

**¿LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE BIOMASA VIA
GASIFICACIÓN ES UNA ALTERNATIVA AMBIENTALMENTE VIABLE PARA
REEMPLAZAR LA ENERGÍA DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES?**

JEANNIE TATIANA PÉREZ SÁNCHEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2010

**LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE BIOMASA VIA
GASIFICACIÓN ES UNA ALTERNATIVA AMBIENTALMENTE VIABLE PARA
REEMPLAZAR LA ENERGÍA DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES?**

JEANNIE TATIANA PÉREZ SÁNCHEZ

**Proyecto de grado para optar el título de:
Especialista en Ingeniería Ambiental**

**Director:
ING. RICHARD DÍAZ GUERRERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2010

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	12
1 LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA.....	14
1.1 CONCEPTOS BÁSICOS.....	14
1.1.1 DEFINICIÓN.....	14
1.1.2 FUENTE DE BIOMASA.....	14
1.1.2.1 Plantaciones Energéticas.....	15
1.1.2.2 Residuos Forestales.....	16
1.1.2.3 Residuos Agrícolas.....	16
1.1.2.4 Residuos Urbanos.....	17
1.1.2.5 Residuos Industriales.....	18
1.1.3 CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA.....	18
1.1.3.1 Tipos de Biomasa.....	18
1.1.3.2 Composición Química.....	19
1.1.3.3 Contenido de Humedad.....	20
1.1.3.4 Porcentaje de Cenizas.....	21
1.1.3.5 Poder Calorífico.....	22
1.1.3.6 Densidad Aparente.....	23
1.2 CONVITIENDO BIOMASA EN ENERGÍA.....	23
1.2.1 PROCESOS TERMOQUÍMICOS.....	24
1.2.1.1 Combustión Directa.....	24
1.2.1.2 Pirólisis.....	26
1.2.1.3 Licuefacción.....	28
1.2.1.4 Gasificación.....	28
1.2.2 PROCESOS BIOQUÍMICOS.....	30
1.2.2.1 Fermentación Metánica.....	31
1.2.2.2 Fermentación Alcohólica.....	32

2	GASIFICACIÓN DE BIOMASA	35
2.1	GENERALIDADES	35
2.2	ETAPAS Y REACCIONES DE LA GASIFICACION.....	35
2.3	PROCESO DE GASIFICACIÓN	38
2.3.1	ALIMENTACIÓN DE LA BIOMASA EN EL REACTOR	38
2.3.2	REACTOR.....	38
2.3.3	ELIMINACIÓN DE LA CENIZA	39
2.3.4	ENFRIAMIENTO DEL GAS.....	40
2.3.5	DEPURACIÓN DEL GAS.....	41
2.3.5.1	Depuración del Gas Seco	43
2.3.5.2	Depuración del Gas Húmedo.....	44
2.4	CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE PARA EL GASIFICADOR	45
2.5	TIPOS DE GASIFICADORES.....	50
2.5.1	LECHO FIJO	51
2.5.1.1	Corriente Ascendente	51
2.5.1.2	Corriente Descendente.....	53
2.5.2	LECHO FLUIDIZADO.....	55
2.5.2.1	Burbujeante	56
2.5.2.2	Circulante.....	57
2.5.3	LECHO ARRASTRADO	58
3	PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE BIOMASA VÍA GASIFICACIÓN EN AGUA SUPERCRÍTICA.....	60
3.1	PROPIEDADES DEL AGUA SUPERCRÍTICA	61
3.2	PROCESO DE GASIFICACIÓN EN AGUA SUPERCRÍTICA.....	65
3.3	CINÉTICA Y ESTUDIO PARAMÉTRICO.....	67
3.3.1	CINETICA	67
3.3.1.1	Reacciones Químicas.....	70
3.3.1.2	Velocidad Cinética	71
3.3.2	PARAMETROS DE OPERACIÓN Y DISEÑO.....	72
3.3.2.1	Temperatura de Reacción	73

3.3.2.2	Presión de Reacción.....	77
3.3.2.3	Tiempo de Residencia	80
3.3.2.4	Velocidad de Calentamiento	81
3.3.2.5	Concentración del Alimento	82
3.3.2.6	Tipos de Biomasa	83
3.3.2.7	Tamaño de Partícula	84
3.3.2.8	Diseño del Reactor	85
3.3.2.9	Geometría del Reactor	87
3.3.2.10	Material del Reactor.....	87
3.3.2.11	Catalizador.....	88
4	ASPECTOS AMBIENTALES.....	93
4.1	POLVO	95
4.1.1	MEDIDAS DE PREVENCIÓN	95
4.2	EMISIONES GASEOSAS	97
4.2.1	LIMITE DE EMISIONES.....	98
4.2.2	MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO	99
4.3	AGUAS RESIDUALES.....	100
4.3.1	COMPUESTOS PROBLEMÁTICOS	102
4.3.2	SISTEMAS DE TRATAMIENTO.....	102
4.3.3	LIMITES DE VERTIMIENTO	103
4.4	CENIZAS VOLANTES Y CHAR.....	104
4.5	OLOR.....	104
4.6	RUIDO	105
	CONCLUSIONES	106
	RECOMENDACIONES.....	108
	BIBLIOGRAFÍA	109

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura No. 1 Origen de la Biomasa.....	15
Figura No. 2 Gasificación de Lecho Fijo en Contracorriente.....	52
Figura No. 3. Gasificación de Lecho Fijo en Paralelo.	54
Figura No. 4 Gasificación de Lecho Burbujeante.....	56
Figura No. 5. Gasificación de Lecho Circulante	57
Figura No. 6. Gasificación de Flujo Arrastrado	58
Figura No. 7 Diagrama de Fase del Agua.....	61
Figura No. 8. Propiedades del Agua @ 25.3 MPa	63
Figura No. 9 Diagrama de Flujo Proceso de Gasificación	66
Figura No. 10 Caminos de Reacción Gasificación de Celulosa	68
Figura No. 11 Efecto de la Temperatura sobre el Rendimiento y la Eficiencia de la Gasificación	75
Figura No. 12. Efecto de la Presión sobre la GE Y CE	78
Figura No. 13 Efecto de la Presión sobre el Rendimiento	79
Figura No. 14 Formación de Agua en las Plantas de Gasificación de Biomasa ..	101

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla No. 1 Tipos de Biomasa.....	19
Tabla No. 2 Composición Típica de la Biomasa	20
Tabla No. 3. Poder Calórico de algunas Formas de Biomasa	22
Tabla No. 4 Procesos de Conversión de Biosmasa.....	34
Tabla No. 5. Propiedades del Gas	42
Tabla No. 6. Características del Combustible de Gasificación.	50
Tabla No. 7 Clasificación de los Gasificadores.....	50
Tabla No. 8. Requerimientos de Calidad del Combustible.....	53
Tabla No. 9 Requerimientos de Calidad del Combustible.....	55
Tabla No. 10. Ventajas y Desventajas de los Gasificadores.....	59
Tabla No. 11. División de la Reacción por Temperatura.....	73
Tabla No. 12. Efecto del Tamaño de Partícula en la Gasificación	85
Tabla No. 13 Gasificación Utilizando Catalizadores	91
Tabla No. 14 Aspectos Ambientales y Peligrosos para la Salud y la Seguridad del Sistema de Gasificación.	94
Tabla No. 15. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes Convencionales..	99
Tabla No. 16. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes	103

TITULO: ¿LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE BIOMASA VIA GASIFICACIÓN ES UNA ALTERNATIVA AMBIENTALMENTE VIABLE PARA REEMPLAZAR LA ENERGÍA DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES?

AUTORES: JEANNIE TATIANA PÉREZ SÁNCHEZ

PALABRAS CLAVES: Demanda Energética, Combustibles fósiles, Biomasa, Gasificación.

En los últimos tres años la demanda de energía a nivel mundial ha tenido un crecimiento de 3,5% y se espera que esta tendencia continúe, esta demanda energética está cubierta en más de un 87% por combustibles fósiles. Esta dependencia tiene importantes repercusiones económicas y ambientales. Desde el punto de vista ambiental, la combustión de combustibles fósiles constituye el principal causante de la emisión de gases de efecto invernadero, causante del calentamiento global que sufre nuestro planeta.

Recientemente, debido a consideraciones ambientales, así como también al aumento de la demanda de energía en el mundo, mayor atención se ha inferido al desarrollo de nuevas fuentes de energía como por ejemplo el hidrógeno, el cual será un importante combustible a ser usado como acarreador de energía en el futuro para vehículos y plantas de generación de electricidad.

Como se sabe, el hidrógeno es renovable y se encuentra como compuesto en el agua, los combustibles fósiles y la biomasa. Comparado con los combustibles fósiles, la biomasa para producción de hidrógeno puede llevar a cero emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂) en un ciclo de vida muy corto que va desde el carbono en forma de CO₂ y la conversión de este en energía por medio de la fotosíntesis en el proceso de crecimiento de la biomasa.

Ya que con esta tecnología se puede inhibir la producción de alquitrán y char, residuos generadores de los principales problemas ambientales, de esta tecnología se puede concluir que esta la producción de hidrógeno a partir de biomasa vía gasificación en agua supercrítica es una tecnología promisoría, la cual puede contribuir al desarrollo de futuros sistemas energéticos eficientes, seguros en diseño y operación, y amigables con el medio ambiente al fin de aumentar la cuota de energías renovables para calefacción, electricidad, transporte y otras aplicaciones.

* Proyecto de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director Richard Díaz Guerrero.

TITLE: THE PRODUCTION OF HYDROGEN FROM BIOMASS GASIFICATION VIA ENVIRONMENTALLY VIABLE ALTERNATIVE IS A POWER TO REPLACE FOSSIL FUELS?

AUTHOR: JEANNIE TATIANA PÉREZ SÁNCHEZ

KEY WORDS: Demand energy, fossil fuels, Biomass, Gasification.

In the past three years, global energy demand has grown 3.5% and expected that this trend continues, this energy demand is covered by more than 87% of fossil fuels. This dependence has significant implications for both economic, and environmental. From the environmental point of view, the burning of fossil fuels is the main cause of the emission of greenhouse gases, responsible for global warming effect our planet.

Recently, due to environmental considerations, as well as to increased energy demand in the world, more attention has been inferred to the development of new energy sources such as hydrogen, which is an important fuel to be used as carrier future energy for vehicles and electricity generation plants.

As is well known, hydrogen is renewable and is like compound in water, fossil fuels and biomass. Compared with fossil fuels, biomass for hydrogen production can lead to zero emissions of carbon dioxide (CO₂) in a very short life cycle that goes from the carbon as CO₂ and the conversion of this energy through photosynthesis in the growth process of biomass.

Since this technology can inhibit the production of tar and char, waste generators of the main environmental problems of this technology can be concluded that hydrogen production from biomass gasification in supercritical water is a promising technology, which can contribute to the development of future energy efficient, safe design and operation, and also friendly environmental to enhance the share of renewable energy for heating, electricity, transportation and many other applications.

* Grade project.

** Chemical Physique Engineering's Faculty. Chemical Engineering School. Specialization in Environmental Engineering. Director Richard Diaz Guerrero.

INTRODUCCIÓN

En los últimos tres años la demanda energética a nivel mundial ha tenido un crecimiento de 3,5% y se espera que esta tendencia continúe en los dos próximos años, para luego crecer a una tasa anual de 3,4% hasta el 2012. Dentro de esta previsión se espera que este año la demanda del petróleo este cerca de los 77,5 millones de barriles por día (b/d), aunque este valor dependerá del grado en que los países resulten afectados por la desaceleración económica y la manera en que China y otras economías de rápido crecimiento sorteen sus efectos.

Esta demanda energética se ve cubierta en más de un 87% por combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas natural. Esta dependencia tiene importantes repercusiones tanto económicas como ambientales. Por el lado económico, cabe destacar que su producción centralizada en determinadas zonas del mundo, está gobernada por factores esencialmente políticos, lo que resulta en precios volátiles y elevados. Así mismo, en ausencia de alternativas viables, el agotamiento de las reservas de petróleo, estimadas en no más de 40 años resultará en un encarecimiento progresivo hasta niveles tales que afecten el desarrollo económico global.

Desde el punto de vista ambiental, la combustión de combustibles fósiles constituye el principal causante de la emisión de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono), responsables del efecto de calentamiento global que sufre nuestro planeta. Esta situación no resulta sostenible a mediano plazo y se apunta de forma insistente desde las administraciones públicas a la necesidad de preparar una transición controlada hacia una nueva forma de producción y consumo energético que sea limpio, seguro y fiable.

Por todo lo anterior, en los últimos años más atención se ha prestado a desarrollar nuevas fuentes de energía, por ejemplo, el hidrógeno, ya que este puede

convertirse en un importante combustible para ser usado como portador de energía.

Como es bien sabido, el hidrógeno es un recurso renovable y se encuentra en muchos compuestos como el agua, los combustibles fósiles y la biomasa. Comparando con los combustibles fósiles, la biomasa para la producción de hidrógeno puede dar lugar a cero de emisiones de CO₂ en un período muy corto del ciclo de vida, ya que el carbono en forma de CO₂ y la energía son fijados por la fotosíntesis durante el crecimiento de la biomasa.

La biomasa ha sido siempre una fuente importante de energía para la humanidad, y aporta aproximadamente el 10-14% de todo el mundo el suministro de energía a día de hoy. El hidrógeno normalmente representa alrededor del 6% en peso de biomasa seca. Para obtener hidrógeno a partir de la biomasa, la pirólisis o la gasificación se pueden aplicar, lo que normalmente produce un gas que contiene 20% de hidrógeno en volumen, el cual puede ser llevado a un proceso de reformado para obtener una corriente de alta pureza que pueda ser usada en celdas de combustible.

Teniendo en cuenta, las características tan especiales de la materia y del producto final, en este documento se realizarán un breve análisis de los aspectos ambientales que conlleva una tecnología tan promisoriosa como lo es la gasificación, con el fin de establecer si puede considerarse una alternativa viable para reemplazar la energía proveniente de los combustibles fósiles.

1 LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA

1.1 CONCEPTOS BÁSICOS¹

1.1.1 DEFINICIÓN

El término “biomasa” incluye toda la materia orgánica, o cuyo origen sea la materia orgánica que existe en un instante de tiempo en la Tierra que proviene de árboles, plantas y desechos de animales; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas residuales y residuos industriales y domésticos). La energía que se puede obtener de la biomasa proviene de la luz solar, la cual, gracias al proceso de fotosíntesis, se aprovecha por las plantas verdes y se transforma en energía que queda acumulada en el interior de sus células. Esta energía puede traspasarse por la cadena alimentaria al reino animal.

1.1.2 FUENTE DE BIOMASA

Las fuentes de biomasa que pueden ser usadas para la producción de energía cubren un amplio rango de materiales y fuentes: los residuos de la industria forestal y la agricultura, los residuos urbanos y las plantaciones energéticas (ver Figura 1), se usan, generalmente, para procesos modernos de conversión que involucran la generación de energía a gran escala, enfocados hacia la sustitución de combustibles fósiles.

¹ Tomado del Libro: Manuales sobre Energía Renovable: Biomasa. Users Network (BUN-CA). Primera Edición. San José, Costa Rica. Biomass Users Network (BUN-CA), 2002.

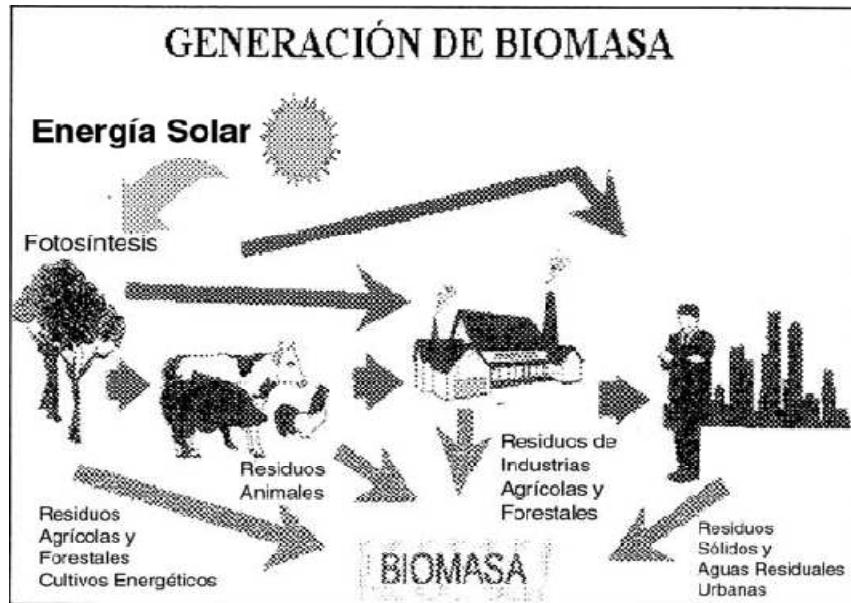


Figura No. 1 Origen de la Biomasa

Fuente: Instituto para la Diversión y Ahorro de la Energía - IDAE

1.1.2.1 Plantaciones Energéticas

Estas son grandes plantaciones de árboles o plantas cultivadas con el fin específico de producir energía. Para ello se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, las cuales usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo. Su período de cosecha varía entre los tres y los diez años. También se utilizan arbustos que pueden ser podados varias veces durante su crecimiento, para extender la capacidad de cosecha de la plantación.

Existen también muchos cultivos agrícolas que pueden ser utilizados para la generación de energía: caña de azúcar, maíz, sorgo y trigo. Igualmente, se pueden usar plantas oleaginosas como palma de aceite, girasol o soya y algunas plantas acuáticas como jacinto de agua o algas, para producir combustibles líquidos como el etanol y el biodiesel.

Adicionalmente, este tipo de cultivos sirve para controlar la erosión y la degradación de los suelos; además, pueden proveer otros beneficios a los agricultores ya que con los cultivos típicos se genera un ingreso sujeto a las fluctuaciones del mercado, al aumento en el costo de los insumos, a las variaciones climáticas, entre otros factores; mientras que con las plantaciones energéticas se tendrá un ingreso permanente debido a la demanda permanente de combustibles que tiene una sociedad industrializada cada vez más consumidora de energía.

1.1.2.2 Residuos Forestales

Los residuos de procesos forestales son una importante fuente de biomasa que actualmente es poco explotada en Latinoamérica. Se considera que, de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%. Se estima que un 40% es dejado en el campo, en las ramas y raíces, a pesar de que tienen un alto potencial energético, cerca del 6 – 22% para las ramas y del 21 – 33 % para las raíces, y otro 40% en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín.

1.1.2.3 Residuos Agrícolas

La agricultura genera cantidades considerables de desechos (rastros): se estima que, en cuanto a residuos de campo, el porcentaje es más del 60%, y en residuos de proceso, entre 20% y 40%.

Al igual que en la industria forestal, muchos residuos de la agroindustria son dejados en el campo. Aunque es necesario reciclar un porcentaje de la biomasa para proteger el suelo de la erosión y mantener el nivel de nutrientes orgánicos, una cantidad importante puede ser recolectada para la producción de energía.

Ejemplos comunes de este tipo de residuos son el arroz, el café y la caña de azúcar. Los campos agrícolas también son una fuente importante de leña para uso doméstico: más del 50% del volumen total consumido.

Por otro lado, las granjas producen un elevado volumen de “residuos húmedos” en forma de estiércol de animales. La forma común de tratar estos residuos es esparciéndolos en los campos de cultivo, con el doble interés de disponer de ellos y obtener beneficio de su valor nutritivo. Esta práctica puede provocar una sobre fertilización de los suelos y la contaminación de las cuencas hidrográficas.

1.1.2.4 Residuos Urbanos

Los centros urbanos generan una gran cantidad de biomasa en muchas formas, por ejemplo: residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas residuales. La mayoría de los países latinoamericanos carecen de adecuados sistemas para su procesamiento, lo cual genera grandes problemas de contaminación de suelos y cuencas; sobre todo por la inadecuada disposición de los residuos y por sistemas de recolección y tratamiento con costos elevados de operación.

Por otro lado, los residuos orgánicos en descomposición produce compuestos volátiles (metano, dióxido de carbono, entre otros) grandes responsables del efecto invernadero. Estos compuestos tienen un considerable valor energético que puede ser utilizado para la generación de energía “limpia”.

En el corto y mediano plazo, la planificación urbana deberá incluir sistemas de tratamiento de residuos que disminuyan eficazmente las emanaciones nocivas de los desechos al ambiente, dándoles un valor de retorno por medio del aprovechamiento de su contenido energético, pues aproximadamente el 80% de los residuos orgánicos pueden ser convertidos en energía.

1.1.2.5 Residuos Industriales

La industria en especial la alimenticia genera una gran cantidad de residuos y subproductos, que pueden ser usados como fuentes de energía, los provenientes de todo tipo de carnes (avícola, vacuna, porcina) y vegetales (cáscaras, pulpa) cuyo tratamiento como desechos representan un costo considerable para la industria.

Estos residuos son sólidos y líquidos con un alto contenido de azúcares y carbohidratos, los cuales pueden ser convertidos en combustibles gaseosos.

1.1.3 CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA

Para evaluar la factibilidad técnica y económica de un proceso de conversión de biomasa en energía, es necesario considerar ciertos parámetros y condiciones que la caracterizan. Estos que se explican a continuación, determinan el proceso de conversión más adecuado y permiten realizar proyecciones de los beneficios económicos y ambientales esperados.

1.1.3.1 Tipos de Biomasa

Los recursos biomásicos se presentan en diferentes estados físicos que determinan la factibilidad técnica y económica de los procesos de conversión energética que pueden aplicarse a cada tipo en particular.

Recurso de Biomasa	Tipo de Residuo	Características Físicas
Residuos Forestales	Restos de Aserrío: corteza, aserrín y astillas. Restos de Ebanistería: Aserrín, trozos y astillas. Restos de Plantaciones: ramas, corteza y raíces.	Polvo Sólido, HR ² >50% Polvo Sólido, HR =30 – 45% Sólido, HR > 55%
Residuos Agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales. Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café). Estiércol. Residuos de Cosechas	Sólido, alto contenido humedad Polvo, HR < 25% Sólido, alto contenido de humedad Sólido, HR > 55%
Residuos Industriales	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales Residuos de procesamiento de carnes Aguas de lavado y precocido de carnes y vegetales Grasas y aceites vegetales.	Sólido, Humedad Moderada Sólido, alto contenido de humedad Líquido Líquido, grasoso
Residuos Urbanos	Aguas residuales Residuos domésticos orgánicos Residuos orgánicos	Líquido Sólidos, alto contenido humedad

Tabla No. 1 Tipos de Biomasa

Fuente: RWEDP (2002).

