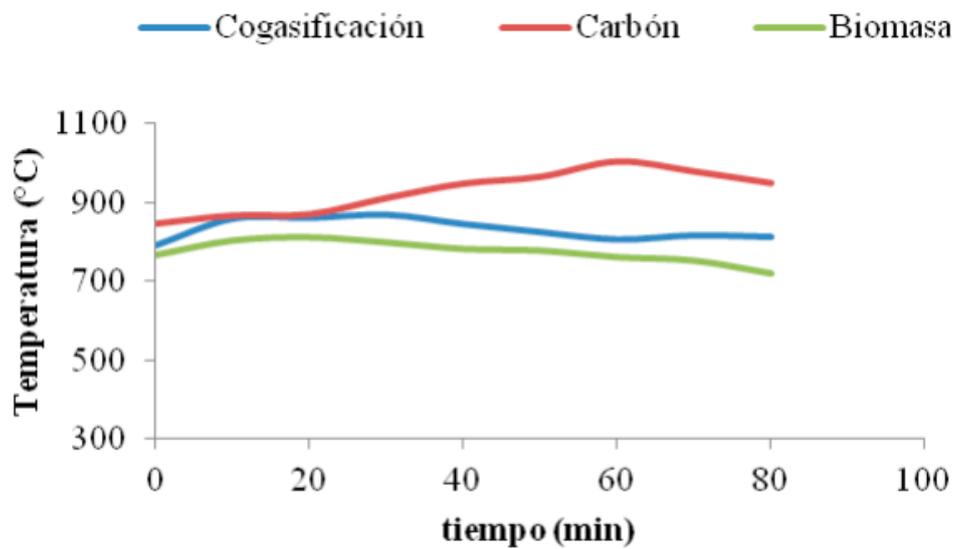


Fig. 4.7 Perfil de temperatura para cada lecho.

También en las fig. 4.8, 4.9 y 4.10 se muestran el comportamiento de la temperatura a lo largo del reactor. Para esto, se tomaron datos para cada módulo del gasificador, tomando medidas en 4 termopares: dos ubicados en la zona del lecho (T1 y T3) y dos más ubicados en el *freeboard* del reactor (T4 y T6) para monitorear la temperatura de salida de los gases.

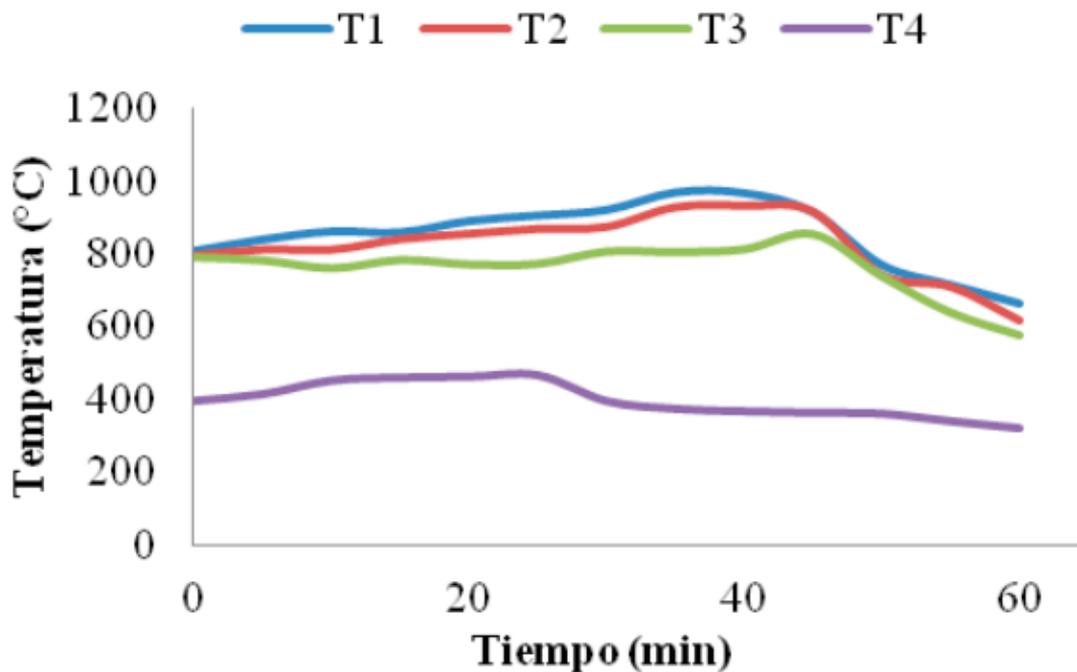


Fig. 4.8 Perfil de temperatura para co-gasificación a lo largo del reactor [59].

