

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

“ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGIA DE ALIMENTOS



Utilización del guishe de *Agave lechuguilla Torrey* para la obtención de biogás por medio de procesos termoquímicos

Por:

Sergio Luis López Tejeda

Monografía

Presentada como requisito parcial para
obtener el título de:

Ingeniería en Ciencia y Tecnología
de Alimentos

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Septiembre de 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

"Utilización del guishe de Agave lechuguilla Torrey para la obtención de
biogás por medio de procesos termoquímicos"

MONOGRAFÍA

Por:

SERGIO LUIS LÓPEZ TEJEDA

Elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y aprobada como requisito
parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

APROBADA:



Q.F.B. Carmen Pérez Martínez

Presidenta del jurado



Q.F.B. María del Carmen Julia García

Sinodal



Dr. Efraín Castro Narro

Sinodal




Dr. Xochitl Ruelas Chacón

Sinodal



Dr. José Dueñez Alanís
Coordinador de la División de Ciencia Animal


COORDINACION DE CIENCIA
ANIMAL

Buenavista, Saltillo Coahuila. Septiembre 2016.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

**"Utilización del guishe de Agave lechuguilla Torrey para la obtención de
biogás por medio de procesos termoquímicos"**

MONOGRAFÍA

Por:

SERGIO LUIS LÓPEZ TEJEDA

Que se somete a consideración de H. Jurado Examinador como Requisito Parcial para obtener
el Título de:

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

El presente trabajo ha sido dirigido por el siguiente comité:



Q.F.B. María del Carmen Julia García

Asesor Principal

Buenvista, Saltillo Coahuila, México. Septiembre 2016.

AGRADECIMIENTOS

Te agradezco primeramente a ti **DIOS NUESTRO SEÑOR** porque me diste la oportunidad de andar por este mundo guiándome siempre por un buen camino y por haberme permitido culminar con éxito mi carrera.

A mi inolvidable **ALMA TERRA MATER UAAAN** por haberme dado la oportunidad de prepararme profesionalmente.

A la **Lic. Laura Olivia Fuentes Lara** por darme la oportunidad de llevar a cabo este trabajo de investigación bibliográfica.

A todos aquellos compañeros y amigos que de alguna manera participaron apoyándome con su amistad y consejos pero que además estuvieron en las buenas y las malas, especialmente a Leonardo Daniel González Pérez, Iván Morales Reyes, Miguel Morales Reyes, David Salas Nuncio, Daniel González Alonso.

DEDICATORIAS

A mi mamá:

Leticia Tejeda Godínez

Gracias por todo el apoyo que recibí, no sólo en esta etapa de mi vida, si no a lo largo de mi vida, por contar con el 100 % de su ayuda en todo momento, por ser mi apoyo. Gracias por la confianza que siempre he recibido y por ser la persona que más me quiere en este mundo.

A mi abuelita:

Margarita Godínez Martínez

Mi segunda madre que tengo, un pilar importante en mi vida, cuidándome desde que era un niño hasta la actualidad, gracias por todo el cariño que me has dado.

A mis hermanas:

Joseline Leticia López Tejeda, María del Carmen López Tejeda y Guadalupe López Tejeda

Mis mejores amigas, con las que compartí muchas veces sentimientos de alegría, tristezas, risas, llantos, gracias por su apoyo y por siempre estar a mi lado en cada momento.

A mis primos:

Vania Carolina Tejeda Godínez, Ana Karen Avilés Tejeda, Viridiana Avilés Tejeda, Grecia Daniela Tejeda Juárez, Sergio Alejandro Tejeda Juárez.

Ante la ley son mis primos, pero para mí son mis hermanos, muchas experiencias hemos tenido juntos y las recuerdo con mucho cariño, gracias por todos los buenos momentos que tuvimos juntos.

A mi familia:

Gracias a todos mis tíos, tías, y demás por sus apoyos y mejores deseos hacia mi persona, gracias por todo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| | 1.1 OBJETIVO..... | 3 |
| 2. | GENERALIDADES DE LA BIOMASA..... | 3 |
| | 2.1 LA BIOMASA EN MÉXICO..... | 4 |
| | 2.2 TRANSFORMACIÓN DE LA BIOMASA..... | 6 |
| 3. | UTILIZACIÓN DE LA BIOMASA EN BIOREFINERIAS..... | 8 |
| 4. | FOTOSÍNTESIS..... | 9 |
| | 4.1 FOTOSISTEMA II..... | 12 |
| | 4.2 FOTOSISTEMA I..... | 12 |
| | 4.3 REACCIONES QUE OCURREN PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE LA FOTOSÍNTESIS..... | 13 |
| 5. | FUENTES DE OBTENCIÓN DE LA BIOMASA..... | 15 |
| 6. | GUISHÉ..... | 17 |
| 7. | PROCESOS ANAERÓBICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMETANO..... | 19 |
| | 7.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN..... | 20 |
| 8. | PROCESOS TERMOQUÍMICOS..... | 22 |
| | 8.1 PROPIEDADES A CONSIDERAR DE LA BIOMASA PARA SU CONVERSIÓN POR MEDIO DE PROCESOS TÉRMICOS..... | 24 |
| | 8.2 FACTORES QUE AFECTAN LA VELOCIDAD DE LOS PROCESOS TERMOQUÍMICOS DE LA BIOMASA..... | 27 |
| | 8.3 FACTORES QUE AFECTAN A LA VELOCIDAD DE LA ETAPA DE REACCIÓN QUÍMICA..... | 29 |
| 9. | COMBUSTIÓN..... | 29 |
| 10. | PIRÓLISIS..... | 31 |
| 11. | GASIFICACIÓN..... | 36 |
| | 11.1 POSIBLES MECANISMOS DE GASIFICACIÓN..... | 43 |
| | 11.2 CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE..... | 44 |

| | | |
|------------|--------------------------------|-----------|
| 12. | TIPOS DE REACTORES..... | 45 |
| 13. | CONCLUSIONES..... | 47 |
| 14. | BIBLIOGRAFÍA..... | 47 |

ANEXOS

| | |
|--|----------|
| EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA CONSUMIDA DE BIOMASA A NIVEL MUNDIAL..... | 4 |
|--|----------|

| | |
|---|----------|
| POTENCIAL MÁXIMO TEÓRICO POR TIPO DE RECURSO DE BIOMASA..... | 5 |
|---|----------|

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|--|-----------|
| CUADRO NO. 1 COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE BIOMASA TÍPICA..... | 25 |
|--|-----------|

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----------|
| FIGURA NO. 1 CONCEPTO DE BIOREFINERÍA..... | 9 |
| FIGURA NO. 2 REPRESENTACIÓN ESQUEMATICA POR GASIFICACIÓN..... | 39 |
| FIGURA NO. 3 DISEÑO DE NUEVOS SISTEMAS DE COMBUSTIÓN..... | 46 |

1. INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica mediante energías renovables toma cada vez mayor interés global. Sistemas de gasificación, combustión, pirólisis y procesos biológicos son las vías que han sido más estudiadas en la última década para la transformación de estas energías renovables (biomasa).

La crisis petrolera de los años setenta ocasiono la búsqueda de nuevas opciones energéticas, con el fin de reemplazar, parcial o totalmente, los recursos de origen fósil con energéticos renovable, además con el incremento de los controles estadísticos de la actividad energética en el ámbito mundial.

Entre 1991 y 2001 se observó una tendencia mundial creciente del consumo anual del petróleo en torno al 2%. Esta tendencia a aumentar cada vez más el consumo energético mundial, ha hecho que varios autores coincidan en que hacia 2025 el precio del petróleo será insostenible debido a que las reservas de este energético se calculan para 40 años. Con este panorama petrolero, se predicen dos crisis energéticas a mediano plazo: una, el momento en el que el consumo de los energéticos de origen fósil superen su propia tasa de producción; y la segunda, cuando los energéticos comiencen a escasear, pese a que el gas y el carbón tienen una perspectiva de reserva de 65 y 155 años. Estas crisis incrementarán los precios de los combustibles, generarán más inestabilidad geopolítica global por la consecución y control de estos recursos, debido a que el desarrollo y el crecimiento económico se desarrollan directamente con el consumo energético bajo el modelo económico y energético implantado en la actualidad en el ámbito global [1].

Otro elemento de juicio al momento de usar combustibles fósiles lo constituye su potencial de generación de emisiones contaminantes, las cuales contribuyen al deterioro del medio ambiente. Entre los principales gases contaminantes se encuentran: el bióxido de carbono (CO_2), principal gas causante del efecto invernadero; el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO) e hidrocarburos parcialmente quemados (HC), principales formadores de smog fotoquímico en presencia de luz; las emisiones de óxidos de azufre (SO), causantes de la lluvia ácida, generadora de sulfatos. El uso de combustibles

alternativos de origen renovable provenientes de la biomasa produce mínimas emisiones de SO, debido a su bajo contenido de azufre, y un ciclo cerrado de emisiones de CO₂ a la atmósfera, porque previamente las plantas fijan el bióxido emitido mediante el proceso de fotosíntesis. Sin embargo emiten CO, NO, HC, en mayor o menor medida comparado con los combustibles fósiles, lo cual depende de la tecnología de aprovechamiento y las condiciones de combustión.

Las emisiones contaminantes descritas generan consecuencias negativas que inciden en la biodiversidad del planeta en la calidad de la biósfera (agua, tierra y aire) y derivan en agotamiento de los recursos naturales. El impacto más dramático es el calentamiento global.

Entre los frentes de trabajo que buscan asegurar el suministro energético, reducir las emisiones contaminantes, se citan básicamente: el uso racional y eficiente de los recursos energéticos y del agua; tecnologías avanzadas en los vehículos; manejo integral de residuos sólidos; investigación y desarrollo de las fuentes de energía renovables, entre las que se encuentra la biomasa.

La principal ventaja que presenta la biomasa como recurso energético es su carácter renovable y bajo costo; también se destacan características como su versatilidad, debido a que pueden obtenerse combustibles renovables en fase gaseosa, líquida y sólida [2].

Razones para el uso de biomasa

- Es una fuente de energía renovable y no contaminante
- Disminuye la dependencia de combustibles fósiles y sus problemas derivados
- Ayuda a la limpieza de los montes y al uso de los residuos industriales
- Fomenta la creación de puestos de trabajo en zonas rurales
- Tiene un coste inferior al de la energía fósil convencional
- Tecnología muy avanzada, con garantía de funcionamiento, alto rendimiento y fiabilidad
- La distribución de la biomasa está asegurada actualmente

1.1 OBJETIVO

Con la información recopilada sobre el guishe de *Agave lechuguilla Torrey*, formular conclusiones para determinar si es viable su transformación por procesos termoquímicos para la obtención de biogás.

2. GENERALIDADES DE LA BIOMASA

El término biomasa, en sentido amplio, se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en un proceso biológico. El concepto de biomasa comprende a productos tanto de origen vegetal como de origen animal. En la actualidad se ha aceptado a la biomasa como fuente para la producción de productos energéticos y materias primas de tipo renovable.

Hemicelulosa, celulosa, lignina y extractivos son los componentes que encontramos en mayor cantidad en la biomasa [3]; aserrín, astillas de madera, restos de comida, estiércol de los animales, son algunos ejemplos de biomasa.

| Energía consumida | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Total usos térmicos energías renovables | 3.537 | 3.656 | 3.712 | 3.750 | 3.753 | 3.932 |
| Biomasa para aplicaciones térmicas | 3.441 | 3.513 | 3.548 | 3.583 | 3.551 | 3.665 |

Evolución de la energía consumida en aplicaciones térmicas con biomasa a nivel mundial.

Según la Agencia Internacional de la Energía, en el año 2009, el 10,2 % del 100% de la estructura de energía primaria en el mundo se obtiene a partir de los recursos que se denominan biomasa y residuos. La biomasa sólida constituyó en dicho año el 70,2% del 100% de la oferta total de energía primaria renovable en el mundo, el biogás el 1,4% del 100% y la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos el 0,9% por 100%. El biogás ha crecido en el mundo entre 1990 y 2009 a una tasa media anual del 14,9% por 100%.

Siendo Suecia, Austria, Dinamarca, EUA, China, Alemania y España los países que mayor uso le dan a estas energías renovables.