1.1.3.2 Composición Química

Todas las formas de biomasa consisten en una parte orgánica, una inorgánica y agua. En la combustión se quema la parte orgánica. La inorgánica influye en el proceso de combustión y forma la ceniza o residuo sólido que queda después de la combustión.

² HR: Contenido de Humedad

Los elementos químicos más importantes son carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), y azufre (S) y, en algunos casos, cloro (Cl). Además, contiene oxígeno (O), el cual no se determina directamente, se calcula como la diferencia entre el peso total y la suma de los otros elementos. La siguiente tabla muestra la composición para varios tipos de biomasa.

Tipo de Biomasa	Porcentaje en Peso Seco						
MADERA	C	H	N	O	S	Cl	Ceniza
Sauce	47,66	5,2	0,3	44,70	0,03	0,01	1,45
Madera Suave	52,10	6,10	0,20	39,90	-	-	1,70
Corteza de Madera dura	50,35	5,83	0,11	39,62	0,07	0,03	3,99
Madera Dura	50,48	6,04	0,17	42,43	0,08	0,02	0,78
Eucalipto	50,43	6,01	0,17	41,53	0,08	0,02	1,76
Roble	49,89	5,98	0,21	42,57	0,05	0,01	1,29
SUB- PRODUCTOS AGRÍCOLAS	C	H	N	O	S	Cl	Ceniza
Brizna de Trigo	39,07	4,77	0,58	50,17	0,08	0,37	4,96
Caña de Azúcar	44,80	5,35	0,38	39,55	0,01	0,12	9,79
Bagazo de Caña	46,95	5,47	0,38	39,55	0,01	0,12	9,79
Paja de Arroz	39,65	4,88	0,92	35,77	0,12	0,50	18,16
Cascarilla de Arroz	38,68	5,14	0,41	37,45	0,05	0,12	18,15
Paja de Maíz	46,91	5,47	0,56	42,78	0,04	0,25	3,99
Olote de Maíz	47,79	5,64	0,44	44,71	0,01	0,21	1,2
Fibra de Coco	50,29	5,05	0,45	39,63	0,16	0,28	4,14
Carbón Mineral	71,70	4,70	1,3	8,30	0,64	0,060	20,70

Tabla No. 2 Composición Típica de la Biomasa
Fuente: RWEDP (2002).

1.1.3.3 Contenido de Humedad

El contenido de humedad, o humedad relativa de la biomasa, es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Esta propiedad se

convierte en factor crítico cuando se quiere recuperar la energía contenida en la biomasa pues determina la energía que se puede obtener por medio de la combustión. Cuando se quema la biomasa, primero se necesita evaporar el agua antes de que el calor esté disponible; por eso, cuanto más alto el contenido de humedad menor el poder calorífico.

Todos los combustibles contienen una cantidad de agua, pero, para la biomasa, los niveles pueden ser altos; depende del tipo de biomasa, el tiempo entre su cosecha y su uso y la humedad atmosférica. Después de haberla cosechado, paulatinamente ésta perderá la humedad hasta que se establezca un equilibrio con el ambiente.

El valor de la humedad se puede indicar según sea en base seca o en base húmeda: en base seca se define como la fracción del peso del agua dentro de la biomasa y el peso del material seco, expresado como porcentaje. El contenido de humedad en base húmeda es la fracción del peso del agua dentro de la biomasa y el peso total del material. El valor en base húmeda siempre es más bajo que en base seca, por lo que es muy importante indicar el método aplicado.

Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de energía.

1.1.3.4 Porcentaje de Cenizas

El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición,

pues, en algunos casos, ésta puede ser utilizada; por ejemplo, la ceniza de la cascarilla de arroz es un excelente aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado.

1.1.3.5 Poder Calorífico

Es la energía que se libera en forma de calor cuando un material combustible es sometido a un proceso de combustión completa. Se expresa como la cantidad de energía por unidad física; por ejemplo joule por kilogramo.

El valor calorífico se puede anotar de dos formas diferentes: bruto y neto. El bruto se define como la cantidad total de energía que se liberaría vía combustión, dividido por el peso. El neto es la cantidad de energía disponible después de la evaporación del agua, es decir, es la cantidad de energía realmente aprovechable.

En la tabla No 3 se podrán ver algunos de los valores típicos del poder calorífico de diferentes formas de biomasa.

Tipo de Biomasa	Valor Calorífico Bruto (MJ/Kg)
MADERA	
Astilla de Madera	20,89
Corteza de Pino	20,95
Residuos Industriales de Madera	19,00
SUB – PRODUCTOS AGRÍCOLAS	
Paja de Trigo	18,94
Caña de Azúcar	18,06
Bagazo de Caña	18,09
Cáscara de Coco	18,60
Olote de Maíz	17,72
Paja de Arroz	15,61
Cascarilla de Arroz	15,58
Aserrín	19,34

Tabla No. 3. Poder Calórico de algunas Formas de Biomasa
Fuente: RWEDP (2002).

1.1.3.6 Densidad Aparente

Esta se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta, bajo condiciones dadas. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los períodos entre cargas.

Por otro lado, materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y, algunas veces, presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión, y eleva los costos del proceso.

1.2 CONVITIENDO BIOMASA EN ENERGÍA³

Antes de que la biomasa pueda ser usada para fines energéticos, tiene que ser convertida en una forma más conveniente para su transporte y utilización. A menudo, la biomasa es convertida en formas derivadas tales como carbón vegetal, briquetas, gas, etanol y electricidad.

Las tecnologías de conversión incluyen desde procesos simples y tradicionales, como la producción de carbón vegetal en hogueras bajo tierra; hasta procesos de alta eficiencia como la dendro-energía y la cogeneración.

A continuación se presentan los procesos de conversión de biomasa más relevantes, los cuales se pueden clasificar en dos categorías:

³ Tomado del Libro: Manuales sobre Energía Renovable: Biomasa. Users Network (BUN-CA). Primera Edición. San José, Costa Rica. Biomass Users Network (BUN-CA), 2002.

1.2.1 PROCESOS TERMOQUÍMICOS

Los procesos termoquímicos de conversión de la biomasa en energía o combustibles son aquellos en que se encuentran implicadas reacciones químicas irreversibles, a altas temperaturas y en condiciones variables de oxidación. Los métodos disponibles en la actualidad no generan un producto único, sino que dan mezclas de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, que también poseen un elevado valor energético.

1.2.1.1 Combustión Directa

Se entiende por combustión la oxidación completa de la materia para dar dióxido de carbono, vapor de agua, cenizas y, principalmente, calor, por lo que éste se convierte en el único componente energético útil del proceso.

Este esquema de combustión implica que el material combustible (biomasa) alcance unas temperaturas lo suficientemente altas como para que, en presencia del comburente (aire en exceso u oxígeno), se pueda mantener la reacción. En el transcurso de la misma se pueden distinguir tres fenómenos:

- ✓ Una fase de evaporación del agua.
- ✓ Una fase de volatilización a partir de los 200 °C.
- ✓ Una fase de formación de gases y combustión de los mismos a partir de los 500 °C.

Por otro lado, las variables que afectan principalmente al buen funcionamiento de este proceso son:

- ✓ Proporción de oxígeno en el aire de entrada.
- ✓ Temperatura de combustión.

- ✓ Características del combustible.

La combustión se realiza normalmente en sistemas que constan de las siguientes unidades:

- ✓ Horno.
- ✓ Equipo de recuperación de calor (generalmente una caldera).
- ✓ Sistema de utilización de la energía recuperada (red de conducción de vapor, turbogenerador, etc).

La energía obtenida puede destinarse a la producción de calor (en forma de agua o de aire caliente) para el uso doméstico o industrial, y a la producción de electricidad.

La combustión presenta una elevada eficacia térmica (calor recuperado de la biomasa en el vapor obtenido). Cuando se utiliza biomasa seca (< 20% de humedad), el rendimiento oscila entre el 80 y el 84%, mientras que en el caso más general de utilizar biomasa húmeda (> 50% de humedad), el rendimiento se encuentra entre el 65 y el 70%. No obstante, la eficacia global del proceso, considerada en sus productos finales (electricidad y vapor de baja presión), oscila alrededor del 30%, valor del mismo orden de magnitud que el de los procesos de obtención de energía a partir de combustibles fósiles.

La ventaja de la utilización de la biomasa como fuente de energía estriba en que los gases residuales producen menos contaminación y la degradación ambiental se puede reducir al mínimo si se utilizan las técnicas adecuadas. Esto hace que este método se utilice profusamente en la actualidad en las industrias azucarera, papelera y derivados de la madera, siendo cada vez más importante su aplicación a las basuras urbanas.

Al hablar de combustión no se debe olvidar el interés de este proceso a nivel doméstico. Aunque la combustión de la madera se ha venido utilizando desde hace muchísimos años en los hogares, en la actualidad está experimentando nuevamente un gran auge, debido a los nuevos diseños de estufas, calderas y cocinas lo suficientemente perfeccionados como para lograr rendimientos del orden del 75%. Así, los modernos hogares de leña proporcionan un mejor aprovechamiento del calor y una emisión de humos mucho menor que los sistemas convencionales.

1.2.1.2 Pirólisis

El proceso de pirólisis consiste en la descomposición de la materia orgánica por la acción del calor y en ausencia de oxígeno. La propia concepción de la pirólisis implica un aporte térmico que, aunque puede tener diferentes orígenes, es lógico suponer que se lleve a cabo con el mismo material que se está tratando.

Aunque la descomposición térmica de la materia orgánica es muy compleja, se pueden distinguir a lo largo del proceso varias etapas:

- ✓ Hasta los 200 °C se produce una pérdida de agua y de otros productos volátiles.
- ✓ Entre los 200 y los 250 °C los constituyentes menos estables de la biomasa se descomponen con desprendimiento de agua y óxidos de carbono, formándose hidrocarburos líquidos oxigenados (alcoholes y ácidos).
- ✓ Hacia los 275 °C se genera la mayor parte de los hidrocarburos líquidos, reacción que, al ser exotérmica, recalienta la masa hasta 300 - 350 °C.
- ✓ Por encima de los 300 °C comienza la formación de productos carbonosos de alto peso molecular (alquitranes y coque).

La naturaleza y composición de los productos finales dependen de las propiedades de la biomasa tratada, de la temperatura y de la presión de operación, y de los tiempos de retención del material en el reactor.

Las materias primas que se investigan actualmente para desarrollar esta técnica son, esencialmente, los subproductos agrícolas y forestales y los residuos sólidos urbanos. Precisamente, las mejores perspectivas de tratamiento de los residuos sólidos urbanos se encuentran en el campo de la pirólisis, de tal manera que la mayor parte de las investigaciones realizadas sobre este proceso se han hecho sobre la base de utilizar como material de alimentación estos residuos, con la doble opción del tratamiento integral o de hacer una clasificación previa para separar los materiales inorgánicos (vidrios y metales) y someter a pirólisis sólo la fracción orgánica.

Generalmente, los productos de reacción se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- ✓ Un gas compuesto por hidrógeno, óxidos de carbono e hidrocarburos gaseosos.
- ✓ Un líquido que, a la temperatura ambiente contiene compuestos hidrocarbonados complejos, entre los que destacan los de carácter oxigenado (alcoholes).
- ✓ Un residuo sólido carbonoso que contiene carbones y alquitranes, así como cenizas.

Las directrices de tratamiento más generalizadas respecto a la obtención de productos se orientan hacia la obtención de dos de los tres grupos posibles: normalmente, gases y sólidos o líquidos y sólidos, siendo frecuente que los gases obtenidos sean utilizados como combustible en otras partes del sistema de proceso.

1.2.1.3 Licuefacción

Es un proceso termoquímico para la obtención de combustibles líquidos a bajas temperaturas y altas presiones con una presión parcial de hidrógeno alta y también con catalizadores para mejorar la reacción y/o provocar la selectividad del proceso. EL producto obtenido es un líquido de mayor calidad que el obtenido mediante el proceso de pirólisis en cuanto a su poder calorífico (35-40 MJ/Kg) y a su menor contenido en oxígeno (< 15%) pero presenta una serie de desventajas: trabajar a muy altas presiones, problemas en el bombeo de la alimentación a esas presiones, la utilización de hidrógeno y el coste elevado al ser un proceso presurizado.

Los combustibles líquidos ofrecen varias ventajas sobre la biomasa como tal, la más importante es su elevada densidad energética, además de su mayor economía al ser transportado y estabilidad en su almacenaje.

1.2.1.4 Gasificación

Bajo la denominación de *gasificación* se recogen todos aquellos procesos que llevan implícita una combustión en condiciones de defecto de oxígeno, con producción de monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno y metano, en proporciones diversas según la composición de la materia prima y las condiciones del proceso.

La temperatura de operación es un factor importante en estos procesos. Para obtener un buen rendimiento de la mezcla gaseosa resultante (contenidos altos en hidrógeno y monóxido de carbono) es necesaria una temperatura mínima de 700 a 800 °C . Para evitar problemas técnicos debidos a la fusión y la aglomeración de cenizas se impone una temperatura máxima. En general se suele trabajar a temperaturas entre 800 y 1500 °C, lo que permite desarrollar las tres fases

similares a las de la combustión, pero limitando la cantidad de comburente a un 10 - 50% del teóricamente necesario para una combustión completa. La calefacción del reactor se realiza normalmente mediante la combustión del gas producido, aun cuando se están desarrollando otros métodos como la utilización del calor de un horno solar o el calentamiento mediante un arco voltaico.

La posibilidad más importante de controlar los productos finales de la gasificación es la variación de las condiciones de entrada del comburente. La utilización como comburente de aire u oxígeno da lugar a dos procesos de gasificación sustancialmente distintos.

En efecto, la presencia o no de nitrógeno en el comburente hace que se obtengan dos tipos diferentes de gas, no sólo en cuanto a su composición y capacidad calorífica, sino bajo el punto de vista de su posible uso. Se trata del *gas pobre* o *gas de gasógeno*, obtenido por la gasificación de biomasa con aire y el *gas de síntesis*, producto de la gasificación con oxígeno.

✓ **El gas de gasógeno**

El gas de gasógeno o gas pobre se obtiene mediante una gasificación de biomasa sólida (leña o residuos agrícolas, con un contenido en humedad inferior al 20%), haciendo pasar a gran velocidad una pequeña cantidad de aire a través de una gran masa en combustión.

El oxígeno del aire quema el carbono contenido en la biomasa proporcionando CO y CO₂; este último se reduce a su vez a CO en contacto con la masa incandescente. Por su parte, el vapor de agua procedente de la humedad del combustible se disocia produciendo hidrógeno y liberando oxígeno, el cual se combina con el carbono para producir más óxidos de carbono. También se obtienen hidrocarburos (principalmente metano) y, al emplearse aire, el contenido

en nitrógeno del gas formado es elevado. En resumen, se obtiene un gas denominado *gas de gasógeno* o *gas pobre*, debido a su reducido poder calorífico (3,4 a 5,4 MJ/m³).

Este hecho obliga a utilizar el gas directamente en unidades de combustión, para obtener electricidad y vapor, debido a que la presencia de nitrógeno impide su transformación en productos más nobles (gas de síntesis, metanol) y desaconseja su almacenamiento y transporte por su baja densidad energética.

✓ **El gas de síntesis**

Cuando se opera en el gasificador con oxígeno y vapor de agua, además de que el gas producido está exento de nitrógeno, se producen cantidades apreciables de hidrógeno y monóxido de carbono. El resultado es una mezcla CO/H₂ con un contenido más o menos elevado de CO₂ e hidrocarburos, que se denomina *gas de síntesis*, por ser una importante materia prima en la síntesis química. Su poder calorífico oscila entre los 5,0 y los 10,9 MJ/m³, pero ésta no es su principal característica, ya que el valor de esta propiedad no es excesivamente alto comparado con el de otros combustibles gaseosos convencionales (gas natural, propano, butano, etc.). Lo realmente interesante de este gas es su posibilidad de transformarlo en combustibles líquidos (metanol y gasolinas), cuya demanda actual es muy superior a la de los combustibles gaseosos.

1.2.2 PROCESOS BIOQUÍMICOS

La conversión bioquímica se basa en ciertas reacciones que ocurren en presencia de enzimas (catalizadores naturales) provistas por microorganismos vivos. Estas reacciones, denominadas fermentaciones, se pueden dividir en dos grandes

grupos: las anaeróbicas que se producen en ausencia de aire y las aeróbicas que se producen en presencia de aire.

Las primeras pueden dar lugar a productos energéticos y eventualmente residuos sólidos valorables (por ejemplo abonos). Las segundas tienen poco interés desde el punto de vista de la producción de energía.

Se distinguen dos procesos bioquímicos de conversión de la biomasa:

1.2.2.1 Fermentación Metánica

La fermentación o digestión metánica es la descomposición bacteriana de materia orgánica en la ausencia de aire, produciendo una mezcla gaseosa, denominada biogás, con un 50 a 70 % de metano, un 30 a 45 % de dióxido de carbono, de 0,5 a 3 % de nitrógeno, 1 % de hidrógeno, 1 % de oxígeno y vestigios de anhídrido sulfuroso y de otros gases.

Como la conversión enzimática se produce en un estricto proceso anaeróbico, se considera frecuentemente la fermentación metánica como sinónimo de fermentación anaeróbica. El sedimento o lodo que queda al extraer el biogás, retiene eficientemente nitrógeno presente en la biomasa, proveyendo un excelente fertilizante sin olor para cultivos agrícolas.

El proceso de fermentación metánica es el mismo que ocurre en la naturaleza en la producción del conocido gas de los pantanos. La conversión de la celulosa en metano se realiza en dos pasos, cada uno catalizado por enzimas diferentes provistas por microorganismos distintos. El primer paso (fase hidrólisis y acidificación) es la rotura de la celulosa, un polímero grande, en materia orgánica soluble (de cadenas cortas y simples), la cual es entonces fermentada como proceso final (fase metanogénica). La temperatura de digestión, mantenida por el

calor autogenerado en el proceso, se encuentra generalmente entre 25°C y 45°C. El proceso puede ser acelerado operando a temperatura mayor (50°C a 65°C). Las bacterias responsables de la degradación y producción del gas metano se encuentran presentes en la biomasa que se emplea (estiércol de los animales y lodos cloacales) por lo que no es necesaria la inoculación, ni el cultivo de cepas especiales para la producción de biogás.

Los materiales más utilizados son el estiércol animal, los residuos industriales y urbanos, las algas, los residuos de plantas y toda otra sustancia orgánica con un elevado contenido de humedad. El estiércol, con una dilución de 9 % de sólido, produce aproximadamente 140 litros de biogás por kg de materia seca y por día.

El biogás obtenido mediante este proceso puede ser empleado igual que el gas natural para cocción, calefacción, accionamiento de motores de combustión interna, refrigeración por absorción, etc. Su poder calorífico depende de la composición; para una relación 60 % metano y 40 % anhídrido carbónico, el poder calorífico es 21,5 MJ/m³.

1.2.2.2 Fermentación Alcohólica

La hidrólisis y posterior fermentación de biomasa con alto contenido de azúcares, almidones o celulosa, puede utilizarse para la producción de alcohol etílico (etanol), igual al que resulta de la destilación del petróleo.

Los carbohidratos, compuestos naturales formados por carbono, hidrógeno y oxígeno, son la materia prima del proceso; se los clasifican en tres categorías generales, en orden de complejidad creciente: azúcares, almidones y celulosas. La materia prima empleada para la producción de alcohol es toda aquella que contenga algunas de esas tres categorías de carbohidratos:

- ✓ Frutas, caña de azúcar, remolacha, sorgo dulce contienen azúcares y pueden ser usados para la producción de alcohol.
- ✓ Cereales (trigo, arroz, maíz, cebada, centeno y avena), papa, batata, mandioca, contienen almidones, y se emplean para la producción de etanol, fundamentalmente producción de alcohol para uso en bebidas.

La celulosa y la hemicelulosa constituyen la pared celular de los vegetales. Constituyen el 95 % de la estructura de plantas como el algodón, la madera contiene alrededor del 50 % de celulosa y la paja de los cereales, un 40 %. La mayoría de estas plantas se emplean para la fabricación de papel, con la cual tiene que competir la producción de alcohol a partir de estas fuentes. A la inversa, el empleo del papel que se obtiene de los residuos urbanos puede ser una buena materia prima para producir alcohol.

El etanol es empleado fundamentalmente como combustible para reemplazar las naftas en los motores de combustión interna. Se los usa sólo o mezclado con naftas en una proporción de alcohol de hasta un 20 % en volumen; en este último caso el alcohol debe ser anhidro, lo que implica un tratamiento adicional. El alcohol anhidro tiene un poder calorífico de 32,7 MJ/kg; el hidratado (4 % de contenido de agua por volumen) contiene 23,5 MJ/kg.

La Tabla 4 muestra una distribución de los procesos de conversión aplicables, de acuerdo con las características y el tipo de biomasa, así como los posibles usos finales de la energía convertida.

Tipo de Biomasa	Proceso de Conversión	Producto Final	Usos
Materiales Orgánicos de Alto Contenido de Humedad	Fermentación Metánica Fermentación alcohólica	Biogás Metanol Etanol Biodiesel	Motores de combustión Turbinas de gas Hornos y calderas Estufas domésticas
Materiales Lignocelulosicos	Combustión Directa Pirólisis Gasificación	Calor Gas Pobre Hidrógeno Biodiesel	Estufas Domésticas Hornos y calderas Motores de Combustión Turbinas de gas

Tabla No. 4 Procesos de Conversión de Biomasa
Fuente: RWEDP (2002).

Actualmente, la combustión directa es el proceso más aplicado para usos energéticos de la biomasa. Procesos más avanzados como la gasificación y la fermentación metánica han sido desarrollados como alternativas más eficientes y convenientes, y para facilitar el uso de la biomasa con equipos modernos. Sin embargo, hasta la fecha, la aplicación de estos últimos no es tan común por tener un costo más alto y la complejidad de su aplicación.