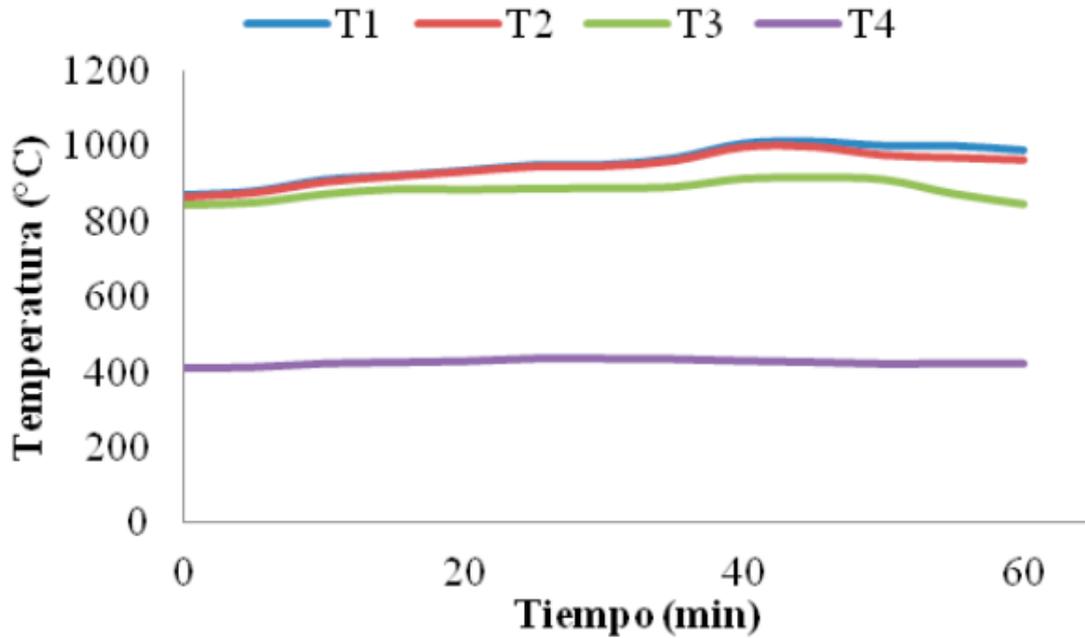


Fig. 4.9 Perfil de temperatura para gasificación de carbón a lo largo del reactor [59].

