

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

INSTALACIÓN Y ARRANQUE DE UN
PROTOTIPO DE GASIFICACIÓN

TESIS
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

SERGIO OMAR CASTRO MARTÍNEZ

ASESORA:

DRA. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ



MÉXICO D.F. 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Dr. Francisco Javier Solorio Ordaz

VOCAL: Dra. Alejandra Castro González

SECRETARIO: M.I Rodolfo Alberto Herrera Toledo

1er. SUPLENTE: M.I. Juan Carlos Cedeño Vázquez

2do. SUPLENTE: Dr. Jorge Luis Naude de la Llave

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

En la empresa Servicios de Disposición Energreen, S.A. de C.V. con apoyo del PAPIME – DGAPA del proyecto 100810: “Prototipos de sistemas de bioenergía y los biocombustibles” México, D.F.

ASESORA DEL TEMA:

Dra. Alejandra Castro González

SUSTENTANTE:

Sergio Omar Castro Martínez

Agradezco a mis padres, hermanas, compañeros y profesores que me ayudaron a la realización de este proyecto.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	I
ÍNDICE DE TABLAS.....	III
RESUMEN.....	IV
INTRODUCCIÓN.....	V
OBJETIVOS.....	VI
Capítulo I. ANTECEDENTES.....	1
1.1 Energía de la biomasa	2
1.2 Procesos transformadores de la biomasa a energía	5
1.2.1 Procesos bioquímicos.....	6
1.2.2 Procesos termoquímicos.....	10
1.3 Uso de la bioenergía en México	16
1.4 Uso de la bioenergía en países de primer mundo	19
1.5 Cambio climático y gases efecto invernadero.....	20
Capítulo II. Fundamentos	25
2.1 Gasificación	25
2.2 Procesos de gasificación.....	28
2.2 Tipos de gasificadores	30
2.3 Parámetros de control en sistemas de gasificación.....	31
2.4 Método de diseño y operación de gasificadores	34
2.4.1 Operación de gasificadores a contracorriente.....	34
2.4.2 Operación de gasificadores de corrientes paralelas	38
2.4.3 Operación de gasificadores de lecho fluidizado.....	38
2.5 Uso de gasificadores en el mundo	40
2.6. Mantenimiento a gasificadores.....	45
2.6.1 Mantenimiento preventivo	45
Capítulo III MATERIALES Y MÉTODOS	47
3.1 Dimensiones del equipo de gasificación	49
3.2 Componentes del sistema de gasificación	53
3.2.1 Tolva de materia prima	53
3.2.2 Zona de secado.....	53

3.2.3 Control de nivel de combustible	54
3.2.4 Intercambiador de calor	55
3.2.5 Reactor de gasificación.....	56
3.2.6 Entrada de aire	56
3.2.7 Boquillas de aire	57
3.2.8 Puerto de iluminación	58
3.2.9 Reducción de campana	58
3.2.10 Rejilla	59
3.2.11 Ciclón.....	60
3.2.12 Filtro de gas de lecho empacado.....	60
3.2.13 Sistema de transmisión de gas.....	61
3.2.14 Quemador	62
3.2.15 Alarma de monóxido de carbono (CO).....	62
3.2.16 Medición de temperatura	63
3.2.17 Medición de humedad	64
Capítulo IV. RESULTADOS.....	66
4.1 Armado de equipo de gasificación	66
4.1.1 Colocar piernas a la cubierta de gas.....	66
4.1.2 Colocar junta en la brida superior del reactor	67
4.1.3 Aislamiento y camisa de acero inoxidable para cubierta de gas	67
4.1.4 Armado del reactor	68
4.1.5 Reactor dentro de la cubierta de gas y ajuste de parrilla	71
4.1.6 Puertos para ajuste de rejilla y limpieza del reactor.....	72
4.1.7 Ciclón	73
4.1.8 Frasco de condensado.....	74
4.1.9 Ejector Venturi.....	74
4.1.10 Aislamiento granular	75
4.1.11 Motor y tornillo sinfín	75
4.1.12 Zona de secado – intercambiador de calor	76
4.1.13 Filtro de gas	76
4.1.14 Conexión de línea de gas de la zona de secado - ciclón.....	78
4.1.15 Tolva	78

4.2 Operación del gasificador de flujo descendente.....	79
4.2.1 Preparación final antes de la puesta en marcha.....	79
4.2.2 Ignición.....	80
4.2.3 Llamada.....	80
4.2.4 Diagrama de flujo.....	80
4.2.5 Especificaciones de operación del sistema.....	81
4.3 Diagrama de bloques del proceso de gasificación.....	83
4.3.1 Balance de masa y energía.....	85
4.4 Cálculo de la eficiencia.....	87
4.5 Cálculo del ahorro económico.....	90
4.6 Cálculo de Emisiones de CO ₂	92
Capítulo V. CONCLUSIONES.....	91
REFERENCIAS.....	94

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Diagrama del ciclo de la biomasa	2
Figura 1.2	Uso de la energía primaria en el mundo durante 2004	4
Figura 1.3	Incremento total de suministro de la energía (ACE) y en el mundo de 2000 a 2008	4
Figura 1.4	Uso de la energía primaria en México	5
Figura 1.5	Tipos de reactores sin retención interior de biomasa	8
Figura 1.6	Tipos de reactores con retención interior de biomasa.....	8
Figura 1.7	Diagrama de la porción de la gasificación y sus subproductos.....	15
Figura 1.8	Estructura de la producción de energía primaria	17
Figura 1.9	Emisiones mundiales de CO ₂ en los escenarios inicial y de perspectiva	22
Figura 1.10	Aumento de Temp. promedio global, Promedio mundial de nm y Cubierta de nieve ..	23
Figura 1.11	Evolución de las emisiones de GEI del sector energético (Tg CO ₂).....	24
Figura 2.1	Esquema de proceso de gasificación.....	25
Figura 2.2	Tipos de gasificadores	39
Figura 2.3	Capacidad de gasificación a nivel mundial y el crecimiento planificado	41
Figura 2.4	Capacidad mundial de la gasificación y el crecimiento planificado por región.....	43
Figura 2.5	Capacidad mundial de la gasificación y crecimiento planificado por la materia prima	44
Figura 2.6	Capacidad mundial de la gasificación y crecimiento planificado por producto	45
Figura 2.7	Capacidad mundial de la gasificación y crecimiento planificado por la tecnología	45
Figura 3.1	Fotografía de lo componentes del gasificador de Flujo descendente.....	50
Figura 3.2	Diagrama general y dimensiones del equipo de gasificación	50
Figura 3.3	Diagrama y dimensiones del filtro de gas empacado.....	51
Figura 3.4	Diagrama y dimensiones del reactor de flujo descendente	52
Figura 3.5	Fotografía de la tolva de materia prima	53
Figura 3.6	Fotografías de la zona de secado	54
Figura 3.7	Fotografía del controlador de nivel.....	55
Figura 3.8	Fotografía del intercambiador de calor	55
Figura 3.9	Fotografía del reactor de gasificación.....	56
Figura 3.10	Fotografías de la entrada de aire	57
Figura 3.11	Fotografía de las boquillas de aire	57
Figura 3.12	Fotografía del puerto de iluminación.....	58
Figura 3.13	Fotografías de la reducción de campana	59
Figura 3.14	Fotografías de la rejilla	59
Figura 3.15	Fotografía del ciclón	60
Figura 3.16	Fotografía del filtro de gas.....	61
Figura 3.17	Fotografías del sistema de transmisión de gas	62
Figura 3.18	Fotografía del tubo quemador	62
Figura 3.19	Fotografía del medidor de monóxido de carbono	63
Figura 3.20	Imagen de termómetro digital de dos canales.....	64
Figura 3.21	Imagen del medidor de humedad.....	64

Figura 4.1	Fotografías de la etapa de armado de piernas en reactor	66
Figura 4.2	Fotografía de la adherencia de junta aislante en reactor	67
Figura 4.3	Fotografías de etapa de armado de interior de cubierta de gas	68
Figura 4.4	Fotografías de líneas de gas	69
Figura 4.5	Fotografía de boquillas de entrada de aire.....	69
Figura 4.6	Fotografías de instalación de reducción de campana.....	70
Figura 4.7	Fotografías de armado de boquillas de aire	71
Figura 4.8	Fotografía de cinta metálica en reactor	71
Figura 4.9	Fotografías de armado de reactor y cubierta de gas.....	72
Figura 4.10	Fotografías de colocación de manivelas de limpieza.....	73
Figura 4.11	Fotografías de armado de ciclón	73
Figura 4.12	Fotografía del frasco de condensado.....	74
Figura 4.13	Arreglo del eyector Venturi	74
Figura 4.14	Fotografía aislamiento granular alrededor de reducción de campana.....	75
Figura 4.15	Fotografías del motor y tornillo sinfín en zona de alimentación	75
Figura 4.16	Fotografía de arreglo zona de secado-intercambiador de calor	76
Figura 4.17	Fotografía de filtro de gas	77
Figura 4.18	Fotografía de conexión de línea de gas.....	78
Figura 4.19	Fotografía de tolva de alimentación.....	79
Figura 4.20	Diagrama de flujo del sistema de gasificación.....	81
Figura 4.21	Diagrama de sistema de gasificación.....	82
Figura 4.22	Diagrama de bloques del proceso	83
Figura 4.23	Fotografía del gasificador operando	84
Figura 4.24	Diagrama de balances de masa y energía.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Producción de energía primaria.....	18
Tabla 1.2	Usos finales de la bioenergía.....	19
Tabla 1.3	Emisiones de GEI por fuente (Tg CO ₂).....	24
Tabla 2.1	Mezcla de gases obtenida del proceso de gasificación.....	30
Tabla 2.2	Modo de contacto del sólido con el gas.....	31
Tabla 2.3	Ceniza composición de la biomasa mayor (ppm en peso seco de la biomasa).	37
Tabla 2.4	Plantas de gasificación operando, en construcción y planificadas alrededor del mundo.....	42
Tabla 3.1	Herramientas necesarias para el ensamble.....	49
Tabla 3.2	Resumen de componentes del equipo de gasificación.....	65
Tabla 4.1	Promedio de valores caloríficos inferiores.....	88
Tabla 4.2	Composición del gas procedente de gasificadores comercial.....	88
Tabla 4.3	Eficiencia obtenida con combustible de madera.....	89
Tabla 4.4	Eficiencia obtenida con combustible de carbón vegetal.....	89

RESUMEN

Este trabajo de tesis, propone la instalación y el arranque de un equipo de gasificación de flujo descendente alimentado con biomasa utilizando residuos de la poda de especies de árboles de Ciudad Universitaria (CU).

El gasificador se puso en marcha iniciando con la regulación de flama, verificación del correcto funcionamiento del equipo, además de la identificación, uso y explicación detallada de cada uno de los instrumentos que componen al equipo de gasificación. El equipo de gasificación tiene una capacidad de producción de 10kW de gas de síntesis para alimentar un motor de combustión interna a base de gas con dicha potencia, la capacidad de almacenamiento depende principalmente de la densidad de la materia prima a procesar. Sin embargo se conoce que la tolva que alimenta al proceso tiene un volumen de 0.013 m³ y tiene un consumo de biomasa en un rango de 2 a 15 kg/hr.

Este trabajo dejó las bases y la ingeniería básica de cada uno de los elementos que componen al equipo. Con la gasificación de biomasa se puede obtener una eficiencia térmica de gasificación del 92.10% en las condiciones máximas de operación y con el valor calorífico más alto de la madera, y así un ahorro beneficio de \$90,235.50 m.n. y una reducción de emisiones de CO₂ de 18,889.44 kg de CO₂ por cada 8,760hrs que el gasificador produzca gas de síntesis.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la demanda de energía se ha incrementado significativamente, es por ello que se han buscado fuentes que contribuyan con el abasto de energía. Hoy en día el cuidado del medio ambiente es un tema que juega un papel muy importante en la generación de energía, se buscan formas alternas, limpias, económicas y con la calidad suficiente para reemplazar a los combustibles fósiles. Las principales fuentes de investigación se enfocan a las energías renovables, ya que además de ser fuentes que parecen inagotables tienen las características para cubrir la demanda, de mayor energía.

Existen fuentes de energía renovables o llamadas también energías limpias que se utilizan y son medios de abastecimiento para países desarrollados, pero también existen fuentes que se encuentran en vías de desarrollo que su futuro parece ser muy prometedor.

La biomasa es un recurso que ha sido utilizado desde hace miles de años por los antepasados, como un combustible para la producción de calor. Esta materia además de tener cualidades caloríficas, tiene la ventaja de no emitir CO_2 a la atmósfera al momento de su combustión, todo esto por el equilibrio que se realiza desde que es una materia viva, una planta. Dichas ventajas han permitido que se realicen investigaciones de tal forma que el proceso de combustión sea más eficiente y se obtenga mayor beneficio de la biomasa. A partir de ello existen procesos térmico y químicos que han permitido que la biomasa se convierta en un medio sustentable para la producción de energía.

El proceso de gasificación es un proceso termoquímico que fue utilizado y desarrollado durante la segunda guerra mundial, esta tecnología a pesar de ser de gran utilidad a lo largo de éste periodo, perdió importancia con la introducción de los combustibles líquidos derivados del petróleo. Sin embargo el incremento continuo en el costo del petróleo ha propiciado que se retomen y desarrollen nuevas tecnologías que permitan sustituir a estos combustibles mediante la preservación del medio ambiente.

La gasificación de biomasa es un proceso termoquímico en un ambiente pobre en oxígeno que permite la transformación de material orgánico sólido en un gas combustible con un poder energético de gran interés. La importancia se enfoca principalmente en el gas obtenido a través del proceso tras ser debidamente acondicionado, ya que su uso puede ser destinado para la producción de energía térmica o como combustible para alimentar una caldera, una turbina o un motor.

La producción de gas con un gasificador de flujo descendente permite la producción de gas con bajo contenido de alquitrán, es decir un combustible con las características necesarias para hacer funcionar un motor de combustión. En países europeos industrializados la gasificación de biomasa ha sido un tipo de energía renovable que ha ido ganando un lugar en la producción de energía, es por ello que esta fuente de energía debe ser una tecnología

que debe ser considerada y experimentada en el país para conocer los usos que se le pueden asignar, de tal forma que vaya ganando terreno en la industria energética hasta lograr un porcentaje de uso considerable como combustible alternativo o sustituto de los combustibles fósiles.

OBJETIVO GENERAL

Instalar y arrancar un prototipo de gasificación de flujo descendente para producción de energía térmica.

Capítulo I. ANTECEDENTES

La energía es la cualidad de un sistema que puede transformarse modificando su situación o estado produciendo un trabajo y existe en diferentes formas: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química, nuclear etc. (Castells y col., 2005; Boles y Cengel 2006). Debido a ello y al gran valor que ésta tiene en las interacciones con el medio ambiente es necesario explicar un poco acerca de los recursos que son necesarios para la producción de la energía, tal como lo son los renovables y no renovables.

Los recursos no renovables son una fuente de energía proveniente de la descomposición y almacenamiento de vegetales y animales a lo largo de millones de años a través de complicados procesos. Por lo tanto, son recursos limitados que disminuyen conforme éstos se consumen (CONUEE, 2012).

Los recursos renovables se definen como fuentes prácticamente inagotables con respecto al tiempo de vida de un ser humano en el planeta y cuyo aprovechamiento es técnicamente viable, además son poco dañinas o nada en absoluto para el medio ambiente, ya que no generan residuos peligrosos. La escasez de combustibles fósiles en los últimos años nos ha llevado a implementar tecnologías que sustituyan las fuentes de energía no renovables por las que sí lo son, tecnologías que aún se encuentran en desarrollo (Madrid, 2009). Dentro de estos tipos de energía se encuentran: la solar, la eólica (viento), la minihidráulica (ríos y pequeñas caídas de agua), la biomasa (materia orgánica), la geotermia (calor de las capas internas de la Tierra) y la oceánica, principalmente (ANES, 2013).

Debido a que la investigación está enfocada a gasificadores, y su combustible son los recursos renovables, específicamente biomasa, es importante conocer a detalle esta fuente de energía.

La biomasa es el material biológico producto de la actividad agrícola, forestal, industrial y ganadera, que puede utilizarse como combustible y/o para la producción industrial, que almacena energía utilizable del sol, tal como se muestra en la Figura 1.1. En el terreno de las energías renovables se refiere a la materia vegetal que se cultiva para generar electricidad o para producir biocombustibles. Aquí se incluye la masa biológica de origen vegetal o animal útil para producir fibras, químicos o calor. Biomasa es el cúmulo de desperdicios biodegradables que es posible quemar como combustible. Excluye a la materia orgánica que ha estado sujeta a transformaciones, como el petróleo y el carbón, productos de largos ciclos y lentos procesos geológicos.

La biomasa puede obtenerse en estado sólido por combustión o bien en estado líquido mediante la fermentación de azúcares, o gaseosos, a través de la descomposición anaerobia de la materia orgánica (Creus, 2004).

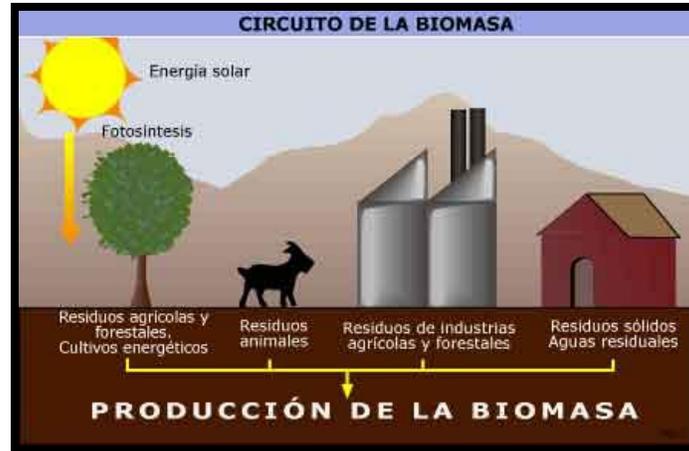


Figura 1.1 Diagrama del ciclo de la biomasa (AMBIENTUM, 2013)

Debido a que existen diferentes tipos de biomasa es importante describir la lista de clasificación que define los diferentes tipos que existen:

Biomasa natural. Es el tipo de biomasa que se obtiene de las ramas de los árboles cuando estas se caen o se realiza una poda.

Biomasa residual seca. Procedente de actividades agrícolas, forestales, industrias de la alimentación, de la madera, etc. Este tipo de industrias proceden residuos sólidos tales como serrín, orugos, viruta paja, etc., con un contenido energético importante.

Biomasa residual húmeda. Se caracteriza por ser líquida. Así por ejemplo se tiene los purines como resultado de la actividad ganadera y aguas residuales.

Cultivos energéticos. Son cultivos de maíz, girasol, caña de azúcar, con usos no alimenticios en la cual se busca obtener la mayor cantidad de energía posible de tal manera que se pueda producir energía térmica, eléctrica o mediante su transformación en biocombustibles. Estos cultivos deben poseer una alta eficiencia fotosintética y un ciclo vegetativo lo más largo posible.

1.1 Energía de la biomasa

La biomasa para que pueda considerarse como material biológico capaz de utilizarse como combustible, es necesario que tenga la cualidad de liberar energía de forma violenta. Además, permite obtener calor y electricidad por un lado, y combustibles líquidos por otro (biocombustibles), proporcionando bioenergía. Para producir energía primero hay que obtenerla, todo material biológico obtiene la mayor parte de su energía de los rayos del sol mediante diferentes procesos. A pesar de la gran cantidad de energía de la cual nos provee el sol en forma de radiación de distinta longitud de onda, únicamente el proceso de

fotosíntesis, medio por el cual las plantas absorben energía, toma una cantidad menor al 1% del total de la energía para realizar dicho proceso. Es decir 173,000 TW es la energía que llega del Sol a la Tierra sólo 40 TW se convierte en materia orgánica por el proceso de fotosíntesis (González, 2009).