2.1 LA BIOMASA EN MÉXICO

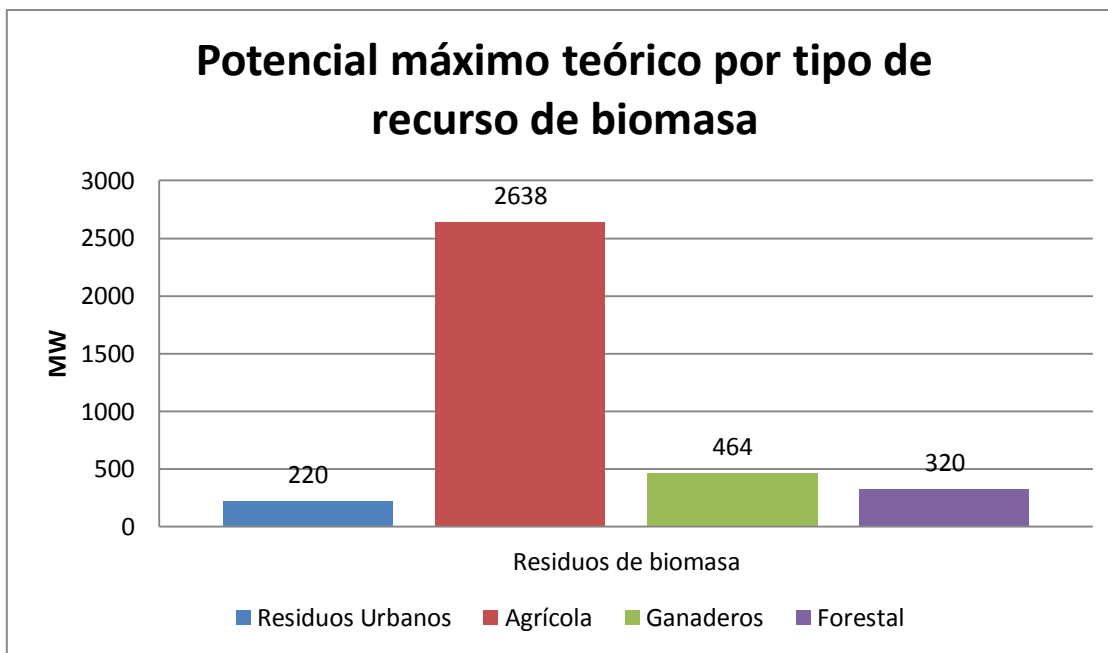
El 80% de la generación eléctrica en México proviene de combustibles fósiles, por lo que el sector demanda una mayor visibilidad sobre las sendas de crecimiento por tecnología mediante el cumplimiento de objetivos de generación renovable. La energía proveniente de la biomasa fomenta el desarrollo rural del país, pero los elevados costos logísticos y la incertidumbre en el acceso al recurso a largo plazo, hacen que el potencial actual de generación con biomasa se concentre en industrias productoras de residuos aprovechables.

- Posibilidad de aprovechar residuos agrícolas (ej. Bagazo).

- Industria papelera y de celulosa.

- Existe una oportunidad en el aprovechamiento de residuos urbanos, aunque presenta importantes incertidumbres técnicas, financieras y regulatorias.

A partir de la información recopilada y los análisis realizados se ha estimado un potencial máximo teórico de 3,642 MW dentro del alcance de los recursos de biomasa estudiados.



Fuente: Parte de las entrevistas realizadas a más de 60 agencias, SAGARPA; SEMARNAT; CFE; Expertos sectoriales.

La capacidad de generación instalable en 2011 para el aprovechamiento de los residuos depositados en rellenos sanitarios en el periodo 2000-2010 es de más de 300 MW.

Por la productividad de las tierras, 6 estados tienen un potencial de 950 MW, los cuales son Sinaloa, Guanajuato, Tamaulipas, Jalisco, Sonora y Michoacán. Establos bovinos con más de 300 cabezas pueden incorporar capacidades de generación de más de 50 kW.

La cascara de coco es un recurso aprovechable para la producción de energía eléctrica. Puede utilizarse como insumo en procesos de co-combustión en carboeléctricas.

La planta carboeléctrica de Petacalco Guerrero, se encuentra ubicada en una de las regiones con mayor producción de coco a nivel nacional. En los estados próximos a la central carboeléctrica existen 58,640 Ha de cultivo de coco, equivalentes a 117,000 toneladas de materia seca. En función del volumen recuperado para su uso en la central se podría generar hasta el 3.0% del total de la energía eléctrica producida en Petacalco. Los residuos de coco pueden sustituir tanto al carbón como al combustóleo, y se

concedirá un escenario de sustitución (límite técnico) de material fibroso de hasta el 5% sin necesidades de modificación de la planta.

La cuantificación del recurso de la biomasa es una tarea complicada y no existen en México datos precisos, salvo las estadísticas que presenta anualmente el balance nacional de energía en el que se consignan las cantidades consumidas de leña y bagazo de caña. Se estima que el consumo anual de los particulares es de 87,820 Tera Joules (TJ) de bagazo de caña y 247,400 TJ de leña, lo cual da un total de 335,220 TJ.

2.2 TRANSFORMACIÓN DE LA BIOMASA

Energía térmica: La utilización del biogás para su utilización en energía calorífica se lleva por medio de una combustión en quemadores, este puede ser combinado con el gas natural y gas LP, solo hay que modificar el sistema de inyección. Hay que recordar que la densidad energética del biogás es inferior que los dos gases mencionados. Por esta razón las condiciones de operación son diferentes, porque se requiere una mayor concentración de biogás, para igual la energía calorífica del gas natural y gas LP. Las aplicaciones más usadas en energía térmica del biogás son sistemas de calefacción, cocimiento de alimentos, calentamiento de agua y sistemas de iluminación.

Energía mecánica: El metano puede ser utilizado para ser utilizado como energía mecánica a través de motores, estos sistemas funcionan a base de ciclos termodinámicos.

Donde más conocimiento se tiene es en los motores de combustión interna, donde se usa el sistema de otto para la utilización del biogás. Los motores de gasolina pueden ser modificados para que se utilice el biogás, donde el sistema de inyección sea modificado, se puede usar el biogás solo para la combustión o hacer una purificación del biogás para obtener metano. Otra forma de generar energía mecánica es por el movimiento cinético que puede producirse por el biogás en turbinas donde se basa en el ciclo termodinámico de Brayton. También puede usarse en las turbinas de vapor donde su función sería ser como combustible para calentar el vapor y que este provoque el movimiento. Otra forma

es usarse en los motores de combustión externa en el cual el biogás puede usarse para producir el calor externamente.

Energía eléctrica: La utilización del biometano para la generación de energía eléctrica puede ser producida por dos vías.

- a) Generadores eléctricos: Un generador eléctrico es aquel que transforma la energía mecánica en energía eléctrica, en el cual hay una diferencia de potencial, en los bornes de una bobina provocando por un campo magnético. La bobina se hace girar para generar una variación de flujo magnético, este movimiento de la bobina se produce por motores o turbinas, y como se había dicho antes la fuente de energía para estos sistemas sería el biogás creando un sistema combinado.
- b) Celdas de combustible: Este sistema permite transformar la energía química formada en una reacción en energía eléctrica, donde se suministra la celda con un combustible y oxígeno. Estas celdas pueden usar hidrógeno puro, o de cualquier combustible, para generar gas rico en hidrógeno. Una ventaja es que solo genera vapor como residuo. La principal desventaja son las operaciones de costo. Se han encontrado grandes resultados con el uso de estas celdas en especial con las de óxido sólido.

Cogeneración: Se llama cogeneración a la producción de energía térmica y energía eléctrica simultánea, a partir de un compuesto primario. Con esto se obtienen un rendimiento de utilización de energía de hasta un 85%. Un ejemplo es el siguiente en una turbina de vapor se usa el calor que es producido por la turbina de vapor para calentar el agua y transformarla en vapor para su utilización en una turbina de vapor que generara calor.

Como en el ejemplo anterior se puede combinar un sistema de celdas de combustible con otro ciclo térmico, donde el calor generado por la celda de combustible es utilizado por un calefactor.

Donde como ejemplo puede usarse para calentar el agua, calefacción etc.

La eficiencia a esta configuración puede ser del 50% la utilización total de energía puede llegar hasta un 85%. Otra forma es la adaptación de un sistema híbrido donde se pueden obtener eficiencias del 70%, un ejemplo es el siguiente la celda de combustión es la fuente principal de generación de energía, donde el calor que requiere es generado por una turbina de gas, el cual también genera electricidad pero alterna, la turbina y la celda se conectan en un recuperador de calor donde emplea el gas de escape de la turbina.

3. UTILIZACIÓN DE LA BIOMASA EN BIOREFINERIAS

La biorefinería hace lo mismo que una refinería, produce combustibles, energía y productos químicos solo que estos son a base de la biomasa.

Las biorefinerías se pueden clasificar en tres tipos:

- La biorefinería 1 solo utiliza una materia prima y solo obtiene un solo producto.
- La biorefinería 2 también utiliza un solo tipo de materia prima, pero no solo genera un solo producto, sino ofrece una variedad de compuestos.
- La biorefinería 3 ofrece utiliza la mezcla de varios compuestos para la generación de compuestos, en esta refinería podemos encontrar la mejor forma para la elaboración de biogás, estas representan una alternativa muy tentativa, pero hay aspectos técnicos que resolver como es el que sean rentables.

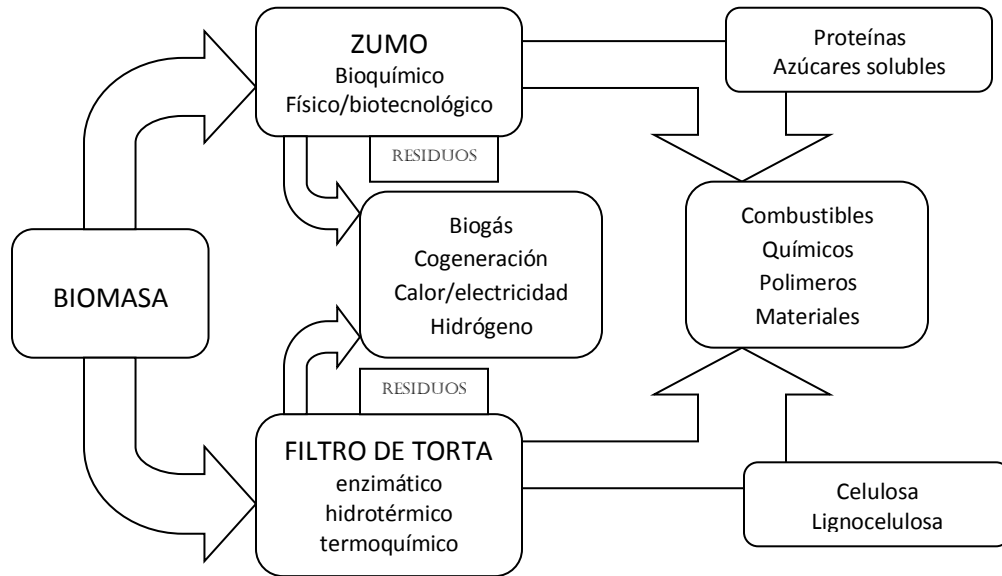
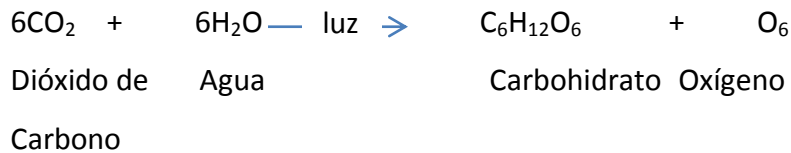


Figura No. 1: Concepto de biorefinería.

4. FOTOSÍNTESIS

La energía almacenada en la biomasa proviene de la energía solar y es convertida en energía química por medio del proceso llamado fotosíntesis, cuando la biomasa es quemada o digerida, esa energía es liberada y puede ser transformada en combustibles gaseosos o líquidos. La energía extraída de la biomasa es llamada bioenergía [5].