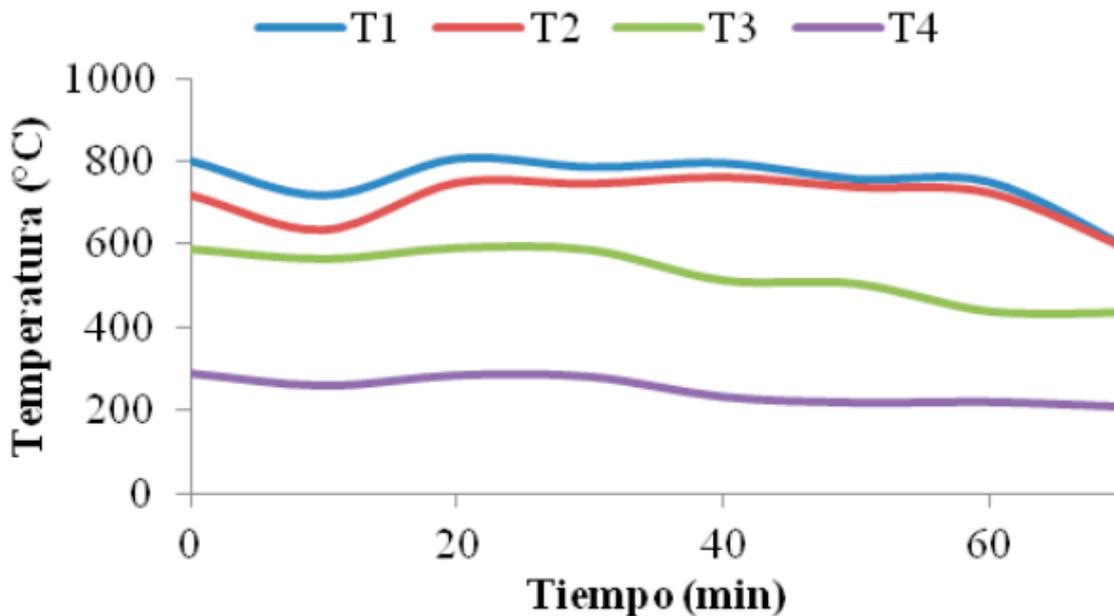


Fig. 4.10 Perfil de temperatura para gasificación del bagazo de caña a lo largo del reactor [59].

Se destaca que la co-gasificación del bagazo de caña y carbón presentan una buena estabilidad, conservando un rango de temperaturas de entre 850 °C y 900 °C.

Por otro lado, también se tiene un estudio del perfil de concentraciones de los compuestos que presenta el gas de síntesis.

En la fig. 4.11 se ilustra la composición de los gases generados bajo condiciones de estado estable durante cada prueba de gasificación. Cada prueba se realizó por duplicado y se tomaron datos cada 20 minutos.

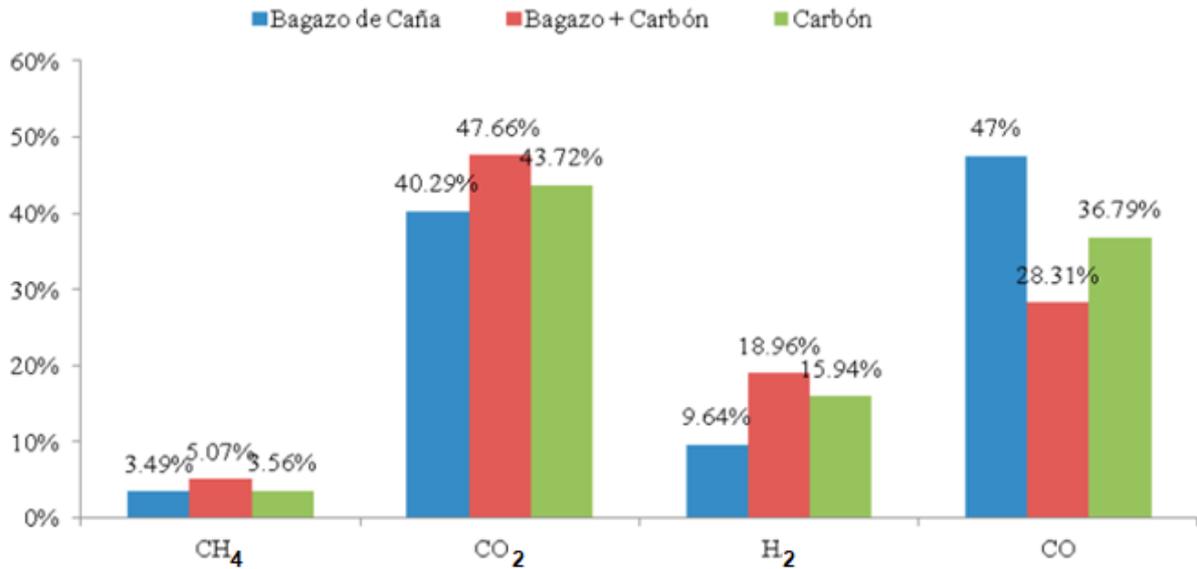


Fig. 4.11 Composición del gas de síntesis [59].

En la fig. 4.12 se puede ver la variación de la composición para las pruebas de gasificación realizadas presentan un aumento en la participación de hidrógeno (H_2) y una disminución en la generación de monóxido de carbono (CO) conforme aumenta la temperatura.