2 GASIFICACIÓN DE BIOMASA

2.1 GENERALIDADES⁴

La gasificación de biomasa es la conversión de materia prima orgánica mediante la oxidación parcial en un producto gaseoso, gas de síntesis o “syngas”, que consiste principalmente de hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO), con menores cantidades de dióxido de carbono (CO₂), agua (H₂O), metano (CH₄), hidrocarburos superiores (C₂+) y nitrógeno (N₂).

Las reacciones se llevan a cabo a temperaturas elevadas, 500 – 1400°C, y presión atmosférica o elevadas de hasta 33 Bar (480 psia). El oxidante usado puede ser aire, oxígeno puro, vapor o una mezcla de estos gases. Los gasificadores basados en aire típicamente producen un gas con alto contenido de nitrógeno con bajo poder calorífico entre 4 – 6 MJ/m³. Los gasificadores basados en oxígeno y vapor producen un gas con alto contenido de hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO) con un poder calorífico entre 10 – 20 MJ/m³.

2.2 ETAPAS Y REACCIONES DE LA GASIFICACION⁵

La química de la gasificación de biomasa es compleja. El proceso tiene una serie de etapas elementales:

- ✓ **Calentamiento del sólido y secado.** La biomasa generalmente tiene un contenido de humedad en un rango entre 5 – 35%. A una temperatura superior a los 100°C, el agua contenida en el material es removida y convertida en vapor. En este proceso la biomasa no experimenta ninguna descomposición.
- ✓ **Pirólisis.** Es la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno; también conocido como devolatilización, este proceso se lleva a cabo a baja temperatura entre 150 – 400°C, es endotérmico y produce de 75 a 90% de materiales volátiles en forma de hidrocarburos gaseosos y líquidos. El material remanente no volátil tiene un alto contenido en carbón, y es llamado “char”. La relación entre la fase volátil y no volátil depende de la composición de la biomasa.

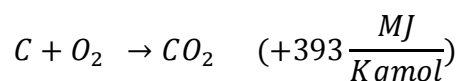
⁴ Tomado: Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals and Hydrogen Production. U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory. 2002.

⁵ Tomado: Biomass Gasification. Maharashtra, India. 2002.

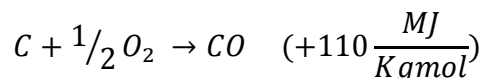
Los componentes más importantes de la fase gaseosa son dióxido de carbono (CO₂), agua (H₂O), H₂, hidrocarburos y otros compuestos en menor cuantía como ácidos orgánicos. La fracción de hidrocarburos está compuesta por metano (CH₄) y compuestos orgánicos condensables denominados alquitranes o "tars". El poder calorífico del gas producido es muy bajo cerca de los 3,5– 8,9 MJ/m³.

- ✓ **Oxidación.** Es la combustión parcial de los gases, líquidos y sólidos producto de la pirólisis por un agente gasificador, normalmente aire, para obtener monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), H₂ y pequeñas cantidades de gases de hidrocarburos. Toma lugar en un rango de temperaturas de 700 – 2000°C, es exotérmica y las principales reacciones presentadas son:

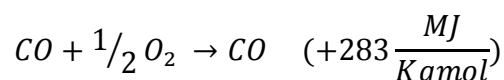
1. Oxidación Total



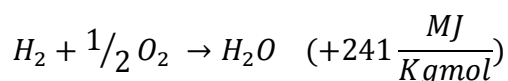
2. Oxidación Parcial



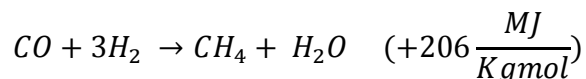
3. Oxidación del Monóxido de Carbono



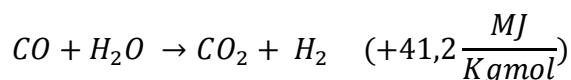
4. Oxidación del Hidrógeno



5. Metanación

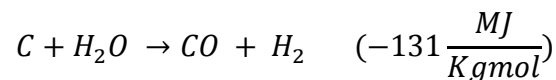


6. Reacción de Intercambio Gas - Agua

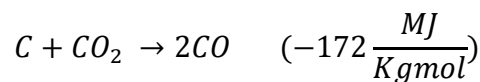


- ✓ **Reducción.** Los productos de la combustión parcial y el “char” son ahora convertidos principalmente en monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) e Hidrógeno (H₂). Las principales reacciones que se presentan en esta fase son:

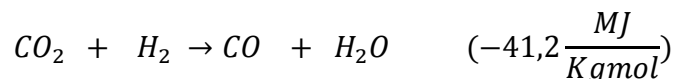
1. Gasificación del Vapor



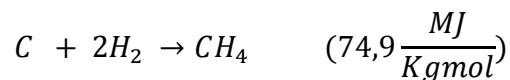
2. Reacción Boudouard



3. Reacción Inversa Intercambio Agua



4. Hidrogenación



Las dos primeras son las principales reacciones de reducción y siendo endotérmicas tienen la capacidad de reducir la temperatura del gas, consecuentemente las temperaturas son normalmente de 800 – 1000°C. Temperaturas más bajas (aprox. 700 – 800 °C) producen un gas de bajo poder calorífico.

La composición final del gas de síntesis depende de las condiciones de presión y temperatura, que a su vez depende de los diferentes equilibrios que se establecen según la biomasa y el agente gasificador (aire, oxígeno o vapor).

2.3 PROCESO DE GASIFICACIÓN

2.3.1 ALIMENTACIÓN DE LA BIOMASA EN EL REACTOR

La biomasa tiene una serie de propiedades peculiares que deben ser consideradas en el diseño de los sistemas de alimentación, las cuales están muy relacionadas con la estructura del grano. Un sistema de manejo y alimentación donde sellos a prueba de gas son requeridos, deberá tener en cuenta la caída o arrastre de las partículas ya que el bloqueo se traducirá en una mayor deformación física. Esto es muy conocido pero poco entendido. Los gasificadores presurizados son un ejemplo especial y extremo de este problema.

Otro problema, especialmente con los gasificadores presurizados es el consumo de gas inerte para purgar los alimentadores, el cual puede ser considerable debido a la alta porosidad de la biomasa.

2.3.2 REACTOR

La conversión termoquímica de la biomasa sólida en un gas crudo toma lugar en el reactor de gasificación (gasificador). La biomasa generalmente va a través de los procesos de conversión, secado, pirólisis, oxidación y reducción, los cuales convierten el flujo másico de entrada de biomasa en un flujo másico de salida de gas con productos deseados: Gas permanente (H_2 , CO , C_xH_y , CO_2 , N_2), productos indeseados: material particulado, polvo, hollín, contaminantes inorgánicos y orgánicos (tars) así como también, ceniza.

Dependiendo de los principios sobre la gasificación (geometría del reactor, agente gasificante (aire, oxígeno o vapor), se obtienen diferentes calidades de gas, relacionadas con composición del gas, contenido de tar, contenido de polvo en el gas crudo antes de realizarse su depuración.

Deben considerarse los siguientes puntos en el momento de diseñar el reactor:

- ✓ Buen desempeño en el dispositivo de monitoreo del nivel de llenado del reactor.
- ✓ Geometría y estructura de la superficie interna del reactor, que promuevan el hundimiento gradual de la biomasa durante el llenado y prevengan la formación de espacios muertos.
- ✓ Condiciones de reacción estables y homogéneas en las respectivas zonas de reacción (secado, pirólisis, oxidación y reducción).
- ✓ Tiempos de retención suficientes en cada zona de reacción.
- ✓ Suministro controlado de aire en cada zona de reacción.

2.3.3 ELIMINACIÓN DE LA CENIZA

La cantidad de ceniza a ser retirada y removida de la gasificación de biomasa es relativamente baja, cerca de un 1 – 2% del peso del alimento seco. Su remoción del sistema depende del tipo de gasificador y corresponde al sistema de remoción primario. Por ejemplo, los gasificadores de lecho fijo tienen una rejilla giratoria con hélice o descarga mecánica en la base del reactor; gasificadores de lecho fluidizado tienen un arreglo de sobreflujo o extracción del lecho como una purga, mientras el lecho fluido circulante se aparta de la corriente en un lugar apropiado en el circuito. Cada proceso tendrá su propio sistema y su fiabilidad es función de la experiencia adquirida por el desarrollador y el método de eliminación de ceniza. Los métodos secundarios y terciarios para la remoción de ceniza se derivarán de ciclones, filtros de gas caliente y sistemas de lavado con agua. A parte de los sistemas de filtros de gas caliente, donde se ha obtenido poca experiencia en su operación, los demás son bien conocidos y confiables.

2.3.4 ENFRIAMIENTO DEL GAS

El propósito del enfriamiento del gas es disminuir la temperatura del gas productor para reunir las condiciones de operación óptimas para el tratamiento del gas. Generalmente, la temperatura de la descarga del reactor está entre 500 – 800°C, está corriente es enfriada a un nivel más bajo sobre 600 – 100°C, de esta forma se puede llevar a cabo la filtración de partículas en seco con filtros cerámica o tela. Para la utilización del gas, una temperatura por debajo de los 40°C es requerida para lograr una eficiencia volumétrica tan alta como sea posible en los motores de gas; entonces enfriadores adecuados tienen que ser instalados, los cuales permitan disminuir la temperatura del gas a un nivel estable y por debajo del punto de rocío.

El límite inferior del rango de temperatura es restringido por el nivel de temperatura del disipador de calor, esto significa que existen ciertas limitaciones en las líneas de retorno de temperatura del sistema de calentamiento o en la temperatura ambiente, cuando se requiere un sistema auxiliar de refrigeración abierto. El disipador de calor abierto es posible, pero no deseable respecto a una utilización eficiente de la biomasa y tiene que ser equilibrado con las directrices sobre energía suficiente presupuestada y uso sostenible de la energía.

El enfriamiento del gas entonces demanda encontrar el arreglo de varios intercambiadores de calor de acuerdo con los requerimientos de la aplicación y su uso eficiente.

A continuación se mencionan algunos puntos importantes que deben considerarse:

- ✓ El calor utilizable, hasta donde sea posible, debe extraerse satisfactoriamente y no debe destruirse a través de dispositivos de bajo nivel de eficiencia.

- ✓ Las condiciones para el enfriamiento del gas están definidas por las características del gas producido y los requerimientos aguas abajo para la depuración del gas.
- ✓ Seleccionar el tipo de intercambiador de calor más conveniente.
- ✓ Seleccionar dispositivos adicionales relacionados al proceso de soporte de la operación de encendido y apagado.
- ✓ Tener en cuenta requerimientos especiales y específicos como carga de ceniza, polvo y alquitrán, con el fin de establecer las instalaciones de regeneración y las propiedades erosivas del gas a enfriar.
- ✓ Pérdidas de presión en el intercambiador de calor sobre el lado del gas.
- ✓ Mantener el nivel de temperatura a través de un proceso controlado de regulación en los respectivos componentes del sistema, con el fin de prevenir el bloqueo de la tubería debido a la condensación de componentes de alquitrán.

2.3.5 DEPURACIÓN DEL GAS

La depuración del gas permite obtener cualidades constantes en el gas independiente de la contaminación del gas producido debido a procesos discontinuos en el generador de gas (gasificador) y en las características de la biomasa.

La depuración tiene la tarea de eliminar el polvo del gas producido, así como también, asegurar la pureza adecuada respecto al contenido de alquitrán. Existen dos formas posibles para conseguirlo; en primer lugar, sistemas combinados de eliminación de polvo y depuración del gas mediante columnas de lavado y en segundo lugar, sistemas independientes de eliminación de polvo y depuración del

gas, lo cual significa que primero se realiza una filtración en caliente para eliminar las partículas, seguida de una depuración del gas de los compuestos alquitranados. Una especial atención debe ser puesta sobre los costos requeridos para la separación de mezclas, transformación y disposición, por ejemplo el tratamiento de aguas residuales.

Existen algunos puntos importantes que deben ser considerados:

- ✓ La toxicidad de los materiales depurados y de los materiales separados del gas.
- ✓ Implementación de procesos para el tratamiento y manejo de los productos secundarios.
- ✓ Monitoreo de la calidad del gas depurado.
- ✓ Pérdidas de presión del lado del gas y aplicación de la diferencia de presión necesaria para transportar el gas al motor por medio de un soplador.
- ✓ Requerimiento de energía para el durado del gas (Eficiencia total de la planta).
- ✓ Procesar el gas productor hasta garantizar el cumplimiento de los mínimos parámetros para el uso de gas. La Tabla 5 compara el contenido de partículas y alquitrán de un gasificador de flujo descendente frente a las exigencias para utilizar el gas por un motor.

	Propiedades Gas Producido mg / m ³	Propiedades Gas Depurado mg / m ³
Partículas	100 – 1000	Al menos < 50 Si es posible < 5
Alquitrán	100 – 500	Al menos < 50 Si es posible < 25

Tabla No. 5. Propiedades del Gas

Fuente: Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern (CH)1997, 153 Seiten, 1997.

- ✓ Tratamiento de los residuos producidos.
- ✓ Medición de los parámetros de operación de la respectiva tecnología empleada.

2.3.5.1 Depuración del Gas Seco

El propósito de la depuración del gas seco es la remoción de material particulado del gas para reducir los problemas en las etapas siguientes del proceso en cadena, por ejemplo enfriamiento del gas y utilización. La depuración del gas seco puede ser dividida en dos; primero, purificación del gas caliente con filtros resistentes al calor (las temperaturas típicas del gas producido están sobre los 500°C y antes del enfriamiento del gas) y en la depuración del gas en filtros de tela (típicamente por debajo de los 200°C y después del enfriamiento del gas).

Los elementos filtrantes para la depuración del gas caliente típicamente consisten en cerámica porosa o materiales de metal sinterizado. Este método es principalmente de interés cuando el gas va a ser utilizado a altas temperaturas como en turbinas de gas o celdas de combustible; y, en segundo lugar, este puede ser interesante para disminuir la carga de partículas en los intercambiadores de calor durante el enfriamiento del gas.

La condensación de alquitrán se previene manteniendo a una temperatura mínima el gas producido; mediante la adición de adsorbentes, lo cual también ayuda a reducir el contenido de alquitrán en ciertos rangos de temperatura y concentración. La condensación excesiva de alquitrán daría lugar a fallos en el funcionamiento por la regeneración de la superficie del sistema de filtro y por ende el final de su vida útil.

Las etapas probables en el proceso de depuración del gas caliente pueden ser las siguientes:

- ✓ Ciclón – eliminación de polvo primaria antes del enfriamiento del gas.
- ✓ Filtro de Gas Caliente – eliminación de polvo fino antes del enfriamiento del gas.
- ✓ Filtro de Mangas – eliminación de polvo fino después del enfriamiento.
- ✓ Otros filtros – Filtro de lecho de arena o de lecho de carbón activado.

Puntos importantes a ser considerados:

- ✓ Componentes altamente tensionados cerca del proceso primario en caliente de eliminación de polvo precedente al enfriamiento del gas.
- ✓ Control de la temperatura en el filtro de polvo porque una temperatura muy alta daña las unidades del filtro y una muy baja produce condensación del alquitrán.
- ✓ Selección del dispositivo de regeneración y del agente regenerador.
- ✓ Requerimiento de potencia auxiliar para los dispositivos auxiliares de calentamiento y los sopladores para el transporte del gas.
- ✓ Remoción y reciclaje de los agentes de depuración del gas (hollín, cenizas, polvo).
- ✓ Elaboración de los manuales de operación y mantenimiento del sistema de depuración.

2.3.5.2 Depuración del Gas Húmedo

Es la purificación del gas por medio de agentes líquidos de lavado en un sistema adecuado. El efecto de depuración se lleva a cabo por la adhesión y disolución de los contaminantes en el agente de lavado. Este tipo de depuración, además, cumple la función de enfriamiento del gas a causa del intercambio de calor entre el

gas y el agente debido al contacto intensivo y la remoción de calor a través de los intercambiadores de calor. Agentes de lavado utilizados son agua, agua / aceite, emulsiones, condensados y varios hidrocarburos.

Después de la depuración del gas húmedo, el gas puede ser utilizado para la producción combinada de calor y potencia, por ejemplo en motores de gas, turbinas o celdas de combustible como la unidad de conversión.

A continuación se hace referencia de algunos puntos a considerar:

- ✓ Resistencia química de los materiales a los diferentes agentes (condensados, hidrocarburos, alcoholes, compuestos alcalinos y/o ácidos).
- ✓ Procesamiento, transporte, almacenaje y disposición si es aplicable, de los residuos generados.
- ✓ Monitoreo de la temperatura de los agentes de lavado y del gas.

2.4 CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE PARA EL GASIFICADOR⁶

Cualquier material carbonoso o biomasa puede ser gasificado sobre condiciones experimentales o de laboratorio. Sin embargo, la prueba real para un buen gasificador no es únicamente poder producir un gas combustible a partir de la combustión de biomasa con 20 – 40% del aire estequiométrico sino hacerlo de tal forma que sea atractivo desde el punto de vista económico. Con el fin de alcanzar este objetivo, las características del combustible tienen que ser evaluadas antes de llevar a cabo el proceso de combustión.

Así un combustible puede ser clasificado como bueno o malo de acuerdo con los siguientes parámetros:

⁶ Tomado: Biomass Gasification. Maharashtra, India. 2002

- ✓ **Contenido de Energía del Combustible y Densidad Aparente.** Entre más alto sea el contenido de energía y la densidad aparente del combustible, consecuentemente el volumen del gasificador es similar para una carga con el fin de obtener potencia por más tiempo.

- ✓ **Contenido de Humedad.** Este valor es determinado por el tipo de combustible, su origen y tratamiento. Es deseable utilizar un combustible con bajo contenido de humedad porque las pérdidas de calor debidas a la evaporación antes de la gasificación son considerables y el balance de energía durante el proceso de gasificación es afectado. Por ejemplo, para un combustible a 25°C y una temperatura de salida del gas crudo del gasificador de 300°C, 2875 KJ/Kg de humedad debe ser suministrada por el combustible para calentar y evaporar la humedad.

Además de afectar el balance de energía en el gasificador, un alto contenido de humedad también aumenta la carga sobre el enfriamiento y la filtración por aumento en la caída de presión a través de estas unidades causada por la condensación de líquido.

Con el fin de reducir el contenido de humedad del combustible se requieren algunos pretratamientos. Generalmente, un contenido de humedad manejable debe ser menor al 20%.

- ✓ **Contenido de Polvo.** Todos los gasificadores de combustible producen polvo. Este puede causar molestias, ya que puede obstruir las partes internas del motor de combustión y por lo tanto tiene que ser removido. Además, aumenta la carga de los filtros requiriendo realizar mantenimiento con mayor frecuencia.

El diseño del gasificador debe ser tal que no produzca más de 2 - 6 g/m³ de polvo.

- ✓ **Contenido de Alquitrán.** Es uno de los constituyentes más indeseados del gas ya que este tiende a depositarse en el carburador y la válvula de admisión y causar problemas en la operación. Es producto de un proceso de alta irreversibilidad que toma lugar en la zona de pirólisis. Las propiedades físicas del alquitrán depende de la temperatura y flujo de calor; su apariencia va desde el color café y acuoso (60% de agua) hasta el negro y altamente viscoso (7% de agua). Existen aproximadamente 200 químicos que han sido identificados como constituyentes del alquitrán hasta ahora.

Muy pocos trabajos de investigación han sido desarrollados con el fin de remover o quemar el alquitrán en el gasificador para obtener un gas de salida prácticamente libre de alquitrán. Los mayores esfuerzos han sido enfocados hacia la depuración mediante filtros y enfriadores.

Un gasificador bien diseñado debe producir menos de un 1 g/m³ de alquitrán.

- ✓ **Contenido de Ceniza y Escoria.** El contenido mineral en el combustible que permanece en la forma oxidada después de la combustión completa es usualmente llamada ceniza. El contenido y composición de la ceniza de un combustible tiene un mayor impacto en la operación libre de problemas del gasificador.

La ceniza básicamente interfiere con el proceso de gasificación de dos maneras:

- Esta puede fusionarse para formar la escoria y este clinker impide o inhibe el flujo de biomasa.

- Si este no se fusiona, la ceniza se alberga en los puntos dentro del combustible donde se inicia la ignición haciendo que disminuya la respuesta a la reacción por parte del combustible.

La remoción de ceniza y alquitrán son los procesos más importantes en el proceso de gasificación para su buen funcionamiento. Se han desarrollado diversos sistemas para la remoción de ceniza; de hecho algunos combustibles con alto contenido de ceniza pueden ser fácilmente gasificados si un sistema de remoción de ceniza adecuado es instalado en el gasificador.

La formación de la escoria puede ser superada mediante dos formas de operar el gasificador.

- Operación a baja temperatura de tal forma que se mantiene la temperatura por debajo de la temperatura de flujo de ceniza.
- Operación a alta temperatura para mantener la temperatura por encima del punto de fusión de la ceniza.

El primer método es normalmente logrado por inyección de agua o vapor mientras el segundo requiere provisiones para aprovechar la escoria fundida fuera de la zona de oxidación. Cada método tiene sus ventajas y desventajas y su uso depende del combustible y del tipo de gasificador.

Teniendo presentes las características del combustible mencionadas anteriormente, únicamente dos combustibles han sido completamente probados, estos son carbón de leña y madera; ya que estos fueron los combustibles más utilizados durante la Segunda Guerra Mundial y los países europeos han desarrollado los mecanismos adecuados para asegurar el control de calidad sobre estos.

El carbón de leña, especialmente, porque es libre de alquitrán y con un contenido bajo de ceniza fue el combustible preferido durante la Segunda Guerra Mundial y aún lo sigue siendo. Sin embargo, existe una gran desventaja del carbón de leña en términos de energía; ya que éste es principalmente producido de madera y durante la conversión cerca del 50% de la energía original es pérdida. Además, con la actual crisis energética donde muchos países no tienen suficiente cantidad de madera disponible, el uso de residuos de la agricultura es ventajoso y atractivo. Por esta razón, muchos residuos agrícolas se han utilizado como combustible para gasificación a pesar de la experiencia limitada en el área. La siguiente tabla muestra las características del combustible de diferentes combustibles en un proceso de corriente descendente.