La biomasa almacena su energía que proviene de los rayos del sol en el proceso de fotosíntesis, las plantas absorben la energía lumínica del sol (fotones) en unas células llamadas cloroplastos, que contienen una sustancia llamada clorofila, que es un pigmento que absorbe la energía luminosa del sol. En el proceso fotosintético se consigue una regeneración del CO₂ y el agua, así como el reciclaje de la energía solar mediante procesos que se dan a través del agua, el suelo, los animales que se comen a las plantas y el proceso de descomposición. Un kilogramo de biomasa genera 12,560 kJ, mientras que un litro de gasolina proporciona 41,868 kJ. El contenido energético de la biomasa se mide en función del poder calorífico del producto energético obtenido durante su tratamiento, o bien en función del poder calorífico del recurso. En el caso de los residuos ganaderos, como los purines, su contenido energético es medido por el biogás generado (está supeditado al sustrato de partida y a la tecnología empleada) (Creus, 2004).

La biomasa cubre aproximadamente el 14% de las necesidades energéticas mundiales en los países industrializados. Sin embargo, solo cubre de media el 3% de la energía primaria, con la excepción de los países nórdicos europeos, donde su utilización para la producción de calor en centrales avanzadas es bastante común. Los países en vías de desarrollo cubren con biomasa, en este caso con consumo tradicional de leña, un 38% de su demanda energética. En algunos países de África, por ejemplo, este porcentaje se eleva al 90% (Ben, 2003). La biomasa sólida (principalmente la leña utilizada para cocción en los países en vías de desarrollo) es la más importante de todas las fuentes de energía renovable, y representa más del 10% del Suministro Total de Energía Primaria (STEP), o tres cuartas partes de la oferta de fuentes renovables del mundo.

Se entiende como energía primaria a toda aquella materia orgánica que es extraída directamente de los recursos naturales y suele utilizarse como combustible para la generación de calor y electricidad. La energía secundaria o productos secundarios se refieren principalmente a todos los productos energéticos no primarios, es decir son aquellos procesos primarios que mediante algún proceso se transformaron a energía secundaria.

Debido a la importancia que ha tenido la entrada de las tecnologías para la transformación de energías renovables en fuentes de energía alrededor del mundo, se ha visto un notable crecimiento en el uso de energías limpias, con tasas que van del 30% y 40 % de desarrollo en los últimos años (AIE, 2011). Estas cifras nos indican que las tecnologías para el desarrollo de los recursos renovables como combustibles están siendo impulsados de manera considerable en beneficio para el planeta como se observa en la Figura 1.2.

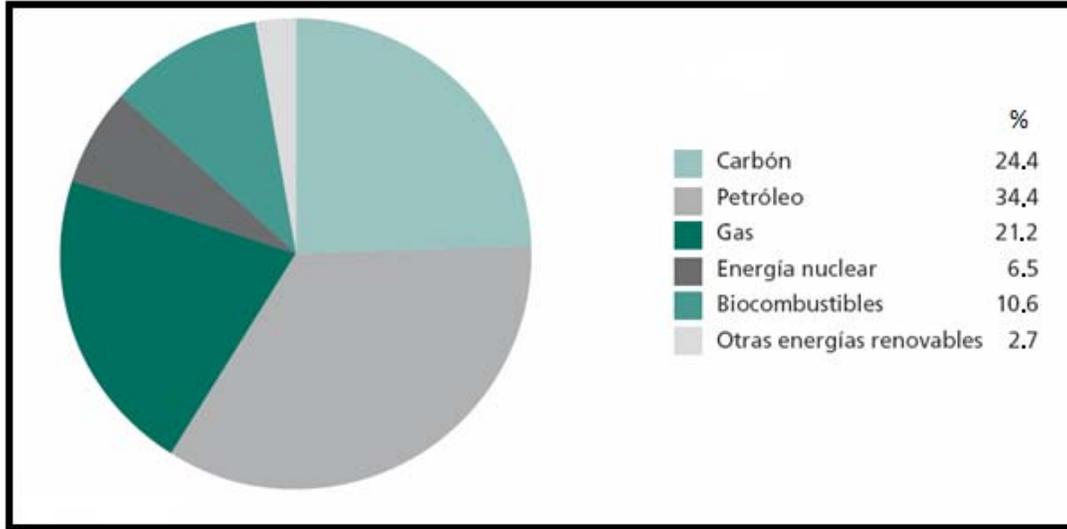


Figura 1.2 Uso de la energía primaria en el mundo durante 2004 (AIE, 2007)

Se estima que para el año 2100 exista un incremento hasta conformar el 25% del total mundial de la producción de energía por biomasa (Masera, 2003). Este incremento puede observarse en la Figura 1.3 en donde se muestra el incremento que se ha ido dando a través de los años (2000-2008) en las energías primarias.

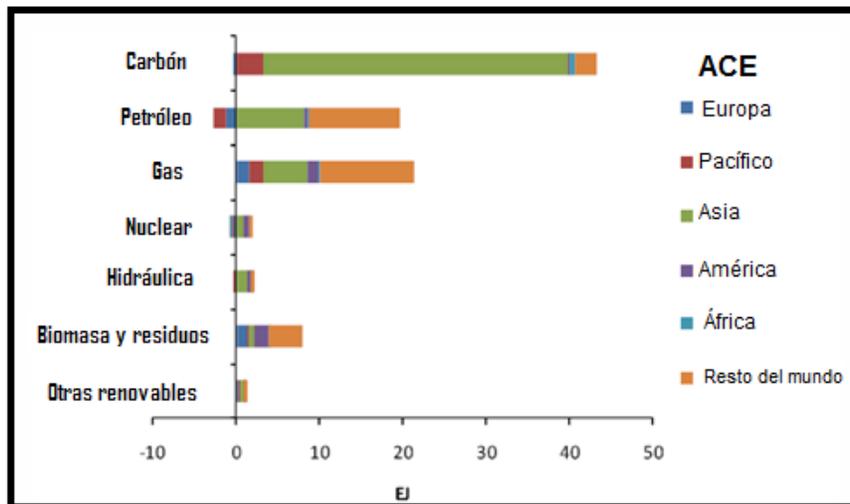


Figura 1.3 Incremento total de suministro de la energía en Administrador Certificado de Energía (ACE) y en el mundo de 2000 a 2008 (AIE, 2011)

En México también se ve reflejado el incremento del uso de energías limpias alrededor del mundo. Como se observa en la Figura 1.4, el aumento anual de cada tipo de energía se da en toneladas equivalentes de petróleo (toe).

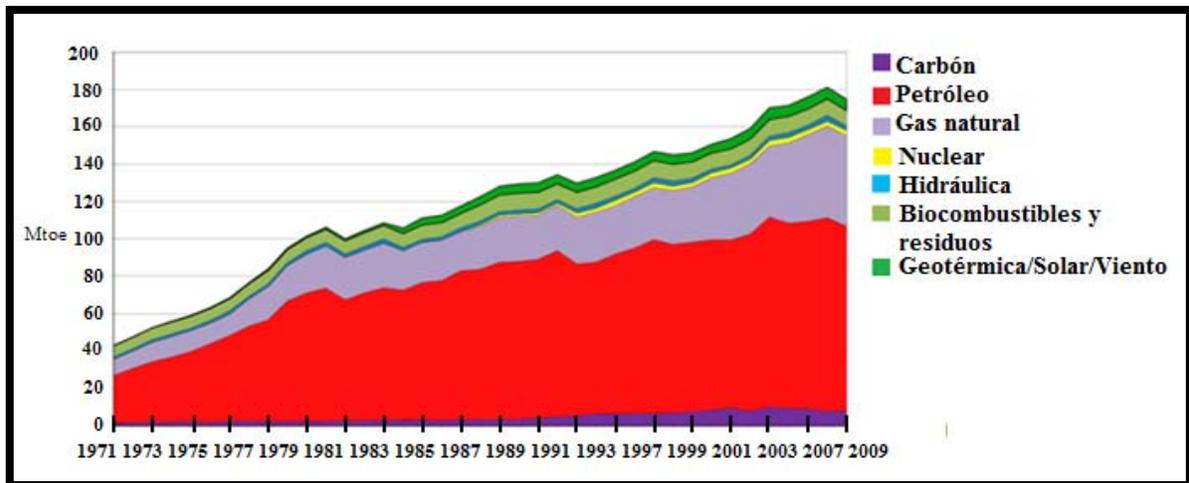


Figura 1.4 Uso de la energía primaria en México (AIE, 2011)

La situación para la producción de energía a través de biomasa es muy favorable en el país ya que Comisión Federal de Electricidad (CFE) considera que por medio de esta fuente de energía la capacidad podría incrementar notablemente.

Debido a que la producción de biomasa alrededor del mundo cumple con el concepto de desarrollo sostenible; a través de esta fuente de energía también llamada bioenergía es posible que la biomasa entre en competencia económica con el petróleo.

México cuenta con un gran potencial para producir energía a partir de la biomasa. Se estima que con los residuos agrícolas y forestales con potencial energético y los residuos sólidos urbanos de las diez principales ciudades, el país tiene una capacidad de 803 Mega Watts (MW) y podría generar 4,507 MW al año (CFE, 2012)

1.2 Procesos transformadores de la biomasa a energía

La biomasa ha sido utilizada por el hombre como fuente de energía durante casi toda su historia. Primero se empezó a utilizar para cocinar y calentar los alimentos, posteriormente se utilizó para actividades artesanales e industriales por medio de la combustión directa. En la actualidad muchas comunidades rurales de escasos recursos se dedican a la recolección y quema de biomasa para subsistir. Esta extracción de energía de la biomasa no es el proceso más adecuado para su conversión, ya que implica graves problemas de deforestación, desertización y reducción de la biodiversidad. Es por eso que a lo largo de los años se han ido descubriendo procesos que resultan más eficientes además de ser muy amigables y benéficos para el medio ambiente. La quema de biomasa para producir calor y transformación en combustible para su mejor transporte y almacenamiento, son las dos formas desde el punto de vista energético en que la biomasa se puede aprovechar.

Para que la biomasa pueda ser utilizada con fines energéticos, ésta requiere cierta adecuación para utilizarla en procesos convencionales. Tal como lo menciona Guillen (2004) estos procesos pueden ser:

Físicos. Actúan físicamente sobre la biomasa y están asociados a las fases primarias de transformación dentro de lo que puede denominarse fase de acondicionamiento, como triturado, astillado, compactado e incluso secado.

Químicos. Relacionados con la digestión química, generalmente mediante hidrólisis, pirólisis y gasificación.

Biológicos. Por la acción directa de microorganismos o de sus enzimas en general llamada fermentación. Son procesos relacionados con la producción de ácidos orgánicos, alcoholes, cetonas y polímeros.

Termoquímicos. Se basan en la transformación química de la biomasa al someterla a altas temperaturas (300-1500°C). Cuando se calienta la biomasa se produce un proceso de secado y evaporación de sus componentes volátiles, seguido de reacciones de crackeo (descomposición de sus moléculas). De lo anterior siguen reacciones en la que los productos resultantes de la primera fase reaccionan entre sí y con los componentes de la atmósfera en la que ocurra la reacción se obtienen así los productos finales.

Todos estos procesos, además de generar productos más energéticos, dan lugar a la emisión de calor, que puede ser aprovechado en el lugar donde es producido. Esto se utiliza para sistemas de calefacción, o para producir el vapor necesario para hacer funcionar una turbina de vapor capaz de generar energía eléctrica. El uso de la biomasa con el transcurso de los años ha incrementado el interés por los usos energéticos, debido a los beneficios que ésta puede tener en cuanto a costos y cuidado del medio ambiente, las consideraciones más importantes son: a) La existencia de tecnologías bien desarrolladas para generar a partir de ella energía calorífica (quemándola en calderas) y combustibles líquidos y gaseosos. b) Las sustancias orgánicas obtenidas del petróleo, gas natural o carbón empleados en industrias como la petroquímica, pueden obtenerse también a partir de la biomasa.

1.2.1 Procesos bioquímicos

Conforme a lo descrito anteriormente se deduce que los procesos biológicos y químicos se presentan en el proceso bioquímico. La biomasa puede convertirse en combustibles gaseosos o líquidos de mayor grado, estabilidad y densidad energética, mediante la acción directa de microorganismos, como lo es la digestión y la fermentación. Esta degradación de la biomasa por acción de los microorganismos se puede dividir en dos grandes grupos: Los que se producen en ausencia de aire (anaerobios) y los que se producen en presencia de aire (aerobios).

1.2.1.1 Digestión

Es un proceso de descomposición de la biomasa verde y húmeda que se produce en ausencia de oxígeno, provocado por acciones de microorganismos, similares a las bacterias, denominados *archeas*. Cualquier material de origen biológico experimenta el proceso de descomposición anaerobia, y se produce más favorablemente en ambientes cálidos, húmedos y faltos de aireación (González, 2009).

La temperatura es un factor muy importante para la producción del biogás, ya que cuando existe un incremento de temperatura se aumenta la tasa de hidrólisis. La velocidad de crecimiento de las bacterias, es el resultado del incremento de temperatura y producción del combustible es más rápida. Por lo tanto para el proceso de la degradación anaerobia pueden realizarse tres rangos de temperatura como las describe Castells y col., (2005).

Psicrófilo: Por debajo de 20°C

Mesófilo: Entre 30 y 40°C

Termófilo: Entre 50 y 70°C

Trabajando en el rango termófilico se asegura, además, la eliminación de hierbas y de huevos y larvas de insectos. Por lo cual presenta interés para el tratamiento de residuos que han de ser aplicados a suelos cultivos, que requieran un cierto grado de higienización.

El proceso en un reactor anaerobio tiene como resultado la generación de mezcla de gases en los que principalmente se puede encontrar metano y dióxido de carbono con nitrógeno, también conocido como *biogás*. También se puede encontrar generación de metano por medio de la degradación aerobia de forma natural cuando la descomposición de la materia orgánica continúa a través del tiempo, a partir de rellenos de terrenos con basuras orgánicas y gas de vertederos.

El gas producido en los rellenos sanitarios, eventualmente se escapa a la atmósfera. Sin embargo, el gas se puede extraer mediante la inserción de tuberías perforadas para dejar salir al gas de vertederos generado; y enterradas en la basura a profundidades de hasta 20 metros. Con esto al cabo de unos cuatro años con una produciría unos 150 a 300 m³ de biogás por tonelada de basura sin seleccionar (González, 2009).

Otros parámetros importantes que hay que considerar, como el tiempo de retención y la velocidad de carga orgánica, dependen del tipo de reactor adoptado, así como de las características del substrato. El sistema por el cual la biomasa es transformada, es a través de los diferentes reactores que éstos a su vez se clasifican en reactores sin retención interior de biomasa, y los reactores con retención interior de biomasa, que se muestran en la Figura 1.5 y Figura 1.6.

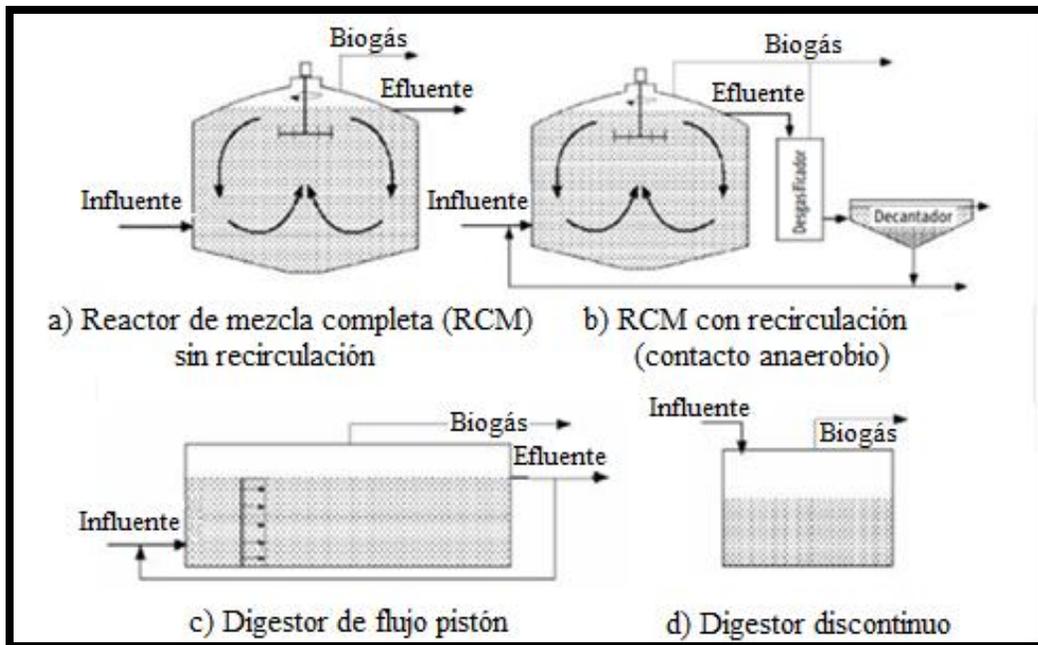


Figura 1.5 Tipos de reactores sin retención interior de biomasa (Castells y col., 2005)

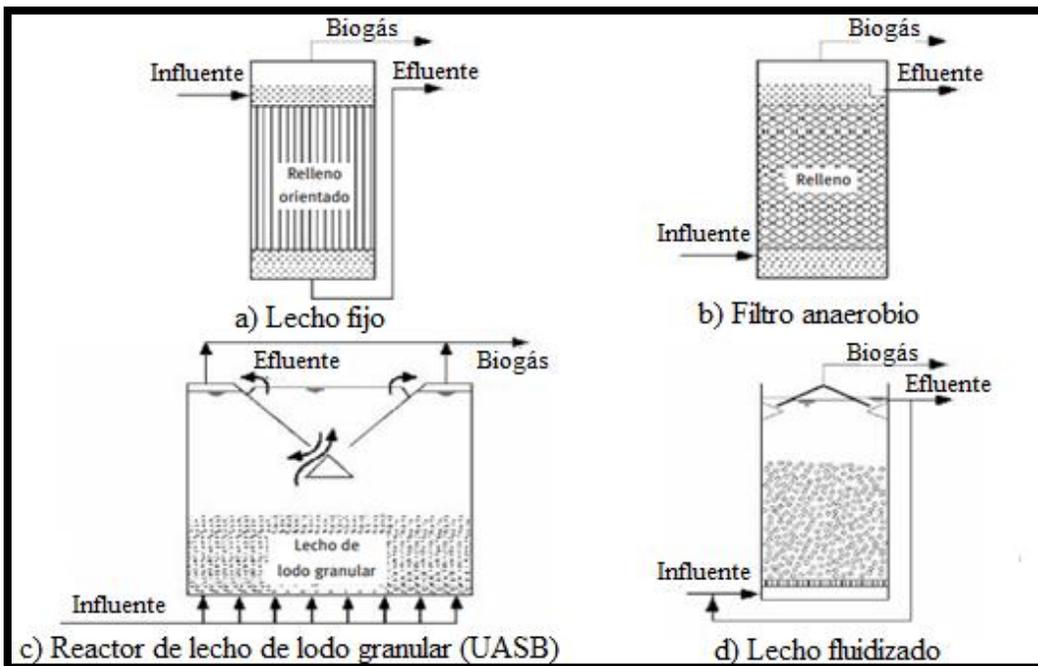


Figura 1.6 Tipos de reactores con retención interior de biomasa (Castells y col., 2005)

1.2.1.2 Fermentación

La fermentación es un método de estabilización biológica utilizado desde hace más de 6,000 años. La descomposición de las sustancias orgánicas se realiza lentamente por microorganismos o enzimas que no se modifican a lo largo de las reacciones. Es importante que el proceso se efectúe bajo ciertas condiciones para una buena operación. En particular con el control de la temperatura y el pH (Creus, 2004). La fermentación de carbohidratos se realiza para producir etanol.