Es la conversión de energía solar en energía química por medio de organismos fotosintéticos en forma de compuestos orgánicos, es un proceso de oxido-reducción que incluye el transporte de electrones y el metabolismo fotosintético del carbono. La fotosíntesis consiste básicamente en la producción de una sustancia orgánica (un glúcido sencillo) a partir de moléculas inorgánicas (el dióxido de carbono como sustrato a reducir, y el agua como dador de electrones que se oxida), mediante el aprovechamiento de la energía lumínica (que queda almacenada como energía química dentro de la molécula sintetizada) y con desprendimiento de oxígeno. El proceso global puede expresarse mediante la siguiente reacción:



El proceso fotosintético suele dividirse en tres etapas:

1. Una etapa de radiación, en la cual la maquinaria fotosintética atrapa la energía luminosa.
2. Una etapa fotoquímica y en la cual se obtiene una separación de cargas (primeras separaciones de oxidación-reducción).
3. Finalmente la etapa bioquímica, en la cual ocurren las reacciones de transferencia de electrones, y se sintetizan los carbohidratos, y que también comprende la síntesis de ATP.

Para que la energía de la luz solar pueda ser usada por los seres vivos, primero ha de ser absorbida. A la sustancia que absorbe luz se le denomina clorofila; la clorofila es el pigmento de las plantas que transfiere la energía solar.

La energía absorbida por el pigmento hace que pierda un electrón de su molécula, que entonces se oxida. Este electrón de alta energía es captado por otra molécula, que, por lo tanto se reduce. Esto es lo que se llama fotooxidación. La posibilidad de que la reacción química ocurra, no sólo depende de la estructura de un determinado pigmento, sino de su asociación de otras moléculas vecinas. La clorofila puede convertir la energía de la luz en energía química, proceso que se inicia con una simple oxidación-reducción, cuando se haya asociada a determinadas proteínas y englobada en una membrana especializada.

Cuando una molécula de clorofila absorbe un fotón, pasa a un estado inestable, denominado estado excitado, en el que un electrón periférico se desplaza hacia una posición más externa. Si este electrón pasa a otra molécula (fotooxidación), la energía se habrá transmitido y la molécula de clorofila permanecerá excitada; para volver a su estado

fundamental deberá recibir otro electrón que ocupe el hueco dejado por el primero. Cuando coexisten numerosas moléculas de clorofila agrupada y ordenada, la energía absorbida por cualquiera de ellas puede transmitirse por resonancia (transferencia de excitón) a todo el conjunto sin que haya transferencia de electrones. Ambos tipos de transferencia de energía tienen lugar en el proceso de absorción de luz por los pigmentos fotosintéticos.

En el cloroplasto, los pigmentos están estrechamente asociados a proteínas y se alojan en la bicapa lipídica de los tilacoides, estos complejos proteína-clorofila se encuentran empaquetados formando unidades denominadas fotosistemas [6].

Cada tilacoide contiene miles de copias de dos tipos de fotosistemas, llamados fotosistema I y fotosistema II. Cada fotosistema consta de dos partes principales: (1) un complejo recolector de luz y (2) un sistema de transporte de electrones. Cada complejo recolector de luz contiene cerca de 300 moléculas de clorofila y pigmentos accesorios. Estas moléculas absorben luz y pasan la energía a una molécula específica de clorofila llamada centro de reacción. En analogía a la recepción de televisión, los pigmentos que absorben luz se denominan moléculas antena, porque captan energía y la transfieren al centro de reacción donde se procesa. La clorofila del centro de reacción está situada cerca de la segunda parte del fotosistema: el sistema de transporte de electrones, una serie de moléculas portadoras de electrones que también están embebidas en la membrana tilacoidea.

Cuando la clorofila del centro de reacción recibe energía de las moléculas antena, uno de los electrones del centro de reacción absorbe la energía, sale de la clorofila y salta al sistema de transporte de electrones. Este electrón energético se mueve de un portador al siguiente. En algunas de las transferencias, el electrón libera energía. Esta energía impulsa reacciones que dan como resultado la síntesis de ATP a partir de ADP y fosfato, o de NADPH a partir de NADP^+ .

4.1 FOTOSISTEMA II

El fotosistema II genera ATP.

Por motivos históricos, los fotosistemas están numerados "hacia atrás"; la forma más fácil de entender el proceso normal de captura de energía luminosa es iniciar con el fotosistema II y seguir los sucesos causados por la captura de dos fotones de luz. Las reacciones dependientes de la luz comienzan cuando los fotones son absorbidos por el complejo recolector de luz del fotosistema II. La energía de cada fotón se transfiere de molécula a molécula hasta que llega al centro de reacción, donde impulsa a un electrón para que salga de la molécula de clorofila. El primer portador de electrones del sistema de transporte de electrones adyacente acepta de inmediato estos electrones energizados. Los electrones se trasladan de una molécula portadora a la siguiente, liberando energía en el camino. Parte de la energía se utiliza para bombear iones hidrógeno (H^+) de un lado a otro de la membrana tilacoidea, lo que genera un gradiente de iones H^+ dentro del tilacoide. Este gradiente impulsa la síntesis de ATP por un proceso llamado quimiósmosis.

4.2 FOTOSISTEMA I

El fotosistema I genera NADPH.

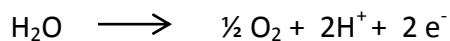
Mientras tanto, la luz también ha estado incidiendo en el complejo recolector de luz del fotosistema I. Cada fotón que incide en el fotosistema I expulsa un electrón de la clorofila de su centro de reacción. Estos electrones saltan al sistema de transporte de electrones del fotosistema I. De inmediato, la clorofila del centro de reacción del fotosistema I reemplaza sus electrones perdidos tomándolos del último portador de electrones del fotosistema II.

Los electrones de alta energía del fotosistema I se desplazan a través de su sistema de transporte de electrones hasta el portador de electrones $NADP^+$. Cada molécula de $NADP^+$ capta dos electrones energéticos y un ion hidrógeno para formar NADPH. Tanto $NADP^+$

como NADPH son moléculas solubles en agua que están disueltas en el estroma del cloroplasto.

4.3 REACCIONES QUE OCURREN PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE LA FOTOSÍNTESIS

La descomposición de agua mantiene el flujo de electrones a través de los fotosistemas. En general, fluyen electrones del centro de reacción del fotosistema II, a través del sistema de transporte de electrones del fotosistema II, al centro de reacción del fotosistema I a través del sistema de transporte de electrones del fotosistema I, y forman NADPH. Para mantener este flujo unidireccional de electrones, se debe abastecer continuamente al centro de reacción del fotosistema II con electrones nuevos que reemplacen a los que cede. Estos electrones de reposición provienen del agua. En una serie de reacciones, la clorofila del centro de reacción del fotosistema II atrae los electrones de moléculas de agua que están dentro del compartimiento del tilacoide lo que hace que esas moléculas se descompongan:



Por cada dos fotones capturados por el fotosistema II, dos electrones son expulsados de la clorofila del centro de reacción y son reemplazados por los dos electrones que se obtienen de la descomposición de una molécula de agua. A medida que se dividen moléculas de agua, sus átomos de oxígeno se combinan para formar moléculas de oxígeno gaseoso, O₂. La planta puede utilizar directamente este oxígeno en su propia respiración, o puede soltarlo a la atmósfera.

En el primer paso de las reacciones fotosintéticas dependientes de la luz, un fotón incide en el complejo recolector de luz del fotosistema II; la energía se absorbe y pasa a la clorofila del centro de reacción. Ahí, un electrón absorbe la energía y sale despedido de la

molécula de clorofila. En menos de una milmillonésima de segundo, el electrón es capturado por el primer portador de electrones del sistema de transporte de electrones adyacente.

A medida que el electrón se mueve de una molécula portadora a la siguiente, pierde energía en cada transferencia. La energía liberada por la reacción exergónica de movimiento del electrón se utiliza para transportar iones hidrógeno activamente al otro lado de la membrana tilacoidea, del estroma al interior del tilacoide.

Este transporte eleva la concentración de iones hidrógeno (y por tanto, también la carga positiva) dentro del tilacoide y crea un gradiente tanto de iones hidrógeno como de carga positiva a través de la membrana tilacoidea.

¿Cómo es que un gradiente de iones hidrógeno genera energía para impulsar la síntesis de ATP?

Comparemos el gradiente de iones hidrógeno a través de la membrana del tilacoide con agua almacenada tras la cortina de una presa en una planta hidroeléctrica. Cuando se abren las compuertas de una presa, el rápido flujo de agua se hace pasar por turbinas que giran por el movimiento del agua y convierten esta energía de movimiento en energía eléctrica. El tilacoide opera de manera análoga. Los iones hidrógeno del interior del tilacoide pueden bajar por sus gradientes hacia el estroma, sólo a través de los canales de ion hidrógeno que sintetizan ATP. De forma un tanto análoga al flujo de agua, este flujo de iones hidrógeno puede efectuar trabajo: específicamente, sintetizar ATP a partir de ADP y fosfato. Al parecer, se sintetiza aproximadamente una molécula de ATP por cada tres protones que pasan a través del canal.

Este mecanismo general de síntesis de ATP es llamado quimiósmosis. Se ha demostrado que la quimiósmosis es el mecanismo de generación de ATP en los cloroplastos, las mitocondrias y las bacterias.

El ATP y el NADPH sintetizados durante las reacciones dependientes de la luz se disuelven en el estroma fluido que rodea a los tilacoides. Ahí proporcionan la energía necesaria para

sintetizar glucosa a partir de dióxido de carbono y agua, proceso en el que intervienen enzimas que también están disueltas en el estroma. Las reacciones que finalmente producen glucosa se llaman reacciones independientes de la luz porque se pueden efectuar con independencia de la luz en tanto se cuente con ATP y NADPH [7].

5. FUENTES DE OBTENCIÓN DE LA BIOMASA

La biomasa puede ser usada como combustible y entra dentro de la categoría de fuentes de energías renovables. La biomasa se puede dirigir a diferentes usos de mercado, de cuestiones tecnológicas y de planificación energética, los usos que se le pueden dar son los siguientes: generación de electricidad, elaboración de combustibles, cocinar alimentos, elaboración de bioalcoholes de automoción etc.

La biomasa es un producto cuyo poder calorífico, en la mayoría de los casos es de tipo medio o bajo y con alto contenido en humedad. Estas características le confieren un elevado carácter local. Por otro lado, los productos energéticos obtenidos tienen distintas posibilidades de comercializarse. Sobre esto hay que reflexionar a la hora de dirigir las aplicaciones de la biomasa.

La biomasa puede obtenerse de diferentes fuentes, esto son algunos ejemplos:

a) Residuos forestales: Se trata de todos aquellos productos resultantes de la limpieza del bosque o del monte, provenientes de recogida de leñas o de labores silvícolas. El volumen de este recurso es variable, pero en promedio se puede considerar una disponibilidad de biomasa entre 1 y 2 ton/Ha. En la actualidad en el bosque hay una presencia de residuos que puede ser excesiva, por ellos se propone la recuperación de esta biomasa. El problema en el uso de este residuo, es la recolecta, ya que, se generan muchos gastos.

b) Residuos agrícolas: Son productos generados en los procesos de agricultura, entre estos residuos se encuentran, la paja, residuos procedentes de la poda de frutales y viñedos, residuos generados en invernaderos. En las industrias agrícolas se pueden producir cantidades significativas de residuos, unos son inocuos, como la cáscara de girasol o de

frutos secos, que tienen un valor en el mercado y se utilizan en gran medida como combustible para pequeños hornos y calderas. Otros son contaminantes; como lo es el caso de los residuos de la industria olivarera; ya que tienen un alto contenido en humedad, y no son fáciles de manejar y de utilizar, pero en su coste (nulo o muy bajo) sólo habría que añadir el correspondiente al transporte.

c) Materias biodegradables: En este apartado se incluye biomasa con alto contenido en humedad, que por su composición pueden dar lugar a procesos de digestión o fermentación de los que se obtiene, por un lado, un gas combustible y por otro un residuo sólido, reciclable, al que se denomina compost. No se excluyen otras posibilidades, como lo es la combustión directa. Dentro de este tipo de residuos se incluyen también las deposiciones de los animales en granjas, productos que resultan contaminantes por su carácter ácido. Existen varias opciones industriales para obtener gas combustible a partir de estos residuos [8].

La biomasa en tiempos de la revolución industrial ya era utilizada, hoy por hoy, la biomasa aporta cerca del 15% de la energía primaria consumida en todo el mundo. El porcentaje de utilización de biomasa como fuente de energía dependerá del grado de industrialización del país, ya que suele ser menor en aquellos países que tienen un menor desarrollo. En los Estados Unidos de América llega al 3%, en España este dato es de un 3.2% [9]. La transformación de la biomasa, da simultáneamente el beneficio de; obtener energía y el evitar una contaminación ambiental a causa de la biomasa. Como ejemplo se tiene la palma de aceite que se produce en Colombia, cuyo potencial energético es de 16,013.7 TJ/año [10].