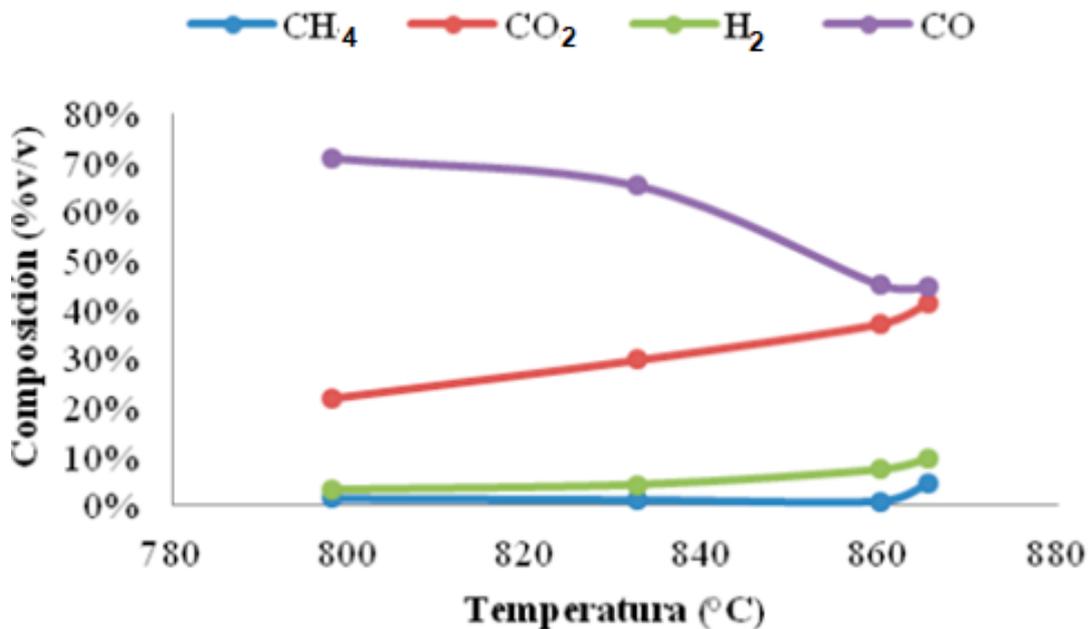


Fig. 4.12 Relación temperatura-composición para gasificación del bagazo de caña [59].

CONCLUSIONES

- En esta tesis se explicó el funcionamiento de una caldera utilizando biomasa como combustible y se relaciona con el uso de lechos fluidizados, esto con el fin de que en investigaciones futuras se tenga la información condensada para así dar paso al desarrollo e implementación de nuevos proyectos que tengan relación con el tema.
- Se explicó la importancia de utilizar combustible alternativo (biomasa) para el funcionamiento específico de una caldera aplicado a un campo de desarrollo en operaciones unitarias.
- Se realizó un análisis comparativo del uso de combustibles en una caldera relacionando que estas constituyen uno de los sistemas térmicos de mayor uso en la industria en el territorio nacional y se considera también que son uno de los principales sistemas térmicos que permiten un potencial de ahorro satisfactorio en cuanto a potencial de ahorro energético. Se pudo afirmar que los precios de los combustibles más típicos como el Gas LP y el precio de la biomasa como combustible para una caldera son significativamente iguales
- Es importante mencionar también que de acuerdo con lo descrito en esta tesis la biomasa es un combustible prácticamente neutro en cuanto a emisiones de CO_2 , por lo que puede jugar un papel fundamental en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir así a reducir el impacto del cambio climático, esto porque en la combustión de la biomasa se considera que las emisiones tienen el balance neutro de CO_2 . Realmente sí que se produce CO_2 como resultado de la combustión de la biomasa, pero el CO_2 que se libera forma parte de la atmósfera actual (es el CO_2 que absorben y liberan continuamente las plantas y árboles para su crecimiento) y no es el CO_2 capturado en el subsuelo a lo largo de miles de años y liberado en un breve espacio de tiempo como ocurre con los combustibles fósiles.
- Si la biomasa utilizada es proveniente de una gestión equilibrada y por lo tanto sostenible, se observa que el incremento de CO_2 emitido a la atmósfera acaba

por frenar, pasando a una situación de reducidas emisiones de CO_2 (las emisiones de calderas no son las únicas consecuencias para el medio ambiente que deben ser consideradas, la producción y el transporte del combustible suponen unas cantidades considerables de contaminación que necesitan considerarse para valorar el equilibrio medioambiental).