Combustible	Tratamiento, Densidad Aparentes y Humedad	Alquitrán Producido g / m ³	Contenido Ceniza %	Observación
Cascarilla de Alfalfa	Cubitos 298 Kg / m ³ 7,9	2,33	6	No formación de Escoria
Cascarilla de Frijol	Cubitos 440 Kg / m ³ 13%	1,97	10,2	Formación severa de escoria
Cascarilla de Cebada	Cubitos 299 Kg / m ³ 4%	0	10,3	Formación de escoria
Cáscara de Coco	Triturada 435 Kg / m ³ 11,8%	3	0,8	No formación de escoria
Cáscara de Coco	Piezas (2 – 5 cm) 65 Kg / m ³	Insignificante	3.4	Escoria en la parrilla pero no problema operacional
Mazorca de Maíz	304 Kg / m ³ 11%	7,24	1,5	No formación de escoria
Forraje de Maíz	Cubitos 390 Kg / m ³ 11,9	1,43	6,1	Formación severa de escoria

Tallos de Algodón	Cubitos 259 Kg / m ³ 20,6%	5	17,2	Formación severa de escoria
Pepa de Durazno	Secados al sol 474 Kg / m ³ 10,9%	1,1	0,9	No formación de escoria

Tabla No. 6. Características del Combustible de Gasificación.
Fuente: Biomass Gasification. Maharashtra, India. 2002

2.5 TIPOS DE GASIFICADORES⁷

Una gran variedad de tipos de gasificadores de biomasa se han desarrollado. Estos pueden ser agrupados en tres grandes clasificaciones: lecho fijo, lecho fluidizado y lecho arrastrado. Las diferencias están basadas en los medios de soporte de la biomasa en el reactor, la dirección de flujo de la biomasa y del agente oxidante, y la forma como se suministra el calor al reactor. La tabla 7 muestra las configuraciones más utilizadas.

Tipo de Gasificador	Dirección de Flujo		Soporte	Fuente de Calor
	Biomasa	Oxidante		
Lecho Fijo de Corriente Ascendente	Descendente	Ascendente	Parrilla	Combustión del char
Lecho Fijo de Corriente Descendente	Descendente	Descendente	Parrilla	Combustión parcial de volátiles
Lecho Fluido Burbujeante	Ascendente	Ascendente	Ninguno	Combustión parcial de volátiles y char
Lecho Fluido Circulante	Ascendente	Ascendente	Ninguno	Combustión parcial de volátiles y char

Tabla No. 7 Clasificación de los Gasificadores.

Fuente: Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals and Hydrogen Production. U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory. 2002.

⁷ Tomado: Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals and Hydrogen Production. U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory. 2002.

2.5.1 LECHO FIJO

Los gasificadores de lecho fijo suelen tener una parrilla para soportar la materia prima y mantener una zona de reacción fija. Estos son relativamente fáciles de diseñar y operar, y por lo tanto muy útiles para la obtención de energía térmica y potencia a pequeña y mediana escala. Sin embargo, estos tienen un inconveniente, mantener uniforme la temperatura de operación y asegurar un adecuado mezclado del gas en la zona de reacción. Como resultado, los rendimientos de gas pueden ser impredecibles y no son óptimos para propósitos de producción de potencia a gran escala, es decir más de 1 MW. Los dos principales tipos de gasificadores de lecho fijo son de corriente ascendente y corriente descendente.

2.5.1.1 Corriente Ascendente

También conocida como gasificación en contracorriente, esta configuración es la más antigua y sencilla forma de un gasificador. La biomasa ingresa por la parte superior del reactor y una parrilla en la parte inferior del reactor soporta el lecho reactante. El agente oxidante (Aire, oxígeno o vapor) es introducido por la parte inferior de la parrilla y difundido a través del lecho de biomasa y char. Ver figura 2.

A medida que la biomasa fluye hacia abajo a través del reactor esta se seca, piroliza, gasifica y combustiona. La combustión completa toma lugar en la parte inferior del lecho, liberando CO_2 y H_2O , estos gases calientes (temperatura cercana a los 1000°C) pasan a través del lecho superior, donde son reducidos a H_2 y CO y enfriados a 750°C . Continuando hacia la parte superior del reactor, los gases reducidos pirolizan la biomasa seca descendente y finalmente secan la biomasa húmeda que está ingresando, dejando el reactor a temperaturas inferiores a los 500°C . La ceniza es removida de la parte inferior del reactor.

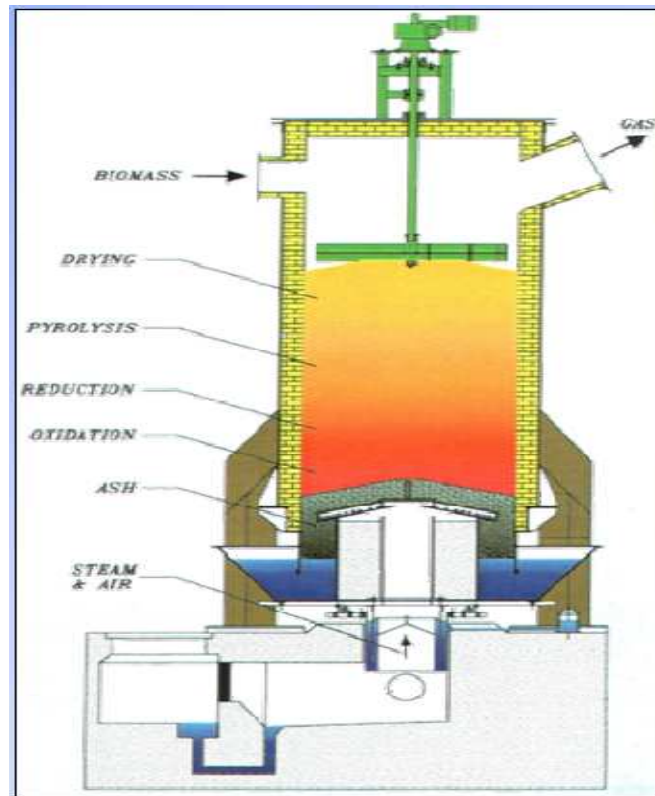


Figura No. 2 Gasificación de Lecho Fijo en Contracorriente.

Fuente: Aprovechamiento Termoquímico de la Biomasa. Instituto de Investigación de Aragón. Universidad de Zaragoza. Julio de 2009.

El gas producido es rico en alquitrán; para aplicaciones de calentamiento, este no es un problema siempre y cuando el bloqueo de la tubería sea manejable pero para producción de potencia este gasificador es un candidato poco probable debido al amplio requerimiento de eliminación de alquitrán.

Por esta razón, el uso principal de este tipo de gasificador es su uso directo en calderas y hornos, porque el gas abandona el gasificador a una temperatura relativamente baja (típicamente inferior a los 500°C), el proceso tiene una alta eficiencia térmica y, como resultado, biomasa con contenido de humedad de 50% puede ser utilizado sin realizar un tratamiento de secado previo. Además, las especificaciones de tamaño del combustible no son críticas.

La Tabla 8, muestra los requerimientos fundamentales del combustible para un gasificador de lecho fijo de corriente ascendente.

Propiedad	Valor
Contenido de Agua	<40% masa, húmeda
Tamaño del Grano	0,5 - 20 cm
Proporción de Partículas Finas	< 30 % masa, húmeda ($\leq 5\text{mm}$)
Contenido de Ceniza	< 6 % masa, seca

Tabla No. 8. Requerimientos de Calidad del Combustible.

Fuente: Biomass Gasification – State of the Art Description. Institute of Thermal Engineering. Austria – December 2007.

2.5.1.2 Corriente Descendente

Los gasificadores de corriente descendente tienen una larga historia de uso en automóviles y buses para producir un gas derivado de la madera para los motores de combustión interna.

También conocido como gasificación en corriente paralela, el gasificador de corriente descendente tiene la misma configuración mecánica que el de corriente ascendente excepto que el agente oxidante y el gas producido fluyen en la misma dirección de la biomasa. Ver figura 3.

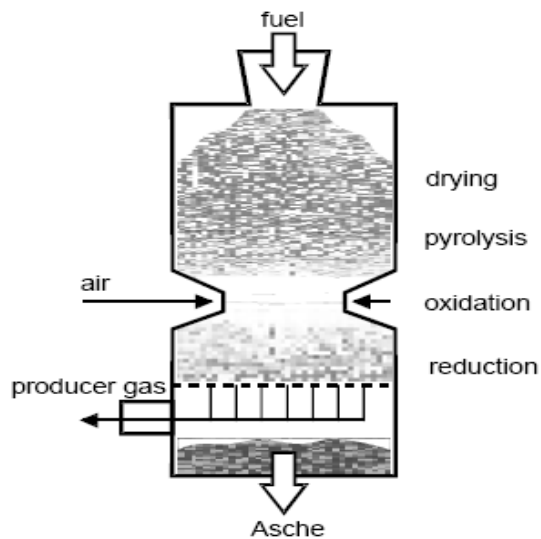


Figura No. 3. Gasificación de Lecho Fijo en Paralelo.

Fuente: Aprovechamiento Termoquímico de la Biomasa. Instituto de Investigación de Aragón. Universidad de Zaragoza. Julio de 2009.

Una mayor diferencia es que en este proceso se puede quemar hasta el 99,9% del alquitrán formado. La biomasa de bajo contenido de humedad (<20%) y el agente oxidante son encendidos en la zona de reacción en la parte superior del reactor. Las llamas generan gas / vapor de pirólisis, el cual quema intensamente dejando 5 a 15% de carbón y un gas de combustión caliente. Estos gases fluyen hacia abajo y reaccionan con el char a temperaturas entre 800 hasta 1200°C, generando más CO y H₂ mientras el gas es enfriado por debajo de lo 800°C. Finalmente, el char no convertido y la ceniza pasan a través de la parrilla ubicada en la parte inferior del reactor y son enviados a disposición.

Durante el proceso se obtiene un gas de bajo contenido de alquitrán, por lo tanto para obtener un gas adecuado para un motor de combustión interna se requiere únicamente aplicar un proceso sencillo de enfriamiento y filtración.

Este tipo de gasificadores no son ideales para tratamiento de residuos porque requieren un combustible de bajo contenido de ceniza para evitar obstrucciones. Además, ampliar su capacidad más allá de un 1MW es muy complicado a causa de la geometría de la sección de garganta. La Tabla 9, muestra los requerimientos fundamentales del combustible para un gasificador de lecho fijo de corriente descendente.

Propiedad	Valor
Contenido de Agua	10 - 25% <small>masa, húmeda</small>
Tamaño del Grano	2 - 20 cm
Proporción de Partículas Finas	< 15 % <small>masa, húmeda</small> ($\leq 5\text{mm}$)
Contenido de Ceniza	< 6 % <small>masa, seca</small>

Tabla No. 9 Requerimientos de Calidad del Combustible.

Fuente: Biomass Gasification – State of the Art Description. Institute of Thermal Engineering. Austria – December 2007.

2.5.2 LECHO FLUIDIZADO

Los gasificadores de lecho fluidizado ofrecen el mejor diseño para el reactor de gasificación. En un lecho fluidizado, el material inerte y el combustible sólidos son fluidizados a través de una corriente de gas que pasa hacia la parte superior del lecho; este gas actúa como medio de fluidización y como agente oxidante. Un lecho fluidizado se comporta como un líquido en ebullición y tiene algunas de las características físicas de un fluido.

Los lechos fluidizados tienen la ventaja de generar un buen mezclado y una alta transferencia de calor, resultando en condiciones muy uniformes y eficiencia en las reacciones. Los dos principales tipos de lechos fluidizados son lecho fluidizado burbujeante y circulante.

2.5.2.1 Burbujeante

En los lechos fluidizados burbujeantes, la velocidad del gas debe ser lo suficientemente alta para que las partículas sólidas y el material comprimido del lecho sean elevados, haciendo que el lecho se expanda y generando burbujeo como en los líquidos. El reactor de lecho burbujeante típicamente tiene una cámara cilíndrica o rectangular, diseñado para que el contacto entre el gas y el sólido facilite el secado y la reducción de tamaño. La gran masa de arena (inercia térmica) en comparación con el gas estabiliza la temperatura del lecho. Ver fig. 4.

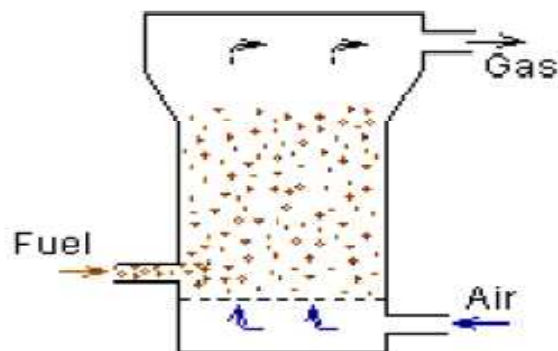


Figura No. 4 Gasificación de Lecho Burbujeante

Fuente: Gasification: An Alternative Process for Energy Recovery and Disposal of Municipal Solid Wastes. Department of Earth and Environmental Engineering Fu Foundation School of Engineering and Applied Science. Columbia University. May 2002

La temperatura del lecho es controlada para lograr una combustión completa, mientras se mantiene la temperatura por debajo del punto de fusión de la ceniza producida. Una vez la biomasa es introducida en el lecho, la mayoría de los

componentes orgánicos se vaporizan pirolíticamente y son parcialmente quemados en el lecho. La combustión exotérmica suministra el calor para mantener la temperatura del lecho y volatilizar la nueva biomasa que ingresa.

El lecho puede ser diseñado y operado para fijar el flujo del alimento relativamente alto respecto al suministro de aire, de tal forma que el flujo de aire sea menor que la cantidad de oxígeno teórico necesario para la oxidación total del alimento. Bajo estas condiciones, el gas y el sólido producidos abandonan el lecho sin reaccionar. El poder calorífico del gas y el alquitrán producidos aumentan como la entrada de aire al lecho disminuye. El rango de temperatura de operación deseado desde 900° - 1000°C.

2.5.2.2 Circulante

A medida que la velocidad del gas aumenta en una cámara de fluido turbulento, el lecho de sólidos continúa expandiéndose, y una fracción en aumento de las partículas es soplada fuera del lecho. Un colector de partículas puede ser usado para capturar la mayor parte de las partículas que regresan al lecho. Un lecho fluido circulante es diferenciado de un lecho fluido burbujeante en que no existe una separación clara entre la zona densa de sólidos y la zona fluida. Ver figura 5.

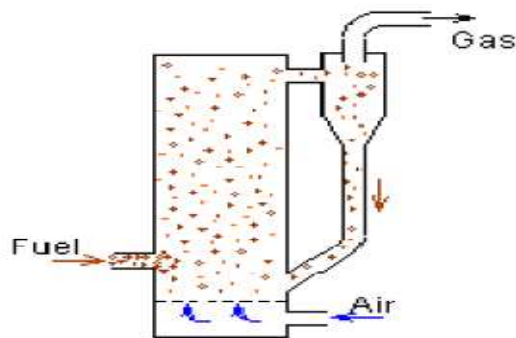


Figura No. 5. Gasificación de Lecho Circulante

Fuente: Gasification: An Alternative Process for Energy Recovery and Disposal of Municipal Solid Wastes. Department of Earth and Environmental Engineering Fu Foundation School of Engineering and Applied Science. Columbia University. May 2002

La densidad del lecho circulante esta en el orden de los 560 Kg/m frente a 720 Kg/m del lecho burbujeante. La distribución del tamaño de partícula, la velocidad de contacto de los sólidos y la velocidad del gas determinan el tiempo de residencia óptimo de los sólidos en el lecho circulante.

Una de las principales ventajas del lecho circulante es su capacidad para procesar materias primas con alta heterogeneidad en cuanto a composición y contenido de humedad. A diferencia del lecho burbujeante donde la aglomeración es un factor preocupante porque puede defluidizar el sistema, razón por la cual combustibles con alto contenido alcalino no se utilizan.

2.5.3 LECHO ARRASTRADO

Con la gasificación en flujo arrastrado, una capa de sólido de grano fino, cuyo tamaño es generalmente menor a 0,1 mm, es transportada a través del reactor junto con el medio de gasificación y así gasificada. Ver figura 6

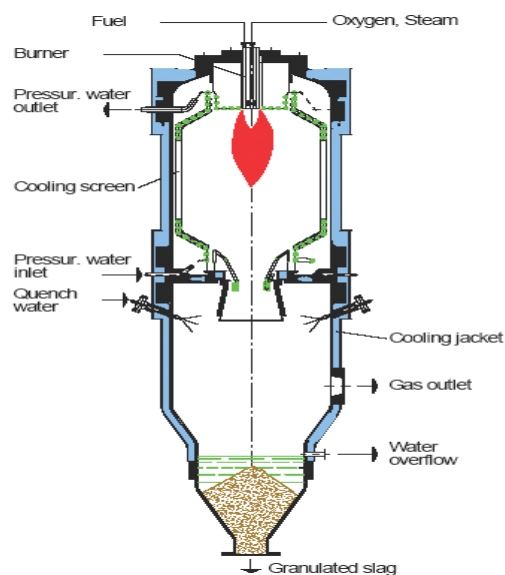


Figura No. 6. Gasificación de Flujo Arrastrado

Fuente: Biomass Gasification – State of the Art Description. Institute of Thermal Engineering. Austria – December 2007.

El medio de gasificación depende del proceso escogido, aire u oxígeno. El tiempo de retención es de poco segundos, y por ende la gasificación tiene que tomar lugar rápidamente a una temperatura entre 1200 y 1500°C. Las altas temperaturas aseguran una conversión completa de los hidrocarburos producidos ya que la pirólisis y la gasificación toman lugar simultáneamente. La reactividad del combustible en relación con las reacciones heterogéneas gas/sólido es un factor secundario porque la capa límite determina la velocidad del proceso. A continuación, en la tabla 10 se presenta un resumen de las características de los principales tipo de gasificadores.

Tipo de Gasificador	Características
Lecho Fijo Ascendente	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción sencilla y robusta • Altos tiempos de residencia de los sólidos. • Baja temperatura del gas producido • Alta eficiencia térmica y alta conversión de carbón • Acarrea bajo contenido de ceniza • Gas con altos niveles de alquitrán
Lecho Fijo Descendente	<ul style="list-style-type: none"> • Altos tiempos de residencia de los sólidos. • Alta conversión de carbón • Acarrea bajo contenido de ceniza • Específico a las características de la materia prima. • Posible fusión de la ceniza y formación de clinker en la parrilla. • Baja capacidad • Se requiere un sistema robusto de depuración de gas.
Lecho Fluido - Burbujeante	<ul style="list-style-type: none"> • Buen control de temperatura y altos flujos de reacción • Niveles moderados de alquitrán • Buen contacto gas – sólido • Alta tolerancia a las variaciones de la calidad del alimento • Alto contenido de material particulado en el gas • Gran capacidad • Puede operar con carga parcial
Lecho Fluido - Circulante	<ul style="list-style-type: none"> • Buen control de temperatura y altos flujos de reacción • Niveles moderados de alquitrán • Construcción y operación simple • Buen contacto gas – sólido y alta conversión de carbón
Flujo Arrastrado	<ul style="list-style-type: none"> • Altas temperaturas producen un gas de buena calidad pero bajo poder calorífico • Únicamente para aplicaciones de gran escala (10 t/h) • Produce un gas libre de alquitrán y alta conversión • Buen contacto gas – sólido

Tabla No. 10. Ventajas y Desventajas de los Gasificadores.

Fuente: Biomass Gasification. Maharashtra, India. 2002

3 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE BIOMASA VÍA GASIFICACIÓN EN AGUA SUPERCRÍTICA

Recientemente, debido a consideraciones ambientales así como también al aumento de la demanda de energía en el mundo, mayor atención se ha inferido al desarrollo de nuevas fuentes de energía como por ejemplo el hidrógeno, el cual será un importante combustible a ser usado como acarreados de energía en el futuro para vehículos y plantas de generación de electricidad.

Como es muy bien sabido, el hidrógeno es renovable y se encuentra como compuesto en el agua, los combustibles fósiles y la biomasa. Comparado con los combustibles fósiles, la biomasa para producción de hidrógeno puede llevar a cero emisiones de Dióxido de Carbono (CO_2) en un ciclo de vida muy corto que va desde el carbono en forma de CO_2 y la conversión de este en energía por medio de la fotosíntesis en el proceso de crecimiento de la biomasa.

Además, la biomasa tiende a ser la fuente de energía mayoritaria para la humanidad, contribuyendo hoy día con cerca del 10-14% del suministro de energía en el mundo, siendo el Hidrógeno el 6% en peso de biomasa seca. Para obtener hidrógeno a partir de biomasa, pirólisis o gasificación pueden ser utilizadas, proceso que producen un gas con un contenido en volumen de hidrógeno aproximado de 20% el cual puede ser reformado para obtener una corriente de alta pureza.

Sin embargo, una porción grande de biomasa tiene un alto contenido de humedad cercana al 95% lo cual incrementa los costos de secado si se usa un proceso de gasificación clásico. Por esta razón, la producción de hidrógeno vía gasificación de biomasa en agua supercrítica (SCW) es una tecnología muy promisoría.

3.1 PROPIEDADES DEL AGUA SUPERCRÍTICA

Agua a condiciones de temperatura crítica, 374.1 °C y presión crítica, 22.1 MPa es conocida como “Agua Supercrítica”. Agua por debajo de la temperatura crítica pero a una presión superior a su presión de saturación es referida como “Agua Subcrítica”. Por debajo de su presión de saturación y temperatura crítica es llamada “Vapor Subcrítico”. Similarmente, por debajo de la presión crítica, el agua podría ser llamada “Vapor Subcrítico” si su temperatura esta sobre a la temperatura crítica. (Ver Figura 7).