La biomasa tiene propiedades que difieren de los combustibles sólidos convencionales, tales como lo son el carbón o la leña. Una de esas grandes diferencias es su alto contenido de materia volátil por arriba del 80% mientras que el carbón tiene menos del 20%. El diseño de un sistema de gasificación, pirólisis y combustión dependerá específicamente del material de la biomasa, su morfología, contenido de humedad y contenido de contaminantes. La última determinación servirá para aplicar el sistema de limpieza del combustible gaseoso.

Una de las ventajas del uso de la biomasa como fuente de combustible, es su baja producción de óxidos de nitrógeno (NO), además el contenido de sulfuro en la biomasa es muy bajo, por lo que las emisiones de dióxido de sulfuro (SO₂) serán también bajas, especialmente comparadas con las emisiones producidas en la combustión del carbón. En adición el uso de biomasa como combustible es una alternativa para el uso de residuos molestos del medio ambiente.

Aunque la biomasa está comenzando a usarse en aplicaciones industriales en el centro y este de Europa y en países desarrollados, los sistemas de operación siguen siendo viejos e ineficientes [11].

6. GUISHE

El guishe es el residuo carnoso que se obtiene del *Maguey Lechuguilla Torrey*, este residuo es generado del proceso para la obtención de fibra de la lechuguilla llamada ixtle [12], y representa una fuente de ingresos para aproximadamente 20,000 recolectores (Reyes-Agüero *et al.*, 2000; Mayorga-Hernández *et al.*, 2004) [13]. La producción de fibra de una planta de lechuguilla es de 8 a 12% de su peso, por lo que se genera aproximadamente 85% de guishe o más (Cruz y Medina 1988). Otros autores como Orozco et al (1977) ha determinado que se obtiene como promedio un 14.6% de fibra y 85.43% de guishe. Esta fibra se utiliza en la elaboración de cepillos, escobetas, costales. De acuerdo con datos de la SEMARNAP (1995), la producción de lechuguilla ha tenido una tendencia negativa en las últimas décadas, debido a la introducción de fibras sintéticas (Romahn, 1992). Sin embargo las perspectivas de comercialización de la lechuguilla son promisoras gracias a la existencia de un mercado internacional ya establecido con tendencias a una mayor demanda (Berlanga *et al.* 1992). Aproximadamente el 93% de la producción se exporta, principalmente a, Estados Unidos, Canadá, Holanda, Alemania, España, Francia, Suiza, Japón, América Central, y algunos países de América del Sur.

El guishe tiene características físicas y químicas favorables, como su poder abrasivo, además, es un residuo con alto contenido en sapogeninas, las sapogeninas tienen

propiedades detergentes que les permiten ser aprovechados para el lavado de ropa, loza o usarlo como shampoo para el cabello, el guishe podría ser utilizado para la fabricación de laminados, aglomerados, cartón, papel filtro, además del guishe se puede extraer una sustancia activa contra el agente causal de la tuberculosis, el basilo *Mycobacterium tuberculosis*, dicha sustancia se inyecta al ganado ovino y vacuno para su protección (Flores y Perales, 1989) [14,15,16]. El guishe es también usado como ingrediente para su utilización en la herbolaria [17].

Como estudio para el uso del guishe se tiene la elaboración de un bioinsecticida a partir del compuesto activo del guishe en sinergismo con la bacteria *Bacillus thuringiensis*, para el control de *Spodoptera frugiperda* en el cultivo de maíz, mostrando resultados altamente efectivos, pero, el solo uso del extracto de guishe, no tuvo una gran actividad de mortalidad, lo que indica que el compuesto activo del guishe debe ser estudiado cuidadosamente con otras cepas y otros insectos [18].



FUENTE: [HTTP://WWW.SAGARPA.GOB.MX/SALADEPRENSA/2012/PAGINAS/2013B278.ASPX](http://www.sagarpa.gob.mx/saladeprensa/2012/paginas/2013B278.aspx)

7. PROCESOS ANAERÓBICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMETANO

La digestión anaeróbica consiste en la degradación de la materia orgánica por la acción de los microorganismos en bioreactores en ausencia de oxígeno. Tal reacción produce biogás constituido principalmente por metano y CO_2 , aproximadamente entre un 80-60% es metano y un 20-40% es CO_2 , la cantidad de penderá del estado del arte y del sustrato que se este utilizando. Por su alta cantidad de metano, el biogás es considerado como un compuesto productor de energía.

La digestión anaeróbica es un proceso que consta de 4 pasos.

1. Hidrólisis: La materia orgánica se transforma en compuestos orgánicos más simples por la acción de bacterias hidrolíticas.
2. Acidogénesis: Las bacterias transforman los compuestos orgánicos simples en ácidos orgánicos, alcoholes y ácidos grasos (ácido acético, propiónico y butírico principalmente).
3. Acetogénesis: Las bacterias acetogénicas convierten los ácidos grasos en dióxido de carbono e hidrogeno.
4. Metanogénesis: En esta parte hay dos formas de sintetizar el metano una es por medio de la división del ácido acético en metano y CO_2 , y la otra es a través de la reducción del CO_2 e hidrogeno en metano y agua.

En cada etapa los microorganismos deben estar de acuerdo a las condiciones que se adapten mejor para la dinámica que hay en cada proceso y poder continuar con la operación.

De todas las etapas la más sensible y tardada es la metanogénesis, deben considerarse la temperatura, pH, acumulación de ácidos, es considerada la etapa más importante porque en esta se produce el metano.

7.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Temperatura: Las bacterias anaeróbicas pueden soportar temperaturas desde el punto de congelación hasta temperaturas de 57.2 °C, pero prosperan alrededor de 36.7 °C.

Potencial de hidrogeno: El rango óptimo es de 6 y 8. Los iones de bicarbonato y los ácidos grasos tienen gran influencia sobre el pH.

Tiempo de retención: Los sistemas mesofilos requieren de 15 a 30 días para la degradación.

Mezclado: Un mezclado propicia favorece a las bacterias para la utilización de los nutrientes, además previene la formación de espumas y gradientes de temperatura, pero un mezclado excesivo puede causar desestabilización, se recomienda un mezclado suave.

La importancia de los reactores radica, en que su funcionamiento, tipo, afectan directamente la eficiencia del proceso anaeróbico. De manera general el reactor anaeróbico esta constituido por una entrada de materiales y una salida de los compuestos ya degradados.

Los bioreactores son utilizados para tratar aguas residuales, estos se colocan en la superficie, los biodigestores se encuentran bajo la superficie y se utilizan normalmente para trabajar con excretas.

Los reactores pueden ser operados en 3 modos: por lotes, semicontinuo y continuo.

En el reactor por lotes como su nombre lo indica se dispone de cierta materia o sustrato y de una cantidad de microorganismos, esta se lleva a cabo de forma natural, solo de be checarse la temperatura, en este proceso no hay alimentación ni extracción. Las

desventajas de este reactor es que no hay una producción continua de biogás, y si se quiere obtener grandes cantidades de biogás se necesita un reactor muy grande. Pero para evaluar el potencial energético son de gran utilidad, lo que significa que son excelentes para pruebas de laboratorio.

Los reactores semicontinuos nos presentan dos formas de poder realizar la operación, una de ellas es la de primero poner las bacterias anaeróbicas con cierta cantidad de sustrato, después se irá añadiendo más sustrato hasta que se llene el reactor. Esto supone una desventaja porque hay un límite para añadir más sustrato.

La otra forma es la de añadir sustrato, y después remover cierta cantidad de medio, para posteriormente colocar más sustrato fresco, esto supone una desventaja porque, la actividad de las bacterias puede verse afectada, además en grandes cantidades es muy inconveniente.

Los lotes continuos ofrecen la mejor forma para la obtención de energía, en esta hay una continua alimentación de sustrato y salida de compuestos formados en el reactor. Debe existir un equilibrio en cuanto a la entrada y salida de materiales. Esta operación se puede dividir en dos fases. La primera es la de la adaptación de los microorganismos, en la segunda ya es el régimen permanente, cuando el sistema es óptimo a las condiciones establecidas. Es importante mantener ciertas condiciones como pH, temperatura, la entrada y salida es un sistema más complejo por ende más difícil de manejar pero con mejores resultados.

Para los anteriores bioreactores se tienen dos alternativas, la primera manejar reactores grandes con gran capacidad y la segunda tener sistemas automáticos.

La cantidad de materia orgánica transformada dependerá de la cantidad de microorganismos presentes, para obtener una mayor eficiencia, podemos inmovilizar los microorganismos por medio de soportes que los atraerán por fuerzas electrostáticas. En

las cuales se formara una biopelícula, formada por los mismos microorganismos, gracias a esto podemos obtener una mejor síntesis de los sustratos. Además que la reproducción celular de los microorganismos, nos proporcionarían soportes con gran cantidad de microorganismos y altas reacciones, otra ventaja es la capacidad catalítica que no disminuye mucho, además que cuando se hace un lavado no hay mucha pérdida de bacterias. Los diferentes materiales de soporte son zeolitas naturales.

8. PROCESOS TERMOQUÍMICOS

El impulso para la conversión termoquímica de la biomasa en productos con valor agregado comenzó con la necesidad de disponer de nuevos combustibles para desplazar las fuentes de petróleo limitadas. A lo largo del mundo se han desarrollado nuevos métodos de proceso para la producción de combustibles alternativos. La búsqueda y desarrollo se ha enfocado en la generación de productos combustibles líquidos y gaseosos [19]. Los procesos termoquímicos son tecnologías que hacen uso de altas temperaturas por procesos específicos para convertir el carbono fijo de la biomasa en combustibles sólidos, líquidos, gaseosos o productos químicos y calor. Las materias primas más adecuadas para estos procesos son aquellas con bajo contenido de humedad tales como la madera [20]. Los procesos termoquímicos son un medio para elevar el valor energético de la biomasa, ya sea en un medio ausente de oxígeno, un medio con exceso de oxígeno o un medio con baja cantidad de oxígeno. Estos procesos son altamente eficientes para transformar la biomasa en productos con valor energético, los componentes orgánicos están sujetos a su transformación en un rango de temperaturas de 250°-1000°C. Los procesos termoquímicos generalmente requieren tiempos de reacción corta en comparación a los procesos de conversión bioquímica; los cuales suceden en un rango de segundos a minutos, en comparación a los días y semanas en la conversión bioquímica. Los productos resultantes en la conversión termoquímica son más densos energéticamente que la materia prima de la biomasa.

En todos los procesos termoquímicos se forma un gas de síntesis, que puede ser usado como combustible (usualmente su valor de calentamiento es el equivalente a la mitad del gas natural) o usado para sintetizar alcoholes, alcanos y otros productos. Los procesos termoquímicos se dividen generalmente en cuatro y son combustión, gasificación, pirólisis y licuefacción. Dependiendo de la naturaleza del medio en que se encuentre la biomasa, el proceso será una gasificación, pirólisis, combustión y licuefacción. El proceso de pirólisis ocurre en un medio inerte, en el proceso de gasificación se usan bajas concentraciones de oxígeno o aire en el medio y en el proceso de combustión se presenta un exceso de oxígeno en el medio. El proceso de pirólisis genera en la devolatilización de la materia líquidos pirolíticos, char sólido y combustible gaseoso. El líquido producido puede ser refinado a un combustible. El sólido char puede ser utilizado como combustible y el combustible gaseoso contiene una gran cantidad de compuestos de hidrocarburos con alto valor calorífico. En el proceso de gasificación, hay formación de char y compuestos gaseosos, el char puede ser utilizado como combustible o como abono por su alto contenido en minerales y los gases pueden ser usados directamente como combustibles. La combustión es usada principalmente para la generación de calor, utilizando en algunos casos el char que se genera como abono.

Dependiendo del método de conversión, los productos intermediarios pueden ser combustibles o químicos. Algunos ejemplos de productos secundarios incluyen productos combustibles como los hidrocarburos y productos químicos como el amonio [21].