- De acuerdo con los datos experimentales recolectados de otras fuentes, los datos obtenidos de la experimentación permiten identificar que la gasificación de la biomasa se favorece con el aumento de la temperatura.

REFERENCIAS

- 1.-Gómez, E., Fernando, N., Aponte, G., Betancourt G. (2014). Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. *DYNA* 81 (184), 159-160.
- 2.-Campoy, M. (2009). *Gasificación de biomasa y residuos en lecho fluidizado: estudios en planta piloto*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- 3.-Berndes, G., Hoogwijk, M., Faaij, A., Turkenburg, W., Van Den Broek, R., Gielen, D. (2003). Exploration of the ranges of the global Potential of biomass. *Biomass and bioenergy*, 25(2), 119-133.
- 4.-Babu, S. (2006). Perspectives on Biomass Gasification. *IEA Bioenergy Agreement*.1(33).
- 5.-Wahlund, B., Yan, J., Westermark, M. (2004). Increasing biomass utilization in energy systems: a comparative study of CO2 reduction and cost for different bioenergy processing options. *Biomass & Bioenergy*, 26, 531-544.
- 6.-Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. *Cuadernos Económicos de ICE* (83), 117-118.
- 7.-Fernández, J. (2010). Biomasa: energía de la biomasa. *Energías Renovables para todos. El periodismo de las energías renovables*.1-2. Recuperado el día 09 de abril del 2020.
- 8.-Valdez, J. (2014). Silvicultura: Principios básicos de los sistemas silvícolas. SAGARPA. Recuperado el día 20 de Noviembre de 2020 de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2014/CD001803.pdf>
- 9.-Marcos, F. (2016). Pelets y briquetas. En *Ecología* (pp.57-59). España: Editorial universitaria.
- 10.-Nijek, J. (2009). *Pellets de madera: una fuente de energía renovable*. Tesis de grado en Ingeniería Industrial. Instituto Tecnológico de Buenos Aires.
- 11.-Varnero, M. (2011). Manual de Biogás. *FAO- Chile*. Recuperado el día 12 de Junio de 2022 de <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- 12.-Tchobanoglous, G. (2009). *Environmental Engineering*. Sexta edición. Capítulo 11: Integrated Waste Management. pp. 490-492.
- 13.-Espinosa, M., López, M., Pellón, A., Mayarí, R., Fernández, A. (2006). La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos como fuente potencial de producción de biogás. *CENIC Ciencias Biológicas*, 38(1), 1-2.

- 14.-Fernández, J., Lucas, H., Ballesteros, M.(2010). Biocarburantes. *Energías Renovables para todos. El periodismo de las energías renovables*, 1-10. Recuperado el 12 de junio del 2022.
- 15.-Berndes,G., Hoogwijk , M., Van den Broek, R. (2003). The contribution of Biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. *Biomass and bioenergy* 25 (1), 1-28.
- 16.-Maser, O., Aguilón, J., Gamino, B. (2005). Anexo 2.Estimación del recurso y prospectiva tecnológica de la biomasa como energético renovable en México. pp. 4-5. UNAM.
- 17.-Castro, S. (2015). *Instalación y arranque de un prototipo de gasificación*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- 18.-Nogués, S., García-Galindo, D., Rezeau A. (2010). *Energía de la Biomasa*. Vol. 1. Prensas Universitarias de Zaragoza. Zaragoza, España. pp. 401-429.
- 19.-Augusto, C., Zapata, A. (2004). Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. *Scientia et Technica*. Núm. 25, 155-157.
- 20.-Turns, S. (2000). *An introduction to combustion: concepts and applications*. Segunda edición, Ed. McGraw-Hill Series in mechanical engineering.
- 21.-Mendoza, J., Bula, A., Gómez, R. y Corredor, L. (2012). Análisis exergético de la gasificación de biomasa. *Información Tecnológica*, 23(5), 86-88.
- 22.-Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Departamento de Energía. (2007). *Biomasa: Gasificación*. Madrid, España. pp.7-9.
- 23.-Centro Politécnico Superior. Universidad de Zaragoza.(2006). *Proceso termoquímicos*. España.
- 24.-Acosta, P., Chipatecua, L. (2018). *Modelación del proceso de gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo con calentamiento indirecto*. Tesis de Licenciatura. Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Colombia, Bogotá.
- 25.-García, R., Aguilar, T., González, H., Márquez, M., Carballo, A. (2006). *Diseño y construcción de un gasificador de lecho fluidizado a escala de laboratorio para el tratamiento térmico de los residuos de tabaco*. Universidad de Pinar del Río. Pinar del Río, Cuba.
- 26.-Barrera, C., Betoret, N., Castelló, M. y Pérez, E. (2018). *Aspectos básicos relacionados con el funcionamiento de una caldera*. Universidad Politécnica de Madrid. España.