El etanol es un alcohol empleado como combustible en sustitución de la gasolina o mezclado con ella y su insumo en la obtención de productos químicos (vitaminas, antibióticos, solventes y otros).

El etanol puede obtenerse a partir del etileno, el que a su vez se obtiene de hidrocarburos. Es posible también producir etanol a partir de la fermentación de biomasa rica en azúcares o almidones. Tal como la remolacha, la mandioca, el sorgo, el maíz, el trigo, la caña de azúcar y subproductos, como se ha realizado efectivamente desde hace varios siglos.

La fermentación suele ir acompañada de desprendimiento de calor y gases. Una investigación de Jeantet y col. (2006) menciona que las fermentaciones más utilizadas, son las fermentaciones alcohólica, láctica y acética.

La fermentación alcohólica, transforma los azúcares en alcohol y en gas carbónico esencialmente bajo la acción de levaduras. También es una fermentación anaerobia. La fermentación láctica es también anaerobia y transforma los azúcares en ácido láctico. La fermentación acética se realiza en presencia de oxígeno (fermentación aerobia), transformando el alcohol en ácido acético. Hay otros tipos de fermentaciones como la propiónica, butírica, maloláctica, entre otros.

La fermentación metánica, es una transformación microbiana que se produce en ausencia de aire (condiciones anaerobias) originando un biogás. El biogás es una mezcla de metano y ácido carbónico. Se genera también una suspensión acuosa de materiales sólidos integrada por compuestos difíciles de degradar junto con nitrógeno fosforo y los demás elementos presentes inicialmente en la biomasa. Conocida hace mucho tiempo por los elaboradores de vinos y cervezas, mediante el cual los azúcares contenidos en la biomasa se convierten en alcohol etílico por medio de levaduras o de ciertas bacterias encargadas de la conversión de material orgánico desde una forma química a otra.

Las concentraciones de etanol obtenidas de la fermentación son del orden de un 15% en volumen. Si se desea etanol puro o concentraciones volumétricas mayores es necesario un tercer paso adicional de destilación, que requiere cantidades importantes de energía (Alonso y Rodríguez, 1985).

En esta destilación se emplea uno de los siguientes dos métodos (Overend, 1982): a) Vaporización de la mezcla etanol/agua sin reflujo (destilación “por flasheo”), o b) Destilación continua con reflujo rectificación. Cualquiera que sea el proceso de destilación empleado, la concentración máxima de etanol obtenible es de un 95.6% (mezcla llamada azeotrópica). Si se requiere etanol puro, debe emplearse un proceso químico adicional para romper el azeótropo.

1.2.2 Procesos termoquímicos

Los procesos termoquímicos, son una tecnología que se utiliza para la conversión de la biomasa en energía o combustible, debido a la capacidad que ésta tiene en su estado sólido y seco para su transformación a altas velocidad de reacción. Los procesos termoquímicos son la combustión, gasificación y pirólisis. De estos procesos se obtienen conversiones normalmente elevadas de la materia prima del 85 y 95% de su materia orgánica con alta eficiencia y relativa poca sensibilidad al variar de un material a otro (Míguez, 2007).

Estos procesos son métodos que se realizan a elevadas temperaturas para hacer una transformación del carbono fijo de la biomasa en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, por procesos específicos. También se puede producir calor y productos químicos a más de 110°C , en presencia de aire, para la producción de gas de "síntesis" con pequeñas cantidades de CH_4 , CO_2 y H_2O (UNAM, 1983).

1.2.2.1 Combustión

Actualmente, la combustión directa de la biomasa es empleada por la gran mayoría de la población rural mundial para calentamiento y cocción de alimentos, y en algunas instalaciones industriales para generar calor y vapor (Alonso y Rodríguez, 1985). Las tecnologías utilizadas para la combustión directa de la biomasa abarcan un amplio espectro que va desde el sencillo fogón a fuego abierto, hasta calderas de alto rendimiento utilizadas en la industria (SENER, 2008). La combustión se define como: Reacción química relativamente rápida, mediante la que se combinan el oxígeno del aire (comburente) con los diferentes elementos oxidables que contienen el combustible, originándose en el proceso un desprendimiento de calor. El proceso puede ir acompañado de llama (incluyendo explosión) o no (incluyendo incandescencia y brasas incandescentes). El aire atmosférico empleado normalmente en la combustión es básicamente una mezcla de oxígeno y nitrógeno, acompañados de pequeñas cantidades de gases como anhídrido carbónico y argón, así como de vapor de agua. Su composición varía ligeramente con el contenido en humedad y con la altura (RENOVETEC, 2013).

El nitrógeno del aire y los restantes componentes suelen permanecer inalterados (excepto cuando las temperaturas son muy altas) acompañando a los gases originados en la combustión. La reacción global de la biomasa puede ser representada por la ecuación 1.1.



donde $\text{CH}_{1.4} \text{O}_{0.6}$ es la fórmula promedio para la biomasa típica. El nitrógeno está entre paréntesis porque es una porción inerte de aire y no toma parte en la reacción.

La estequiometría de la combustión se ocupa de las relaciones másicas y volumétricas entre reactivos y productos. Los aspectos a determinar son principalmente:

A) Aire necesario para la combustión

B) Productos de la combustión y su composición

Para predecir estas cantidades es preciso referirse a un proceso ideal que dependa de unos pocos parámetros, básicamente la naturaleza del combustible. Para definir este proceso ideal se consideran los tipos de combustión siguientes, es importante destacar que los diferentes tipos no excluyen a que sucedan los demás en una misma reacción.

B.1) Combustión completa.-Conduce a la oxidación total de todos los elementos que constituyen el combustible. En el caso de los hidrocarburos.

Carbono $\rightarrow \text{CO}_2$

Hidrógeno $\rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Azufre $\rightarrow \text{SO}_2$

Nitrógeno $\rightarrow \text{N}_2$

Oxígeno \rightarrow participará como oxidante

El nitrógeno se considera como masa inerte, si bien a altas temperaturas de los humos pueden formarse óxidos de nitrógeno en pequeñas proporciones del orden de 0.01% (IDAE, 2010).

B.2) Combustión neutra o estequiométrica.-Es la combustión que se realiza con el aire estequiométricamente necesario (aire teórico). En los hornos y quemadores industriales no es posible conseguir el 100% de la eficiencia; por lo que, si sólo se suministrara el aire estequiométrico, no se podría lograr la combustión completa del combustible. Este tipo de combustiones completas, sólo pueden conseguirse en laboratorio. Ya que se precisa que las mezclas de combustible y comburente sean totales y homogéneas, pues en caso contrario, se producirá la combustión completa con exceso de aire en unas zonas. Mientras que en otras, la combustión es incompleta por defecto de aire.

B.3) Combustión incompleta con defecto de aire.-Se produce cuando se aporta aire en cantidad insuficiente y por lo tanto no se quema todo el hidrógeno y/o todo el carbono hasta su grado máximo de oxidación de CO_2 .

B.4) Combustión con exceso de aire.-Se produce cuando se aporta mayor cantidad de aire que en la combustión neutra. El porcentaje de CO₂ disminuye al ser diluido en un mayor caudal de gases. El rendimiento es inferior al de la combustión neutra, por el calentamiento del exceso de aire hasta la temperatura de los gases.

Fases en la combustión

El proceso de la combustión implica que el material combustible (biomasa) alcance 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:

- a) Una fase de evaporación del agua (secado)
- b) Una fase de volatilización a partir de los 200°C
- c) Una fase de formación de gases y combustión de los mismos a partir de los 500°C

No obstante, en una unidad de combustión, estas tres etapas a nivel global, tienen lugar simultáneamente. Por otro lado, las variables que afectan y que hay que cuidar principalmente para el buen funcionamiento del proceso de combustión son:

- a) Proporción de oxígeno en el aire de entrada
- b) Temperatura de combustión
- c) Características del combustible

Estas tres variables deben ser cuidadas constantemente ya que una variación en alguna de ellas puede provocar defectos en la combustión, acciones perjudiciales para los equipos y medio ambiente.

1.2.2.2 Pirólisis

Los equipos para la obtención de gas con un bajo contenido calórico a partir de carbón mediante pirólisis, fueron desarrollados durante el siglo XIX y principios del XX. En la mayor parte de las ciudades existían plantas que generaban gas para iluminación y usos comerciales (Bailie, 1979).

La pirólisis es un proceso térmico que, en ciertas circunstancias, puede ser interesante para procesar residuos y recuperar productos, por el cual se realiza una oxigenación parcial y controlada de la biomasa, para obtener como resultado una combinación variable de combustibles.

La FIDA (2012), define a la pirólisis como la descomposición térmica de un material en ausencia de oxígeno o cualquier otro reactante que contenga oxígeno (aire, agua, dióxido de carbono) a altas temperaturas (200°C- 500°C). En este proceso se destruyen las sustancias orgánicas mediante el calentamiento en un ambiente libre de oxígeno, dando como resultado de esta reacción, fracciones gaseosas, líquidas y sólidas. Estas tres fracciones producidas son:

- 1.- Un gas compuesto por hidrógeno, metano, monóxido de carbono y diversos gases en menor proporción (dependiendo de las características del pirólizado). Este gas se puede convertir en energía.
- 2.- Un líquido consistente en un flujo de alquitrán o aceite que contiene metanol, hidrocarburos oxigenados complejos, ácido acético y acetona. A partir de estos componentes se pueden fabricar adhesivos, aromatizantes alimenticios, fertilizantes, aditivos para combustibles, agentes para el control de emisiones de SO_x y NO_x, productos para la industria farmacéutica, etc.
- 3.- Un sólido, el llamado coque de pirólisis, consistente en carbono casi puro unido a cualquier material inerte que estuviese presente en los residuos. Es un residuo carbonoso que puede ser utilizado como combustible o para la producción de carbono activo.

La pirólisis se produce a través de una serie compleja de reacciones químicas además de procesos de transferencia de materia y calor, se pueden distinguir a lo largo del proceso varias etapas. Se puede considerar que la pirólisis comienza en torno a los 200°C, llegando a ser o prácticamente completa en torno a los 500°C. Aunque la pirólisis está en función del tiempo de residencia del residuo del reactor.

La pirólisis también aparece como paso previo a la gasificación y a la combustión. Uno de los procesos de pirólisis conocidos desde hace más tiempo es la carbonización de gran importancia industrial para la producción de carbón vegetal.

El carbón vegetal como combustible sólido presenta la ventaja frente a la biomasa que le dio origen. Por ejemplo, de tener un poder calorífico mayor o, lo que es lo mismo, un peso menor para igual cantidad de energía, lo que permite un transporte más fácil. No obstante, debe hacerse notar que la carbonización representa una pérdida muy importante de la energía presente en la materia prima, ya que el proceso consume gran cantidad de ella (FIDA, 2012).

1.2.2.3 Gasificación

Las tecnologías de gasificación de biomasa, tales como la pirólisis y la licuefacción, tienen sus antecedentes directos en los gasificadores de carbón, que tuvieron un desarrollo

continuo desde la primera mitad del siglo XIX hasta alrededor de 1920, cuando el petróleo se estableció como el combustible deseable por excelencia.

Durante la segunda Guerra Mundial la escasez de combustibles hizo renacer el interés por los gasificadores fijos y estacionarios en Suecia, Inglaterra, Canadá y la Unión Soviética, llegando a establecerse como equipos comunes en Europa, Japón, China, Brasil, Nueva Zelanda y Australia (NRC, 1981).

El incremento en el precio del petróleo a principio de los setentas despertó nuevamente el interés por la tecnología de gasificación a partir de la biomasa (Alonso y Rodríguez, 1985).

Como ya se mencionó, la gasificación no es una tecnología desarrollada recientemente, sino que ha sido un recurso habitual en periodos de escasez de combustibles, ya que permite convertir sólidos (carbón, biomasa) en gases que pueden ser empleados en motores de combustión interna, calderas y turbinas. Se denomina gasificación de biomasa a un conjunto de reacciones termoquímicas, que se producen en un ambiente con presencia de oxígeno, en forma controlada, y que da como resultado la transformación de un sólido en un gas combustible denominado “gas pobre” por su bajo contenido calórico que es susceptible de ser utilizado en una caldera, en una turbina o en un motor, tras ser debidamente condicionados.

En el proceso de gasificación, la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros, incluso en monóxido de carbono e hidrógeno. Esta mezcla de gases llamada gas de síntesis, tiene un poder calorífico menor (PCI) equivalente a la sexta parte del poder calorífico inferior del gas natural, cuando se emplea aire como agente gasificante. El agente gasificante es una gas, o mezcla de ellos que aporta calor para iniciar las reacciones y oxígeno.

El rendimiento del proceso de gasificación varía dependiendo de la tecnología, el combustible y el agente gasificante que se utilice, en el rango de 70-80%. El resto de la energía introducida en el combustible se invierte en las reacciones endotérmicas, en las pérdidas de calor de los reactores, en el enfriamiento del gas de síntesis, necesario para su secado y filtración, y en el lavado (IDEA, 2007).

La Figura 1.7 muestra los subproductos que se pueden obtener a partir del agente gasificante empleado, en este caso con mezcla de gases como el aire y oxígeno puro. Es importante destacar que con ambos elementos se puede llegar al mismo resultado, sin embargo, al utilizar oxígeno el proceso se vuelve más eficiente pero costoso por lo tanto es recomendable utilizar métodos específicos para aprovechar dicha ventaja.

La temperatura de operación es un factor importante en estos procesos. Para obtener un buen rendimiento de la mezcla gaseosa resultante es necesaria una temperatura mínima de 700 a 800°C. Con el objeto de evitar problemas técnicos debidos a la fusión y aglomeración

de las cenizas se impone una temperatura máxima, generalmente entre 800 y 1500°C. Estas temperaturas permiten desarrollar las tres fases similares a las de la combustión, limitándose a la cantidad de comburente a un 10-50% del teóricamente necesario para la combustión completa (Míguez, 2007).

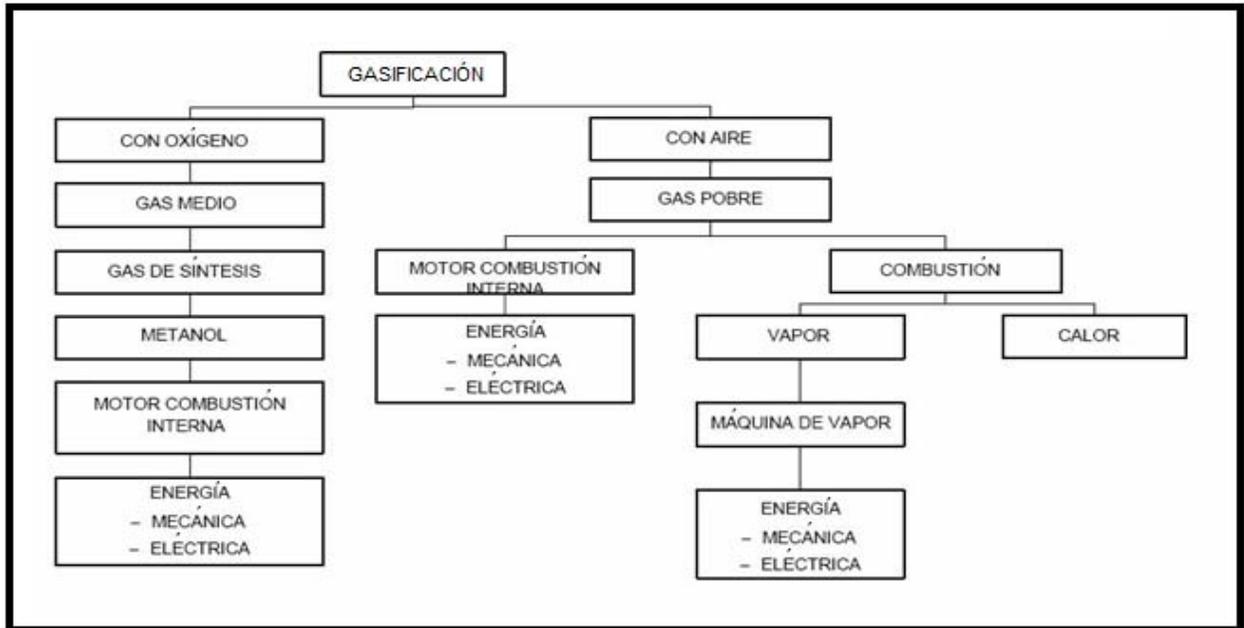


Figura 1.7 Diagrama de la porción de la gasificación y sus subproductos (SENER, 2013)

Clasificación de la gasificación

La gasificación de la biomasa puede ser clasificada atendiendo los siguientes criterios:

- Agente gasificante: Aire, oxígeno, vapor de agua, H₂.
- Forma de suministrar calor: Método directo o indirecto
- Tipo de reactor o tecnología: Lecho fijo en contracorriente o en corriente paralela, lecho fluidizado. Transporte neumático, sistemas combinados o circulantes.
- Presión y temperatura del reactor
- Forma de separar las cenizas.

Considerando los criterios anteriores se encuentran en vías de desarrollo gasificadores para la obtención de gases de mediano contenido calórico a partir de madera. Estos gasificadores son de lecho fijo y lecho fluidizado, con variaciones de gasificación por etapas. El desarrollo de procesos para obtener gas de mediano, alto poder calórico y para la conversión de éstos en combustibles líquidos se realiza mediante el proceso de licuefacción.

Licuefacción

Los procesos de licuefacción fueron desarrollados en el siglo XIX empleando carbón como materia prima. El desarrollo moderno de la conversión de biomasa en combustibles líquidos se origina a principios de la década de los setentas (Elliott, 1982).

La licuefacción es un proceso en la que los materiales con alto contenido de carbón pierden oxígeno a través de una reacción con monóxido de carbono. Al perder oxígeno y ganar hidrógeno, ya sea puro o a partir de agua, el material se convierte en un aceite. La licuefacción puede darse procesando directamente la biomasa o a través de un paso preliminar de gasificación (Braunstein, 1981). Los procesos de licuefacción ocurren a altas temperaturas y presiones, empleándose catalizadores alcalinos en algunos de ellos. Temperaturas de 370 a 400°C son típicas de procesos con catalizador. Empleando catalizadores alcalinos, tales como carbono sin sodio, se obtienen tasas de reacción razonable o rápida entre 315 y 345°C (Espinosa y col., 1979).