Para un mejor conocimiento acerca de la transformación ocurrida en la biomasa en los diferentes procesos termoquímicos, es recomendable hacer un análisis termogravimétrico, para hacer una comparación de la pérdida de biomasa a diferentes temperaturas, y tener resultados que nos aporten características de la biomasa utilizada, y que nos ayuden a calcular parámetros que ocurren en las reacciones producidas en la biomasa estudiada.

8.1 PROPIEDADES A CONSIDERAR DE LA BIOMASA PARA SU CONVERSIÓN POR MEDIO DE PROCESOS TÉRMICOS.

Contenido de humedad: Es la cantidad de agua en el material, expresado como un porcentaje del peso. El contenido de humedad siempre debe ser mencionado.

Contenido de cenizas: Es el contenido de componentes inorgánicos presentes en la biomasa, y al igual que el contenido de humedad, es expresado como un porcentaje del peso. Las cenizas son una parte integral de la estructura de las plantas, la cual, consiste en un amplio rango de elementos, que representan menos del 0.5% en arboles, 5-10% en diversos materiales de cultivo y arriba del 30-40% en cascara de arroz y milenrama. El problema que puede causar el alto contenido de cenizas, son la obstrucción por escorificación de las cenizas, provocando varios problemas en la operación en reactores de lecho fluidizado.

Contenido de materia volátil: La materia volátil se refiere a la parte de la biomasa que es transformada y desprendida cuando la biomasa es calentada (por encima de 400°C a 500°C). La biomasa típicamente tiene un alto contenido de materia volátil (por encima del 80%).

Composición elemental: La composición de los compuestos orgánicos de la biomasa libres de cenizas son relativamente uniformes. Los mayores componentes son carbono, oxígeno e hidrogeno. La mayoría de la biomasa también contiene una proporción pequeña de hidrogeno.

Cuadro No. 1 Composición elemental de biomasa típica

| Elemento | Símbolo | % Peso (base seca libre de cenizas) |
|-----------|---------|-------------------------------------|
| Carbono | C | 44-51 |
| Hidrogeno | H | 5.5-6.7 |
| Oxígeno | O | 41-50 |
| Nitrógeno | N | 0.12-0.60 |
| Azufre | S | 0.0-0.2 |

Fuente: Laboratorio de caracterización, Centro de investigación de de energía, medioambiente y tecnología, Soria, España.

Valor de calentamiento: El valor de calentamiento de un combustible es una indicación de la energía química ligado en el combustible en referencia a un entorno normalizado. La estandarización implica la temperatura, estado del agua (vapor o líquido) y los productos de combustión (CO_2 , H_2O , etc.). Estas condiciones estandarizadas están ampliamente disponibles en la literatura en la medición de los valores de calentamiento.

La energía química ligada en el combustible esta dado por el valor del calentamiento del combustible en energía (J) por cantidad de materia (kg). Esta energía no puede ser medida directamente.

La biomasa siempre contiene algo de agua, la cual esta relacionada como vapor hasta calentamiento. Esto implica que algo del calor liberado durante las reacciones químicas es absorbido por el proceso de vaporización. Para esta reacción, el valor de calentamiento neto disminuye con el contenido de humedad de la biomasa.

En un contenido de humedad de aproximadamente 87%, el valor de calentamiento neto deberá ser cero. En practica, el máximo contenido de humedad admisible deberá ser del 55%, para encender el combustible y extraer energía de el.

Densidad aparente: La densidad aparente se refiere al peso del material por unidad de volumen. Para la biomasa es expresada sobre una base en peso seco (contenido de

humedad, $MC=0\%$), con una indicación correspondiente de contenido de humedad (MC_w). Similar al contenido de humedad, la densidad aparente de la biomasa muestra extremas variaciones en los diferentes tipos de biomasa, desde valores bajos de $150-200 \text{ kg/m}^3$ para granos de cereal de paja hasta valores altos de $600-900 \text{ kg/m}^3$ para madera maciza. Juntos, valores de calentamiento y densidad aparente determinan la densidad de energía, que es la energía potencial disponible por unidad de volumen de la biomasa.

La degradación térmica de la biomasa y muestras de celulosa, hemicelulosa y lignina han sido estudiadas extensivamente usando como método el TGA (análisis termogravimétrico).

William y Besler llevaron a cabo un TGA en madera, cáscara de arroz, y muestras de celulosa, hemicelulosa y lignina con un flujo de nitrógeno para purgar el producto de los gases.

Las siguientes observaciones fueron hechas en los siguientes rangos de temperatura:

La hemicelulosa se representó por la descomposición del xilano entre 220 y 320°C y el calentamiento que continuó por encima de los 720°C , resultó en un rendimiento aproximado del 20% de char de la hemicelulosa original.

La descomposición de la celulosa fue entre los 250 y 360°C y tuvo un rendimiento de char aproximado al 8% del peso original de la celulosa después de calentarla a 720°C .

La descomposición gradual que se sometió la lignina fue entre los 80 y 500°C . El rendimiento de char fue del 55% del peso original de la lignina después de calentarla a 720°C .

De los datos del TGA, las curvas del DTG han sido dibujadas a diferentes rangos de calentamiento para la madera, celulosa, hemicelulosa y lignina. Lo siguiente es lo que se observó:

- Solo una temperatura para la pérdida del peso máximo ha sido observada para la hemicelulosa, celulosa y lignina.

- Dos temperaturas para la pérdida máxima de peso fueron observadas para la madera. (Una cercana a la temperatura máxima de la hemicelulosa y otra para la celulosa).
- Aunque en el aumento de los rangos de temperatura hay una desviación lateral de las temperaturas para la pérdida de peso máximo, es debido a combinar los efectos de transferencia de calor a los diferentes rangos de calentamiento de la cinética de la descomposición que da como resultado una descomposición lenta.

8.2 FACTORES QUE AFECTAN LA VELOCIDAD DE LOS PROCESOS TERMOQUÍMICOS DE LA BIOMASA

Para evaluar cualitativamente los factores que pueden afectar a la velocidad global de los procesos termoquímicos es necesario analizar cuáles son los factores que afectan a la velocidad de cada una de sus diferentes etapas.

Factores que afectan a la velocidad de la etapa de transferencia externa de materia.

La velocidad de esta etapa depende fundamentalmente de dos factores: el espesor de la capa límite y el gradiente de concentración de A en dicha capa. Cuanto menor es el espesor de la capa y mayor el gradiente de concentración de A mayor es la velocidad con la que el reactivo A atraviesa la película gaseosa.

El espesor de la capa límite depende fundamentalmente de la naturaleza de la fase gaseosa y sus propiedades (composición, viscosidad, densidad, etc.), de la temperatura y del régimen turbulento o laminar de la fase gaseosa. Altas temperaturas y un régimen turbulento (altas velocidades de fase gaseosa) disminuyen el espesor de la capa favoreciendo la velocidad de esta etapa. Cuanto menor es la viscosidad de la fase gaseosa mayor es la velocidad de transferencia de materia.

El gradiente de concentración de A en la capa límite será mayor cuanto mayor sea la concentración de A en la fase gaseosa y menor sea la concentración en la superficie del sólido. A su vez, esta concentración en la superficie del sólido será menor cuanto más rápidamente ocurran las etapas de difusión a través de la capa de cenizas y la reacción química. Por lo tanto, la velocidad de la etapa de transferencia externa depende de la velocidad de las otras dos etapas posteriores.

En el caso particular de la pirólisis, en el que no existe reactivo gaseoso, esta etapa es la de transmisión de calor externa. Los factores que afectan a la velocidad de esta etapa son semejantes a los citados para la transferencia de materia, a excepción por supuesto del gradiente de concentración del reactivo A , puesto que en este caso no existe tal reactivo. En este caso, el gradiente que afecta a la velocidad de la etapa es el gradiente de temperatura entre la del seno de la fase gaseosa y la temperatura en la superficie del sólido. A su vez, esta temperatura dependerá de la velocidad de la reacción química (descomposición térmica) puesto que estas reacciones de descomposición pueden ser endotérmicas.

Factores que afectan a la velocidad de la etapa de transferencia interna de materia

En este caso la velocidad de la etapa depende fundamentalmente de la difusividad efectiva de A en las cenizas, y del gradiente de concentración de A en la capa de cenizas. Cuanto mayor es la difusividad del reactivo A y mayor el gradiente de concentración de A en la capa de cenizas, mayor es la velocidad de esta etapa.

La difusividad de A en la capa de cenizas depende fundamentalmente de la temperatura, de las propiedades del agente reactivo A (difusión molecular de A) y de las propiedades de las cenizas (porosidad, tortuosidad, etc.). Al aumentar la temperatura asciende el coeficiente de difusión de A ; también incrementará, cuanto más porosa y menos tortuosa sea la capa de cenizas. A medida que crezca el espesor de las cenizas más lenta será la etapa de transferencia interna de materia.

En cuanto al gradiente de concentración de A en la capa, este será mayor cuanto mayor sea la concentración de A en la superficie de reacción. Por lo tanto, de nuevo, este gradiente, y en consecuencia la velocidad de esta etapa, depende de la velocidad de las otras dos etapas.

En el caso particular de la pirólisis la velocidad de transmisión interna de calor dependerá fundamentalmente del espesor de la capa de las cenizas, la conductividad térmica de los sólidos que forman esta capa y del gradiente de temperatura existente en la capa. La velocidad de transmisión de calor se verá favorecida con espesores pequeños de capa de cenizas y altas temperaturas.

8.3 FACTORES QUE AFECTAN A LA VELOCIDAD DE LA ETAPA DE REACCIÓN QUÍMICA

La velocidad de reacción depende fundamentalmente de la temperatura, de la presión y de la concentración de reactivos. A medida que aumenta la temperatura aumenta la velocidad de reacción de cualquiera de los procesos termoquímicos. También un aumento en la concentración de reactivos (A y B) aumenta la velocidad de reacción química. En el caso de la pirólisis influirá la concentración de reactivo sólido (grado de conversión, la conversión del sólido influye en la velocidad porque a medida que reacciona el sólido se consume el reactante sólido). En gasificación y combustión además del reactivo sólido también influirá la concentración del reactivo en fase gaseosa [22].

9. COMBUSTIÓN

La combustión es el sistema más antiguo y simple de utilización de la biomasa, que es sometida a determinadas temperaturas con exceso de oxígeno, para su transformación y obtención de energía [23]. El proceso de combustión de la biomasa envuelve un número de aspectos físicos y químicos de alta complejidad. El proceso de combustión puede ser dividido en varios procesos generales; secado, pirólisis, gasificación y combustión. El proceso de combustión total puede ser un proceso continuo o un proceso por lotes. La

combustión por lotes es usado en algunas unidades de combustión a escala pequeña, como ejemplo mas claro tenemos las estufas de leña. Las unidades de combustión a mediana y larga escala son siempre aplicaciones de combustión continua.

Secado, pirólisis y gasificación serán siempre los primeros pasos en un proceso de combustión para combustibles sólidos. La importancia relativa de estos pasos variará, dependiendo de en la tecnología de combustión implementada, las propiedades del combustible y las condiciones de proceso de combustión. En una combustión por lotes las aplicaciones serán una separación entre la fase volátil y el char de combustión [24].

Los sistemas de combustión son uno de los procesos con posibilidades de mejora más limitadas por lo que a regulación y control se refiere. Los ajustes de los parámetros de combustión en los quemadores industriales, siguen siendo notablemente rudimentarios. Ello contrasta con la sofisticación y las mejoras de tipo electrónico introducidas en los sistemas de regulación de temperatura.

La principal carencia en este campo es, posiblemente, la falta de información directa sobre el núcleo del proceso: la llama. Es por ello que en diversos centros de desarrollo tecnológico se están siguiendo líneas de investigación sobre:

- Detección de fluctuaciones de presión en distintos puntos de sistemas, mediante micrófonos y transductores de presión.
- Análisis de la radiación emitida por la llama en distintas franjas del espectro, a base de desarrollar diferentes sensores para la detección de la radiación térmica en los rangos de la radiación ultravioleta e infrarrojo.
- Toma de muestras de partículas a través de sondas.
- Captación y procesado de las imágenes de la llama, a partir de sistemas avanzados de visión artificial.

Como conclusión la combustión es un proceso en el que se produce la oxidación de la biomasa con un gran exceso de aire. Este exceso de aire, con las debidas precauciones,

supone la oxidación de todos los residuos orgánicos y gases a productos inertes. Sin embargo, el gran exceso de aire condiciona la temperatura máxima que se puede alcanzar, exige un gran consumo energético y genera una gran masa de gases a depurar [25].