- 27.-Secretaría de Energía (SENER), Programa Mexicano-Alemán para NAMA. (2012). *Caracterización de tecnologías y aplicaciones térmicas en el sector PyME. Selección de tecnologías para un programa de sustitución, reconversión masiva y elaboración de escenarios*. México.
- 28.- Pérez, M., Sosa, M. (2013). Mecanismos de transferencia de calor que ocurren en tratamientos térmicos de alimentos. *Temas selectos en Ingeniería de Alimentos*. 7(1), 37-47 Puebla, México. Recuperado el día 22 de junio del 2022 de https://www.usfx.bo/nueva/vicerrectorado/citas/TECNOLOGICAS_20/Ingenieria%20de%20Alimentos/Perez-Reyes-et-al-2013.pdf
- 29.-García, J. (2019). *Mantenimiento y optimización energética de una planta*. Tesis de maestría. Escuela Superior de la Marina Civil de Gijón.
- 30.-CALDERAS POWERMASTER. (2009). *Catálogo de productos: calderas*. Recuperado el día 25 de abril del 2020 de <https://powermaster.com.mx/www/historia.html>
- 31.-Miranda, R. (2018). *Calderas: clasificación, usos y mecanismos de transferencia de calor*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Ingeniería Química. pp. 3-4.
- 32.-Nuevo, D.(2022). *Energías renovables; ¿cómo funciona una caldera de biomasa?* TECPA Ingeniería y Medio Ambiente. Recuperado el día 05 de abril del 2022 de <https://www.tecpa.es/biomasa-ventajas-caldera/>
- 33.-De-Prada, A. (2014). *Estudio experimental de la aglomeración de partículas en un lecho fluidizado*. Departamento Ingeniería térmica y de fluidos. Universidad Carlos III. Recuperado el día 04 de abril del 2020 de <https://core.ac.uk/download/pdf/44310631.pdf>
- 34.-Perry, R., Green, D. y Maloney, J.(2012). *Manual del Ingeniero Químico, Volúmen 3*. Séptima edición. pp. 17-2.
- 35.-Dávila, J. (2004). *Estudio experimental del efecto de la porosidad de partículas sobre el proceso de secado en un lecho fluidizado a vacío empleando aire*. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería Mecánica. Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla. Recuperado el día 04 de abril del 2020 de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/davila_n_jr/
- 36.-Perry, R., Green, D. y Maloney, J.(2012). *Manual del Ingeniero Químico, Volúmen 3*. Séptima edición. pp. 17-3,17-5.
- 37.-Reyna, J. (2011). *Simulación numérica de tipo euleriana-euleriana de un lecho fluido bidimensional para la determinación del comportamiento de burbujas*. Proyecto fin de carrera. Departamento de Ingeniería térmica y de fluidos. Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid.