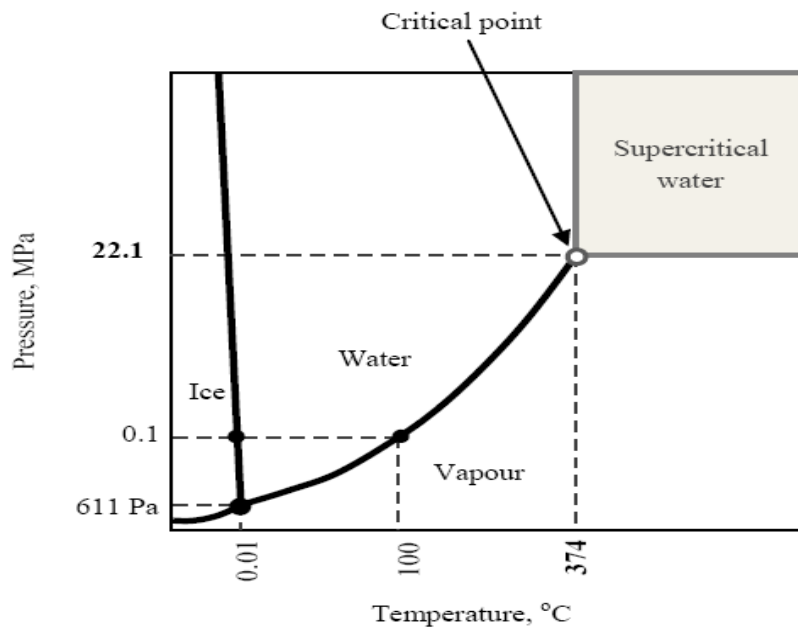


Figura No. 7 Diagrama de Fase del Agua

Fuente: Biomass Gasification in Supercritical Water. International Journal of Chemical Reactor Engineering. Volumen 7. 2009.

Sobre la presión crítica, en lugar de tener un punto de ebullición como a la presión subcrítica, el agua tendría una temperatura pseudocrítica, donde el agua experimenta una transición de líquido a gas. La temperatura pseudocrítica para una presión supercrítica dada puede ser estimada por la siguiente relación, la cual es válida hasta 80 MPa.

$$\frac{T_{sc}}{T_c} = \left(\frac{P}{P_c} \right)^F$$

Donde,

$$T_{sc} > T_c, P > P_c$$

$$F = 0.1248 + 0.01424 \left(\frac{P}{P_c} \right) - 0.0026 \left(\frac{P}{P_c} \right)^2$$

En la esquina superior derecha de la Figura 7, el área sombreada indica la región de agua supercrítica. Cuando agua a presión atmosférica (Agua Subcrítica), es calentada sobre su temperatura de saturación sufre cambio de fase de líquido a vapor con una marcada variación en la densidad (958 Kg/m³ a 99 °C hasta 0.55 Kg/m³ a 124°C, @ 0,1 Mpa).

Sobre la presión crítica el cambio en la densidad del agua es leve a través de su temperatura pseudocrítica, donde un estado de transición de líquido a vapor toma lugar. Por ejemplo, a presión supercrítica de 25 Mpa, la densidad del agua se reduce de 630 Kg/m³ a 350°C hasta 170 Kg/m³ a 400°C. Sobre la presión crítica se evita el cambio convencional de fase a través de la ebullición, de esta forma la energía adicional requerida (Calor de Vaporización) para el cambio de fase en presión subcrítica no es necesaria. Esta propiedad es especialmente importante para la recuperación de calor del agua supercrítica a través de un intercambiador de calor donde la diferencia de temperatura entre las dos corrientes es la fuerza impulsora porque sin el calor latente durante la transferencia de energía los cambios en temperatura son menores. Esto hace que la eficiencia de un intercambiador de calor sea mayor. Por esta razón, una gran parte del calor requerido para calentar el agua hasta la temperatura de operación para el proceso de Gasificación en Agua Supercrítica (600°C) puede ser recuperada.

La densidad, la viscosidad y la constante dieléctrica son las tres principales propiedades que influyen la gasificación de biomasa y, el agua supercrítica tiene valores favorables de estas propiedades y serán discutidas brevemente a continuación.

El agua en el estado supercrítico posee valores de viscosidad como el gas y de densidad como el líquido. Un valor bajo de viscosidad favorece la transferencia de masa y una densidad como líquido promueve una mejor solvatación. Por otro lado, la constante dieléctrica es muy baja, por ejemplo, a 25 MPa, la constante dieléctrica del agua cae de 80 a temperatura ambiente hasta 2 a 450°C. Ver Figura 8.

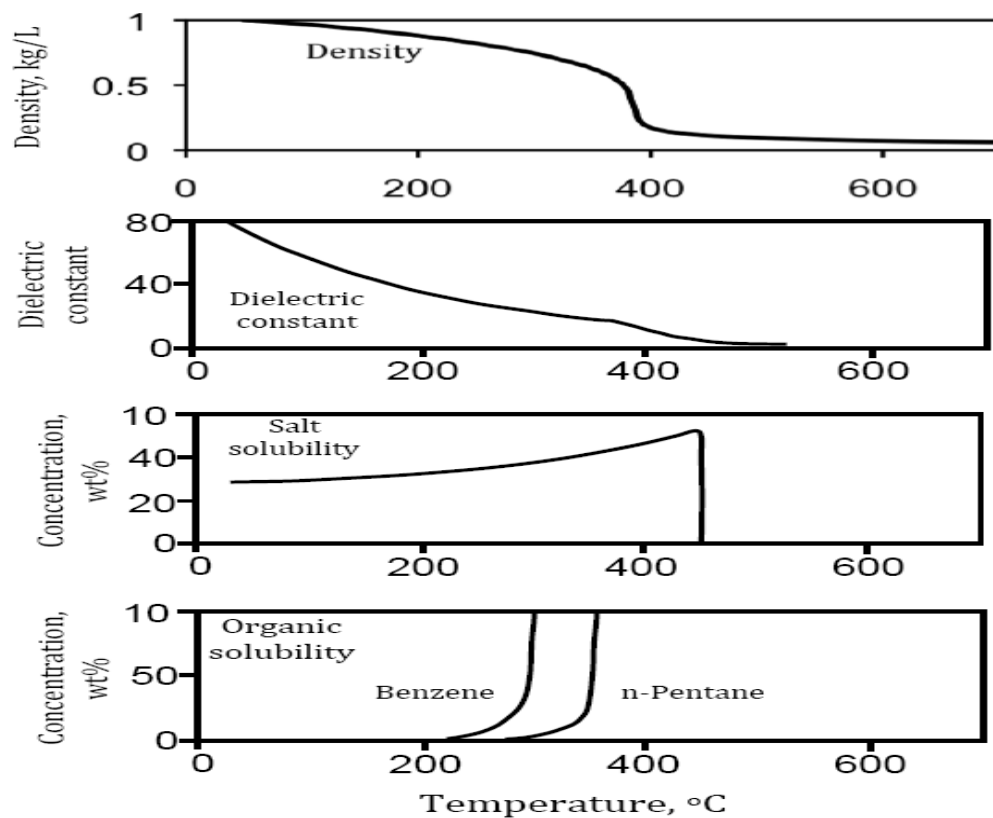


Figura No. 8. Propiedades del Agua @ 25.3 MPa

Fuente: Biomass Gasification in Supercritical Water. International Journal of Chemical Reactor Engineering. Volumen 7. 2009.

Existe una gran diferencia en densidad entre estas dos condiciones. Una implicación del cambio de densidad es que cuando esta decrece, el número de enlaces de hidrógeno cae, y su fuerza se debilita lo cual se manifiesta en un menor valor de la constante dieléctrica. Esto hace que el agua siendo un solvente altamente polar a temperatura ambiente (o a condiciones subcríticas), en la región supercrítica sea un solvente no polar.

El agua supercrítica es, entonces, un buen solvente para compuestos orgánicos no polares como benceno, n-pentano, entre otros, los cuales tienen una muy baja solubilidad a condiciones subcríticas. Esta propiedad podría permitir que diferentes compuestos orgánicos incluso materiales lignocelulósicos sean rápidamente disueltos en agua supercrítica y, por consiguiente romper el límite de la interface durante la gasificación. Una vez, disueltos, el agua supercrítica romperá eficientemente los enlaces de celulosa promoviendo la formación de productos gaseosos eficazmente. Esto hace al agua supercrítica un mejor medio de reacción en el cual el mezclado es rápido y los materiales orgánicos se disuelven satisfactoriamente.

Los gases como el CO_2 , CH_4 , H_2 , N_2 y aire son completamente miscibles en agua supercrítica; los compuestos polares inorgánicos como KCl , NaCl , CaSO_4 , entre otros, los cuales tienen una alta solubilidad en agua subcrítica muestran una muy baja solubilidad en agua supercrítica, de esta forma se facilita su separación del producto final.

El agua supercrítica es caracterizada por una alta concentración de iones H^+ y OH^- , permitiendo que actúe como un catalizador ácido o básico en las reacciones. Teniendo en cuenta las propiedades del agua supercrítica, la gasificación en agua supercrítica es un excelente medio para la extracción de energía de la biomasa porque modificando la presión o la temperatura, se pueden cambiar las características del agua supercrítica, generando cambios en la química y cinética

de reacción dando como resultado final, productos con la concentración deseada y, debido a sus propiedades únicas el posible alcanzar el equilibrio termodinámico y altas velocidades de reacción.

Por todo lo anterior, la Gasificación en Agua Supercrítica permite conseguir alta conversión de sólidos (cerca del 99%), alta concentración de hidrógeno en el gas producido (cerca del 50%) e inhibir la formación de alquitrán y char. Adicionalmente, el gas producido puede ser almacenado o utilizado a alta presión obviando el costo de un compresor de gas.

3.2 PROCESO DE GASIFICACIÓN EN AGUA SUPERCRÍTICA

En la gasificación en agua supercrítica, el agua ayuda a romper grandes moléculas de biomasa en pequeñas moléculas como CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , entre otras; además, provee el medio de reacción y el hidrógeno necesario para la reacción de hidrólisis. La reacción global es endotérmica o levemente exotérmica. Una de las mayores características de esta gasificación es que si es llevada a cabo apropiadamente, la producción de char es mínima, y esta es una de las razones que generaron en principio mayor interés en este proceso.

El proceso de la gasificación en agua supercrítica es mostrado en la Figura 9, siendo este el diagrama de flujo típico.

Un gasificador supercrítico necesariamente requiere que el alimento y el agua sean presurizados a la presión supercrítica requerida. Para sobrellevar el problema de bombear sólidos fibrosos a alta presión, la biomasa podría convertirse en barro.

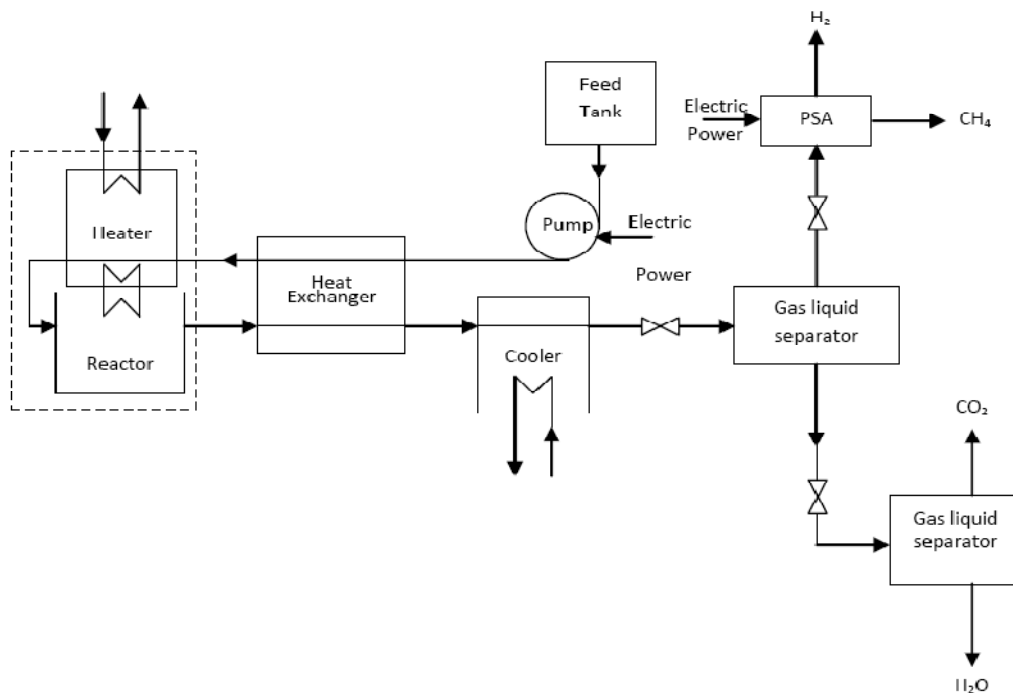


Figura No. 9 Diagrama de Flujo Proceso de Gasificación

Fuente: Biomass Gasification in Supercritical Water. International Journal of Chemical Reactor Engineering. Volumen 7. 2009.

El barro de biomasa bombeable es preparado en un tanque de alimentación mezclando la biomasa molida en agua con un agente emulsificante apropiado, una bomba de alta presión lleva el alimento al reactor, pasando antes por un intercambiador de calor donde se precalienta utilizando el calor del producto que sale del reactor. Este calor no es suficiente para alcanzar la temperatura de entrada del reactor, entonces antes de ingresar al reactor pasa por un calentador.

Después de la gasificación, el producto pasa a través del intercambiador de calor que precalienta el alimento, posteriormente es llevado a un enfriador para disminuir más su temperatura, y entonces a un separador gas – líquido de alta presión. La mezcla de gas podría llevarse a través de un equipo de purificación como un depurador y/o una unidad de adsorción. La fracción de líquido es

colectada del separador mientras la fracción de gas podría ser llevada a una unidad de absorción. Una válvula disminuye la presión del líquido antes de ingresar a un separador gas - líquido de baja presión.

La Figura 9, muestra uno de los muchos diagramas de flujo de proceso de la Gasificación en Agua Supercrítica, su configuración depende de la mezcla de productos deseados, la temperatura de diseño del reactor, la selección del sistema de precalentamiento del alimento y de separación de los productos.

3.3 CINÉTICA Y ESTUDIO PARAMÉTRICO

La Gasificación en Agua Supercrítica es afectada por un gran número de parámetros que deben ser entendidos para comprender mejor el funcionamiento proceso.

3.3.1 CINÉTICA

Entre los principales constituyentes de la biomasa se encuentra celulosa, hemicelulosa y lignina; el primero ha sido estudiado más extensamente, razón por la cual, será discutido el camino de reacción de la gasificación de celulosa, Figura 10.

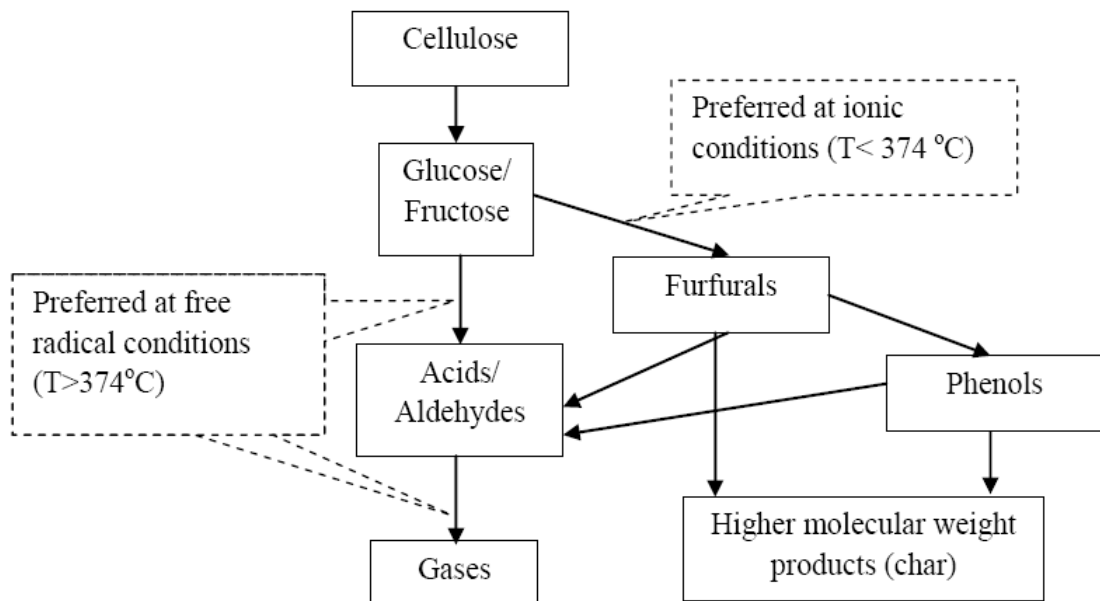


Figura No. 10 Caminos de Reacción Gasificación de Celulosa

Fuente: Biomass Gasification in Supercritical Water. International Journal of Chemical Reactor Engineering. Volumen 7. 2009.

La Figura 10, muestra dos caminos paralelos de conversión. El primero, izquierda, corresponde a una reacción de radicales libres, preferiblemente a condiciones supercríticas (alta temperatura y/o baja presión), mientras el de la derecha es reacción iónica, preferiblemente a condiciones subcríticas (baja temperatura y/o alta presión). Como los gases son productos típicos de las reacciones de radicales libres, la formación ocurre a muy altas temperaturas (superior temperatura crítica). Los pasos secuenciales de la reacción de gasificación son:

1. Hidrólisis de la celulosa a glucosa y/o fructosa, la cual toma lugar cerca de los 200°C. Gas, aceite o char no son producidos en esta fase.
2. Después de esto, el proceso es seguido por dos reacciones paralelas competitivas.

- Descomposición del azúcar en aldehídos y ácidos orgánicos de cadena corta.
- Deshidratación y cierre de la cadena para formar derivados del furfural y fenoles, los cuales representan el alquitrán.

La primera reacción es iónica mientras la segunda es de tipo radicales libre.

3. Los aldehídos y ácidos reaccionan para formar gases. Los derivados del furfural y fenoles podrían también descomponerse en gases en agua supercrítica, pero esta reacción es más lenta que la descomposición de la glucosa.
4. Furfural y fenoles podrían también producir char o coque.

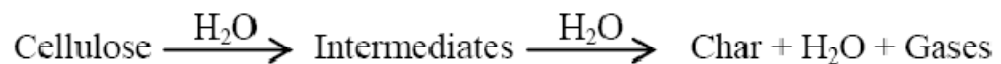
A condiciones supercríticas ($T > 374.1^{\circ}\text{C}$), el camino de la izquierda en la Figura 10, viene siendo más importante. La densidad del agua a estas condiciones es más baja que a condiciones subcríticas, esto inhibe las reacciones iónicas pero favorece las reacciones por radicales libres, las cuales son requeridas para la formación de gases como H_2 o CH_4 .

Además, puede notarse que los productos intermedios de la descomposición son disueltos en agua supercrítica debido a su alto poder solvente para los compuestos orgánicos, permitiendo una velocidad de reacción mayor mientras se minimiza la formación de alquitrán o "char".

Minowa en 1998, propuso un modelo alternativo similar al de la pirólisis para la conversión de celulosa en agua de alta presión. De acuerdo con este modelo, la hidrólisis de celulosa comienza entre los $200 - 220^{\circ}\text{C}$ produciendo productos solubles en agua como glucosa y oligómeros. Sobre los 240°C , la formación de compuestos de no - glucosa, aceite y gases comienza. La celulosa es

completamente descompuesta sobre los 280 °C, y la conversión de glucosa es completa sobre los 300°C.

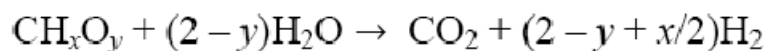
Varhegyi en 1993, propuso el siguiente modelo para la descomposición de biomasa en agua de alta presión. Ellos sugieren que a muy baja temperatura (> 200 °C), hidrólisis es el primer paso.



En la descripción dada anteriormente de la reacción de gasificación debe tenerse en cuenta que la celulosa de las diferentes fuentes de biomasa tener variaciones en su estructura química y cristalina y por lo tanto, su degradación puede ser diferente.

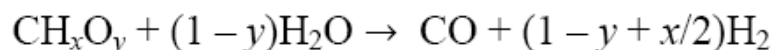
3.3.1.1 Reacciones Químicas

La reacción global para la gasificación de biomasa para producción de hidrógeno en agua supercrítica puede ser representada por la siguiente reacción simplificada, la cual es de naturaleza endotérmica.

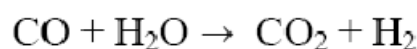


Tras esta reacción global, tres reacciones intermedias competitivas pueden ocurrir durante la gasificación de biomasa en agua supercrítica:

1. *Reformado de Vapor:*



2. *Reacción de Intercambio de Agua:*

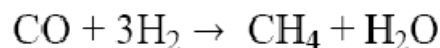


Penninger y Rep en 2006, describieron el mecanismo de la reacción de intercambio de agua en agua supercrítica. En condiciones supercríticas la disociación iónica del agua tomar lugar produciendo iones OH^- . La reacción entre el CO y el OH^- produce el anión HCOO^- , de acuerdo con la siguiente ecuación:



El anión se descompone en CO_2 y el anión H^- , el cual interactúa con agua para formar H_2 y OH^- por transferencia de electrones.

3. Metanación:



Debido a que el producto deseado en la gasificación de biomasa en agua supercrítica es el hidrogeno (H_2), entonces la reacción de intercambio de agua – gas debería ser dominante y la metanación restringida. Una alta temperatura de reacción permite este efecto.

3.3.1.2 Velocidad Cinética

Para la determinación de la cinética de la Gasificación de Biomasa en Agua Supercrítica, se han realizado investigaciones utilizando reactores de flujo tubular, el cual puede ser visto como un reactor de flujo tapón ideal cuando se satisface el criterio:

$$\text{Pe} = \frac{ud}{D} \rightarrow \infty$$

Cuando la longitud del reactor es más de 100 veces su diámetro, el coeficiente de dispersión axial (D) se aproxima a cero, entonces el número de Peclet (Pe) tiende a infinito y la condición para un reactor de flujo tapón ideal es satisfecha.