10. PIRÓLISIS

La pirólisis es la descomposición térmica ocurrida en un medio ausente de oxígeno, es también el primer paso en la gasificación y combustión [26]. En muchas aplicaciones industriales el proceso es llevado a cabo bajo presión y a temperaturas de operación cercanas a los 430°C. La técnica más común tiene tiempos de residencia cortos (<2 seg.) y altos rangos de calentamiento usando unas temperaturas entre los 350-500°C y es llamada pirólisis rápida (Bridgwater, 2006). El rango de oxígeno disponible y la cantidad de oxígeno que se debe permitir durante el quemado de la biomasa es llamado el rango de equivalencia. Para el proceso de pirólisis el rango de equivalencia deberá ser menor que el 0.1 y solo una fracción modesta de la energía de la biomasa es encontrada en el producto gaseoso, junto con el resto que son el char y residuos de aceite [27].

La pirólisis puede ser efectuada de diferentes maneras, en función del tiempo y la temperatura a los cuales es sometida la biomasa dentro del reactor de pirólisis, así, se diferencian claramente la pirólisis lenta, rápida y flash o ultrarrápida [28]. La pirólisis lenta a su vez se divide en dos tipos, pirólisis de carbonización y pirólisis convencional [29].

Durante el proceso de pirólisis, largas moléculas de hidrocarburos de la biomasa se rompen en moléculas relativamente más simples y pequeñas [30]. Los productos de la pirólisis son gases, vapores, aceites y carbonilla. La composición del extracto depende de la temperatura, del tipo de biomasa y del proceso. Al comienzo del proceso de pirólisis se forma el denominado vapor piroleñoso, que es una mezcla de hidrógeno, CO, CO₂, e hidrocarburos. Después se forman compuestos líquidos, como aceites, alcoholes y ácidos, y, finalmente, queda un residuo sólido, el coque, que está compuesto de alquitrán, carbón y cenizas. El carbón vegetal resultante puede ser utilizado como combustible

doméstico y como producto reductor en la industria. Antes de comenzar la pirólisis hay que eliminar los componentes no combustibles que pueda llevar la biomasa vegetal, tales como metales, tierra, etc.

Bridwater reportó que los parámetros en el proceso de pirólisis, tales, como la temperatura y velocidad de calentamiento determinan el rendimiento y la composición de los productos derivados. En la pirólisis rápida con temperaturas elevadas por encima de los 1000°C y temperaturas por debajo de los 650°C, con un enfriamiento rápido por líquidos, los productos intermediarios se condensan sin seguir reduciendo los componentes con un peso molecular alto dentro de los productos gaseosos. Si el deseo es la obtención de hidrocarburos líquidos o bioaceite es preferente usar la pirolisis rápida. De lecho fluidizado, ciclónica, flujo de arrastre, vórtice, son el tipo de reactores recomendados para la pirólisis rápida. La pirólisis lenta requiere velocidades de calentamiento bajo y temperaturas máximas bajas. El rendimiento máximo de char vía coque secundario y reacción de repolimerización son observadas en velocidades de calentamiento bajo y a temperaturas por debajo de los 500°C. Por lo tanto la pirolisis lenta ha sido usada para la producción de char y gas. Reactores de lecho fijo, hogares múltiples, horno rotatorio son usados para la pirolisis lenta. La velocidad de purgamiento de los productos gaseosos, para prevenir las reacciones secundarias de la pirólisis, no han sido estudiadas detalladamente para intentar analizar el efecto que tendría en la composición del gas formado.

William y Besler llevaron a cabo un estudio detallado de la influencia de la temperatura y velocidad de calentamiento, de la pirólisis lenta en la biomasa en un reactor batch estático.

Las observaciones que se hicieron son las siguientes:

- Hubo una disminución en el rendimiento del char y un aumento de rendimiento de aceite y gas, cuando se aumento la temperatura por cada aumento de calentamiento.
- A 420°C y por encima de esta temperatura el rendimiento acuoso se mantuvo virtualmente constante aproximadamente en un 37 wt%
- El mayor rendimiento de char se obtuvo a una temperatura de 300°C y el char se mantuvo como hidrocarburos con alto peso molecular.
- Los hidrocarburos con alto peso molecular dentro del char se volatilizaron y degradaron cuando hubo un aumento a la temperatura por encima de los 300°C.
- El rendimiento de aceite aumento constantemente entre los 300 y 720°C. Y se mantuvo así durante todos los rangos de temperatura.
- El aceite es altamente oxigenado.
- Un aumento en carbón e hidrogeno y una disminución de sulfuro y oxígeno contenidos en el aceite en los rangos de calentamiento fueron observados.
- El rendimiento de gas aumentaba cada vez más cuando se aplicaba más calor.
- El rendimiento de char disminuía cuando se elevaba la temperatura.
- El valor calorífico del aceite y del char fueron esencialmente independientes a los rangos de temperatura y se encontró un promedio de 23 y 32 Mj/Kg. respectivamente.
- El rendimiento de CO, CO₂, H₂, CH₄, C₂H₆ ingresaron cuando se aumentó la temperatura y sus valores totales caloríficos fueron de 13.6, 15.7, y 15.8 Mj/m³, a rangos de calentamiento de 5, 20, 40 y 80 °K/min.
- El aceite y el agua fueron evolucionando a lo largo del calentamiento en el proceso.

Algunos estudios han reportado que la presencia de minerales afecta el proceso de pirólisis. Byun reportó que los óxidos de cobre, zinc y aluminio catalizán la reacción de gas

de agua a bajas temperaturas (200-300°C). Raveendran estudio la influencia de los materiales minerales en la pirólisis por desmineralización de la biomasa y después impregnándola con sales y reportó lo siguiente:

- En los casos de desmineralización de la cáscara de coco, maní y arroz el rendimiento de char aumentó.
- En los casos de desmineralización de mazorca de maíz y madera el rendimiento de char disminuyó.
- La desmineralización en la cascara de arroz tuvo mayor rendimiento de char que la cáscara de coco y maní.
- El rendimiento de líquido aumentó para todas las desmineralizaciones de los diferentes tipos de biomasa.
- El rendimiento de char en la mazorca de maíz, cáscara de maní y arroz es menor cuando la desmineralización de la biomasa es impregnada con sales de cloruro de zinc y cloruro de potasio.
- En todos los casos el rendimiento de líquido disminuyó y el rendimiento de gas aumentó debido a la impregnación de sales.
- La impregnación de cloruro de Zinc aumentó el rendimiento de gas y disminuyó el rendimiento de líquido.
- Una mayor concentración de sal, disminuyó el rendimiento de líquido.
- Solo los efectos de los cationes cambiaron las concentraciones en gases y líquidos.

Las plantas pirolíticas más simples suelen trabajar a temperaturas menores de 600°C y el proceso de destilación pasa a través de cuatro etapas:

- 1) Cuando la temperatura es de entre 100 y 120°C se produce una eliminación de la humedad.
- 2) Hacia 275°C se produce una emisión de gases formada, principalmente, por nitrógeno, monóxido y dióxido de carbono, y como líquidos aparecen ácido acético y metanol.

3) De 280 a 350°C tienen lugar una serie de reacciones exotérmicas que conducen a la formación de una mezcla de productos químicos, tales como aldehídos, cetonas, fenoles, ésteres, CO₂, CO, CH₄, C₂H₆ y H₂ (utilizando ciertos catalizadores, como el ZnCl₂, se consigue que estas reacciones se produzcan a temperaturas más bajas).

4) Por encima de 350°C se eliminan todas las sustancias volátiles y se forma una cantidad mayor de metano y de CO, mientras que el residuo sólido que queda está formado por carbón vegetal y cenizas [31].

Diversas técnicas basadas en pirólisis, están abriendo nuevas vías para el análisis de la materia orgánica, que implican una separación cromatográfica de los productos de la pirólisis y datos de los espectros de masas. La interpretación de los datos requiere un detallado conocimiento del comportamiento durante la pirólisis de los compuestos pirolizados. La complejidad y diversidad de la materia orgánica puede originar una gran cantidad de productos durante la pirólisis (Kögel-Knabner, 2000). Reacciones térmicas secundarias pueden causar una modificación considerable en los compuestos originales. Por ejemplo, la pirólisis de celulosa produce compuestos carbonílicos, ácidos, furanos, piranonas, azúcares anhídridos y fenoles. Junto a otros compuestos, la pirólisis de proteínas rinde alquilpirrolidonas y pirrolidinedionas. Los ácidos grasos se pueden descarboxilar durante la pirólisis, especialmente en presencia de materia mineral (esto es especialmente importante en muestras de materia orgánica provenientes de suelos), que tendría efectos catalíticos. Esto ilustra la enorme complejidad de los pirolizados obtenidos de estructuras macromoleculares presentes en la materia orgánica (González-Villa y col., 1999; Kögel-Knabner, 2000). Sólo los productos volátiles son analizados por cromatografía de gases [32].

11. GASIFICACIÓN

Es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso (residuo orgánico) es transformado en un gas combustible, en presencia de un agente oxidante (aire, oxígeno, vapor de agua) a bajas concentraciones [33]. Durante el proceso de gasificación ocurren diferentes tipos de reacciones y cambios en la biomasa, a 120°C ocurre una desecación de la biomasa, cerca de los 350°C se forma el char y a una temperatura mayor de 350° C se devolatiza la materia volátil y se gasifica.

En el proceso de gasificación, la biomasa se descompone y emite un gas de síntesis inflamable (singas). Este gas se puede quemar en una caldera convencional o utilizarse en lugar de gas natural en una turbina de gas para poner en marcha generadores eléctricos. El biogás que se forma mediante la gasificación puede ser filtrado para eliminar compuestos químicos no deseados y usarse en sistemas eficientes de generación de energía de ciclo combinado, que generan electricidad mediante la combinación de turbinas de vapor y de gas [34].

Existen variables que afectan la composición del gas formado en el proceso de gasificación que son: tamaño, estructura, medio, temperatura, cenizas, radio de calentamiento y flujo del medio.

- **Tamaño:** Entre mas pequeña sea la partícula, el proceso termoquímico será mas efectivo, porque el calor se transferirá mas uniformemente a todas las partículas, en donde el radio de reacción será máximo y la temperatura exponencial.
- **Forma:** Los residuos biorgánicos son generalmente pelletizados, el proceso de pelletización permite que se genere el biogás a temperaturas menores. La biomasa en forma de grumos puede someterse directamente sin un proceso anterior, pero si los grumos presentan un tamaño mayor a 6 cm no son

aceptables. Cuando esto ocurre, los grumos se cortan en trozos pequeños en forma de chip, con un tamaño de 2.5 cm. Para ambos de pelletización y cortado casos, hay que tener en cuenta que la energía gastada que produce esta operación y tomarla como energía del proceso.

- Estructura: Si la estructura de la biomasa es altamente porosa, la transmisión de calor será mejor y más uniforme, porque el calor generado en el reactor se almacenara en la estructura porosa de la biomasa, de forma contraria ocurre con la biomasa poco porosa, porque el calor se queda en la parte exterior, mientras que en la parte interna de la biomasa no ocurre una transmisión de calor, y por lo tanto no ocurren los procesos termoquímicos, que se generan en la parte externa de la biomasa.
- Temperatura: Las temperaturas que usualmente son usadas están por debajo y por encima de los 500°C. Generalmente las temperaturas por encima de los 500°C, para la reducción del dióxido de carbono del carbono a monóxido de carbono. Por lo tanto, la pirólisis de la biomasa es llevada a cabo a temperaturas menores a los 500°C, para un rendimiento máximo de char con un flujo de medio inerte. La gasificación completa es lograda a temperaturas por encima de los 500°C con flujo de aire.
- Cenizas: Shafizadeh ha observado que incluso en la presencia de concentraciones muy bajas de impurezas se han mostrado como catalizadores o inhibidores en la degradación. Además la presencia de metales traza han resultado en el desplazamiento a temperaturas bajas para la descomposición térmica de la celulosa.
- Ambiente: Se ha observado que un ambiente (gasificación,) el cual tenga reacción con la biomasa, tiene diferentes resultados a un ambiente (pirólisis)

que no reacciona con la biomasa, se ha encontrado que en la pirolisis se obtiene un mayor rendimiento de líquidos, gas y char. Los gasificadores comerciales utilizan como gasificador el aire en cantidades subestequiométricas, para la producción de biogás.