- 38.-Kunii, D. y Levenspiel O. (1992). *Fluidization Engineering* (Segunda edición). Estados Unidos: Ed. Butterworth-Heinemann.
- 39.-Barreira, Victor. (2007). *Estudio hidrodinámico de un lecho fluidizado*. Proyecto fin de carrera. Departamento de Ingeniería térmica y de fluidos. Ingeniería Industrial. Universidad Carlos III de Madrid.
- 40.-Perry, R., Green, D. y Maloney, J.(2012). *Manual del Ingeniero Químico, Volúmen 3*. Séptima edición. pp. 17-17 a 17-23
- 41.-Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Rosario. (2004). *Cátedra de Procesos Industriales. Craqueo Catalítico*. Departamento de Ingeniería. Argentina.
- 42.-Luckenbach, E., Worley, A., Reichle, D. y Gladrow, M. (1981). *Encyclopedia of chemical processing and design. Cracking Catalytic*. Vol.13. Ed. Marcel Dekker. New York. pp.1-132.
- 43.- Graham, P. (1962). Phthalic anhydride.*Chemical Engineering Progress*. 58 (96).
- 44.-Veatch, N. (1962). Hydrocarbon Process. *Pet. Refiner*, 41 (18).
- 45.-Laguna, I.(2002). La generación de energía Eléctrica y el ambiente. *Gaceta Ecológica*. Número 65. pp. 53-62. Recuperado el día 25 de abril del 2020 de <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906504.pdf>
- 46.-Grønli, M.(1996). *A Theoretical and Experimental Study of the Thermal Degradation of Biomass*. Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología. Trondheim (Noruega).
- 47.-Rezeau, A. (2010). *Combustión de biocombustibles sólidos*. Energía de la biomasa (Volumen I). Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza, p.435-479.
- 48.-Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis*. Practical Design and Theory. 1ª edición. Oxford: Elsevier. pp. 121-365
- 49.-Cooper, J., Hallett, W. (2000). *A numerical model for packed-bed combustion of char particles*. *Chemical Engineering Science* (55).pp. 4451- 4460.
- 50.-Bardi, S., Astolfi, A. (2010). *Modeling and Control of a Waste-to-Energy Plant*. *IEEE Control Systems Magazine*.pp. 27-37.
- 51.-Porteiro, J., Miguez, J., Granada, E. y Moran, J. (2006). *Mathematical modelling of the combustion of a single wood particle*. *Fuel Processing Technology*, 87. pp. 169-175.
- 52.-Surjosatyo, A., Vidian, F. y Sulisty, Y. (2010). *A Review on Gasifier Modification for Tar Reduction in Biomass Gasification*. *Journal Mekanikal* (31). pp. 62-77.

- 53.-Velasco, J. (2015). *Caracterización y simulación del lecho de una caldera de biomasa en contracorriente*. Grado en Ingeniería Química. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales. Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica.
- 54.-CIDERPLUS Energía. (2014). *Calderas CIDERPLUS TP*. Valladolid, España. Recuperado el día 02 de mayo del 2020 de [Calderas CIDERPLUS TP | CIDER+energia \(cidenergy.es\)](http://calderas.cidenergy.es/)
- 55.-Consejería de economía y hacienda. Comunidad de Madrid. (2013). *Guía básica. Calderas Industriales eficientes*. Fundación de Energía de la Comunidad de Madrid. Recuperado el día 13 de junio del 2020 de <https://www.ingenieros.es/files/proyectos/Guia-basica-calderas-industriales-eficientes-fenercom-2013.pdf>
- 56.-Quintero, L., Chimá, K. (2013). *Determinación del poder calorífico de los residuos sólidos agroindustriales de palma de aceite, como alternativa de energías renovables en el departamento del Cesar*. Fundación Universitaria del Área Andina. Colombia. Recuperado el día 13 de junio de 2020 de <https://core.ac.uk/download/pdf/268442492.pdf>
- 57.-Sanz, D.(2012). *¿Cuántos tipos de caldera hay?*. Blog Actitud ecológica.Recuperado el día 13 de junio del 2020 de <https://actitudecologica.com/calefaccion/calderas/>
- 58.-VYC Industrial. (2020). *Calderas de Biomasa Industriales*. España. Recuperado el día 04 de julio del 2020 de <https://vycindustrial.com/calderas/biomasa-industriales/>
- 59.-Macías, R., Chejne, F., Montoya J. y Blanco A. (2014). Gasificación del bagazo de caña y carbón en planta piloto. *MUTIS*, 4 (1), pp. 24-32.