Los procesos de licuefacción y gasificación son procesos termoquímicos con un mismo fin, la obtención de combustibles a partir de la biomasa. Sin embargo, el proceso de licuefacción tiene una gran desventaja, la utilización de hidrógeno y el costo es muy elevado al ser un proceso presurizado. En el caso de gasificación de biomasa existe una serie de ventajas e inconvenientes que se presenta en la elección del reactor, lo que hace que su elección dependa de varios factores. Los principales criterios de elección son el tamaño y la densidad del residuo biomásico a procesar, la capacidad del procesamiento y la calidad deseada para el producto gaseoso a obtener. Otras de las ventajas del proceso son las diversas aplicaciones en la combustión posterior de los gases que se citan a continuación:

- Producción de calor para usos industriales. El sistema constaría de gasificador y quemador. El gas puede sustituir a otros combustibles convencionales y sería un combustible muy limpio y sin problemas de contaminación.
- Producción de electricidad en zonas aisladas. El sistema constaría de gasificador generador de vapor, turbina de vapor y generador eléctrico, y se podrían aprovechar fundamentalmente residuos forestales.
- Producción de calor para secado de granos.
- Producción de vapor de agua. El sistema constaría de gasificador y caldera.
- Producción de electricidad y/o potencia para el bombeo de agua de granjas.

1.3 Uso de la bioenergía en México

La bioenergía es la energía que se obtiene de la biomasa y se presenta en una gran variedad de formas. Puede obtenerse a partir de los biocombustibles sólidos como la leña, el carbón vegetal o los residuos agrícolas (que pueden quemarse o gasificarse para producir calor o

electricidad), los cultivos energéticos (como la caña de azúcar y plantas oleaginosas, de las que se extraen combustibles líquidos como el bioetanol y el biodiesel), y los residuos municipales y el estiércol (de los que pueden obtenerse combustibles gaseosos como el biogás). La bioenergía puede ser también una fuente de hidrógeno para producción de energía.

En México representa 6% (550PJ) del consumo de energía primaria. En 2010, la oferta interna bruta fue de 9,250 petajoules (PJ), de los cuales 348 PJ corresponden a la energía de la biomasa (SENER, 2010). En la Figura 1.8 se puede ver una gráfica de la estructura de la producción de la energía primaria de México en 2010, en la Tabla 1.1 se muestra la producción de la energía primaria en los años 2009 y 2010.

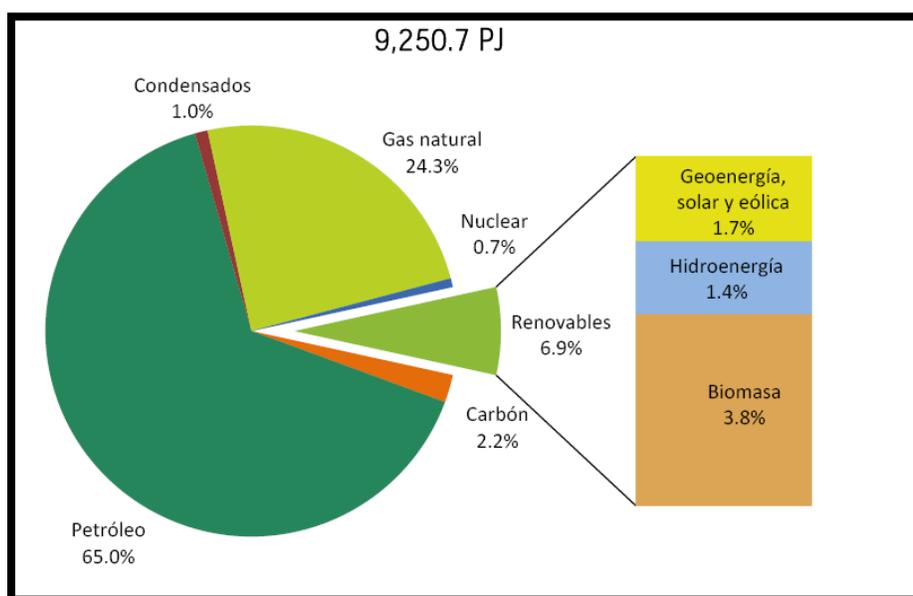


Figura 1.8 Estructura de la producción de energía primaria (SENER, 2010)

En 2010, el uso de leña como fuente de energía representó el 34% (259 PJ) del uso total de la energía de México del sector residencial, comercial y público (SENER, 2010). El 89% de la población rural cocina con leña. La tecnología de cocción más extendida corresponde a los fogones abiertos, mismos que, aunque versátiles y económicos, conducen a un uso dispendioso del recurso y a la contaminación de interiores.

La leña es también utilizada en multitud de pequeñas industrias rurales como tabiquerías, talleres alfareros, panaderías y otras. Además de su relevancia como energético, la leña constituye el principal uso de los recursos forestales en México (79% del total) (SEMARNAT, 1999; Díaz, 2000). Sin embargo, el impacto sobre el recurso no es directamente proporcional al volumen utilizado, pues la mayor parte de la leña proviene de árboles o ramas muertas, árboles fuera del bosque, residuos de madera y acahuales.

El consumo de bagazo se concentra en el sector industrial (88.8 PJ en la producción de azúcar y 0.2 en la de celulosa y papel). Una gran parte del potencial energético se desperdicia debido a la tecnología obsoleta, calderas de baja presión y por la combustión de bagazo muy húmedo. En términos de usos finales, actualmente la energía generada por la combustión de biomasa se destina mayoritariamente a usos térmicos: Cocción de alimentos, calentamiento de agua y calor de proceso en los ingenios (donde también contribuye a la generación de electricidad para consumo propio) y pequeñas industrias. La Tabla 1.2 indica cuales son los usos finales de la bioenergía.

Tabla 1.1 Producción de energía primaria (SENER, 2010)

	2009	2010	Variación porcentual	Estructura porcentual	
	Petajoules	Petajoules	(%) 2010/2009	2009 %	2010 %
Total	9419.2	9250.7	-1.8	100	100
Carbón	207.7	202.6	-2.5	2.2	2.2
Hidrocarburos	8496.4	8348.2	-1.8	90.2	90.2
Petróleo crudo	6058.7	6008.6	-0.8	64.3	64.9
Condensados	86.1	92.5	7.5	0.9	1
Gas natural	2351.7	2247	-4.4	25	24.3
Nucleoenergía	112.8	63.9	-43.3	1.2	0.7
Renovables	602.2	636	5.6	6.4	6.9
Hidroenergía	95.2	132	38.9	1	1.4
Geoenergía	152.7	149.9	-1.8	1.6	1.6
Energía solar	4	4.9	21.1	0.04	0.05
Energía eólica	0.1	0.6	-33.4	0.01	0.01
Biomasa	349.4	348.3	-0.3	3.7	3.8
Bagazo de caña	88.7	89	0.3	0.9	0.9
Leña	206.7	259.3	-0.5	2.8	2.8

Tabla 1.2 Usos finales de la bioenergía (Masera,2003)

Sector/uso final	Uso de energía (PJ/año)
Residencial	
Cocinar	300
Calentar agua	35
Calefacción	n.d.
Pequeñas industrias	
Producción de carbón de leña	0-20
Otros(fábricas de ladrillos, cerámica, pan)	20-30
Otro	
Bagazo	90
TOTAL	455-475

1.4 Uso de la bioenergía en países de primer mundo

Se considera cada vez más que el uso de la bioenergía ofrece una mayor gama de ventajas que las demás fuentes de energía: mayores ingresos rurales y menores niveles de pobreza en los países en desarrollo; restauración de las tierras improductivas y degradadas, y fomento del desarrollo económico.

Al contribuir a la seguridad energética, la bioenergía tiene, especialmente para los países importadores de petróleo, también consecuencias estratégicas. La bioenergía tiene el potencial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, que preocupan al mundo entero (FAO, 2008).

En los países desarrollados, la biomasa provee más de la mitad de las energías renovables. El país con mejor calidad de vida del mundo, Finlandia, cubre con biomasa forestal el 50% de las necesidades de calefacción de 5.3 millones de habitantes. En los países en desarrollo, la biomasa aporta el 38% de la energía total utilizada (Roma, 2011).

En 2007, la Administración Forestal Estatal China anunció una iniciativa orientada a la explotación de dos plantaciones de *Jatropha curcas* destinadas a producir biocombustibles en las provincias de Yunnan y Sichuan. Posteriormente, la Administración declaró su intención de dedicar más de 13 millones de hectáreas de tierras forestales a la expansión de los cultivos para producción de biocombustibles.

Por su parte, el Departamento Forestal Provincial de Yunnan ha proyectado explotar, para este año, 1.3 millones de hectáreas de plantaciones con el objeto de producir 4 millones de toneladas de bioetanol y 600,000 toneladas de biogásóleo al año (Liu, 2007). Según han

manifestado las autoridades, las plantaciones ocuparán terrenos forestales y agrícolas degradados, que tan sólo en la provincia de Yunnan cubren una superficie estimada de 4 millones de hectáreas. En China sudoccidental existe un gran número de áreas forestales de gran biodiversidad que contienen valiosos bienes forestales que es menester proteger (Perley, 2008).

1.5 Cambio climático y gases efecto invernadero

El cambio climático es un problema con características únicas, ya que es de naturaleza global. Sus impactos mayores serán en el largo plazo e involucra interacciones complejas entre procesos naturales, fenómenos ecológicos y climáticos y procesos sociales, económicos y políticos a escala mundial (Magaña, 2001).

El clima depende de un gran número de factores que interactúan de manera compleja. Se piensa en éste como un estado cambiante de la atmósfera, mediante sus interacciones con el mar y sus diversas escalas de tiempo y espacio. Cuando un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura sale de su valor medio de muchos años, se habla de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos, como inestabilidades en la atmósfera y/o el océano; o por forzamientos externos, como puede ser algún cambio en la intensidad de radiación solar recibida o incluso cambios en las características del planeta (concentraciones de gases de efecto invernadero, cambios en el uso del suelo, etc.) resultado de la actividad humana.

Hoy en día se sabe que la humedad en el suelo también constituye un mecanismo de memoria que puede afectar el clima. Es por ello que la deforestación o la urbanización resultan en variabilidad o cambio climático, al afectar la humedad que puede ser retenida por el suelo. Existen ciertos factores que pueden producir cambios en el clima, aunque no de manera precisa. Tal es el caso del cambio climático del último siglo. Es por ello que no fue sino hasta 1995 que un grupo de científicos reunidos en el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2001) concluyó que “El balance de las evidencias sugiere que hay una influencia humana discernible en el clima global”. Las anomalías experimentadas en el último siglo, o por vivirse en las próximas décadas podrían incluir alteraciones en las formas como actualmente se experimenta la variabilidad interanual o interdecadal del clima.

La tierra absorbe radiación solar, principalmente en la superficie, y la redistribuye por circulaciones atmosféricas y oceánicas para intentar compensar los contrastes térmicos, principalmente del ecuador a los polos. La energía recibida es re-emitida al espacio para mantener, un balance entre energía recibida o re-emitida, o en su distribución en la tierra, se reflejará como cambios en el clima. Los aumentos en la concentración de los llamados gases de efecto invernadero reducen la eficiencia con la cual la tierra re-emite la energía

recibida al espacio. Si las concentraciones de gases de efecto invernadero continúan aumentando, la temperatura de superficie del planeta mantendrá una tendencia positiva (Magaña, 2001).

En el efecto invernadero el aire es muy transparente para la radiación solar y muy opaco a la radiación terrestre. Es decir, la atmósfera es un filtro que deja pasar los rayos solares, algunos de ellos son absorbidos por la superficie terrestre (y por los demás componentes de la Tierra), que en consecuencia se calientan y emiten la radiación terrestre, que es absorbida por la atmósfera y las nubes. Las capas atmosféricas y las nubes van sucesivamente absorbiendo, calentándose y remitiendo hacia arriba y hacia abajo radiación térmica procedente de abajo. Por supuesto, no toda la radiación solar incidente es absorbida por la Tierra. Una porción considerable es reflejada y devuelta hacia el espacio exterior, en donde una parte no es atrapada por la atmósfera y se fuga hacia el espacio. Es así como el efecto invernadero es producido por la fracción absorbida de ambas radiaciones (Garduño 1998; Hardy y col., 1986 y Voituriez, 1994).

El nombre efecto invernadero proviene de la similitud con las instalaciones construidas para cultivar plantas en un ambiente más cálido que el exterior, dado que el techo de un invernadero tiene la misma propiedad de dejar entrar la radiación solar y bloquear la terrestre generada en su interior.

La atmósfera es una mezcla de gases y de aerosoles, los aerosoles reflejan la radiación solar y reducen la cantidad de ella que penetra a las capas inferiores y llega a la superficie. Consecuentemente, este efecto se debe a los gases atmosféricos, pero no a todos sólo a los más complejos y minoritarios, llamados justamente gases de invernadero. El oxígeno (O_2) y el nitrógeno (N_2) son abrumadoramente los componentes principales de la atmósfera (99%): El O_2 constituye 21%, y el N_2 , 78%. Sin embargo, ellos no son gases efecto invernadero. O sea que si la atmósfera estuviera formada por N_2 y O_2 , sería tan respirable como ahora, pero la temperatura típica de la Tierra sería de $-18^\circ C$, igual que si no hubiera atmósfera (Toharia, 1984 y Voituriez, 1994). Por lo tanto, los gases efecto invernadero están dentro del 1% restante de la composición atmosférica. En general, están constituidos por tres o más átomos, los que forman moléculas diatómicas (como el N_2 y el O_2) o monoatómicas son transparentes a la radiación terrestre. Los más importantes son el vapor de agua (H_2O) y el bióxido de carbono (CO_2), los demás gases invernadero (CH_4 , NO_x , CFSC, etc.). Se llaman gases traza por su presencia ínfima en la atmósfera (Hardy y col., 1986).

El ozono (O_3) es gas efecto invernadero y está presente en dos ámbitos atmosféricos distintos. Por un lado, forma la capa estratosférica planetaria, que en las últimas décadas se ha reducido notablemente, sobre todo en la Antártida, situación llamada comúnmente hoyo de O_3 . El cambio climático global actual continuará seguramente, dado que seguirán creciendo el CO_2 y los gases traza, pues sus emisiones son consustanciales al estilo de vida

de nuestra civilización, misma que ha comenzado a interesarse y preocuparse del problema y sus repercusiones en los sistemas naturales y artificiales (IPCC, 2001).

Dentro del contexto internacional, la AIE(2010) ha identificado que alrededor del 84% de las emisiones actuales de CO₂ están relacionadas con la energía y más o menos 65% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero pueden atribuirse a la liberación de los gases durante la combustión, como resultado de la oxidación de carbono en los combustibles. No obstante, también existen emisiones fugitivas producidas por la liberación de gases como el metano (CH₄). Cada sector tiene diferentes perspectivas de crecimiento conforme al escenario inicial y una gama distinta de opciones con baja emisión de carbono que pueden utilizarse para reducir las emisiones tal como se muestra en la Figura 1.9.

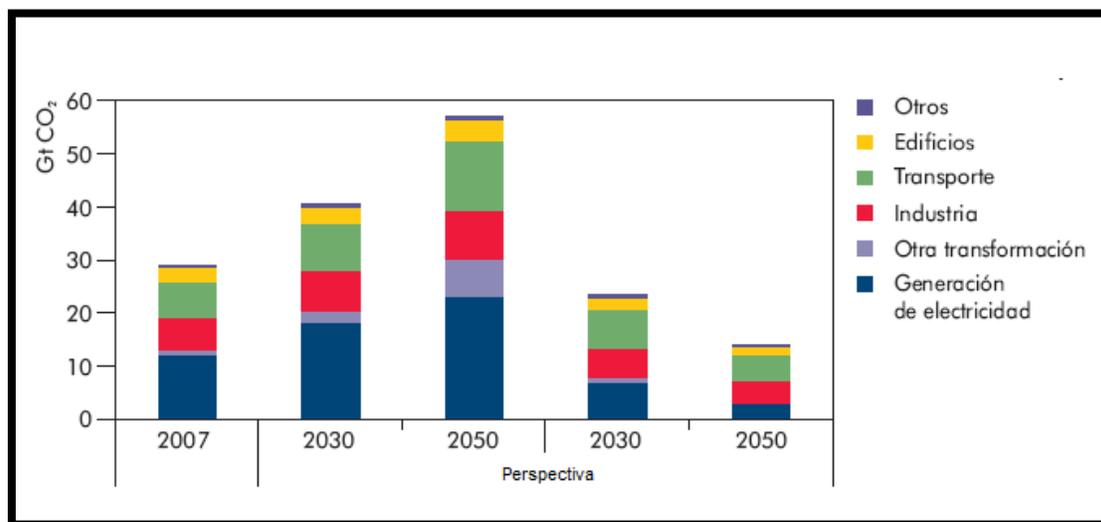


Figura 1.9 Emisiones mundiales de CO₂ en los escenarios inicial y de perspectiva (AIE, 2010)

De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases Efecto Invernadero 1990-2006 (INEGEI), el sector energía (producción, transformación, manejo y consumo de productos energéticos) es la principal fuente de emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) en México que representó el 60.7% del total de las emisiones durante 2006.

En México, las emisiones totales de GEI del sector energético alcanzaron 498.5Tg (Teragramo) CO₂ durante 2011, 3.5% inferior respecto a 2010 (Tabla 1.3). De 2001 a 2011, dichas emisiones crecieron 1.8% promedio anual (Figura 1.9).

Lo crítico es que entre 1750 y 2005 las concentraciones atmosféricas de bióxido de carbono (CO₂) aumentaron cerca de 35%, pasando de 280 ppm a 379 ppm (IPCC, 2007). Este

aumento en la concentración de CO₂ se debe principalmente a la quema de combustibles fósiles y al cambio de uso del suelo.

Las estimaciones para el calentamiento global promedio del planeta para fines del siglo XXI (2090-2099), en relación a 1980-1999, están en un rango entre 1.8 y 4°C. De los pasados 14 años (1995-2009) más de once se ubicaron entre los más cálidos registrados desde 1850. Aún si las concentraciones de todos los GEI y aerosoles se mantuvieran a niveles del año 2000, se esperaría un incremento de 0.1°C por década.

- Las estimaciones para el aumento en el nivel medio del mar para el mismo período están en un rango entre 0.28 m y 0.43 m.

- La Figura 1.10, publicada por el IPCC (2007), muestra el Cambio Global en tres factores que ha sufrido el Clima del Planeta; (a).- La temperatura promedio, (b).- El nivel medio del mar y (c) La cobertura de nieve del Hemisferio Norte de la Tierra.