El poder calorífico del gas varía según el procedimiento adoptado en el proceso, el cual tiene un valor en torno a $4-6 \text{ MJ/m}^3$, si el agente gasificante es aire; $10-20 \text{ MJ/m}^3$, si el proceso se realiza con oxígeno, y mayor de 30 MJ/m^3 , si se gasifica con hidrógeno (Pérez, 2006)[35].

Durante la gasificación de la biomasa se llevan a cabo 3 subprocesos: secado, carbonización (pirólisis) y gasificación. Estos subprocesos se pueden realizar en un solo reactor (gasificación en una etapa) o en reactores separados (gasificación en dos etapas). En el siguiente esquema se presentan las dos disposiciones.

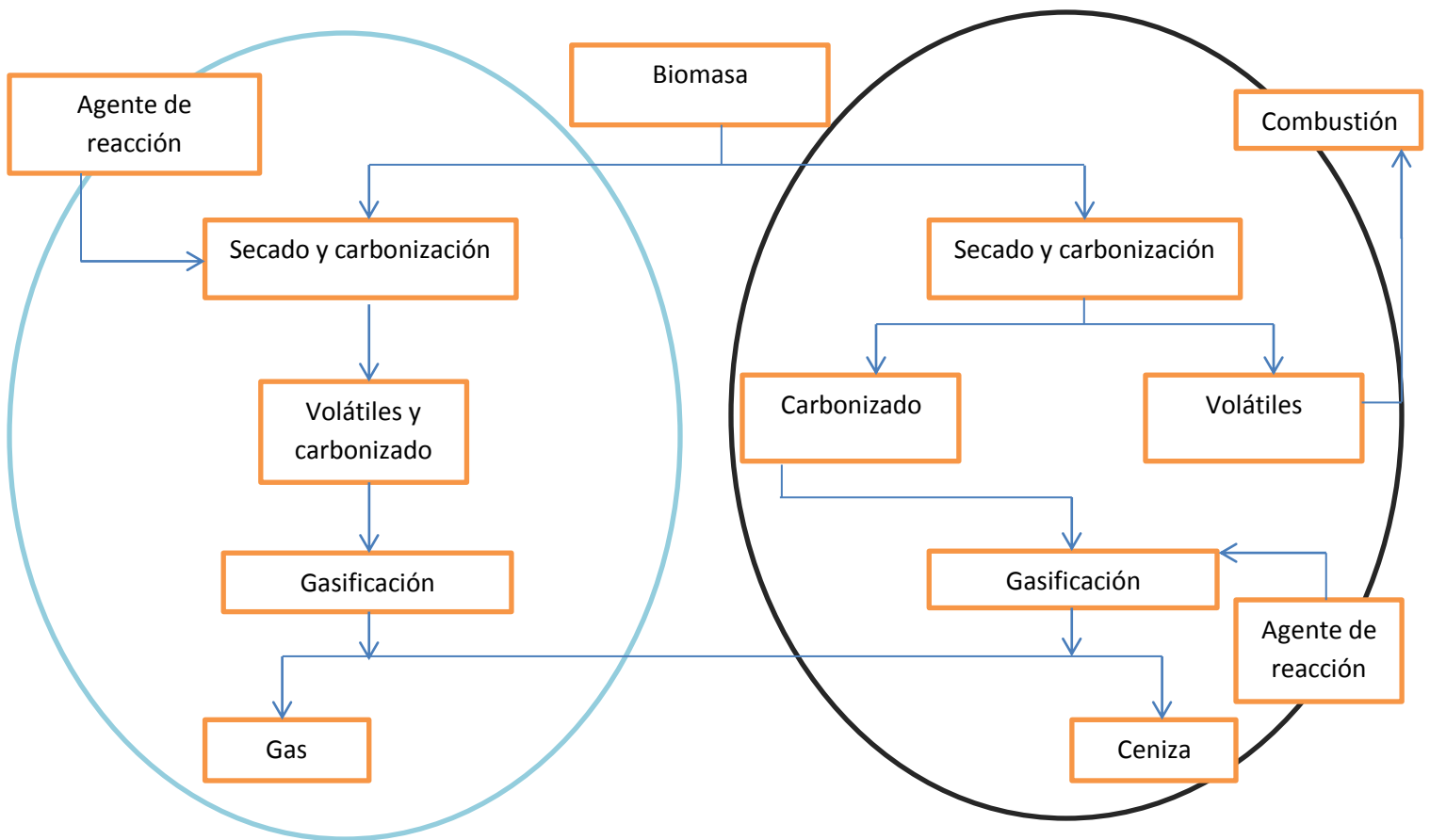


Figura No. 2: Representación esquemática de la gasificación de la biomasa mediante procesos en una y dos etapas. El esquema encerrado en el círculo azul, representa la gasificación en una etapa, el esquema encerrado en el círculo negro, representa la gasificación en dos etapas.

En el proceso de una etapa, la biomasa se introduce en un reactor donde es calentada y simultáneamente entra en contacto con el gas de reacción. Los productos del secado y la pirólisis (volatilizado y carbonizado) reaccionan con el agente de reacción para formar una mezcla de gas de combustible. En el caso de gasificación en una etapa permanece como residuo la ceniza de la materia prima. En la gasificación en dos etapas el secado y la carbonización de la biomasa se realizan en un reactor inicial. El carbonizado obtenido se introduce luego en un gasificador donde entra en contacto con el agente de gasificación llevándose a cabo las reacciones de oxidación parcial del carbonizado que genera el gas de

gasificación. Los productos volátiles obtenidos de la carbonización en la primera etapa son utilizados como combustibles.

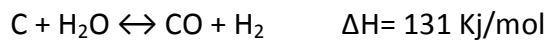
El proceso de carbonizado es el primer paso en el proceso de gasificación, en la carbonización se obtienen productos sólidos, líquidos y gaseosos que pueden ser usados directamente como combustible o procesados para la obtención de productos químicos u otro tipo de combustible. Este proceso se completa a temperaturas aproximadamente a 500°C. El carbonizado formado es un producto carbonoso con una estructura porosa ocupada parcialmente por alquitranes condensados. Por medio de la gasificación se evacua este material y se permite la reacción adicional de la estructura carbonosa. La gasificación del carbonizado ocurre por medio de la acción de un agente de reacción que puede ser aire, oxígeno, vapor de agua, hidrógeno y dióxido de carbono o mezclas en diferentes proporciones de estos elementos.

Durante la gasificación de carbonizados se llevan a cabo dos tipos de reacciones: reacciones heterogéneas en las cuales el medio de reacción y los gases producidos reaccionan con el carbonizado (producto sólido), éstas también se conocen como reacciones primarias; y reacciones homogéneas en la fase gaseosa en las cuales los productos de las reacciones primarias reaccionan entre sí y con el agente de reacción. La composición del gas obtenido depende del nivel de avance de todas éstas reacciones. Las principales reacciones que describen el proceso de gasificación de carbonizado junto con las entalpías de reacción se describen a continuación.

Reacciones heterogéneas de oxidación y oxidación parcial:



Reacciones heterogéneas de gasificación:



William y Besler llevaron a cabo un TGA en madera y cáscara de arroz, y muestras de celulosa, hemicelulosa y lignina a rangos de temperatura de 5, 20, 40 y 80°K/min con un flujo de nitrógeno para purgar el producto de los gases.

Las siguientes observaciones fueron hechas en todos los rangos de temperatura:

La hemicelulosa se represento por la descomposición del xilano entre 220 y 320°C que resulto en un rendimiento del char del 20% peso de la celulosa original después de calentarla a 720°C.

La descomposición de la celulosa fue entre los 250 y 360°C y tuvo un rendimiento de char aproximado al 8% del peso original de la celulosa después de calentarla a 720°C.

La descomposición gradual que se sometió la lignina fue entre los 80 y 500°C. El rendimiento de char fue del 55% del peso original de la lignina después de calentarla a 720°C.

De los datos obtenidos del TGA y DTG en madera, celulosa, hemicelulosa y lignina. Se observó lo siguiente:

- Solo una temperatura para la pérdida del peso máximo ha sido observada para la hemicelulosa, celulosa y lignina.
- Dos temperaturas para la pérdida máxima de peso fueron observadas para la madera. (Una cercana a la temperatura máxima de la hemicelulosa y otra para la celulosa).
- Aunque en el aumento de los rangos de temperatura hay una desviación lateral de las temperaturas para la pérdida de peso máximo, es debido a combinar los efectos de transferencia de calor a los diferentes rangos de calentamiento de la cinética de la descomposición que da como resultado una descomposición lenta.

Una mirada cercana a los contenidos de oxígeno y carbón revela que todas las biomásas tienen el oxígeno para convertir el carbón a óxidos de carbono ya sea parcial o completamente. Usando los datos de porcentaje de carbono que pueden ser convertidos a CO por el oxígeno disponible en la biomasa (bio-oxígeno). Sin embargo es digno de mención que el carbón es también consumido en la formación de metano e hidrocarburo y en la reacción de gas de agua. Para ello es posible el gasificar la biomasa en ausencia de aire teóricamente. Esto abre el camino para la conversión del saber de la auto-gasificación, de la materia de combustibles sólidos en la biomasa por el bio-oxígeno de si mismo.

11.1 POSIBLES MECANISMOS DE GASIFICACIÓN

En reacciones catalíticas heterogéneas, los siguientes pasos toman lugar:

1. Difusión de reactantes a través de gas que rodea la película de partícula catalítica.
2. Difusión de reactantes a través de poros del catalizador a los sitios de reacción.
3. Quimisorción de reactantes en el sitio de reacción.
4. Reacciones entre los reactantes de Quimisorción en los sitios de reacción.
5. Desorción de los productos de los sitios de reacción haciendo los sitios disponibles para reactantes frescos para obtener la quimisorción.
6. Difusión de productos a través de poros para la superficie del catalizador.
7. Difusión de productos a través de gas que rodea la película de partícula catalítica.

Pasos 1, 2, 6 y 7 son considerados a ser pasos físicos como compuestos no nuevos son formados en estos pasos. Pasos 3-5 son pasos químicos que producen nuevos compuestos. Donde, todos estos pasos toman lugar en serie, el paso mas lento es considerado a ser el controlador de la reacción.

La actividad del catalizador depende sobre el número de sitios y nivel de actividad en cada sitio. El nivel de actividad de sitio decide la distribución del producto, donde el número de sitios determinará el rango de reacción. La temperatura tiene efecto exponencial en estos factores.

De las observaciones hechas, la gasificación tal vez sea vista cómo una reacción heterogénea catalizada por cenizas. Los reactantes tal vez sean quimisorbidos en la ceniza catalizadora. Porque de los pasos 1-3 de catalizadores heterogéneos no serán existentes en la gasificación. Todos los otros pasos tomaran parte en la reacción. Los fenómenos siguientes tal vez sean asumidos para tomar lugar en la gasificación:

1. Por calentamiento, los sitios en la ceniza catalizadora son activadas.
2. Dependiendo a la temperatura, el número de sitios activados y su nivel de actividad varía.

3. Moléculas de carbono, hidrogeno y oxígeno quimisorbidas en la matriz de cenizas son reaccionadas.
4. Dependiendo al nivel de actividad del sitio del carbón, hidrogeno y oxígeno darán aumento a varias composiciones de CO, CO₂, hidrocarburos agua metano etc.
5. El char producido tal vez sea reactivo con vapor de agua para producir CO e hidrogeno en presencia de ceniza catalítica.
6. Los productos así formados se difundirán a través de los poros en la en la ceniza catalítica.
7. Los productos además se difundirán a través de la película de gas circundante de la biomasa.
8. Si los productos gaseosos son barridos por gases de purga, tales como el N₂ o Argón, cuando son formados después de la degradación secundaria la conversión de carbono a CO y H₂ no habrá tenido lugar. Varios investigadores han reportado esto.

Es evidente que la discusión de la auto-gasificación de la biomasa en combustibles gaseosos por bio-oxígeno y ceniza catalizadora es realizable. El logro de temperatura uniforme y la ausencia de un medio de flujo que ayude a la degradación secundaria son esenciales en el logro de esto. Por lo tanto, estudios en el efecto de rango de calentamiento en auto-gasificación deberán ser la llave a la calidad y cantidad de los productos de gasificación.