ANEXOS

Datos técnicos de una caldera

Potencia o capacidad de una caldera

La potencia se expresa en caballo caldera (CC), equivalente a 9.81 kW de potencia térmica o 33,480 BTU/h. Específicamente en las pequeñas y medianas empresas (PyME) en México pueden encontrarse calderas desde 10 CC hasta 500 CC. Una caldera de 10 CC puede generar alrededor de 150 kg de vapor a 100°C por hora y de ahí en adelante se podrá generar mayor cantidad de vapor entre más potente sea la caldera. Algunas de 300 CC podrán generar cerca de 4,700 kg de vapor por hora.

A continuación, se presentan las capacidades comunes de las calderas disponibles por los principales fabricantes: Myrggio, PowerMaster y Cleaver Brooks.

Caballos caldera	Potencia de salida (KCal/h)	Producción de vapor a 100°C (Kg/h)
10	84,360	156
15	126,540	235
20	168,720	313
25	210,900	391
30	253,080	469
40	337,428	626
50	421,785	782
60	506,142	939
80	674,900	1,252
100	834,600	1,565
125	1,054,500	1,956
150	1,265,400	2,347
200	1,687,200	3,130
250	2,109,000	3,912
300	2,530,800	4,695

350	2,952,600	5,477
400	3,374,400	6,260
500	4,218,000	7,825

Tabla 6. Capacidades de calderas de los principales fabricantes.

Consumo de energía de una caldera

En México las calderas pueden usar diferentes tipos de combustibles, entre los más comunes están: gas natural, gas LP o diesel. El combustóleo casi no es usado por las PyME pero sí en industrias mayores. La tabla presentada a continuación informa el consumo de combustible por hora con el que puede desempeñarse una caldera en función de su capacidad en caballos caldera. En general los valores menores en consumo pueden asociarse a calderas de alta tecnología de menos de 8 años de edad, mientras que los valores mayores son representativos de equipos estándar, antiguos o con mal mantenimiento.

Las calderas eficientes podrían consumir por hora la cantidad de combustible indicada por los valores debajo de la columna que dice "Desde" en el cuadro inferior, +- 6%. El consumo depende del tamaño de de la caldera, de los aditamentos de la misma, del combustible, del quemador, de su automatización. Todos estos componentes influyen directamente en el precio del equipo.

Caballos Caldera (CC)	Diesel (L/h)			Gas natural (m ³ /h)			Gas LP (L/h)		
	Desde	Hasta	Promedio	Desde	Hasta	Promedio	Desde	Hasta	Promedio
10	10.6	13.2	11	11	14	11.7	15.7	20.5	16.4
15	15.8	19.8	16.5	16.5	21.1	17.6	23.6	30.8	24.6
20	21.1	26.4	22	22	28.1	23.4	31.5	41	32.8
25	26.4	33	27.5	27.5	35.1	29.3	39.4	51.3	41
30	30.2	37.7	31.5	31.1	39.7	33.1	44.5	57.9	46.3
40	40.3	50.3	41.9	41.4	52.9	44.1	59.3	77.2	61.8
50	50.3	62.9	52.4	51.8	66.1	55.1	74.2	96.6	77.2
60	60.4	75.5	62.9	62.2	79.4	66.1	89	115.9	92.7
80	78.5	98.2	81.8	87	111	92.5	114.6	149.3	119.4
100	97.2	121.6	101.3	108.7	138.7	115.6	143.3	186.6	149.3
125	121.6	152	126.7	135.8	173.4	144.5	179.1	233.3	186.6
150	145.9	182.4	152	163	208.1	173.4	214.9	279.9	223.9
200	194.6	243.2	202.7	217.3	277.4	231.2	286.6	373.1	298.5
250	243.2	304	253.3	271.7	346.8	289	358.3	466.5	373.2
300	291.8	364.8	304	326	416.2	346.8	429.9	559.8	447.8
350	340.5	425.6	354.7	380.3	485.5	404.6	501.5	653	522.4
400	389.1	486.4	405.3	434.7	554.9	462.4	573.2	746.4	597.1
500	486.4	608	506.7	543.3	693.6	578	716.5	933	746.4

Tabla 6.2 Consumo promedio de combustible en calderas de vapor.