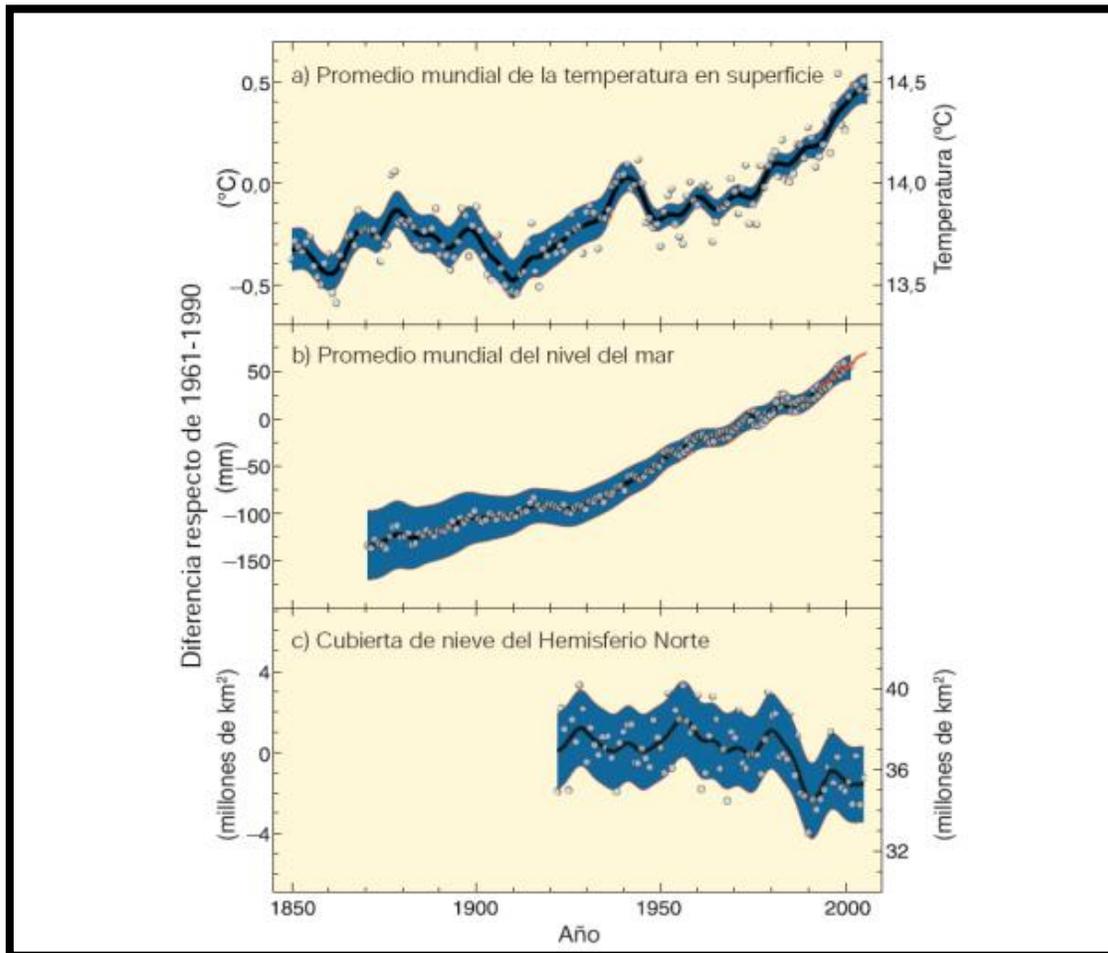


Figura 1.10 Gráfica de aumento de: a) Temperatura promedio global, b) Promedio mundial de nivel del mar y c) Cubierta de nieve del Hemisferio norte (IPCC, 2007)

Tabla 1.3 Emisiones de GEI por fuente (Tg CO₂) (SENER, 2011)

	2010	2011	Variación porcentual (%) 2011/2010	Estructura porcentual (%) 2011
Emisiones CO₂	516.84	498.51	-3.55	100
Consumo de combustibles	4515.91	432.51	4.04	86.8
CO₂	400.44	417.09	4.16	83.67
CH₄	1.83	1.87	2.16	0.37
N₂O	13.65	13.77	0.9	2.76
Emisiones fugitivas	100.93	65.78	-34.82	13.2
CH₄	100.93	65.78	-34.82	13.2

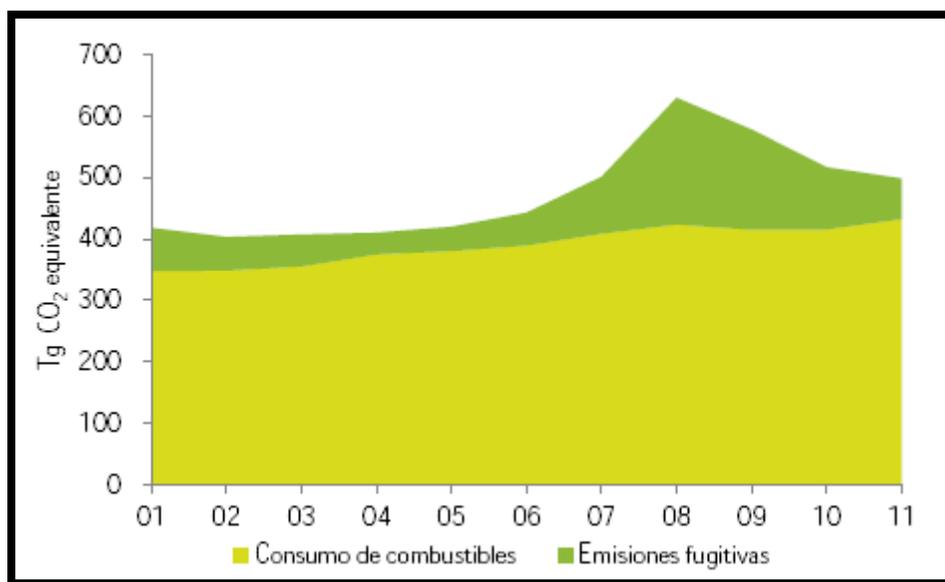


Figura 1.11 Evolución de las emisiones de GEI del sector energético (Tg CO₂) (SENER, 2011)

Capítulo II. Fundamentos

2.1 Gasificación

La gasificación de biomasa es un conjunto de reacciones termoquímicas que se produce en un ambiente con presencia de oxígeno en forma controlada que da como resultado la transformación de un sólido en un gas combustible. En el proceso de gasificación de biomasa tienen lugar varias reacciones cuyo orden e importancia depende de las condiciones de operación, del combustible y de los elementos del agente gasificante utilizado. Garay y col. (2008) y Guillén (2004) lo agrupan en tres etapas principales que podrían esquematizarse como se muestra en la Figura 2.1.

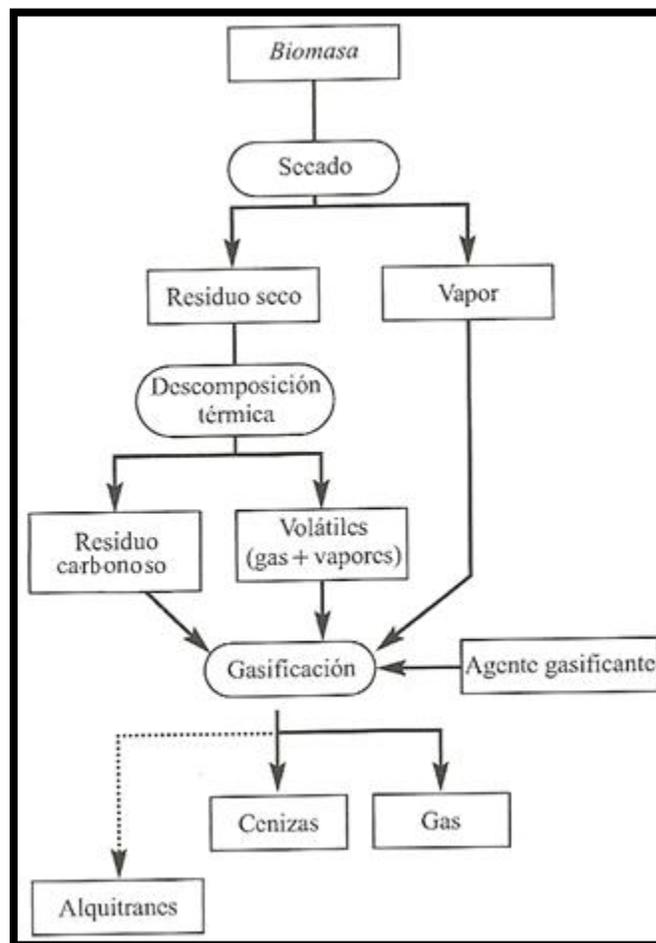


Figura 2.1 Esquema de proceso de gasificación (Nogués y col., 2010).

Como se representa en la Figura 2.1, una partícula de biomasa que entra a un gasificador sufre inicialmente un proceso de secado seguido de una descomposición térmica (pirólisis o volatización). Posteriormente pueden tener lugar diversas reacciones sólido-gas o gas-gas

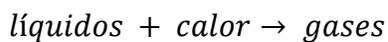
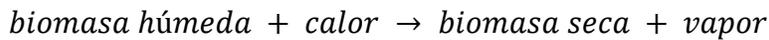
entre todos los componentes presentes tales como el agente gasificante y los productos de las etapas de secado y descomposición térmica (sólidos, vapores y gases). El orden en que estas etapas se produzcan y la importancia relativa de ellas, vendrá determinado principalmente por el tipo de reactor y el agente gasificante utilizados. Las principales reacciones que tienen lugar en un gasificador pueden resumirse en 3 etapas que son 1) Pirólisis, 2) Oxidación y 3) Reducción.

1) Pirólisis o descomposición térmica

Etapas en las que la descomposición térmica de la biomasa se da en ausencia total de oxígeno. En procesos lentos y temperaturas de 300 a 500°C, el producto obtenido es carbón vegetal, mientras que en procesos rápidos (segundos) y temperaturas entre 800 a 1200 °C se obtienen mezclas de compuestos orgánicos de aspecto aceitoso y de bajo pH, denominado aceite de pirólisis. El combustible se descompone en una mezcla de sólido, líquido y gas como:

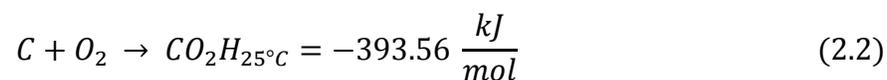
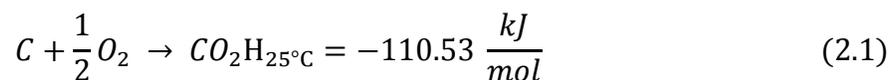
- Sólidos (char): Leña, astillas, carbón vegetal
- Líquidos (tar): Alquitranses, aceites, aldehídos, alcoholes, cetonas y ácidos orgánicos
- Gaseosos: Biogás, hidrógeno.

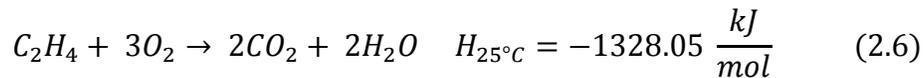
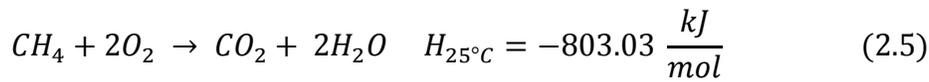
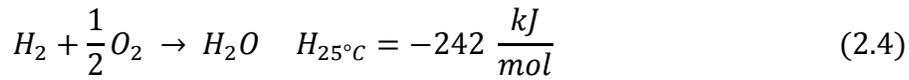
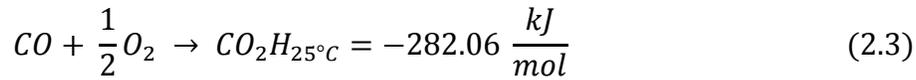
Puede incluirse aquí el proceso de secado y precalentamiento que tiene lugar al entrar la biomasa al gasificador, aunque este proceso no implica ninguna reacción química.



2) Oxidación o combustión

La combustión tiene lugar cuando el agente gasificante es un oxidante. El oxígeno o aire implica el conjunto de reacciones de oxidación tanto homogénea como heterogénea, fundamentalmente exotérmica, mediante las que se genera dióxido de carbono, agua y sales minerales (cenizas) y el calor necesario en forma de gases para que el proceso se mantenga.

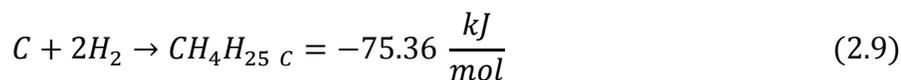
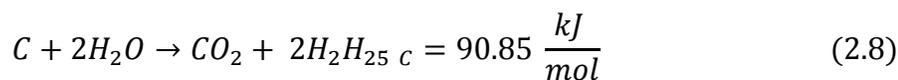
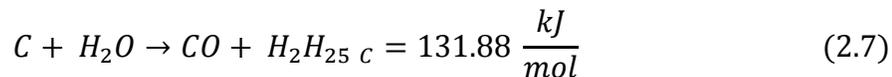


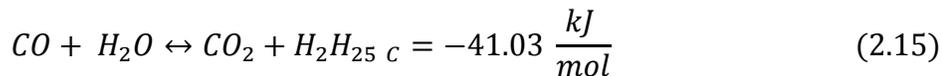
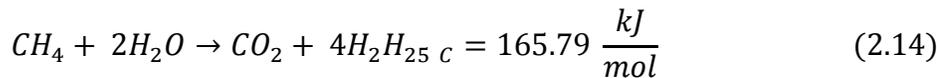
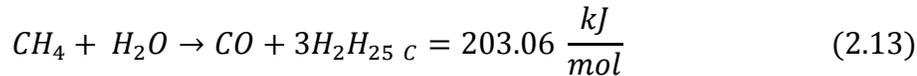
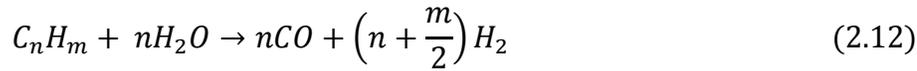
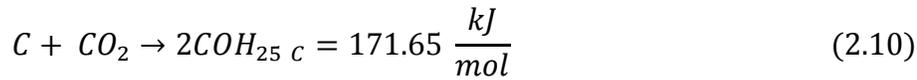


3) Reducción o gasificación

La reducción, es una combustión incompleta de la biomasa a una temperatura entre los 600 a 1500°C en una atmósfera pobre de oxígeno, en la que la cantidad disponible de este compuesto está por debajo del punto estequiométrico, es decir, el mínimo necesario para que se produzca la reacción de combustión. En este caso se obtiene principalmente un gas combustible formado por monóxido y dióxido de carbono, hidrogeno y metano. La reducción la constituyen las reacciones sólido-gas o en fase gas, mediante las que el sólido remanente se convierte en gas. Se trata de reacciones fundamentalmente endotérmicas, algunas de las cuales tienen lugar en muy poca extensión, o sólo tienen lugar en determinadas condiciones, como ocurre con algunas reacciones de hidrogenación y/o reformado.

Las etapas de oxidación y reducción pueden considerarse conjuntamente en una sola etapa de gasificación en la que tienen lugar todo tipo de reacciones posibles entre el “carbón vegetal” y la mezcla gaseosa presente. La combustión ocurre en la zona de oxidación, donde se liberan aproximadamente 401.9 kJ al quemar 1 mol de carbono y convertirlo en dióxido de carbono. Las reacciones principales de la etapa de reducción son endotérmicas ya que necesitan absorber energía, por lo tanto la temperatura de reacción disminuirá durante la reducción (FAO, 1993). Las reacciones son las siguientes:





2.2 Procesos de gasificación

Existen otros posibles criterios para clasificar los procesos de gasificación. Generalmente se consideran dos criterios para clasificar los procesos de gasificación de biomasa, según el agente gasificante utilizado y según el movimiento relativo entre el agente gasificante y el sólido (Nogués y col., 2010).

a) Agentes gasificantes

Es importante discutir el papel del agente gasificante ya que afecta a la calidad del gas generado y a la economía del proceso. La operación autotérmica de un gasificador implica la necesidad de aportar oxígeno, para generar el calor necesario para los procesos de gasificación. La opción más sencilla y económica para esto, es el empleo de aire. Sin embargo, el uso de aire viene acompañado de la consecuente dilución con nitrógeno del gas generado, disminuyendo su poder calorífico y la eficiencia global del proceso. La posibilidad de utilizar exclusivamente oxígeno por medio de unidades de destilación o adsorción de aire, elimina la ineficiencia asociada a la dilución, pero es, por el contrario, difícil de justificar económicamente.

Otra posibilidad tecnológicamente atractiva es el uso de vapor como agente gasificante. Esta opción cuenta con la ventaja de que el vapor es un reactivo en las reacciones de gasificación y reformado y su coste de generación es considerablemente inferior al del

oxígeno. Sin embargo, el uso de vapor cuenta con el inconveniente de la necesidad de aportar calor al reactor de manera indirecta. Es por tanto que, aunque el uso de vapor es tecnológicamente viable para la generación de un gas producto de buena calidad y sin dilución asociada al nitrógeno, sigue presentando una economía desfavorable. La puesta en práctica de este concepto de gasificación se ha orientado desde dos enfoques distintos: el uso de mezclas oxígeno vapor y el uso de gasificadores indirectos (Campoy, 2009).

En el primero de estos conceptos, el oxígeno alimentado se invierte en la combustión parcial de la biomasa, aportándose de esta manera el calor necesario para que el proceso sea auto-mantenido. El gas producido tiene un elevado contenido en hidrógeno y se evita la dilución con nitrógeno. La tecnología ha sido extensivamente probada a escala laboratorio (Wang y Kinoshita, 1992); (Gil y col., 1999), pero la inversión económica para el equipamiento de suministro de oxígeno de alta pureza sigue siendo elevada, de modo que la aplicación a escala industrial es menos atractiva. Un segundo enfoque trata de evitar la necesidad de aportar oxígeno separando los procesos de combustión del carbonizado y de pirólisis de la biomasa en dos zonas paralelas, la primera alimentada con aire y la segunda con vapor. Este concepto de gasificador indirecto se conoce como lechos gemelos, de modo que se realiza una circulación de calor por medio de la transferencia del material inerte del lecho de combustión al lecho de desvolatilización. La aportación esencial de este planteamiento es que permite obtener una gasificación con vapor autotérmica sin la necesidad de oxígeno (sólo se utiliza aire), produciendo un gas con un poder calorífico medio, es decir, sin dilución por nitrógeno. Esta tecnología ha alcanzado un estado semi-comercial en la actualidad (Rauch y col., 2004) y sigue siendo objeto de investigación (Van der Meijden y col. 2008; Canneto y col., 2008; Matsuoka y col., 2008).

b) Configuración sólido-agente gasificante

Considerando el movimiento relativo del agente gasificante y el sólido gasificado, se establece otra clasificación según el tipo de reactor utilizado en la gasificación de la biomasa. Existen diferentes configuraciones de reactores que definen distintos modos de contacto entre la biomasa y el agente de reacción, las cuales se ven reflejadas en la distribución de productos obtenidos de cada equipo como se muestra en la Tabla 2.1. De acuerdo a la disposición del equipo existen diversos tipos de gasificadores principalmente de lecho fijo, lecho móvil y lecho fluidizado.

Tabla 2.1 Mezcla de gases obtenida del proceso de gasificación (CPSUZ. 2006)

AGENTE GASIFICANTE	Poder Calorífico Superior (MJ/m ³)	COMPOSICION DEL GAS OBTENIDO (% en volumen)						USO
		H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	C ₂	
Aire	< 6	16	20	12	2	50	-	Combustible
Oxígeno	10 - 20	32	48	15	2	3	-	Combustible gas de síntesis
Vapor de agua	10 - 20	50	20	22	6	-	2	Combustible gas de síntesis
Hidrógeno	> 30							Sustituto del gas natural

2.2 Tipos de gasificadores

Existe una amplia variedad de reactores que se utilizan para los procesos de gasificación de biomasa. Su elección depende de varios factores, como pueden ser la granulometría de la biomasa residual, la humedad, la limpieza del gas de síntesis requerida o según el manejo del combustible (Bordas y Elías, 2011; IDAE, 2007).

Lecho fijo:

En el lecho fijo el combustible permanece estático dentro del gasificador y el proceso de pirólisis va consumiendo la totalidad de la carga ingresada. Estos tipos de gasificadores, a su vez, se subdividen dependiendo del sentido relativo de las corrientes del combustible (biomasa) y agente gasificante. Cuando las corrientes son paralelas, el gasificador se denomina de flujo descendente, puesto que el sólido entra por la parte superior. Ésta da como resultado que el oxidante y el vapor arrastren las partículas de carbón a medida que fluyen a través del gasificador. Cuando circulan en sentido opuesto, se denomina de flujo ascendente. En estos gasificadores el sólido es introducido por la parte superior y desciende lentamente en contracorriente con el flujo del gas generado por la introducción de los agentes gasificantes (aire u oxígeno y vapor) por el fondo del gasificador.