11.2 CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE

Aunque los valores de calentamiento en los diferentes tipos de biomasa son similares, los combustibles de la biomasa tienen grandes diferencias con respecto a características físicas (contenido de humedad y densidad aparente) químicas (contenido de materia volátil y contenido de cenizas) y morfológica (tamaño y distribución de tamaño). Esas características del combustible afectan el escoger la tecnología de conversión, combustibles fáciles tales como la madera pueden trabajar en una larga variedad de

equipos, mientras combustibles difíciles tales como cáscara de arroz o bagazo son muy específicos y las soluciones tecnológicas son caras. Los diferentes tipos de biomasa que son utilizados comercialmente para la generación de energía deben cumplir características en cuanto a su contenido de humedad (MC_w), contenido de cenizas (AC_d) y bajo valor de calentamiento (LHV_w).

12. TIPOS DE REACTORES

Existen muchos tipos de equipos de combustión comercialmente que sólo difieren en el diseño de las cámaras de combustión, temperaturas de operación y mecanismos de transmisión de calor. Los dos tipos de equipos más utilizados son los de lecho fijo y lecho fluidizado.

Reactores de lecho fluidizado: En este tipo de reactores el lecho de sólidos o partículas están soportadas por un flujo de gas.

Reactores de lecho fijo: En este tipo de reactores hay una separación de partículas por gravedad.

El desarrollo de nuevas tecnologías para la combustión de la biomasa en calderas de baja potencia, aptas para su aplicación en instalaciones domésticas y residenciales, ha revolucionado el mercado ya que la posibilidad de contar con equipos de biomasa tan fiables, eficientes y seguros como los convencionales de combustible fósil era algo imposible no hace demasiado tiempo.

Han sido tres los pilares sobre los que se ha centrado la investigación y desarrollo de la tecnología:

- Control de emisiones de la combustión para cumplir las exigentes normativas medioambientales.
- Control de los parámetros de la combustión, manteniéndolos dentro de los rangos adecuados para la consecución de elevados rendimientos.

- Garantizar la eficiencia bajo cualquier condición de funcionamiento de la caldera, ya que estas se deben enfrentar a amplias variaciones de la demanda energética.

Funcionamiento

1. Puerta de la caldera
2. Rejilla de parrilla
3. Cámara de combustión
4. Indicador de llenado
5. Espiral de limpieza
6. Conducto de combustión
7. Tapa de limpieza
8. Mecanismo vibrador
9. Zona de intercambio de calor fluido
10. Ventilador
11. Limpiador intercambiador de calor
12. Salida de humos
13. Sonda Lambda
14. Sensor de gas
15. Motor sinfín ceniza
16. Sinfín ceniza
17. Caja de cenizas
18. Panel de control

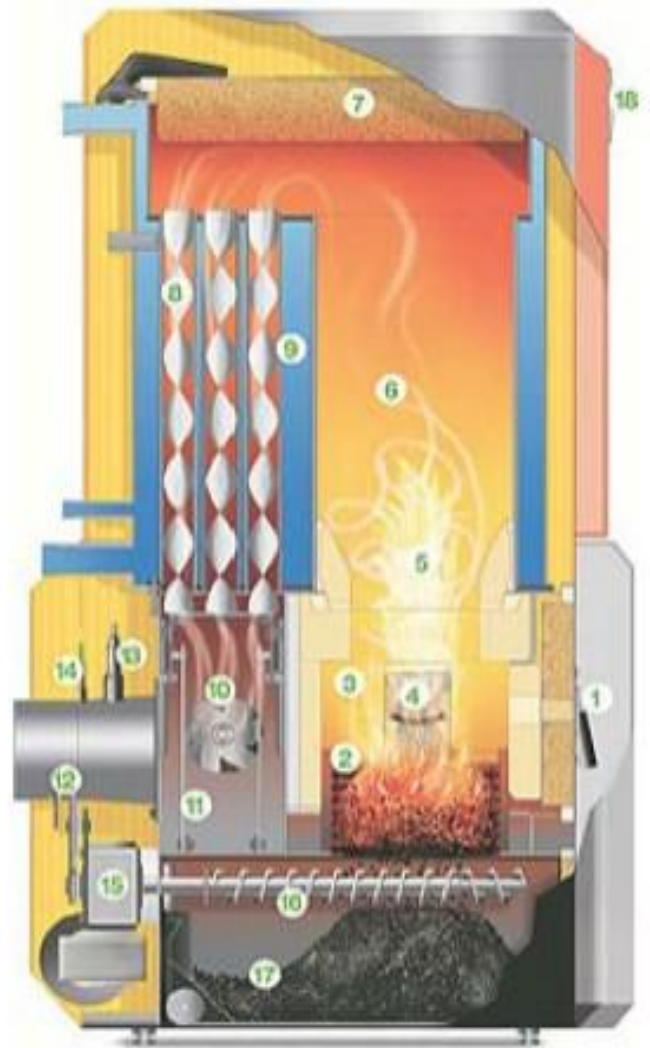


Figura No. 3: El diseño de nuevos sistemas de combustión con aportaciones reguladas de aire de combustión a distintos niveles para mantener para mantener el desarrollo de zonas de intercambio de calor compactas y eficientes son las bases sobre las que se fundamenta la tecnología de aprovechamiento energético de la biomasa. Los sistemas de regulación y control basados en microprocesadores, son responsables del óptimo rendimiento energético conseguido ante cualquier variación respecto a las condiciones nominales de funcionamiento.

13. CONCLUSIONES

No todos los diferentes tipos de biomasa pueden ser adecuados para su transformación en bioenergéticos por procesos termoquímicas.

El tipo de reactor de lecho fluido es una mejor opción en los procesos termoquímicos, en especial el de cogeneración.

Por las características físicas y químicas que presenta el guishe puede ser viable para su transformación en biogás por procesos termoquímicos.

El conocimiento de los procesos termoquímicos es una opción para la transformación de residuos orgánicos que se generan en gran cantidad en industrias del sector agronómico.

14. BIBLIOGRAFÍA

A. Brigwater (2001), Progress in thermochemical biomass conversion, Editorial Osney Mead, p.p. 1186.

Álvaro Sánchez Bravo (2007), Ciudades, medio ambiente y sostenibilidad, Editorial ArCibel, p.p. 255, 256

Bautista López Pilar; Martínez Cruz Martín, Aprovechamiento, rendimiento en fibra y regeneración del cogollo de *Agave lechuguilla Torrey* en el altiplano mexicano, Tesis profesional presentada como requisito profesional para obtener el título de Ingeniero Forestal, Universidad Autónoma de Chapingo, p.p. 11, 12, 13, 15,

Biología y aprovechamiento de *Agave lechuguilla Torrey*. Boletín de la Sociedad Botánica de México, A, 067, 2000 pp.75-82

Bo Liu, Catalytic generation of hydrogen and chemicals from biomass derived polyols, Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Filosofía, p.p. 16

Efrain Velasco Bautista; Alberto Arredondo Gómez; Marisela Cristina Zamora Martínez; Francisco Moreno Sánchez (2009), Modelos predictivos para la producción de productos forestales no maderables, INIFAP, p.p. 9

Emilio Menéndez Pérez (2001) Energías renovables, sustentabilidad y creación de empleo, Editorial La Catarata, p.p. 157, 158, 159, 160, 163.

Enrique Domínguez López (2000), Régimen jurídico de las energías renovables y la cogeneración eléctrica, Edita Ministerio de administraciones públicas, p.p. 37

Fernando Sebastian Nogués; Javier Abrego Garrués, Adeline Reseau, Daniel García Galindo (2010), Energía de la biomasa (Volumen I), No. 173, Editorial Zaragoza, p.p. 312, 313, 314.

Integradora de ixtleros de Zacatecas, Estudio Orientado a identificar los mercados y canales de comercialización internacionales para la oferta de productos de ixtle con valor agregado (2009), SAGARPA, FIRCO, p.p. 76

Jaime González Velasco (2009), Energías renovables, Editorial Reverté, p.p. 253, 254, 255

Jhon R. Agudelo; Pedro Benjumea; Edwin Gómez Meneses; Juan Fernando Pérez Bayer, 21 de Agosto de 2002, Biodiesel: Una revisión del desempeño mecánico y ambiental, Artículo de la Universidad del Norte de Ingeniería y desarrollo, p.p. 2 y 3.

Joaquín Moreno Casco, Raul Moral Herrero (2007), Compostaje, Edición Mundi-Prensa, p.p. 273,274

José María de Juana Sardón; Adolfo de Francisco García (2003), Energías renovables para el desarrollo, Editorial Paraninfo, p.p. 191.

José O. Valderrama (2002), Artículos de información tecnológica, No.5.

Juan Fernando Pérez Bayer; Gasificación de biomasa. Estudios teórico-experimentales en lecho fijo equicorriente; Editorial Universidad de Antioquia, p.p. 3, 4, 5.

Juan Fernando Pérez Bayo (2009), Gasificación de la biomasa. Estudio teórico-experimentales en lecho fijo equicorriente, Editorial Universidad de Antioquia, p.p. 18

Lincoln Taiz; Eduardo Zeiger (2006), Fisiología vegetal, Editorial Universitat Jaume, p.p.315, 205.

Mariano Seoáñez Calvo; Pedro Ladaria Sureda; Elena Bellas Velasco; Ana María Campos Gonzalo; Manuel Berrocal de Brio; Pilar Seoáñez Oliet (2000), Tratado de gestión del medio ambiente urbano, Editorial Aedos, pp 293, 294

Mark Crocker, Thermochemical conversion of biomass to liquids fuels and chemicals, Publicado por Royal Society of chemistry, p.p. 149

Marta C. Cervantes Ramírez, Plantas de importancia económica en zonas áridas y semiáridas de México, Congreso de Análisis del X encuentro de geógrafos de América latina, Universidad de Sao Paulo.

Niki Walker (1972), Biomass: Fueling change, Editorial Crabtree publishing, p.p. 4, 8.

Sonia Rincón; Alexánder Gómez; Wolfgang Klose (2011), Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial, Publicación de la Deutsche Nationalbibliothek, p.p. 8.

Peter Quaak; Harrie Knoef; Hubert Stassen (1999), Energy from biomass, No. 442, p.p. 1, 2, 3, 4.

Prabir Basu (2010), Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory, Editorial Elsevier, p.p. 65, 66

Rafael Castro Franco (1994), Desarrollo de un bioinsecticida a partir de *Bacillus thuringiensis* y extracto de *Agave lechuguilla* para el control de *Spodoptera frugiperda*, Tesis presentada como requisito parcial para obtener el grado de doctor en ciencias con especialidad en microbiología, p.p. 40, 41, 60, 66.

Rasmhi Sanghi, Vandana Singh (2012), Green Chemistry for Environmental Remediation, Editorial Wiley, pp. 295, 296.

Revista de la facultad de ciencias químicas (2007), Universidad de Cuenca, Buenos Aires Argentina, No. 5, p.p. 25

Sjaack Van Loo, Jaap Koppejan (2008), The handbook of biomass combustion and co-firing, Publicado por Earthscan, p.p. 8

Teresa Audesirk; Gerald Audesirk; Bruce E. Byers (2003), Biología: La vida en la tierra, Editorial Pearson Educación, p.p. 118, 119, 120, 121, 122.

Xavier Elias Castells (2005), Tratamiento y valorización energética de residuos, Ediciones Díaz de Santos, p.p. 206, 207, 210

PÁGINAS WEB

4. http://www.energia.gob.mx/webSener/res/0/D121122%20Iniciativa%20Renovable%20ENER_Biomasa.pdf

17. <http://www.hidalguia.com.mx/eloxochitlan/herbolaria.htm> Consultado el 22 de julio del 2011

29. http://books.google.com.mx/books?id=DnyfnOsTLfcC&pg=PT192&dq=slow+pyrolysis&hl=en&sa=X&ei=PhnqT9_J4b22gW3xr2mAQ&redir_esc=y#v=onepage&q=slow%20pyrolysis&f=false

34. http://books.google.com.mx/books?id=O4Na_qQkNuYC&pg=PA13&dq=gasificaci%C3%B3n+de+la+biomasa&hl=en&sa=X&ei=Z4vrT5PzNI_g8AShpljZBQ&ved=0CDsQ6AEwAzgU#v=onepage&q=gasificaci%C3%B3n%20de%20la%20biomasa&f=false