Para un reactor de flujo tapón ideal, la reacción es modelada como:

$$\frac{dX_c}{d\tau} = -\frac{r_c}{C_{c0}}$$

Lee y Blasi en 2007, usaron una expresión para la velocidad de reacción una tipo Arrhenius, primer orden e irreversible, asumiendo que el reactor opera a condiciones isotérmicas e isobáricas. Esta suposición resulta en:

$$\tau = C_{c0} \int_0^{X_c} \frac{dX_c}{-r_c}$$

Donde,

$$X_c = \frac{C_{c0} - C_c}{C_{c0}}$$

El tiempo de residencia, τ , y la conversión, X_c , son dadas por datos experimentales y la constante de reacción K , puede ser estimada de:

$$K = -\frac{\ln(1 - X_c)}{\tau}$$

Asumiendo que la reacción es de tipo Arrhenius, la velocidad de reacción puede ser escrita como:

$$-r_c = K C_c = A \exp(-E/RT) C_c$$

3.3.2 PARAMETROS DE OPERACIÓN Y DISEÑO

La Gasificación en Agua Supercrítica es un campo reciente de investigación. Sin embargo, los siguientes parámetros han sido identificados como los que influyen el proceso de gasificación.

Para discutir el efecto de los parámetros de operación y diseño sobre la gasificación es muy importante definir el significado de desempeño del gasificador. El desempeño de un gasificador es evaluado en términos de varios índices, eficiencia de la gasificación, eficiencia de carbón y rendimiento de productos específicos.

La eficiencia de la gasificación (GE) es definida como el porcentaje de biomasa convertido en gas; la eficiencia de carbón (CE) es la relación de carbón en la biomasa convertida en gases y el rendimiento de productos es medido en términos de su porcentaje en el gas producto, así como también, la cantidad de gas producto por unidad de alimento.

3.3.2.1 Temperatura de Reacción

La temperatura de reacción, quizás el parámetro más importante que influencia el desempeño de un gasificador, tiene un efecto significativo sobre el rendimiento específico de la gasificación, especialmente en ausencia de catalizador. De hecho, puede dividirse dentro de tres grupos dependiendo del producto primario (Tabla 10).

Rango de Temperatura	Catalizada	Rendimiento del Producto
Temperatura Alta ($> 500^{\circ}\text{C}$)	No Catalizada	Gas Rico de Hidrógeno
Temperatura Media (T_c hasta 500°C)	Con Catalizador	Gas Rico de Metano
Temperatura Baja ($< T_c$)	Con Catalizador	Otros gases de moléculas orgánicas

T_c – Temperatura Crítica

Tabla No. 11. División de la Reacción por Temperatura.

Fuente: Biomass Gasification in Supercritical Water. International Journal of Chemical Reactor Engineering. Volumen 7. 2009.

Los procesos a alta temperatura (500 – 800 °C) son termodinámicamente menos eficientes que los de baja temperatura. Guo en 2007, mostró que en el caso del equilibrio y la gasificación en agua supercrítica de lignina, 650°C y 725°C son las temperaturas de reacción requeridas, respectivamente. Una temperatura mayor a esta no es necesaria debido a que un incremento mayor no aumentará el gas producido. Sin embargo, la temperatura para alcanzar el equilibrio depende de las condiciones de reacción como concentración de la biomasa y velocidad de calentamiento.

Los procesos a baja temperatura (200 – 300 °C) son más eficientes, pero la gasificación no catalizada es difícil de lograr, razón por la cual el uso de catalizador es esencial para estos procesos. Para la producción de metano, el equilibrio muestra que a temperaturas bajas (374 – 500°C) da mayor rendimiento, de acuerdo con el principio de Le Chatelier.

La velocidad cinética de cualquier ecuación de Arrhenius aumenta con la temperatura; así como también, la constante de velocidad de reacción, por lo tanto, el rendimiento global de la gasificación es mayor.

Resultados con Glucosa

En general, la eficiencia de la gasificación aumenta con el incremento de la temperatura del reactor a diferentes presiones.

La Figura 11, muestra la variación en la composición del producto de la gasificación para glucosa a 28 MPa y la eficiencia de la gasificación contra la temperatura del reactor.

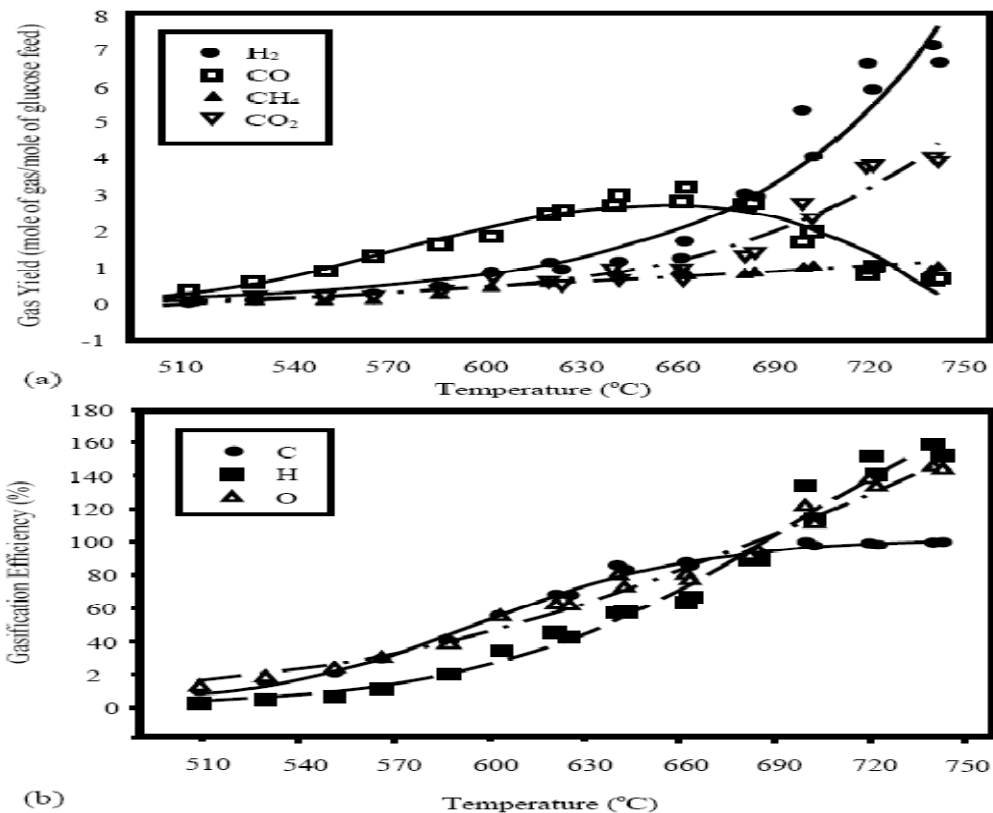


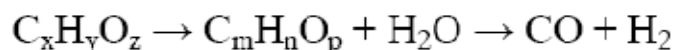
Figura No. 11 Efecto de la Temperatura sobre el Rendimiento y la Eficiencia de la Gasificación

Fuente: Biomass Gasification in Supercritical Water. International Journal of Chemical Reactor Engineering. Volumen 7. 2009.

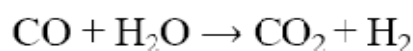
Las eficiencias de la gasificación son porcentajes del total de moles de C, H, u O en el gas por mol de C, H u O de glucosa. La eficiencia de carbón alcanza el 100% a 700°C, representando una completa conversión de glucosa a gas; la eficiencia de hidrógeno es superior al 100% porque el agua supercrítica contribuye con parte de este, confirmando que el agua supercrítica sirve como fuente de hidrógeno y como solvente para la gasificación de glucosa.

Un efecto mayor de la temperatura a 25 MPa se observó, un incremento del 30% en la temperatura de reacción (500 a 650 °C) resultó en un aumento de 167% en la eficiencia de carbón (CE) y más de 300% en la eficiencia de gasificación (GE).

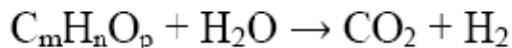
Para explicar el efecto de la temperatura se empleará el siguiente mecanismo de conversión de glucosa en agua supercrítica. Primero la glucosa se rompe en varios productos intermedios solubles en agua que podrían someterse a la reacción de reformado de vapor para producir CO.



El CO producido, entonces es convertido en hidrogeno adicional mediante la reacción de intercambio agua – gas.



A bajas temperaturas la reacción de reformado es más rápida que la de intercambio agua – gas, entonces mayor es la cantidad producida de CO que la convertida en H₂, pero a temperaturas mayores ocurre lo contrario. Además, algunos de los productos intermedios también reaccionan para producir H₂ y CO₂.



Resultados con Biomasa

El efecto de la temperatura de reacción en la gasificación de biomasa es similar al visto con glucosa. Para la gasificación de aserrín de madera, hay un incremento de más del 10% en GE y CE cuando la temperatura aumenta de 600°C a 650°C. El rendimiento de H₂, CO₂ y CH₄, también aumenta con la temperatura a 30 MPa.

En la gasificación de almidón de maíz también se estableció una fuerte relación entre la temperatura y el rendimiento obtenido, pasando de 41% a 92% con un incremento de la temperatura de 550 a 700°C. Otro dato experimental obtenido con césped, arrojó los mismos resultados, en este caso, el rendimiento aumenta de 0.62 a 0.88 y la concentración de carbón en el residuo líquido disminuye de 1017 a 333 ppm con un cambio de temperatura de 625 a 700°C.

Demirbas en 2004, estudió diferentes clases de biomasa sobre un rango de temperatura relativamente pequeño, pero claramente notó el efecto dominante de la temperatura sobre el rendimiento de gas.

Con los resultados obtenidos, Demirbas desarrolló una correlación entre el rendimiento de hidrógeno (YH) y la temperatura (T) obteniendo un coeficiente de relación alto para todas las corridas.

Cáscara de Almendra: $YH = 0.0661T + 36.350, r = 0.9988$

Cáscara de Algodón: $YH = 0.0517T + 27.700, r = 0.9947$

Cáscara de Avellana: $YH = 0.0484T + 26.083, r = 0.9948$

Cáscara de Girasol: $YH = 0.0564T + 30.550, r = 0.9990$

Cáscara de Nuez: $YH = 0.0440T + 23.567, r = 0.9941$

Otros tipos de biomasa, también muestran un efecto similar de la temperatura.

Por otro lado, el rendimiento de alquitrán (efluente líquido) también es afectado por la temperatura. El rendimiento de alquitrán, en este contexto, es definido como los gramos de alquitrán en el líquido efluente por gramo de alimento. A baja temperatura (< 600°C) el líquido efluente toma un color amarillento y una delgada capa de color castaño oscuro gracias a la presencia de alquitrán pero su color comienza a ser más claro cuando la temperatura cambia a 650°C.

3.3.2.2 Presión de Reacción

El efecto de la presión en la gasificación de biomasa en agua supercrítica es algo muy complejo. La velocidad de las reacciones de radicales libres disminuye con la presión debido al efecto jaula, mientras que la de las reacciones iónicas aumenta con la presión porque los productos iónicos tienen mayor densidad.

La eficiencia de la gasificación (GE) y la concentración de hidrógeno y dióxido de carbono en el gas aumenta con el incremento en la presión a 500°C pero el efecto es opuesto a 650°C. Lu en el 2006, encontró un efecto de la presión sobre el rendimiento de hidrógeno (H_2 aumenta de 17 a 17 mol/kg cuando la presión cambia de 17 a 30 MPa).

Las figuras 12 y 13, muestran el efecto de la presión sobre el rendimiento de gas, la eficiencia de la gasificación y la de carbono a 500°C, 600°C y 700°C para la gasificación en agua supercrítica de cascarilla de arroz en un reactor batch.

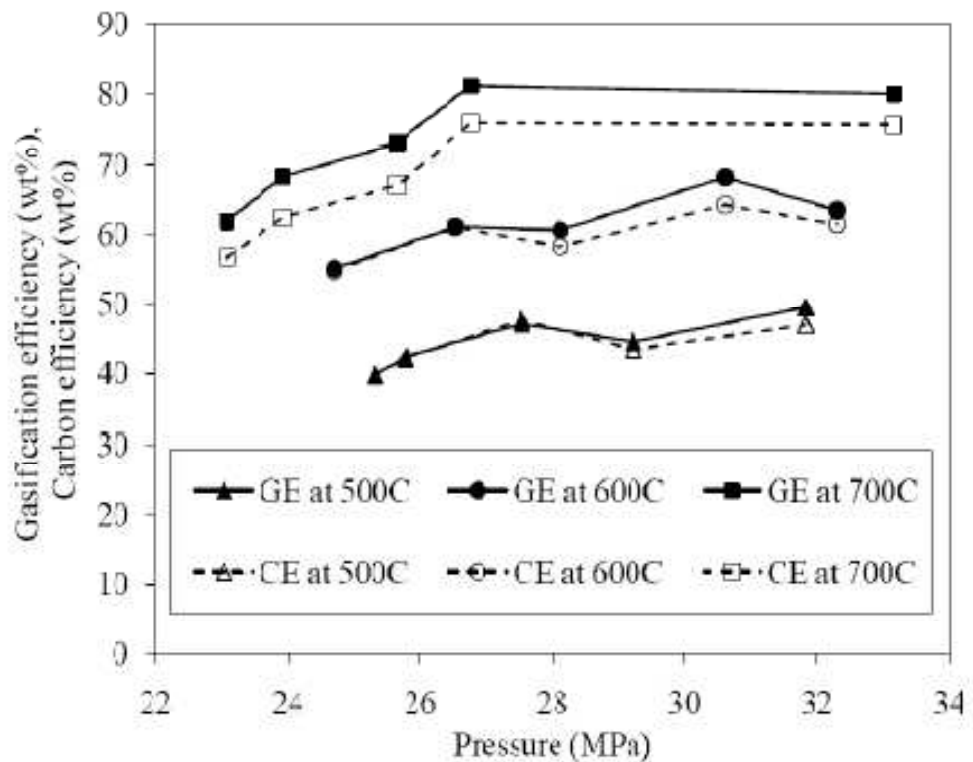


Figura No. 12. Efecto de la Presión sobre la GE Y CE

Fuente: Biomass Gasification in Supercritical Water. International Journal of Chemical Reactor Engineering. Volumen 7. 2009.

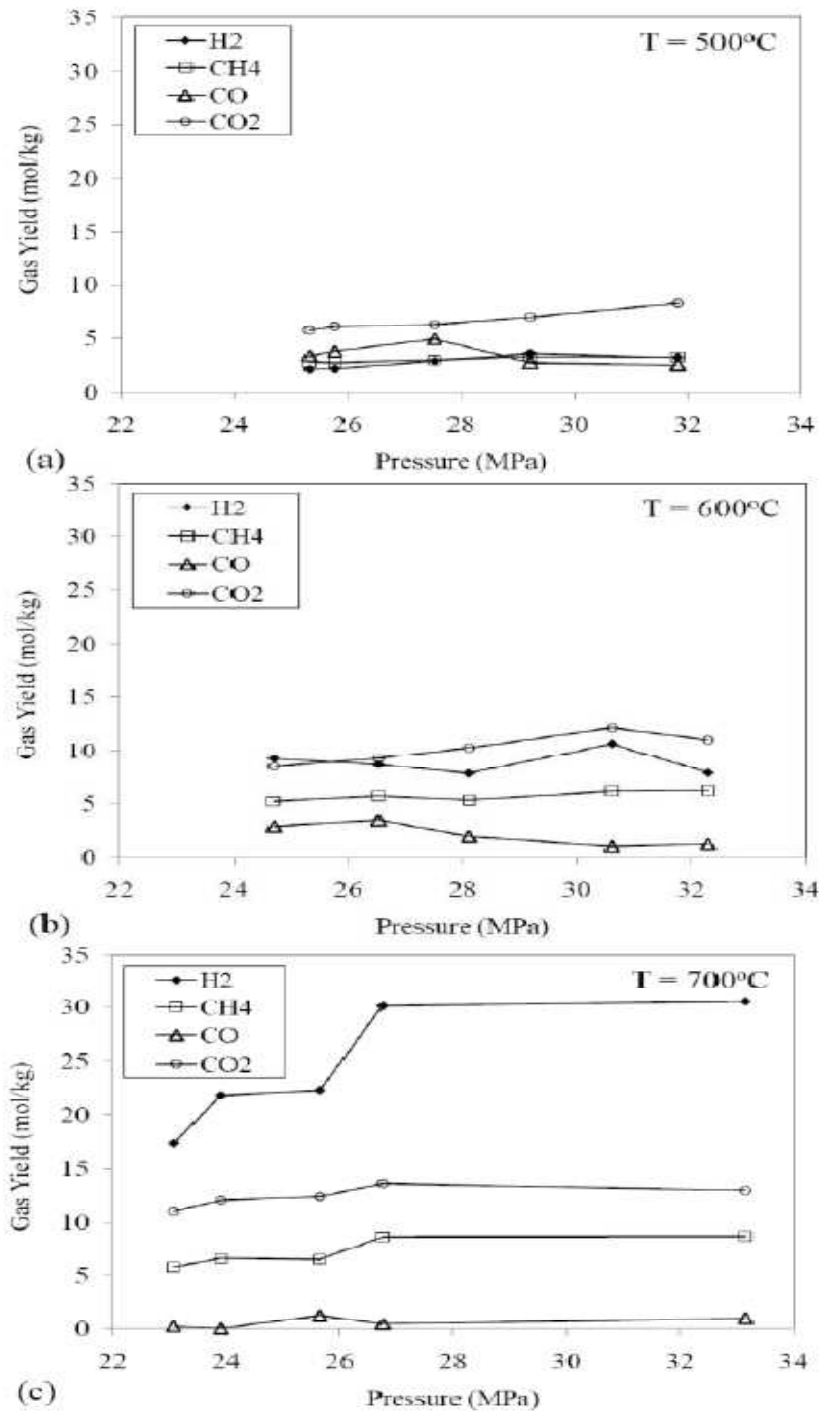


Figura No. 13 Efecto de la Presión sobre el Rendimiento

Fuente: Biomass Gasification in Supercritical Water. International Journal of Chemical Reactor Engineering. Volumen 7. 2009.

Cuando la presión aumenta, la concentración de iones en el agua supercrítica aumenta la velocidad de la hidrólisis; así como también, aumentan los valores de la densidad, la constante dieléctrica, los iones en el producto ya que la reacción iónica es más dominante, y la viscosidad. Esto hace que la difusión de las moléculas reactantes entre sí sea difícil. La velocidad de las reacciones de tipo fisión tales como las de descomposición se reduce. Sin embargo, el aislamiento de las moléculas reactantes inhibe las reacciones soluto – soluto pero promueve las reacciones soluto – solvente como la reacción de intercambio agua – gas.

3.3.2.3 Tiempo de Residencia

El tiempo de residencia en el reactor es definido como el volumen del reactor dividido entre el flujo volumétrico de agua a la temperatura y presión del reactor. Muchos estudios realizados han mostrado que el tiempo de residencia tiene un efecto importante.

Williams y Onwudili en 2005, estudiaron el efecto del tiempo de residencia sobre la eficiencia de la gasificación de glucosa a 374°C. La eficiencia de la gasificación ligeramente aumenta y alcanza un 90% después de 120 minutos con un decremento sutil en aceite y un aumento en el rendimiento de char.

En todos los casos el tiempo de residencia está limitado por el equilibrio porque una vez alcanzado, la eficiencia de la gasificación (GE) y el rendimiento de gases permanece constantes.

En los experimentos con cascarilla de arroz a 660°C, 30 MPa y una concentración de biomasa de 2% en peso, se encontró que el rendimiento de hidrógeno aumenta de 7 a 14 mol/kg de biomasa alimentada cuando el tiempo de residencia cambia de 10 a 40 minutos. Un incremento mayor no fue notado cuando el tiempo aumentó a 60 minutos.

Hao en 2003, estudió el efecto del tiempo de residencia en la gasificación de glucosa de 0.4M a 650°C y 25 MPa; en este caso, cuando el tiempo de residencia aumenta de 1.7 a 3.7 minutos, el valor de GE cambia de 93.6% a 117.6%, así como también, el valor de CE de 77.5% a 98.7%. Además, se encontró que 3.6 minutos es el mínimo tiempo de residencia necesario para obtener un valor razonable para GE. Lee en 2002, presentó resultados similares cuando glucosa 0.6M es gasificada a 28 MPa y 700°C. En este caso, el mínimo tiempo de residencia es de 10.4 segundos. Sin embargo, a baja temperatura, 600°C, los rendimientos de H₂ y CH₄ aumentan con el tiempo de residencia mientras el de CO tiene una tendencia inversa.

Para aserrín, la eficiencia de la gasificación (GE) y la eficiencia de conversión de carbón (CE) son directamente proporcionales respecto al tiempo de residencia pero el carbón orgánico total (TOC) no convertido en el líquido efluente disminuye, lo cual sugiere que un mayor tiempo de residencia favorece la gasificación de biomasa. La gasificación de glucosa muestra que a 700°C, para tiempo de residencia superiores a 14 segundos, el rendimiento de hidrógeno no es mayor al aumentar más el tiempo de residencia. Pero a baja temperatura, 600°C, el rendimiento es menor y continúa creciendo en rango de tiempo de residencia de 10 – 50 segundos.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se podría especular que el pico de rendimiento para gas, a una temperatura baja, puede ocurrir en un tiempo de residencia mayor.

3.3.2.4 Velocidad de Calentamiento

En una sección anterior, se mostró la importante influencia de la temperatura de reacción sobre la gasificación en agua supercrítica, la presente sección examina

como la velocidad de calentamiento a la temperatura de reacción puede influir en el producto.

Al tas velocidades de calentamiento, generalmente favorecen el proceso de gasificación de biomasa, porque un calentamiento lento permite la formación de coque y char. A bajas velocidades, la mezcla biomasa – agua salta lentamente de temperatura subcrítica hasta la supercrítica, así que el alimento gasta un tiempo finito a temperatura subcrítica en la zona de precalentamiento del reactor, dando lugar a reacciones iónicas que producen productos intermedios como furfural y otros compuestos insaturados. Cuando los reactantes alcanzan la temperatura supercrítica, las reacciones de radicales libres toman lugar y los productos intermedios polimerizan formando coque y char, y, a su vez la conversión de carbón decrece. Para altas velocidades de calentamiento en tiempo en la región subcrítica es corto y la formación de coque y char es reducida, por ende, una mayor conversión es alcanzada.

Una comparación de resultados obtenidos de velocidades de calentamiento de 1°C/min y 3°C/min a 500°C muestran que a la mayor velocidad de reacción lo rendimientos obtenidos de H₂, CH₄ y CO₂ también son mayores, pero el de CO es bajo, pasando de 17 mmol/mol de glucosa a 1°C/min a 4.5 mmol/mol de glucosa a 3°C/min.