Lecho fluidizado:

En este tipo de gasificador fluye aire a través de un lecho de partículas sólidas a velocidad suficiente para mantenerlas en estado de suspensión, y en donde se comienza por calentar externamente el lecho, el material de alimentación (biomasa) se introduce tan rápido como se alcanza una temperatura suficientemente elevada. Las partículas del combustible se introducen en el lecho del reactor, se mezclan rápidamente con el material del lecho y se calientan casi instantáneamente, alcanzando así la temperatura de este. Como resultado de este tratamiento, el combustible realiza la etapa de pirólisis muy rápidamente, dando como resultado una mezcla de componentes con una cantidad relativamente elevada de materiales

gaseosos. La fase de gas se reproduce una nueva gasificación y reacciones de los alquitranes (García y col., 2006).

En el proceso de gasificación por lecho fluidizado el agente gasificante mantiene en suspensión inerte al combustible, hasta que las partículas de éste se gasifican, se convierten en cenizas volátiles y son arrastradas por la corriente del gas de síntesis. De este tipo de gasificadores hay tres clasificaciones, burbujeante, circulante y arrastrado. Todos ellos pensados para grandes cantidades de combustible (Cuba A., 2011). En la Tabla 2.2 se muestra un resumen de los tipos de gasificadores y su contacto con el sólido.

Tabla 2.2 Modo de contacto del sólido con el gas (Cuba, 2011)

Tipo	Modo de contacto
Gasificador de lecho fijo (Flujo descendente)	El sólido y el gas circulan en la misma dirección, que es descendente.
Gasificador de lecho fijo (Flujo ascendente)	El sólido y el gas circulan en dirección contraria. El sólido circula en dirección descendente y el gas circula en dirección ascendente.
Gasificador de lecho fluidizado (burbujeante)	La velocidad del gas es relativamente baja. Los sólidos inertes permanecen en el reactor. Un sólido inerte puede ser la arena.
Gasificador de lecho fluidizado (circulante)	Ocurre separación de sólidos en la corriente gaseosa. Los sólidos inertes son arrastrados, separados y recirculados al reactor.
Gasificador de lecho fluidizado (arrastrado)	La velocidad del gas es alta. Normalmente no existen sólidos inertes, la alta velocidad del gas genera elevadas velocidades de transformación.
Gasificadores paralelos o dobles	La gasificación se produce con vapor en el primer reactor y el carbón producido es transportado hacia el segundo reactor, donde ocurre la combustión para calentar el medio fluidizante de recirculación.
Gasificadores rotatorios	Nos proporcionan un buen contacto sólido-gas.

2.3 Parámetros de control en sistemas de gasificación

El diseño y operación de un gasificador requiere la comprensión de los efectos de los diversos tipos de biomasa y parámetros de operación en el rendimiento del sistema. Los diversos tipos de biomasa son diferentes en sus propiedades físicas, químicas y morfológicas que afectan las características del proceso de gasificación (Moilanen y col.,

2009). Para elegir un tipo de biomasa también hay que considerar su poder calorífico (Nemtsov y Zabaniotou, 2008).

La pirólisis y gasificación son procesos termoquímicos de la biomasa, donde la temperatura y el calentamiento tienen efectos importantes sobre la pérdida de peso de la biomasa. El análisis termogravimétrico (ATG) mide y registra la variación de la masa de una muestra cuando es sometida a un programa de temperatura en una atmósfera controlada. La variación de masa puede ser una pérdida o ganancia de masa. Los datos que ofrece el ATG son útiles para comparar los parámetros de la reacción, tales como la temperatura y velocidades de calentamiento.

Las variables que afectan la velocidad de gasificación se identifican y cuantifican. Las variables son las siguientes (Kirubakaran y col., 2007) y (Nogués y col., 2010):

Tamaño: En el reactor de gasificación ocurren los siguientes procesos: 1) Calentamiento de la partícula sólida, 2) Difusión y 3) Absorción de los reactivos en la partícula. Por ello, el tamaño de la partícula influye de manera importante, fundamentalmente en el tiempo de contacto necesario para que las reacciones se completen. Entre más pequeño sea el tamaño de la biomasa mejor será el calor transferido. La temperatura que resulta en la reacción será uniforme a lo largo de la partícula.

Cuando se controla la gasificación, la velocidad de reacción será máxima y aumentará exponencialmente con la temperatura para los procesos de lecho fluidizado y tamaños menores a 0.2 cm hasta mayores a 6 cm la reacción y la transferencia de calor se controlan (Maa y Bailie, 1973). En general pueden indicarse a modo orientativo los siguientes intervalos de tamaño de partícula como adecuados para cada tipo de gasificadores: desde unos pocos mm hasta unos 15 cm para procesos de flujo ascendente, y entre 3 y 10 cm para procesos de flujo descendente.

Estructura: Si la biomasa es altamente porosa, la superficie para la reacción es muy alta y la difusión del reactivo/producto será fácil. Cuando la biomasa es menos porosa, la temperatura varía desde el máximo en el exterior al mínimo en el interior. Debido a la falta de uniformidad de la temperatura el secado, pirólisis y gasificación tienen lugar simultáneamente produciendo una composición no uniforme de los gases. Grønli y col. (2002) han estudiado el análisis termogravimétrico y la volatilización cinética de maderas duras y de maderas blandas. Han observado que en el caso de maderas blandas, la descomposición comienza a temperatura más baja y la temperatura máxima de pérdida peso es mayor.

Relación agente gasificante/biomasa: Es probablemente el parámetro más influyente de los que se puede manipular directamente. Centrándose en los procesos de gasificación con aire u oxígeno, puede indicarse en general que un aumento de la cantidad de oxígeno suministrado favorece la formación de dióxido de carbono. Además se considera que si el

agente gasificante es aire se produce un efecto de dilución por parte del nitrógeno presente. No obstante, los valores excesivamente bajos de este parámetro pueden no generar la energía suficiente para mantener el proceso en las condiciones adecuadas, disminuyendo el rendimiento del gas. Normalmente hay un valor óptimo de la relación aire/biomasa para cada proceso. Para gasificadores de lecho fluidizado esta relación suele ser del orden de 0.5 a 1.6 (en masa), para gasificadores de lecho fijo la proporción suele ser alrededor de 1.5 (en masa). Generalmente, se observa que el medio ambiente reactivo (aire/oxígeno) resulta en la gasificación completa de biomasa, mientras en un ambiente inerte (nitrógeno/argón) la volatilización (pirólisis) ayuda a que se produzca más residuo carbonoso.

Williams y Besler (1993 y 1996) han observado que la degradación secundaria del carbón vegetal en los gases puede prevenirse en la pirólisis de la biomasa, barriendo los gases volatilizados con gases inertes tales como nitrógeno. Esto produce más carbón vegetal igual al contenido de carbono fijo en la biomasa. Safi y col. (2004) han llevado a cabo estudios donde el carbón vegetal obtenido a diferentes velocidades de calentamiento fue menor que el carbono fijo disponible, debido a la presencia del medio reactivo tal como aire.

Velocidades de calentamiento: Kirubakaran y col., (2007) con base en los reportes de Bridgwater reportaron la influencia de los parámetros de la pirólisis en la reacción, tales como temperatura y la velocidad de calentamiento para determinar el rendimiento y la composición de los productos derivados. La formación de residuos carbonosos es minimizada por velocidades de calentamiento elevadas. Productos de forma gaseosa a ritmos de calentamiento altos, la temperatura máxima es alta. Si el producto final deseado es un hidrocarburo líquido o bio-aceite, la pirólisis rápida es la preferida. Lecho fluidizado, ciclónica, de flujo de arrastre, vórtice y reactores ablativos son recomendados para la pirólisis rápida. La pirólisis lenta requiere de bajas tasas de calentamiento y de baja temperatura máxima. El rendimiento máximo del carbón vegetal se observa a tasas de calentamiento lento, junto con una baja temperatura máxima (menor de 500°C). Por lo tanto, la pirólisis lenta se ha utilizado para la producción de carbón vegetal. Reactor de lecho fijo, hogares múltiples y el horno rotatorio se utilizan para la pirólisis lenta (William y Besler, 1996).

Temperatura: Es un parámetro importante en todas las etapas del proceso de gasificación, y por tanto lo es para el rendimiento final del mismo. En concreto, las proporciones entre residuos carbonosos, alquitranes y gas en los productos de pirólisis dependen estrechamente de la velocidad de calentamiento y la temperatura.

Dos rangos de temperatura se seleccionan normalmente, por encima y por debajo de 500°C. Generalmente temperaturas superiores a 500°C son elegidas para la reducción de dióxido de carbono con carbono para monóxido de carbono. Por lo tanto, la pirólisis de la biomasa se lleva a cabo a temperaturas inferiores a 500°C para el máximo rendimiento de los residuos carbonosos con medio que fluye inerte. La gasificación completa se consigue a

temperatura por encima 500°C con aire que fluye. Como idea general puede indicarse lo siguiente: A altas velocidades de calentamiento (>2°C/min) y alta temperatura final (>500°C) se produce mayoritariamente gas. Si la temperatura final es menor o las velocidades de calentamiento son menores, aumenta la producción de líquidos.

Ceniza: La ceniza contiene materias minerales. La composición de la ceniza en bio-residuos como informaron Raveendran y col. (1995) se muestra en la Tabla 2.3. Factores de gran importancia en el proceso de transformación y fraccionamiento son: 1) La proporción en la que se encuentran los constituyentes de la materia que forma las cenizas 2) Su nivel de volatilidad/reactividad, 3) Las condiciones de equilibrio termodinámico que predominen en el sistema, 4) Las características específicas a la tecnología de conversión y 5) Las condiciones asociadas a su operación (medio oxidante, alta/baja temperatura en la sección de conversión, etc.).

Shafizadeh (1968) observó que incluso la presencia de muy bajas concentraciones de impurezas provoca que se inhiba la degradación. Además, la presencia de rastros de metales cambia los resultados a una temperatura más baja para la descomposición térmica de la celulosa. Byun y col. (2002) informaron que los óxidos de cobre/zinc/aluminio catalizan la reacción de gas de agua a menor temperatura (200-300°C).

Alquitranes: Los denominados genéricamente como alquitranes son en realidad una extensa familia de hidrocarburos. Su presencia en los procesos de combustión y en particular en la gasificación es fundamental para la explotación de la planta. Desde el punto de vista operacional, el gran problema es que a las temperaturas de operación superiores a 500°C, los alquitranes se hallan en forma de vapor y por tanto su comportamiento es similar al de los gases. Cuando el gas de síntesis se enfría, los alquitranes condensan y provocan una serie de problemas de corrosión, erosión o medioambientales (emisiones) (Castells y col., 2005).

2.4 Método de diseño y operación de gasificadores

Garay y col. (2008) y la NETL (2010) Explican a detalle la operación de diversos tipos de gasificadores y se muestran a continuación.

2.4.1 Operación de gasificadores a contracorriente

En estos gasificadores de lecho fijo, el sólido es introducido por la parte superior y las partículas grandes de carbón o biomasa se mueven lentamente hacia abajo a través de un lecho. Los agentes gasificantes (aire u oxígeno y vapor) se mueven en la dirección opuesta a la biomasa, es decir hacia arriba a través del lecho. Conforme desciende el sólido, es calentado por la corriente ascendente del gas hasta llegar a la zona de combustión donde se

alcanza la máxima temperatura. Ahí sucede un enfriamiento posterior previo a la descarga de cenizas. Con esta tecnología se obtiene un gas bastante contaminado de alquitranes (Martínez, 2006).

Las partículas gruesas se utilizan en los gasificadores de lecho fijo para garantizar la buena permeabilidad de la cama o lecho y para ayudar a evitar la caída de presión excesiva. Las reacciones dentro del gasificador se producen en diferentes zonas.

En la zona superior se produce el secado, que es un proceso endotérmico con consumo de 2512 kJ/kg de agua evaporada. La segunda zona en sentido descendente es la zona de oxidación donde ocurre la eliminación de agua que constituye la biomasa. Esta etapa es de naturaleza exotérmica que eleva por sí sola la temperatura del sólido a 450°C. Más abajo se considera zona de gasificación que consiste en dos franjas en las que en la parte superior se encuentra a 600°C, produciéndose la reducción de gases de CO₂, H₂O para formar CO y H₂, consumiendo energía térmica y enfriando los gases.

La zona inferior es la zona de combustión, donde se produce el contacto de los gases de alimentación (aire, oxígeno puro, vapor de agua o mezcla de gases) con la fase final de la descomposición del combustible, que suele ser carbono casi puro más las cenizas (óxidos alcalinos) y sílice. En dicha zona se produce el calentamiento de los gases y ocurren las reacciones de oxidación exotérmicas productos de la reacción de la biomasa con el oxígeno para formar CO y CO₂. En la zona de gasificación la temperatura oscila entre los 600°C y las velocidades de reacción son suficientemente elevadas como para suponer que los tiempos de permanencia del gas en la zona, son suficientes para alcanzar condiciones próximas al equilibrio.

En la zona de pirólisis o secado las cosas ocurren de modo diferente. La temperatura es inferior a 600°C y las reacciones no son lo bastante rápidas como para aceptar que en toda situación se alcancen condiciones próximas al equilibrio. Así, en el gas pueden existir moléculas orgánicas producidas por fractura de otras mayores, que reaccionarían con otros componentes del gas a temperaturas superiores o simplemente se fragmentarían nuevamente. En estas condiciones es tal la lentitud que en los tiempos de permanencia en la zona no sufren alguna transformación notable y salen a la zona de secado e incluso al exterior, de tal modo que, al enfriarse aún más se condensan formando los alquitranes, que finalmente se convierten en hollines.

En general, los gasificadores que producen escoria necesitan una mayor cantidad de vapor y oxígeno en relación al carbono para alcanzar temperaturas más altas que la de fusión de la ceniza. La naturaleza de este tipo de gasificadores implica que el combustible debe tener solidez mecánica para lograr formar una cama permeable. El rendimiento de este tipo de gasificador es relativamente bajo. La eficiencia térmica es alta debido a que el gas producido sale a temperaturas relativamente bajas. Lo anterior también implica que la

producción de metano es significativa a temperaturas normales de operación. Por lo tanto, el gas producido debe ser cuidadosamente limpiado antes de su uso o su reciclaje en un reactor, pero no para aplicaciones directas de cocción o calentamiento.

Características

El contenido de humedad del combustible es el factor principal que determina la temperatura del gas de descarga. El lignito que tiene un contenido de humedad muy elevado, produce gas en bruto a una temperatura de alrededor de 315° C. El contenido inferior de humedad del carbón bituminoso produce temperaturas de los gases de más de 540° C. Típicamente, el gas producido que sale del gasificador se enfría por contacto directo con el agua de reciclaje para condensar y eliminar los alquitranes y aceites, el enfriamiento del gas se produce antes de que salga del reactor. Después del enfriamiento, el calor puede ser recuperado del gas por generación de vapor a baja presión.

Tabla 2.3 Ceniza composición de la biomasa: mayor (ppm en peso seco de biomasa) (Raveendran y col. ,1995)

No.	Biomasa	Al	Ca	Fe	Mg	Na	K	P	Si	CO	Cr	Cu	Mn	Ni	S	Zn
1	Bagazo	-	1,518	125	6,261	93	2,682	284	17,340	-	-	18	9	16	60	16
2	Fibra de coco	148	477	187	532	1,758	2,438	47	2,990	0.6	2	68	4	2	64	25
3	Cáscara de coco	73	1,501	115	389	1,243	1,965	94	256	0.5	0.3	5	1	13	35	9
4	esencia de fibra de coco	1,653	3,126	837	8,095	10,564	26,283	1,170	1,050	3.2	0.2	1,239	27	22	476	40
5	Mazorca de maíz	-	182	24	1,693	141	9,366	445	9,857	-	-		19	6	15	11
6	tallo de maíz	1,911	4,686	518	5,924	6,463	32	2,127	13,400	8	11	32	12	13	564	32
7	Desperdicios de algodón ginebra	-	3,737	746	4,924	1,298	7,094	736	13,000	-	-		38	10	58	22
8	cáscara de cacahuete	3,642	12,970	1,092	3,547	467	17,690	278	10,960	2.3	6	11	44	11	299	52
9	Cáscara de mijo	-	6,255	1,020	11,140	1,427	3,860	1,267	150,840	-	-		38	49	317	94
10	Cáscara de arroz	-	1,793	533	1,612	132	9,061	337	220,690	-	-	21	108	32	163	1244
11	Paja de arroz	-	4,772	205	6,283	5,106	5,402	752	174,510	-	-		463	45	221	47
12	Madera subabul	-	6,025	614	1,170	92	614	100	195	-	-	1	2	1	66	40
13	Paja de trigo	2,455	7,666	132	4,329	7,861	28,930	214	44,440	-	-	7	25	25	787	18

2.4.2 Operación de gasificadores de corrientes paralelas

Los gasificadores de este tipo funcionan a temperaturas muy elevadas para fundir las cenizas de carbón en escoria inerte. La alimentación de carbón fino y una alta temperatura de operación permite que la reacción de gasificación se produzca a una velocidad muy alta (tiempo de residencia típico es del orden de pocos segundos), con altas eficiencias de conversión de carbono (98-99.5%) (Castells y col., 2005).

En estos gasificadores el sólido entra por la parte superior, lo que da como resultado que el oxidante y el vapor arrastren las partículas de carbón a medida que fluyen a través del gasificador, experimentando sucesivamente los procesos de secado y pirólisis al ser sometido a un aumento progresivo de la temperatura. El gas obtenido es de baja calidad energética, pero tiene la ventaja de tener un contenido bajo de alquitranes (Martínez, 2006).

El principio de funcionamiento es similar al de contracorriente, pero el agente fluye en la misma dirección al combustible. La combustión debe ser iniciada en la parte superior de la cama fija, quemando una pequeña porción del combustible, o a través de una fuente externa. El gas producido sale por la parte inferior del gasificador a una alta temperatura. La mayoría de este calor es transferida a la corriente de aire que entra desde la parte superior del gasificador, resultando en una eficiencia energética similar al de flujo ascendente.

La gran diferencia conceptual entre un gasificador de contracorriente y el de contracorriente, radica en que en el primero los gases liberados en las etapas de pirólisis y zona de gasificación no pasan a través de una zona de alta temperatura. Mientras que en el de corrientes paralelas los gases liberados en las etapas de pirólisis y zona de gasificación deben de pasar necesariamente por la zona de alta temperatura, la zona de oxidación. Esto implica una serie de condiciones como que los alquitranes tienden a desaparecer, al pasar por la etapa de gasificación y la mayoría de alquitranes son quemados, por lo que sus niveles son mucho menores que los del tipo updraft o contracorriente. En el producto final, el agua sale del sistema sin reaccionar (zona de secado) alcanza los más altos niveles de conversión. La consecuencia global es que los gases tienden a salir del sistema a menor temperatura, pero con una composición tal que su poder calorífico es superior (Garay y col., 2008).

El alquitrán, aceites, fenoles, y otros líquidos producidos a partir de volatilización del carbón en el interior del gasificador se descomponen en hidrógeno (H_2), monóxido de carbono (CO) y pequeñas cantidades de gases de hidrocarburos ligeros.

2.4.3 Operación de gasificadores de lecho fluidizado

El funcionamiento de los gasificadores de flujo descendente y flujo ascendente se ve afectado por las propiedades morfológicas, físicas y químicas del combustible. Los

problemas que se encuentran son la formación de escoria y la excesiva caída de presión en el gasificador. Un sistema de diseño que pretende eliminar tales dificultades es el gasificador de lecho fluidizado (FAO, 1993).

El sólido triturado se introduce por un lateral del gasificador, donde reina una temperatura uniforme (para biomasa se opera a unos 800-900°C). Los agentes gasificantes que se introducen a una alta velocidad mantienen en suspensión las partículas del sólido, formando un fluido que se comporta como un líquido mientras se producen las reacciones. Las cenizas se extraen de la parte inferior, en tanto que el gas suele arrastrar partículas de sólido sin quemarlas, mientras que en gasificadores de diseño más avanzado suelen recogerse y recircularse al lecho.

El volumen de gas producido por unidad de volumen del reactor es superior al de los gasificadores de lecho fijo, lo que se traduce en un menor precio. La composición del gas es muy uniforme, variando muy poco debido a las buenas condiciones de operación, de transferencia de calor y materia que proporciona el lecho fluidizado. Al ser la temperatura uniforme en todo el lecho, los gases salen del gasificador a una temperatura elevada, lo que obliga a optimizar cuidadosamente el sistema de recuperación de calor a fin de mantener un buen rendimiento térmico global (Martínez, 2006). En la Figura 2.2 se muestra gráficamente los procesos anteriormente descritos para los diferentes tipos de gasificadores.

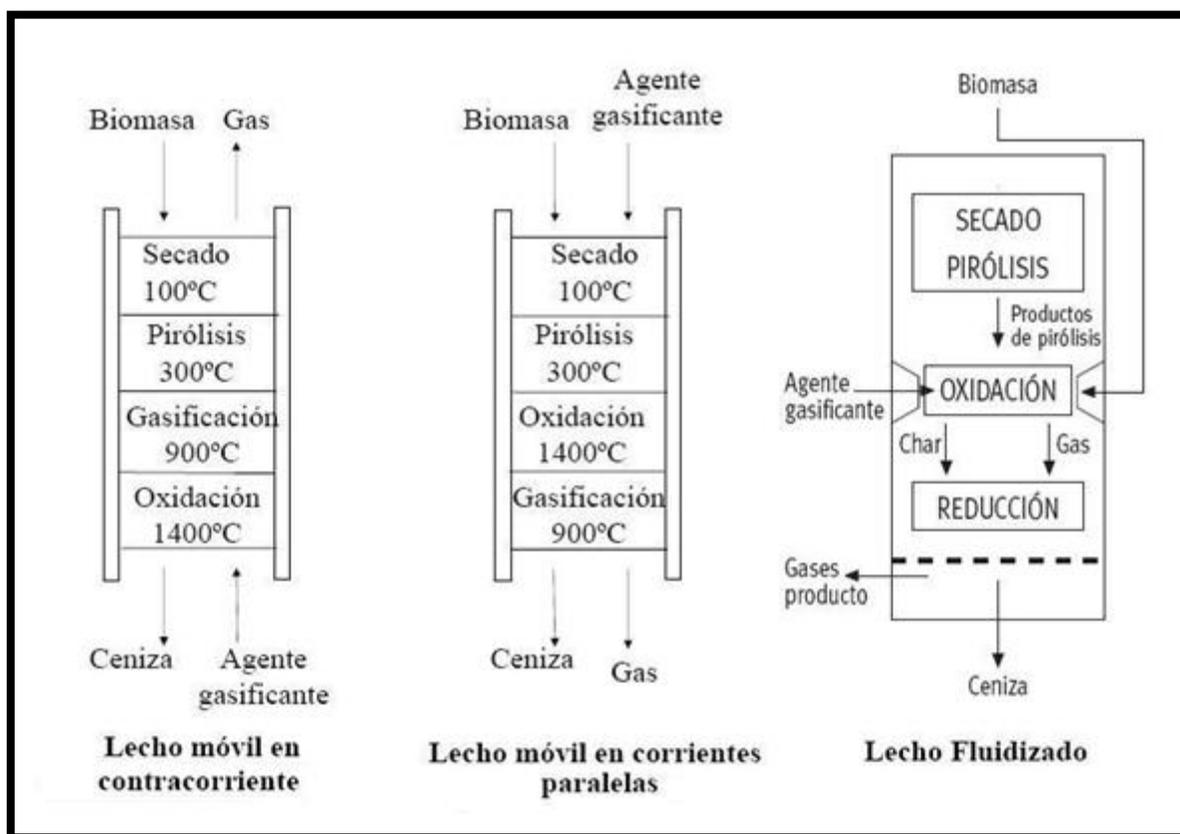


Figura 2.2 Tipos de gasificadores (IDEA, 2007)

2.5 Uso de gasificadores en el mundo

En tiempos de la Segunda Guerra Mundial, en Dinamarca, durante las fuertes restricciones del suministro de petróleo, el 95% de los automóviles (tractores, coches, camiones, barcos, etc.) funcionaban gracias a los gasógenos, que empleaban madera o carbón como combustible de gasificación para generar un gas combustible que se quemaba limpiamente en un motor de gasolina estándar para producir energía mecánica.

Esta vieja tecnología, fue también empleada en Sudáfrica durante el Apartheid como procedimiento de elaboración de hidrocarburos a partir de carbón mediante el proceso Fischer-Tropsch. El gas obtenido por gasificación a alta temperatura y presión en contacto con catalizadores metálicos formaba hidrocarburos alifáticos (gasolina y gasóleo) (Oñate, 2006).

La gasificación es un proceso prometedor para la conversión de biomasa. Es un gas combustible que puede ser utilizado en calderas de carbón para su combustión directa, cuando el gas producto se limpia adecuadamente en motores de combustión interna y turbinas de gas o gas de síntesis para combustibles líquidos u otros productos químicos (Kurkela y col., 2004).

En los últimos 10-15 años ha comenzado el resurgimiento de la tecnología de gasificación. Entre las razones para tal resurgimiento se encuentra el espectacular aumento de los costos de energía. Además, la percepción es que estas tendencias son a largo plazo por la rápida industrialización y el aumento de la demanda de la energía en países como China y la India. La gasificación es utilizada en aplicaciones como la generación eléctrica, la fabricación de productos químicos, sustitutos del gas natural, hidrógeno y combustibles (Janeiro, 2009).

La base de datos muestra que 11 plantas con 17 gasificadores, se encuentran en construcción y un adicional de 37 plantas con 76 gasificadores, se encuentran en las etapas de planificación para entrar en funcionamiento entre 2011 y 2016. La mayoría de estas plantas (40 de 48) utilizan carbón como materia prima. La capacidad adicional prevista de todas las nuevas plantas de 2011 y 2016 es 51,288 de Mega Watts térmicos (MWt), un incremento de más del 72%. Si este crecimiento es realizado, la capacidad mundial para el año 2016 será 112,106 MWt de la capacidad de gas de síntesis a partir de 192 plantas y 505 gasificadores. La base de datos del Departamento de Energía de EE.UU. (NETL, 2010) de gasificación en todo el mundo muestra que la capacidad de gasificación ha crecido actualmente a 70,817 MWt de salida de gas de síntesis como se muestra en la Figura 2.3 y 144 plantas en operación, con un total de 412 gasificadores.

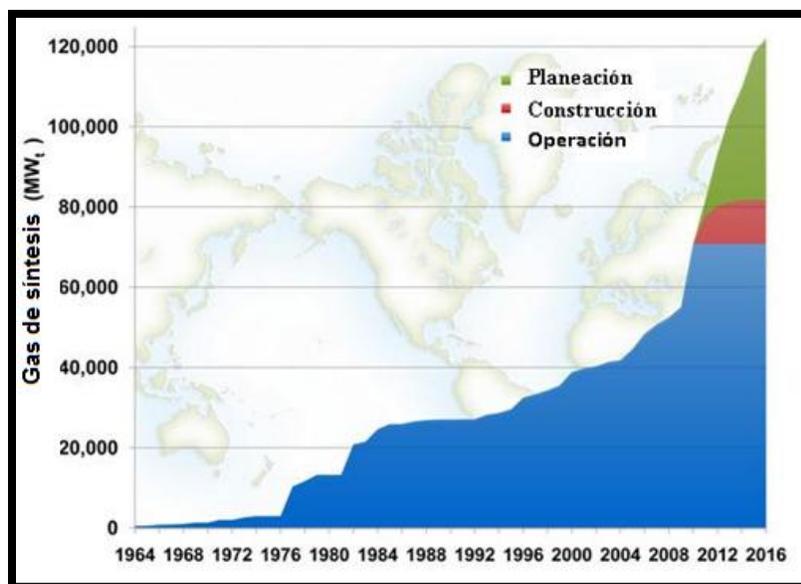


Figura 2.3 Capacidad de gasificación a nivel mundial y el crecimiento planificado - acumulado por año (NETL, 2010)

a) Un dinámico mercado global

La gasificación se ha convertido en la base de la nueva tecnología, así como un medio para convertir el carbón y otras materias primas de carbono en hidrógeno limpio y monóxido de carbono. Se utiliza para crear una variedad de productos con valor agregado para la economía global. Su uso en más de dos docenas de países industrializados y la diversidad de sus productos como son la electricidad, productos químicos, combustibles líquidos para el transporte, el hidrógeno o el Sustituto del Gas Natural (SGN), muestran el enorme potencial para el crecimiento continuo de la industria de la gasificación. Las consideraciones ambientales, incluidas las medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, permiten que la tecnología de gasificación sea la vía para la expansión del uso de esta fuente de energía. En general, el crecimiento futuro de las tecnologías de gasificación estará determinado por el equilibrio del costo de capital y el producto en combinación con los costos ambientales, los requisitos reglamentarios y la aceptación pública.

b) Cambios en la industria

En la industria actual, la salida de gas de síntesis se ha incrementado en un 26% desde 2007 y en un 50% desde 2004. China cuenta con siete plantas en construcción: Seis para convertir el carbón en productos químicos y fertilizantes y uno para convertir el carbón en energía. Un adicional de 10 plantas de gasificación se están planificando para el año 2016 en China. Ocho para convertir el carbón en productos químicos y fertilizantes y dos para convertir el carbón a la energía. Dos plantas de ciclo combinado con gasificación integrada (CCGI), actualmente se encuentran en construcción en EE.UU. El crecimiento se espera

que continúe con los 16 proyectos previstos para la operación de este país desde 2010 a 2016, combinado las 18 plantas representan el 47% del crecimiento de la capacidad total de generación de energía en EE.UU., el 23% de combustibles gaseosos, 18% para los combustibles líquidos y 12% de las instalaciones químicas. Trece plantas adicionales se planean en todo el mundo 11 utilizarán carbón, y dos se utilizara biomasa y residuos. En la Tabla 2.4 se muestra un resumen de las plantas que se encuentran operando, en construcción y planificadas.

Tabla 2.4 Plantas operando, en construcción y planificadas alrededor del mundo (NETL, 2010)

Materia prima		Operando 2010	En construcción 2010	Planificado 2011-2016	Total
Carbón	Capacidad del gas de síntesis (MWt)	36,315	10,857	28,376	75,548
	Gasificadores	201	17	58	276
	Plantas	53	11	29	93
Petróleo	Capacidad del gas de síntesis (MWt)	17,938			17,938
	Gasificadores	138			138
	Plantas	56			56
Gas	Capacidad del gas de síntesis (MWt)	15,281			15,281
	Gasificadores	59			59
	Plantas	23			23
Coque de petróleo	Capacidad del gas de síntesis (MWt)	911		12,027	12,938
	Gasificadores	5		16	21
	Plantas	3		6	9
Biomasa	Capacidad del gas de síntesis (MWt)	373		29	402
	Gasificadores	9		2	11
	Plantas	9		2	11
Total de la capacidad del gas de síntesis (MWt)		70,818	10,857	40,432	122,107
Total de Gasificadores		412	17	76	505
Total de Plantas		144	11	37	192

c) Regionales de distribución

Las plantas de gasificación están operando en 29 países. La región de Asia / Australia tiene 37% de la capacidad operativa total. La región de África / Oriente Medio ha fortalecido su posición en segundo lugar, debido al rápido crecimiento en Qatar. De los 10,857 MWt de capacidad de gas de síntesis que se encuentra actualmente en construcción, el 65% se está construyendo en la región de Asia y Australia, el 18% en Europa, y el 17% en América del Norte. Con el 63% del crecimiento total de la capacidad prevista, América del Norte tiene el potencial para liderar el crecimiento regional en el mundo hasta el 2016. Otro 34% se

originan en la región de Asia / Australia, con China a la cabeza, estos datos pueden ser observados en la Figura 2.4.

En las Figuras 2.5, 2.6 y 2.7, se muestra la capacidad de operación de todas las plantas de gasificación, ya sean las puestas en marcha o en estado de operación comercial a partir de finales de 2010. La construcción incluye aquellos proyectos que están en construcción a partir de 2010. Capacidad prevista incluye a cualquier planta comercial que se encuentra actualmente en fase de planificación, diseño o desarrollo, pero aún no ha comenzado la construcción y los planes para poner en marcha a finales de 2016.

d) Distribución de materia prima

En la Figura 2.5 se muestra como el carbón mantiene su posición de liderazgo como la materia prima predominante en el proceso de gasificación (51%). El petróleo suministra el 25% de las materias primas, el gas natural cada vez con mayor importancia con el 22% debido a la Perla de GTL en Qatar. Las 11 plantas actualmente en construcción serán a base de carbón. De los 40,432 MWt de capacidad del gas de síntesis que se planean para el período 2011-2016, más del 70% se espera que sea alimentado con carbón y el 30% de la capacidad restante con coque de petróleo para dar cuenta de casi todo el crecimiento.

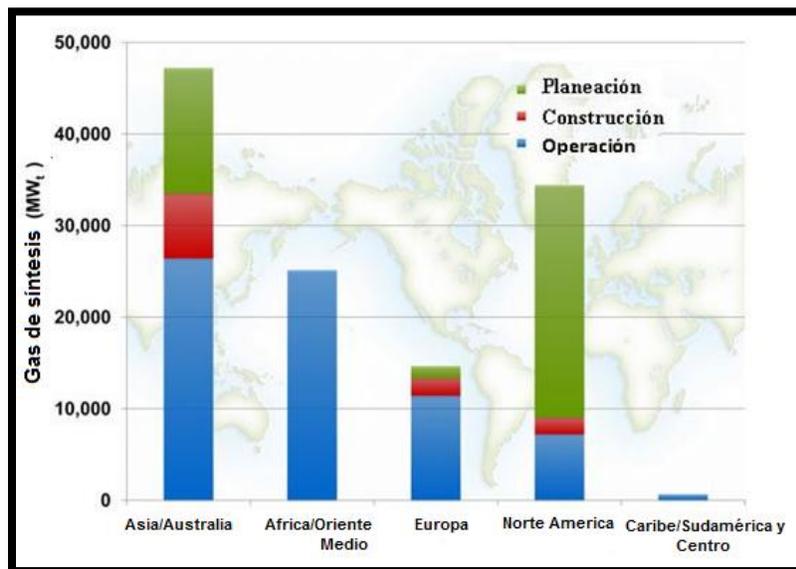


Figura 2.4 Capacidad mundial de la gasificación (MWt) y el crecimiento planificado por región (NETL, 2010)

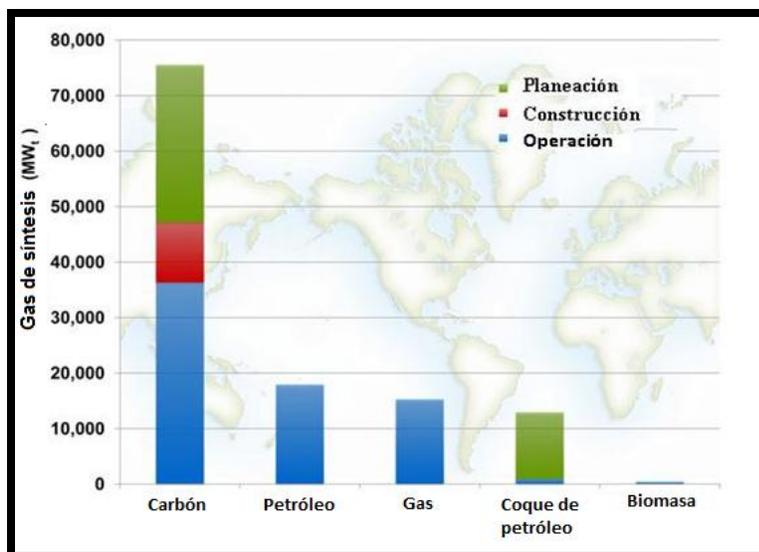


Figura 2.5 Capacidad mundial de la gasificación y crecimiento planificado por la materia prima (NETL, 2010)

e) Distribución de productos

Los productos comercializables generados a partir del gas de síntesis incluye a los productos químicos en la posición de liderazgo (45%), seguido por combustibles líquidos (38%), energía (11%) y gas (6%), como se muestra en la Figura 2.6. Siete de las plantas en construcción producirán sustancias químicas y cuatro para generación de energía.

f) Tecnología de distribución

Shell es el proveedor de tecnología de gasificación que tiene la mayor capacidad instalada 28,822 MWt de gas de síntesis tal como se muestra en la Figura 2.7, seguido por Sasol Lurgicon 17,753 MWt, y GE con 16,334 MWt. Seis de las plantas actualmente en construcción utilizará la tecnología de Shell.

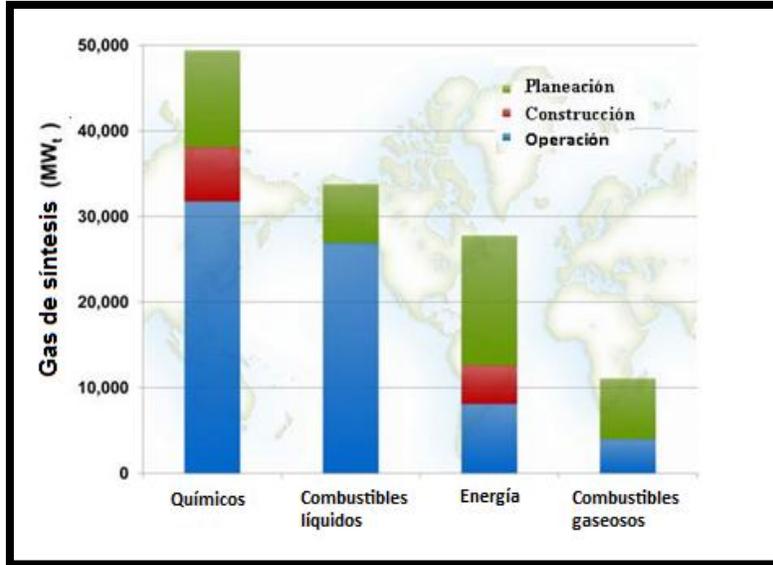


Figura 2.6 Capacidad mundial de la gasificación y crecimiento planificado por producto (NETL, 2010)

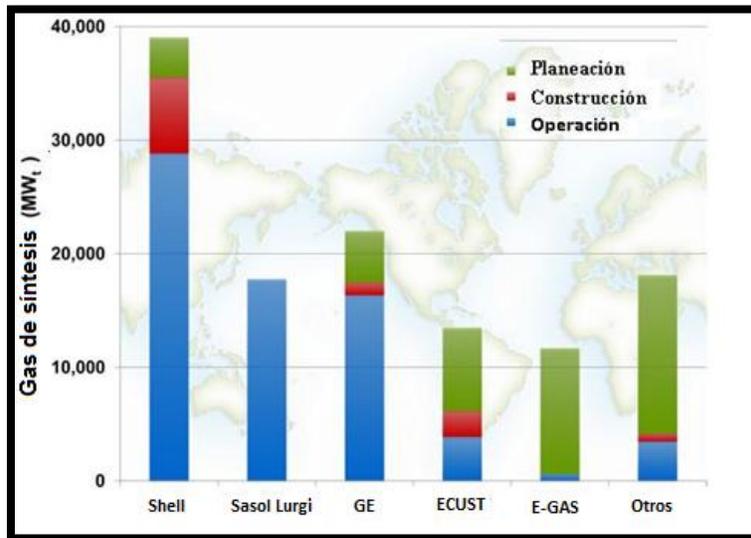


Figura 2.7 Capacidad mundial de la gasificación y crecimiento planificado por la tecnología (NETL, 2010)

2.6. Mantenimiento a gasificadores

2.6.1 Mantenimiento preventivo

En el mantenimiento predictivo es necesario conocer el estado de los equipos. Esta tarea es indispensable para detectar el fallo cuando este se encuentra en estado incipiente. Al conocer la situación del equipo se puede decidir si es necesaria la intervención del mantenimiento o se puede determinar el momento adecuado para realizar estas actividades

sobre dichos elementos. Para el mantenimiento predictivo se aplican diversas técnicas analíticas que permiten diagnosticar los fallos cuando todavía no ha producido efectos notables en el comportamiento del equipo, entre las que se encuentran, los ensayos no destructivos (END).