3.3.2.5 Concentración del Alimento

El alimento de un gasificador comprende principalmente biomasa sólida y agua. La concentración de sólido en el alimento tiene un efecto importante sobre la gasificación, siendo un problema mayor de diseño durante la aplicación comercial de la gasificación en agua supercrítica.

Resultados sobre la gasificación de glucosa, muestran que los porcentajes de H₂ y CO₂ en el gas son proporcionales a la concentración de glucosa en el rango de 0.1M a 0.9M, pero las fracciones de CO y CH₄ son reducidas. La eficiencia de la gasificación (GE) disminuye con el incremento de la concentración, y esta tendencia fue observada en reactores tubulares de 6 mm y 9 mm de diámetro, y los rendimientos de H₂, CO₂ y CH₄ disminuyen y la de CO aumentan cuando es mayor la concentración de glucosa en el alimento.

Experimentos con biomasa como aserrín y tusa de maíz también muestran que a una concentración alta, la eficiencia de la gasificación (GE) y la eficiencia de conversión de carbón (CE) son menores que las obtenidas a una concentración menor. Los rendimientos de H₂, CO₂, CH₄ presentan la misma conducta.

3.3.2.6 Tipos de Biomasa

Demirbas en 2004, comparó los resultados de la Gasificación en Agua Supercrítica de cinco tipos diferentes de cáscaras de frutas. Arreglando en orden decreciente de acuerdo con el rendimiento de hidrógeno obtenido se tiene: cáscara de almendra, cáscara de girasol, cáscara de algodón, cáscara de avellana y de nuez en un rango de temperatura y presión de 650 - 750K y 23 – 48 MPa, respectivamente. El análisis último y el composicional muestran que el rendimiento de hidrógeno está relacionado con el contenido de hidrógeno o celulosa de la biomasa.

Lu en 2006, realizó experimentos con paja y cascarilla de arroz, tallo de trigo, cáscara de cacahuete, tallo de maíz, tallo de sorgo y aserrín de madera sugieren que el tallo de trigo y el de sorgo son más fácilmente gasificados que los otros tipos de biomasa, pero se encontró que las composiciones del gas obtenidas no son distinguibles. La eficiencia de la gasificación (GE) varían de 60 a 90%, y la eficiencia de conversión de carbón esta en el rango de 50-80%.

Yoshida y Matsumura en 2001, estudiaron el efecto de los tres principales componentes de la biomasa (celulosa, hemicelulosa y lignina) y encontraron una tendencia similar. Entre ellos, la celulosa da el mayor rendimiento de hidrógeno, seguido por la hemicelulosa y la lignina, lo cual sugiere que este último, es el componente clave que afecta el rendimiento de hidrógeno ya que alimento con contenido de lignina producen un gas con contenido de hidrógeno inferior al valor de equilibrio.

Si no existe interacción entre los componentes principales de la biomasa, el comportamiento de la gasificación de una mezcla puede ser predicho como un promedio de los resultados de la gasificación de los componentes individuales por la fracción en peso de cada componente (X_c , X_h , X_l):

$$N_{wa} = N_c X_c + N_x X_x + N_l X_l$$

Donde N_c , N_h , N_l son los rendimientos de celulosa, hemicelulosa and lignina, respectivamente. Esta ecuación muestra un mejor ajuste para la producción de CO_2 que de H_2 y CH_4 . En el caso de mezclas binarias, la anterior ecuación indica una dependencia lineal de N_{wa} frente a la fracción en peso de un componente. En presencia de lignina los valores experimentales se desvían de los valores de equilibrio debido a la rápida reacción entre la lignina y los productos intermedios producidos de la celulosa. Esta reacción no es una simple hidrogenación de lignina porque no existe evidencia de la producción de CH_4 .

3.3.2.7 Tamaño de Partícula

El tamaño de partícula es un problema de diseño significativo para cualquier gasificador porque entre más pequeño sea el tamaño requerido mayor es el consumo de energía para su adecuación. Aunque la Gasificación en Agua Supercrítica, aún está en la fase de introducción a escala real, existen algunos

estudios que examinan este aspecto. Conceptualmente, desde que la resistencia a la transferencia de masa en agua supercrítica sea mínima, el tamaño de partícula no debe tener un mayor efecto.

Lu en 2006, estudió este aspecto para la gasificación de paja de arroz, y encontró que partículas más pequeñas de alimento resultan en un mayor rendimiento de hidrógeno, eficiencia de gasificación y eficiencia de carbón durante la gasificación (Tabla 12). Como energía adicional es requerida para la molienda de la biomasa, un tamaño de partícula óptimo podría ser encontrado considerando la viabilidad económica.

Tamaño Partícula	Rendimiento de Gas (mol/Kg)						GE (%)	CE (%)	TOC (ppm)
	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆			
0.177 – 0.42 mm	13.74	0.11	3.31	10.47	0.27	0.43	56.51	50.20	1.455
< 0.177 mm	17.00	0.34	5.06	17.51	0.46	0.82	93.22	77.28	1.673

T=650 °C, P=25 MPa, Tiempo de Residencia 30s, Alimento: Paja de Arroz

Tabla No. 12. Efecto del Tamaño de Partícula en la Gasificación

Fuente: Biomass Gasification in Supercritical Water. International Journal of Chemical Reactor Engineering. Volumen 7. 2009.

3.3.2.8 Diseño del Reactor

Los datos experimentales reportados han sido generados principalmente en los siguientes tres tipos de reactores:

1. Reactor Batch
2. Reactor de Flujo Tubular
3. Reactor Continúo de Tanque Agitado

El diseño del reactor batch es sencillo pero la región de la reacción no es necesariamente isotérmica. Hashaikeh en 2006, estudió la disolución de sauce, en un reactor que contenía dos celdas de diamante separadas entre sí por un empaque de espesor de 250 micrones y huecos en el centro de 608 micrones para obtener un volumen de reacción de 50 nanolitros. La lignina y la hemicelulosa del sauce fueron fragmentadas y disueltas a baja temperatura, 200°C y la celulosa en un rango de 280°C a 320°C de temperatura a una presión de 10 MPa.

El reactor batch tiene un problema, y es que es muy difícil aislar las diferentes reacciones que tomar lugar durante el calentamiento y el enfriamiento, así que no es posible estudiar la reacción con tiempos de residencia tan cortos.

El reactor de flujo tubular satisface mejor los requerimientos para el análisis de la reacción, ya que proporciona una gasificación continua en un tiempo de residencia corto, pero el taponamiento es un mayor problema. A altas concentraciones del alimento, experimenta taponamiento debido a la formación de char en la sección de calentamiento y al aumento de la ceniza dentro del reactor lo cual representaría un inconveniente prioritario en la aplicación de la gasificación de biomasa en las unidades comerciales.

El reactor vessel agitado puede superar estas limitaciones debido a su excelente mezclado y la alta velocidad de calentamiento. El reactor continuo de tanque agitado es una integración entre una autoclave y un reactor de flujo tubular. La biomasa puede ser mezclada uniformemente en el reactor y calentada rápidamente. Sin embargo, el sistema es más complejo y energía adicional es requerida para el agitado. Matsumura y Minowa en 2004, estudiaron el uso potencial de un lecho fluidizado de agua supercrítica para la gasificación continua de biomasa y llegaron a concluir que un lecho fluidizado burbujeante para barro de biomasa es más apropiado que lecho fluidizado rápido, porque con este se puede prevenir el taponamiento del reactor, pero el proceso es más complejo y todavía

se encuentra en el estado de diseño teórico. Lu en 2008, condujo un experimento en un lecho fluidizado con diámetro de 30 mm y una longitud total de 915,, y no se observó taponamiento. Hasta ahora, muy pocos trabajos se han desarrollado en lecho fluidizados de agua supercrítica, por lo tanto, en ausencia de datos experimentales es muy difícil especular sobre el comportamiento de este tipo de reactor.

3.3.2.9 Geometría del Reactor

Muchos de los experimentos sobre Gasificación en Agua Supercrítica han sido realizados en reactores de pocos milímetros de diámetro; escalar estos resultados a reactores de diámetros con valores en centímetros e incluso de metros, pueden estar sujetos a grandes incertidumbres porque tales reactores pequeños no muestran los efectos hidrodinámicos, de transferencia de masa y calor dentro del reactor.

Hao en 2003 y Lu en 2006, estudiaron el efecto del diámetro del reactor; en este proceso se compararon dos reactores de diferente tamaño, 6 mm y 9 mm de diámetro interior. El efecto del diámetro del reactor en el rendimiento de gas no fue evidente en estos estudios; por otro lado, la eficiencia de la gasificación (GE) se redujo con el incremento en el diámetro del reactor en el caso de glucosa como biomasa pero se incrementó para aserrín, por ende, estos estudios no permitieron concluir sobre el efecto del diámetro del reactor en la Gasificación de Biomasa en Agua Supercrítica. Sin embargo, se podría suponer que la transferencia de calor entre el alimento y la pared del reactor debería influir en la gasificación.

3.3.2.10 Material del Reactor

Como se dijo anteriormente, los datos experimentales de la Gasificación en Agua Supercrítica han sido obtenidos de reactores de diámetro muy pequeño, los cuales

tienen una relación superficie a volumen del reactor muy grande. Además, muchos de los reactores usados son metálicos con actividad catalítica y así, los resultados de la gasificación deben tener algún tipo de influencia derivada de los materiales.

Antal en el año 2000, encontró que la aleación de níquel (Hastelloy) no es conveniente para ser usada en la Gasificación de Biomasa en Agua Supercrítica porque tiene un efecto catalítico y esto conlleva a un problema severo de corrosión. Por otro lado, reactores fabricados en acero inoxidable 316 implicaron una muy baja gasificación debido a su baja actividad catalítica.

Otro efecto interesante de las paredes del reactor es percibido debido al tratamiento de su superficie. Boukis en el año 2006, trató la superficie de la pared de su reactor, fabricado en Aleación 625, con una solución de peróxido de hidrógeno al 3% en peso a una temperatura de 600°C y 25 MPa durante 50 horas, lo cual produjo una oxidación del molibdeno, cromo y níquel sobre la superficie del reactor. Este pretratamiento incrementó la conversión de metanol del 86% al 99% a 600°C y, la concentración de CO en el gas disminuyó de 10 - 12% hasta cerca del 1%.

3.3.2.11 Catalizador

La presente sección discute la influencia de la adición de diferentes tipos de catalizadores sobre las reacciones de gasificación en agua supercrítica.

Los catalizadores juegan un papel importante en la conversión de biomasa. Como se señaló en la sección 3.3.2.1, la conversión a baja temperatura (<500°C) es mínima, de tal forma que el uso de catalizadores es esencial. El optimismo temprano que surgió sobre la alta conversión de biomasa en agua supercrítica podría ser afectado por la actividad catalítica en las paredes del reactor usado. Debido a la alta temperatura y presión de los gasificadores de agua supercrítica

fue necesario realizar experimentos haciendo uso de aleaciones de acero como 625, Hest alloy, Inconel; todos estos materiales mostraron un efecto catalítico significativo sobre la reacción.

Los principales tipos de catalizadores que han sido usados hasta ahora para la gasificación en agua supercrítica son:

1. Catalizadores Metálicos
2. Catalizadores basados en Carbono
3. Catalizadores Alcalinos

Estos catalizadores son apropiados para la producción de hidrógeno. Un proceso catalizador exitoso depende de los componentes, del proceso industrial y de la morfología del catalizador. Para la gasificación de biomasa en agua supercrítica, reactantes, ambiente de la reacción, parámetros de proceso y configuración del reactor son también importantes así como el área superficial y el perfil de diámetro del poro del catalizador. Catalizadores con una gran área superficial tienen mejor efecto catalítico, además, catalizadores con un perfil de diámetro de poro amplio mejorarían el rendimiento de hidrógeno.

✓ **Catalizadores Metálicos**

Catalizadores metálicos heterogéneos tienen una ventaja sobre los base homogénea o catalizadores alcalinos ya que son relativamente más fáciles de recuperar. Esto ayuda a reducir los costos de catalizador, además, catalizadores metálicos granulares podrían también servir como un portador de calor.

Hao en el año 2005, comparó el desempeño de cinco tipos de catalizadores metálicos, 5% en peso de Ru sobre carbón activado, 5% en peso de Pd en carbón activado, partículas de CeO_2 , nano- CeO_2 y nano- $(\text{CeZr})\text{O}_2$, durante la gasificación

de celulosa a 500°C y 27 MPa. El catalizador basado en Rutenio mostró el mejor desempeño, con el más alto rendimiento de hidrógeno y metano.

El Níquel es comúnmente usado como catalizador para la gasificación en agua supercrítica. Furusawa en el año 2007, encontró que los rendimientos de carbón e hidrógeno aumentan de 8.3% y 14.1% a 22.7% y 46.2% respectivamente, cuando 0,05g de 20% en peso de catalizador Ni/MgO es agregado a 400°C.

La cantidad de catalizador también afecta la reacción. Yoshida en el año 2004, encontró que el aumento de la cantidad de catalizador de Níquel mejoró la eficiencia de la gasificación de celulosa, lignina y mezclas de celulosa – lignina a 400°C, 25 MPa y 20 minutos de tiempo de reacción.

✓ **Catalizadores Alcalinos**

Estos catalizadores son altamente miscibles en agua haciendo que sean más efectivos para la gasificación de biomasa. Sin embargo, su recuperación y reutilización podrían ser un problema.

Lu en el año 2006, encontró que el rendimiento de hidrógeno usando como catalizador K_2CO_3 es dos veces mayor que sin catalizador a las mismas condiciones. Sin embargo, tiene una desventaja, incrementa el contenido de fenoles en el producto, pero estos pueden ser gasificados a 600°C.

Watanabe en el año 2003, estudió el efecto de catalizadores de NaOH y ZrO_2 en la gasificación de lignina y n-Hexadecano en agua supercrítica, y el efecto de la adición de oxígeno (oxidación parcial) sobre la gasificación. El experimento se realizó a 400°C, 30MPa y tiempo de residencia de 15 minutos.

La Tabla 12, compara los rendimientos de hidrógeno sobre las diferentes condiciones. El rendimiento de hidrógeno, es bajo en ausencia de catalizador, pero puede aumentar usando oxidación parcial y catalizador. Independiente de la presencia de oxidación parcial, el uso de catalizador también incrementa el rendimiento de hidrógeno. Además, el catalizador alcalino es más efecto que el metálico, siendo en este caso particular, de 2-5 veces más efectivo en la producción de hidrogéno.

		Rendimiento de Hidrógeno (% molar)		
		No Catalizada	Catalizador Metálico (ZrO ₂)	Catalizador Alcalino (NaOH)
LIGNINA	Sin Oxígeno	0.5%	1.0%	5.0%
	Con Oxígeno	2.0%	3.5%	9.5%
n- HEXADECANO	Sin Oxígeno	2.0%	3.0%	8.5%

Tabla No. 13 Gasificación Utilizando Catalizadores

Fuente: Biomass Gasification in Supercritical Water. International Journal of Chemical Reactor Engineering. Volumen 7. 2009.

Si el hidrógeno se forma únicamente por la reacción de intercambio agua – gas, la relación de rendimiento de H₂ a rendimiento de CO₂ (relación H₂/CO₂) debe ser la unidad. Durante este estudio, se encontró que para la gasificación de n-Hexadecano, la relación H₂/CO₂ fue de 0.3 y 0.75 para reacción no catalizada y catalizada con ZrO₂. Esto sugiere una oxidación directa del carbón de la biomasa a CO₂, además del formado a través de la reacción de intercambio agua – gas. Pero cuando el catalizador alcalino fue usado, la relación H₂/CO₂ fue de 1.76, lo cual indica que la reacción de intercambio agua – gas debe ser favorecida por el catalizador básico que suprime la oxidación directa del carbón de la biomasa. Además, un valor de esta relación superior a la unidad, sugiere que además de la formación de hidrógeno a través de la reacción de intercambio, debe existir otro camino para su formación. Este podría ser la descomposición térmica de los hidrocarburos.

✓ **Catalizadores Basados en Carbono**

Xu en el año 1996 y Matsumura en el año 1997, estudiaron el efecto de catalizadores de carbón en la gasificación de glucosa en agua supercrítica a 600°C y 34.5 MPa. Los catalizadores usados fueron carbón de madera, carbón de cáscara de macadamia, carbón activado y carbón activado de cáscara de coco.

Muchos de los catalizadores de carbón aumentaron la eficiencia de gasificación de carbón mientras redujeron el contenido de CO en el producto gaseoso. Esto aparentemente, fue debido a las mayores velocidades de las reacciones de intercambio de agua – gas y de metanación, que hicieron que el carbón en el combustible fuera convertido en CO₂ y CH₄. Esto mejora el rendimiento de metano el cual fue más alto en el caso de carbón activado de cáscara de macadamia; para carbón activado, el rendimiento de CO es mayor y el rendimiento de H₂ menor que con cualquier otro catalizador. Esto sugiere que el carbón activado no cataliza la reacción de intercambio de agua – gas.

En conclusión, los catalizadores tienen un efecto mayor en la gasificación de biomasa en agua supercrítica. Además de mejorar el rendimiento de la gasificación, también permite la reducción de la temperatura del reactor y por lo tanto mejora el rendimiento termodinámico del sistema.

4 ASPECTOS AMBIENTALES

La gasificación de biomasa es una tecnología promisoría, la cual puede contribuir al desarrollo de futuros sistemas energéticos eficientes, seguros en diseño y operación, así como también, amigables con el medio ambiente al fin de aumentar la cuota de energías renovables para calefacción, electricidad, transporte y muchas otras aplicaciones.

El único gran inconveniente es que su operación puede resultar una actividad de alto riesgo para la seguridad, la salud y el medio ambiente, a menos que medidas preventivas adecuadas y efectivas se apliquen continuamente.

Como lo vimos en un capítulo anterior, un sistema de gasificación consiste principalmente en:

- ✓ Almacenamiento de Combustible, en este caso biomasa
- ✓ Sistema de manejo y alimentación
- ✓ Gasificador
- ✓ Enfriamiento del gas
- ✓ Depuración del gas
- ✓ Utilización del gas

Cada parte de la planta crea unos riesgos específicos para la salud, seguridad y medio ambiente. La Tabla 13, muestra los principales aspectos ambientales y peligros para la salud y la seguridad, asociados con la operación de un sistema de gasificación.

PROCESO	Preparación del Combustible	Sistema de Alimentación	Gasificador	Depuración del Gas	Utilización del Gas
ASPECTO O PELIGRO					
POLVO	X	X		X	
RUIDO	X	X	X	X	X
OLOR	X		X	X	
AGUAS RESIDUALES				X	X
ALQUITRAN				X	X
CENIZAS				X	
GASES					X
FUEGO	X	X	X	X	X
EXPLOSION DE POLVO	X	X	X		
RIESGO MECÁNICO	X	X	X		X
INTOXICACIÓN POR GAS		X	X	X	X
QUEMADURAS EN LA PIEL			X	X	X
EXPLOSIÓN DE GAS			X	X	X
PÉRDIDAS DE GAS			X	X	X

Tabla No. 14 Aspectos Ambientales y Peligrosos para la Salud y la Seguridad del Sistema de Gasificación.

Esta sección examina las fuentes de las preocupaciones ambientales y describe las medidas que deben tomarse para limitar el impacto ambiental, considerando únicamente factores ambientales relacionados a la planta de gas, emisiones de líquidos y gases, y residuos, Las principales amenazas son luego examinadas y directrices de seguridad serán suministradas para garantizar el funcionamiento adecuado de los sistemas de gasificación.

4.1 POLVO

El polvo se genera durante la preparación de la materia prima, almacenamiento y manejo, alimentación, y en los equipos de eliminación de cenizas. El manejo de materiales sólidos es una fuente notable de partículas en el aire, especialmente cuando los sólidos están secos y quebradizos. La generación de polvo crea varios problemas, incluyendo:

- ✓ El polvo en el aire puede formar mezclas explosivas con este mismo en la cual una mezcla explosión primaria puede generar más polvo en el aire causando explosiones secundarias y esto puede ser devastador.
- ✓ La inhalación de polvo es una fuente potencial de daño en los pulmones.
- ✓ Irritación ocular y cutánea.
- ✓ Las capas de polvo combustible puede causar olores o estar en estado latente de ignición.
- ✓ El polvo alojado en todas las superficies horizontales expuestas conducen a problemas de seguridad para el personal en las operaciones de rutina, así como también, al aumento en el mantenimiento y detracción estética.
- ✓ Aumento en la fricción y el desgaste de los equipos mecánicos causados por la deposición de polvo, aumentando los costos por mantenimiento y reduciendo la fiabilidad del proceso, porque estos incrementan el potencial de los accidentes.

4.1.1 MEDIDAS DE PREVENCIÓN

- ✓ Minimización de manejo de sólidos y evitar la manipulación brusca para reducir al mínimo el roce entre partículas de combustible y la suspensión de polvo.

- ✓ Sistema de manejo de los sólidos de manera hermética, en especial en el transporte de equipos a los puntos de descarga.
- ✓ Instalación de campanas de aspiración de gas y equipos de depuración del gas con el fin de controlar fuentes de polvo, por ejemplo los molinos y las pantallas.
- ✓ Mantenimiento de una baja presión en los ambientes cerrados para evitar la propagación del polvo a los establecimientos vecinos con sistema de depuración de gas adecuado.

Las partículas sólidas también son arrastradas en el gas producto de la gasificación tales como cenizas, cenizas volantes, polvo de filtro, carbón, materiales inertes del lecho y trazas de catalizador, en caso que el sistema de gasificación incluya estas características. Dado que estas fuentes están localizadas, en principio son más fáciles para controlar. En la descarga de material fino como cenizas volantes, puede requerirse humidificarlos con el fin de prevenir la re-suspensión durante su manipulación y disposición.

El carbón formado por el craqueo secundario o la gasificación incompleta, puede también crear mezclas explosivas con aire, pero por lo general en recipientes apropiados. El carbón de la biomasa puede ser pirofórico y deber ser enfriado adecuadamente antes de ser descargado y almacenado, si cantidades significativas son producidas. Algunos tipos de gasificadores pueden producir partículas calientes como consecuencia de mal funcionamiento o fallas en los equipos. Estos pueden encender otros materiales inflamables y provocar un incendio.

Desde el punto de vista de salud ocupacional, las partículas de polvo pueden ser clasificadas por:

Tamaño de Partículas: Mayores que 5μ (0.005mm) son atrapadas por los pelos húmedos en las fosas nasales; más pequeñas que 0.2μ (0.0002 mm) no se asienta en los pulmones y son exhaladas nuevamente. Por lo tanto, el rango de tamaño intermedio es el más peligroso.

Forma y Composición: de algunos materiales son conocidos por causar daño en los pulmones por ejemplo el asbesto produce asbestosis y la sílice produce fibrosis. Estos pueden surgir de los materiales del lecho fluido.

El polvo originado de la remoción de ceniza puede ser tóxico debido a la adsorción de químicos sobre las partículas. Varios compuestos con propiedades carcinogénicas, tales como el benzoantraceno y benzopireno son adsorbidos sobre las partículas de polvo. Estos son peligrosos para la salud humana ya sea después de su inhalación y contacto con la piel y/o después de su acumulación en la cadena alimentaria. Además, las partículas de polvo pueden ser adsorber compuestos orgánicos no polares hasta un 40% de su peso, el cual puede ser mayor para hollín y carbón negro con sus altas áreas superficiales específicas.

4.2 EMISIONES GASEOSAS

El procesamiento térmico de la biomasa tiene el potencial de ofrecer una contribución importante para satisfacer la demanda creciente de energía renovable y alcanzar los objetivos fijados por diferentes organizaciones a nivel mundial preocupadas por el calentamiento global debido a las crecientes emisiones de Dióxido de Carbono (CO_2). La gasificación de biomasa es considerada una de las rutas más prometedoras para la producción de energía renovable debido a la posibilidad de ciclos de mayor eficiencia, pero aunque ha tenido un buen progreso técnico a nivel comercial logros positivos aún no se han alcanzado. Un aspecto importante en la comercialización es el de reducir las emisiones de gases a niveles aceptables, con el fin de cumplir la legislación.

4.2.1 LIMITE DE EMISIONES

En general, el conocimiento técnico de las autoridades reguladoras es pobre; porque conocen la combustión pero la pirólisis y la gasificación es un misterio. Por lo tanto, procedimientos para autorizar la gasificación son muy largos, en caso que existan dichos procedimientos. A nivel mundial, especialmente en países europeos, donde esta tecnología ha tenido un auge muy importante, usualmente las autoridades nacionales son responsables de otorgar los permisos.

Otra cuestión conflictiva es la opinión pública negativa generalizada sobre el tratamiento térmico de la biomasa; proyectos puestos en marcha, sobre todo las plantas a gran escala, se enfrentan a problemas con las comunidades porque tienen objeciones a dicha instalación en su barrio.

Educación y capacitación de los organismos pertinentes es necesaria, pero es costoso. Además, las diferentes regiones en un país también pueden interpretar las normas de diferentes maneras, lo que significa que la ubicación es vital en algunos casos, para su aprobación porque algunas áreas requieren autorización para una instalación de 150 kW_e, otras no.

En el caso de Colombia, mediante el Decreto 948 de 1995, se expidió el Reglamento de Protección y Control de Calidad del Aire, el cual incluye las fuentes fijas y móviles.

En este decreto se hace referencia explícita a la incineración de residuos sólidos, líquidos o gaseosos pero no se nombra la pirólisis o la gasificación porque son tecnologías que no son usadas en nuestro país. En la Tabla 13, se presentan los límites máximos permisibles recomendados de la concentración de contaminantes convencionales para Colombia.

Contaminante	Unidad	Límite Máximo Permissible	Tiempo de Exposición
PST	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	100	Anual
		300	24 Horas
PM10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	70 ⁸	Anual
		150	24 Horas
SO ₂	ppb	30	Anual
		48	24 Horas
		134	3 Horas
NO ₂	ppb	53	Anual
		80	24 Horas
		106	1 Hora
O ₃	ppb	51	8 Horas
		77	1 Hora
CO	ppm	9	8 Horas
		26	1 Hora

PST – Partículas Suspensas Totales

PM10– Material Particulado Menor a 10 micras

Tabla No. 15. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes Convencionales

Fuente: Documento Soporte Norma de Calidad de Aire. Subdirección de Estudios Ambientales - IDEAM. Bogotá, 7 de Septiembre de 2005.

Como se puede ver, el compuesto cuyo límite permisible de emisión es más crítico para un gasificador de biomasa es el monóxido de carbón (CO). Por esta razón, en la siguiente sección se tratará sobre las medidas de control.

4.2.2 MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO

Con el fin de cumplir los límites estrictos para las emisiones de CO, son necesarias medidas de reducción, rentables y eficientes. Existe un solo ejemplo donde el CO se reduce casi a nivel cero. Sin embargo, este es un caso muy particular, donde el gas de escape del motor se dirige a una caldera de madera existente donde el CO remanente es térmicamente combustionado.

Catalíticos de post-combustión también es posible pero no se aplica todavía. Una sencilla medida es aumentar la relación aire-combustible, pero es dudoso que una medida única sea suficiente. Por último, las modificaciones de los motores

(cámara de combustión, relación de compresión o reducción del encendido) y sistemas inteligentes de gestión se pueden aplicar.

4.3 AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales durante la operación normal de un sistema de gasificación sólo se producen en el tratamiento de los gases producto. En el tratamiento de los gases producto, los alquitranes y las partículas se eliminan, las aguas residuales que contiene partículas, coque y componentes aromáticos. El motor de gas requiere para su buen funcionamiento de un gas que está libre de aerosoles para prevenir daños en la línea de control de gases, durante la combustión dentro del cilindro y en la línea de gases de combustión. El contenido de agua en el gas producto puede condensarse en las siguientes etapas del sistema:

- ✓ Enfriamiento del gas
- ✓ Depuración del gas
- ✓ Tubos
- ✓ Sopladores
- ✓ Motores de Gas : Mezcladores Aire – Gas
Interenfriador después del turbo cargador
Intercambiador de calor gas – combustible
- ✓ En todas partes la línea de gas producto durante el inicio, cierre y operación inestable.

Especialmente, cuando el gas producto es mezclado con aire y en el interenfriador después del turbo cargador, por esta razón, el punto de rocío de la mezcla gas – aire ha de ser calculada cuidadosamente para evitar cualquier condensación en el interior del motor de gas.

La siguiente figura muestra los posibles puntos en una planta donde la condensación de agua puede ocurrir.

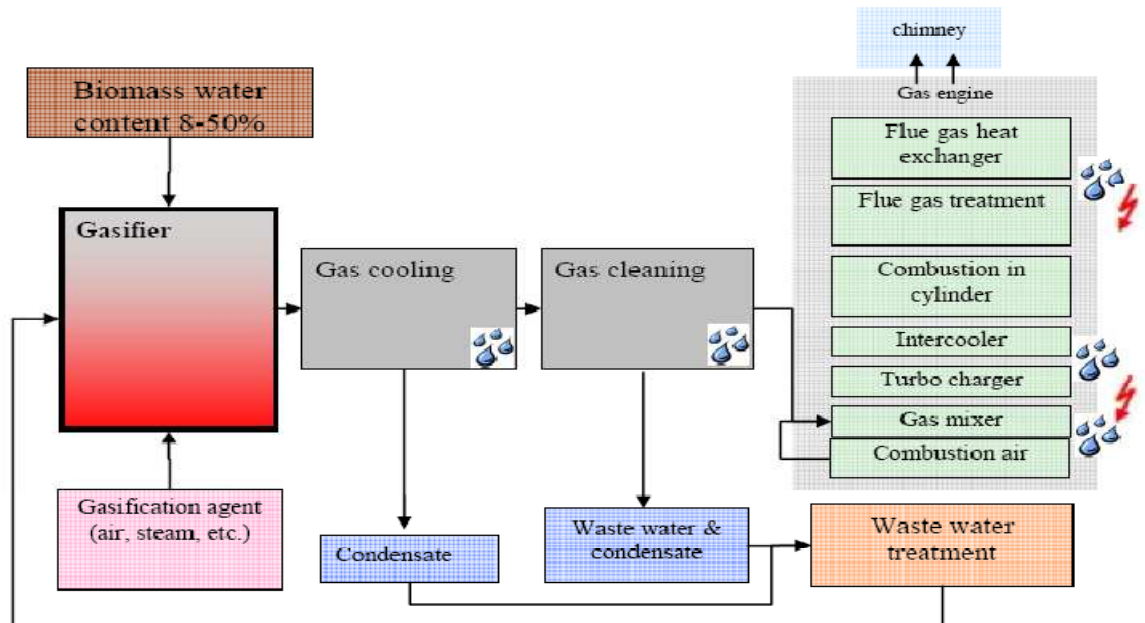


Figura No. 14 Formación de Agua en las Plantas de Gasificación de Biomasa

Fuente: Health, Safety and Environment of Biomass Gasification. Institute of Chemical Engineering, Vienna University of Technology. September 2005, Innsbruck, Austria.

En principio, el agua residual puede ser formada de dos maneras diferentes en una planta de gasificación:

- ✓ Condensación del agua la temperatura está por debajo del punto de rocío.
- ✓ Uso del agua durante la depuración de gas (Lavador de gases húmedos).

El balance de agua en una planta de gasificación se puede manejar en diferentes formas:

- ✓ Disposición del agua residual formada
- ✓ Procesamiento interno y uso del agua residual por:
 - Combustión
 - Tratamiento de Agua Residual
- ✓ Evitar / minimizar el agua residual mediante el secado de la biomasa y temperaturas de entrada altas al motor de gas (agua en la biomasa de entrada es igual al agua de salida en la chimenea).

Durante el diseño de una planta de gasificación los siguientes datos para el balance de agua han de tenerse en cuenta:

- ✓ Agua de entrada en el combustible
- ✓ Conversión de agua en el gasificador
- ✓ Punto de Rocío del gas producto antes del tratamiento para agua y alquitrán.
- ✓ Temperaturas en el tratamiento del gas y la distancia de seguridad del punto de rocío.
- ✓ Punto de Rocío en mezclador aire – gas, interenfriador y enfriador del gas

4.3.1 COMPUESTOS PROBLEMÁTICOS

Dependiendo de la tecnología de gasificación, el tipo de tratamiento de gas y los parámetros de operación el agua residual puede contener diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos como benceno, tolueno, penoles y otros hidrocarburos aromáticos entre los orgánicos. En el caso de los inorgánicos, el principal componente es el amoníaco y pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno que son encontrados en el gas producto. Si estos contaminantes son removidos del gas producto en una unidad sencilla, entonces todos estos contaminantes se encontrarán en el agua residual y tiene que ser tratados. Si los contaminantes son removidos por unidades separadas (filtro de mangas y depurador), entonces los componentes orgánicos y el amoníaco tienen que ser tratados en el agua residual.

4.3.2 SISTEMAS DE TRATAMIENTO

Los sistemas de tratamiento para el agua residual están basados en procesos químicos, físicos y biológicos. Las sustancias en el agua residual tienen que ser convertidas o concentradas para ser removidas.

Diferentes sistemas de tratamiento han sido investigados hasta ahora en los sistemas de gasificación, y el más exitoso está basado en los siguientes principios:

- ✓ **Sedimentación:** Para remover la mayor cantidad de compuestos orgánicos.
- ✓ **Evaporación del agua residual y combustión del vapor producido.**

4.3.3 LIMITES DE VERTIMIENTO

En Colombia, por medio del Decreto 1584 de 1984 se establecieron las concentraciones máximas permitidas para el control de carga de un vertimiento. En la tabla 14, se muestran los valores.

Parámetros	Unidad	Límite Máximo Permisible
pH	Unidades de pH	5 - 9
Temperatura	°C	≤40
Ácidos, bases o soluciones ácidas o básicas; sustancias explosivas		Ausentes
Sólidos Sedimentables	mg/l	≤10
Sustancias Solubles en Hexano	mg/l	≤100
Sólidos Suspendidos	%	Remoción ≥ 50% de la carga
DBO Doméstico	%	Remoción ≥ 30% de la carga
DBO Industrial	%	Remoción ≥ 50% de la carga
Caudal Máximo	mg/l	1.5 veces el caudal promedio horario

Tabla No. 16. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

4.4 CENIZAS VOLANTES Y CHAR

Las cenizas volantes y el char presentan problemas similares a aquellos causados por el polvo. Existe un riesgo adicional de incendio que dicta que las cenizas volantes y el char deben ser almacenados húmedos. La disposición de esta mezcla húmeda presenta sus propios problemas ambientales. Los sólidos deben ser separados del agua en una instalación de tratamiento de agua. Agua extraída será contaminada y puede requerir tratamiento posterior antes de la descarga utilizando una tecnología de tratamiento de agua ortodoxa. Problemas especiales No se conocen. La fracción sólida debe ser considerada un residuo industrial y descargada en consecuencia a los vertederos autorizados.

4.5 OLOR

Los olores puede surgir a causa de:

- ✓ La degradación del material orgánico
- ✓ La presencia de fugas de gas
- ✓ La manipulación y almacenamiento de alquitrán, agua residual, cenizas volantes, entre otros productos.

El alquitrán de madera tiene un olor fuerte, característico y persistente, incluso en pequeñas concentraciones. El olor del alquitrán de carbón es algo aromático, debido a la presencia de naftaleno, antraceno y fenantreno. El olor de alquitrán derivado de materiales ligno-celulósicos es más repugnante.

Cuando la materia prima contiene nitrógeno o azufre, el gas producto contiene gases olorosos como H_2S , COS o NH_3 . El alquitrán y el agua residual pueden estar contaminados por compuestos de azufre y nitrógeno fuertemente olorosos, aunque es muy poco probable que sea un problema con productos derivados de la biomasa debido a sus niveles muy bajos de azufre y nitrógeno.

4.6 RUIDO

El ruido se producido cuando una parte mecánica o un motor están operación. Áreas de la planta especial donde los niveles de ruido pueden ser importantes son:

- ✓ Recepción de almacenamiento y equipos de manipulación
- ✓ El sistema de alimentación
- ✓ Los compresores
- ✓ La turbina de gas o motor

Los efectos sobre los seres humanos de una exposición prolongada al ruido están bien documentados. Medidas adecuadas deben tomarse para minimizar el ruido, por ejemplo, mediante el uso de materiales adsorbentes de sonido y vibración o encerramiento acústico. Los operadores también están obligados a ser provistos de tapones de protección auditiva.

CONCLUSIONES

- ❖ La biomasa constituye una fuente energética renovable de materias primas de importancia notable, tanto por su nivel actual de implantación en importantes mercados mundiales, como por su potencial real; y tan versátil como el petróleo, ya que de ella pueden producirse prácticamente toda la gama de productos que hoy en día se obtienen de la fuente fósil. Por otra parte, existen tecnologías ya maduras para su utilización y es, así mismo, considerable el esfuerzo desarrollado en nuevas tecnologías de producción y aplicación, que contribuirán en un corto-medio plazo a la mayor rentabilidad de explotación de esta fuente.
- ❖ La biomasa puede ser convertida en energía haciendo uso de diferentes tecnologías que implican procesos termoquímicos y bioquímicos. Entre los procesos termoquímicos se encuentra la gasificación como una alternativa de procesamiento que permite convertir la biomasa en un producto gaseoso de alto poder calórico cuya composición depende de la materia prima utilizada, la tecnología y las condiciones de operación. Uno de los componentes principales del gas producto es el hidrógeno, el cual es el mejor combustible en cuanto a poder calórico por unidad de masa se refiere (un gramo de hidrógeno contiene más del doble de energía que un gramo de gas natural) y desde el punto de vista ambiental, por su nula producción de emisiones de CO₂ (ya que solo produce agua) y su toxicidad nula. Por esta razón, la gasificación de biomasa para producción de hidrógeno se convierte en una tecnología de gran interés porque desde todo punto de vista ambiental sería una de las mejores alternativas para reemplazar los combustibles fósiles.
- ❖ La gasificación de biomasa en agua supercrítica para producción de hidrógeno es una opción prometedora desde el punto de vista ambiental y económico. En comparación con el proceso de gasificación convencional, este proceso es

adecuado para biomasa con alto contenido de humedad logrando una alta eficiencia ya que la etapa de secado no es requerida. Además, un gas rico en hidrógeno, con bajo contenido de CO se puede generar en un proceso de un solo paso, con la gran ventaja que se suprime la formación de alquitrán y carbón. Estos productos desde el punto de vista ambiental y económico son un problema significativo, por un lado porque contaminan las aguas residuales y son peligrosos para la salud humana por su característica mutagénica y cancerígena y por otro lado, porque aumentan de manera exorbitante los costos de post tratamiento de cada una de las corrientes de salida del proceso.

- ❖ A pesar de las grandes ventajas desde el punto de vista económico y ambiental que exhibe el proceso de gasificación de biomasa en agua supercrítica para producción de hidrógeno, actualmente esta tecnología se encuentra en la fase de investigación y desarrollo. Por esta razón, antes de pensar en construir una planta a escala industrial, es necesario mayor desarrollo tecnológico que permita conocer mejor el mecanismo de la reacción, y por ende definir los parámetros de operación y diseño adecuados, teniendo en cuenta que el comportamiento de los procesos a escala laboratorio difiere considerablemente del observado a escala industrial.

- ❖ En este momento la gasificación de biomasa para producción de hidrógeno es sin duda alguna, desde el punto de vista ambiental, una excelente alternativa para reemplazar la energía proveniente de los combustibles fósiles. Hoy día, la única limitante que tiene es desde el punto de vista económico ya que los costos de producción y almacenamiento de hidrógeno son demasiado altos comparados con los que tienen los combustibles convencionales.

RECOMENDACIONES

- ❖ En Colombia, existe una buena disponibilidad de biomasa para ser empleada en procesos de conversión térmicos como la gasificación, con el fin de producir energía renovable, por esta razón, es muy importante iniciar el proceso de investigación de este tipo de tecnología y así, realizar un avance en este campo que nos permita tener a la vista una solución al problema futuro que se presentará en cuanto a disponibilidad de energía obtenida a partir de combustibles fósiles y además, poder contribuir con la globalización del uso de energías más amigables con el medio ambiente.
- ❖ A nivel mundial, la gasificación de biomasa está lista para ser comercializada, pero actualmente la introducción a gran escala se ha visto obstaculizada por varias razones relacionadas con la Salud, Seguridad y Ambiente (HSE), ya que la sensibilización en HSE es un problema porque actores claves del mercado para su implementación no están familiarizados con la tecnología o no pueden juzgar los riesgos de HSE.
- ❖ Durante el proceso de gasificación de biomasa el producto principal es gas, pero como se vio, a la vez se generan muchos productos indeseados que pueden causar un impacto sobre el medio ambiente, la salud, y la fiabilidad operacional. Por lo tanto, es importante desarrollar investigaciones que nos permitan conocer más a fondo el proceso, composición del gas producto y características de los residuos sólidos y del agua residual, teniendo en cuenta, que previamente se debe realizar una selección del tipo de biomasa, tipo de gasificador y condiciones de operación. Todo con el fin de establecer los parámetros adecuados para el procesamiento de la biomasa y posterior tratamiento del gas producto y demás residuos líquidos y sólidos generados.

BIBLIOGRAFÍA

- ❖ URBAÉZ MÉNDEZ, Carlos Luis; CARBALLO ABREU, Leila; ARTEAGA CRESPO, Yasiel; MÁRQUEZ MONTESINO, Francisco. Biomasa: alternativa sustentable para la producción de Biogás. Universidad de Pinar del Río. Facultad de Forestal y Agronomía. Departamento de Química.
- ❖ CARRASCO, Juan. Capítulo 7 - La Biomasa como Fuente de Energía y Productos para la Agricultura y la Industria.
- ❖ Manuales sobre Energía Renovable: Biomasa/ Biomass Users Network (BUN-CA). -1 ed. -San José, C.R. :Biomass Users Network (BUN-CA), 2002. Versión para internet: <http://www.bun-ca.org>.
- ❖ LLEÓ ALONSO, Alberto. Tratamiento Térmico de Residuos. Director Dpto. Desarrollo de Infraestructuras de Residuos y Calidad Ambiental. VAERSA. 10 de julio de 2008.
- ❖ AV BRIDGWATER, AACM BEENACKERS, K SIPILA. An Assessment of the Possibilities for Transfer of European Biomass Gasification Technology to China.
- ❖ CIFERNO, Jared; Marano, John. Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals and Hydrogen Production. U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory. June 2002.
- ❖ RAJVANSHI, Anil. BIOMASS GASIFICATION. Nimbkar Agricultural Research Institute. Maharashtra, India. Versión para internet: <http://nariphaltan.virtualave.net/Gasifier.pdf>.

- ❖ PRINS, Mark. Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction. Technische Universiteit Eindhoven, 2005.
- ❖ BASU, Prabir; METTANANT, Vichuda. Biomass Gasification in Supercritical Water. International Journal of Chemical Reactor Engineering. Volume 7 – 2009.
- ❖ BABU P., Suresh. Biomass Gasification for Hydrogen Production – Process Description and Research Needs. IEA Thermal Gasification Task Leader Gas Technology Institute.
- ❖ BROWN, Robert C; SMEENK Jerod; SADAKA Samy; NORTON, Glenn; ZHANG, Ruiqin; SUBY, Andy; CUMMER, Keith; RITZERT, Joe; XU, Ming; LYSENKO, Steve; NUNEZ, Josh; BROWN, Nathan. Biomass-Derived Hydrogen from a Thermally Ballasted Gasifier. Final Technical Report. October 2001.
- ❖ L.J. Guo; Y.J. Lu; X.M. Zhang; C.M. Ji, Y; Guan, A.X. Pei. Hydrogen Production by Biomass Gasification in Supercritical Water: A Systematic Experimental and Analytical Study. Shaanxi Province, China.
- ❖ LAU, Francis S.; BOWEN, David A.; DIHU, Remon; DOONG, Shain; HUGHES, Evan E.; REMICK, Robert; SLIMANE, Rachid; TURN, Scott Q.; ZABRANSKY, Robert. Techno-Economic Analysis of Hydrogen Production by Gasification of Biomass. Final Technical Report. Gas Technology Institute. U.S. Department of Energy. Septiembre de 2002.