El departamento de mantenimiento, tiene la responsabilidad de llevar a cabo todos los procedimientos requeridos para una correcta medición de los elementos. Para realizar un correcto mantenimiento predictivo, es importante tener un registro de las mediciones producidas y almacenadas en programas de ordenador.

El costo de mantenimiento de los gasificadores es muy bajo, como así su operación. De las 8,760 horas del año, 1,752 horas se usan para su mantenimiento, o sea que al año el gasificador tiene un Factor de Planta del 80%. Dependiendo del tamaño y aplicación del gasificador, es la frecuencia del mantenimiento. GERTEK (2012) muestra el mantenimiento de un gasificador con capacidad para generar 1.1 MW.

a) Chequeo diario (sin detener el funcionamiento del gasificador)

- Drenar Cenizas
- Checar humedad en biomasa

b) Checar cada 100 hrs. (se detiene el funcionamiento del gasificador de 2 a 4 horas):

- Checar tolva de vaciado
- Checar puntas de entrada de aire
- Checar válvula de succión de aire

c) Checar cada 400 hrs. (se detiene el funcionamiento del gasificador aproximadamente 24 horas):

- Checar cámara de carbón, para evitar acumulaciones
- Checar puntas de entrada de aire
- Limpiar el eyector Venturi
- Checar tubería de gas
- Checar sellos
- Examinar el filtro de gas

Capítulo III MATERIALES Y MÉTODOS

Se instalará un equipo de gasificación de biomasa de flujo descendente en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. El gasificador producirá la mayor cantidad de gas de síntesis con bajo contenido de alquitranes e impurezas mediante el proceso de conversión termoquímica, con la finalidad de que el gas pueda utilizarse para alimentar un motor de combustión y así producir electricidad. El gasificador de flujo descendente GEK TOTTI se ha seleccionado gracias a las diferentes investigaciones realizadas alrededor del mundo, y enfocadas al fin que posteriormente se le quiere dar. Funcionamiento con un motor de combustión a base de gas.

El gasificador de flujo descendente ha resultado la solución para eliminar las impurezas contenidas en el gas de síntesis mediante el arrastre de alquitrán con la corriente de los gases en la etapa de pirólisis. En su trayecto descendente los alquitranes deben pasar a través de la zona de combustión y así es como se transforman en gases permanentes de hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano.

Dependiendo de la temperatura de la zona de combustión y del tiempo de contacto de los vapores con el alquitrán, se logra una descomposición más o menos completa de los alquitranes. La principal ventaja de los gasificadores de corrientes paralelas radica en la posibilidad de producir un gas sin alquitrán apropiado para aplicarlo a motores.

El GEK TOTTI que es un kit experimental de gasificación con torre de integración térmica total, por sus siglas en inglés, es un gasificador de flujo descendente configurado para alimentar motores para la producción de electricidad. Así mismo permite la recuperación y recirculación de calor mediante el secado del combustible de alimentación con el calor de los gases de escape.

Los resultados que ofrece el fabricante del sistema GEK TOTTI es una mejor combustión y una mayor temperatura de craqueo para la conversión de alquitrán en gases combustibles, así como una mayor eficiencia del gasificador. Teóricamente el sistema de gasificación a su máxima capacidad puede producir gas con un potencial de energía capaz de producir electricidad a través de un motor de 10kW.

A continuación se describe cada uno de los componentes del equipo de gasificación y su principal función dentro del proceso para la producción de gas de síntesis. También se da a conocer el proceso de ensamble y las herramientas necesarias para que el equipo sea armado desde su proceso inicial considerando que se tiene un kit experimental como el que se muestra en la Figura 3.1.

El equipo de gasificación está integrado por:

- Tolva de materia prima
- Zona de secado
- Control de nivel de combustible
- Intercambiador de calor
- Reactor de gasificación
- Entrada de aire
- Boquillas de aire
- Puerto de iluminación
- Reducción de campana
- Perilla y rejilla
- Ciclón
- Filtro de gas lecho empacado
- Sistema de transmisión de gas
- Quemador
- Medidor de monóxido de carbono
- Medidor de temperatura



Figura 3.1 Fotografía de los componentes del gasificador de flujo descendente

Para el ensamble de los componentes es necesario un kit de herramienta básica o por lo menos el equipo que a continuación se enlista en la Tabla 3.1.

De la Tabla 3.1 cabe mencionar que la herramienta y el compresor son responsabilidad del usuario, lo que respecta a los pegamentos y aislantes son elementos que los incluye el kit de ensamble de gasificación GEK TOTTL.

Para el compresor de aire el fabricante recomienda que se utilice un equipo no mayor a 200 psi de presión para alimentar el eyector y así producir la flama final.

Tabla 3.1 Herramientas necesarias para el ensamble

Herramientas a utilizar	
<i>Descripción</i>	
Llave mixta estándar de hierro forjado	9/16"
Llave mixta estándar de hierro forjado	1/2"
Llave mixta estándar de hierro forjado	5/8"
Desarmador de cruz	
Desarmador plano	
Guantes de látex	
Tijeras metálicas	
Navaja	
Llave estilson	18"
Llave inglesa	10"
Pinzas de presión	
Pistola para calafatear	
Boquilla para lata roscada gas Butano	
Extensión eléctrica	
Escalera	
Cinta teflón	
Silicón rojo RTV de alta temperatura Permatex	
Compresor de aire de 200psi	
Cinta de aislar negra de 3/4"	

3.1 Dimensiones del equipo de gasificación

En las Figuras 3.2, 3.3 y 3.4, se muestran las dimensiones de los componentes principales que conforman el equipo de gasificación, para un panorama general del tamaño y diseño del equipo.

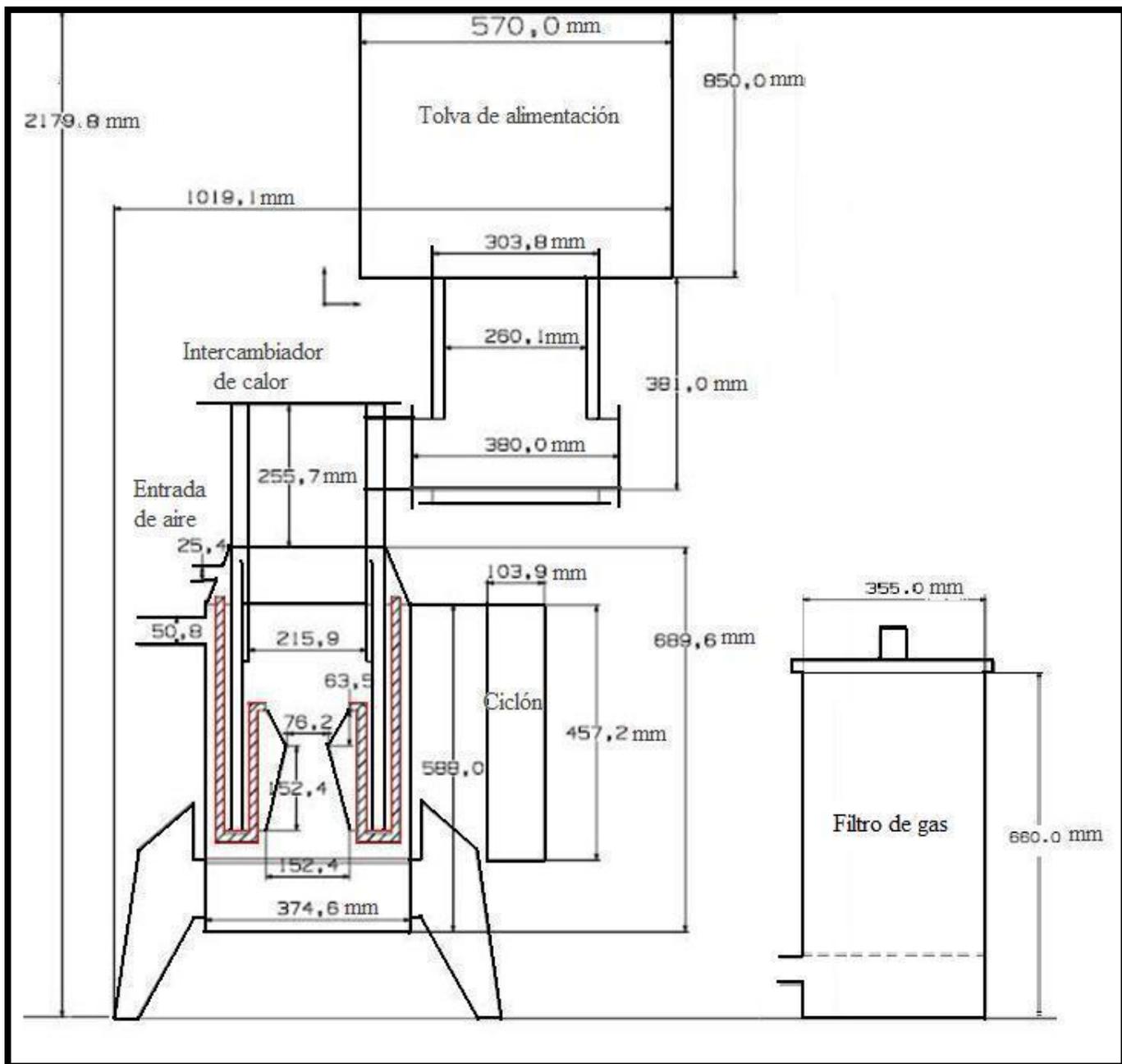


Figura 3.2 Diagrama general y dimensiones del equipo de gasificación experimental

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama general del equipo de gasificación, en él se observa el arreglo de los principales componentes que conforman el proceso de manera interna como externa, así como las dimensiones de cada elemento. En la imagen se muestra la tolva de alimentación, elemento que suministra y almacena la biomasa, el intercambiador de calor, etapa del proceso que se da la entrada y salida de aire, el reactor que es el corazón del proceso en donde se realiza la pirólisis, combustión y reducción y el filtro de gas, lugar donde se realiza la última purificación del gas producto.

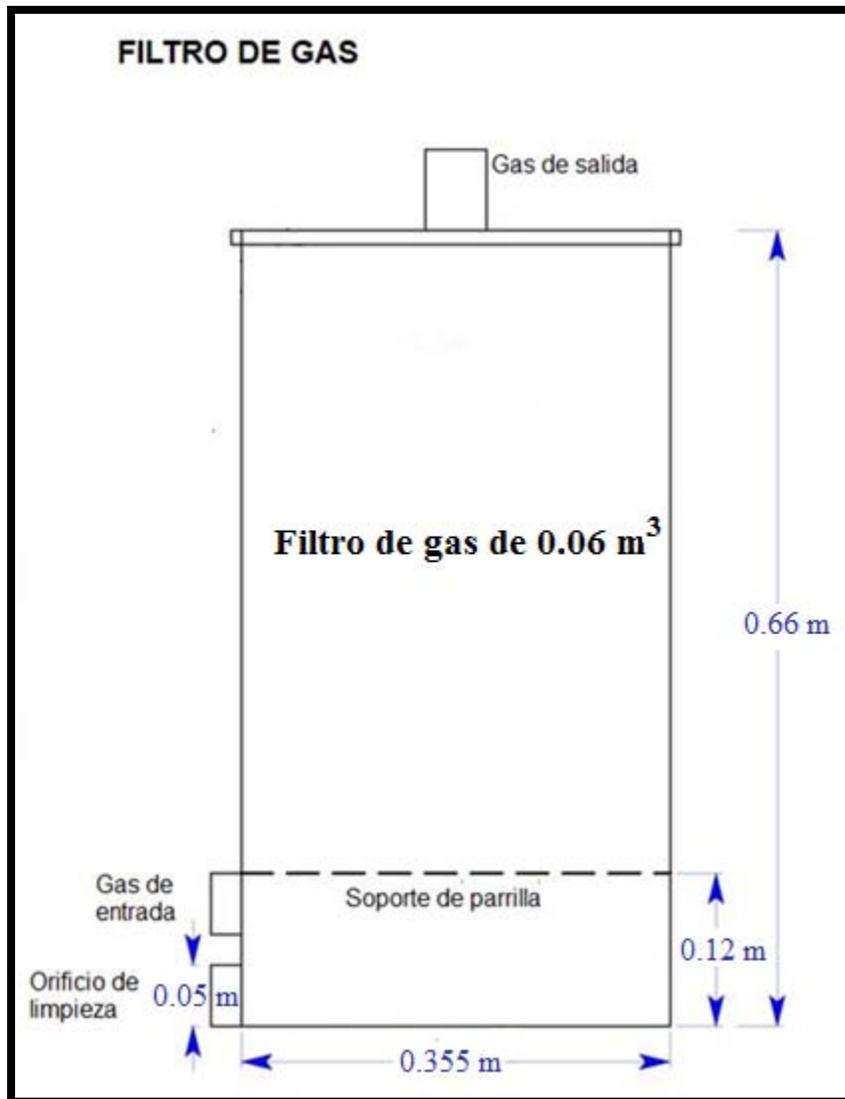


Figura 3.3 Diagrama y dimensiones del filtro de gas empacado

El filtro mostrado en la Figura 3.3, es el elemento que tiene el último contacto con el gas obtenido del proceso de gasificación antes de ser procesado en cualquiera de sus usos, es por eso que de él depende que el resultado de la aplicación tenga mayor o menor eficiencia, el filtro de gas, se convierte en un elemento muy importante ya que gracias a él se pueden eliminar gran parte de los alquitranes producidos de la pirólisis que no fueron disueltos en la combustión.

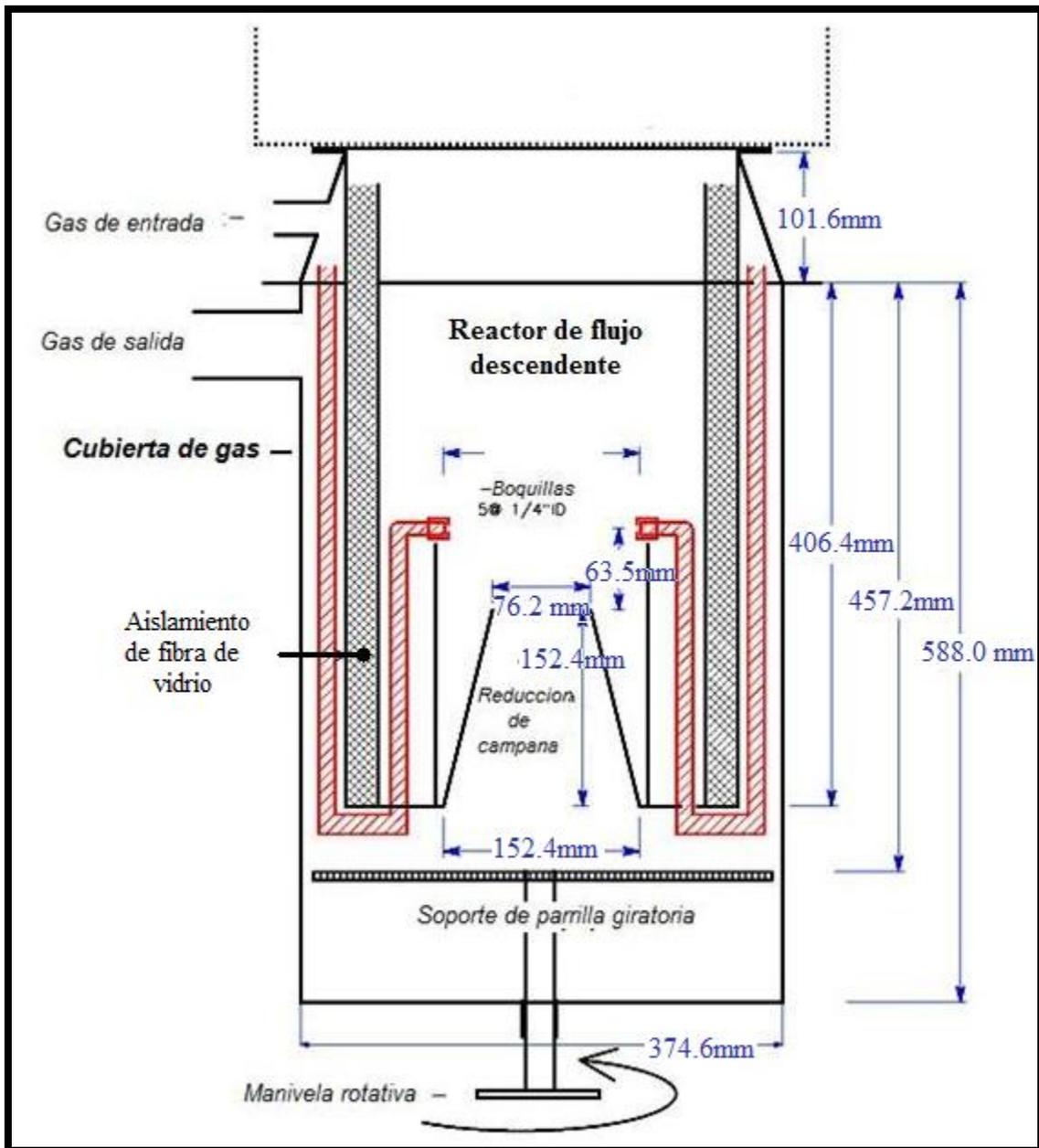


Figura 3.4 Diagrama y dimensiones del reactor de flujo descendente

El reactor de gasificación como ya se indicó es uno de los componentes con mayor importancia del proceso, por ello es esencial conocer su estructura de este elemento. En la Figura 3.4 se muestran los elementos internos que lo conforman, entradas y salidas de aire, conexión reducción campana, parrilla giratoria, cubierta de gas y aislamiento de fibra de vidrio, así como las dimensiones de describen a cada parte.

3.2 Componentes del sistema de gasificación

3.2.1 Tolva de materia prima

La tolva de materia prima es un barril de acero que tiene un volumen de 0.113 m^3 . Se encuentra en la parte más alta del equipo, como se muestra en la Figura 3.5^a. Se encarga de almacenar el combustible y a su vez suministrarlo para que el proceso se lleve a cabo. La tolva se sella con una tapa para mantener el vacío del sistema Figura 3.5b. La tapa incluye una válvula de liberación de seguridad para el proceso de secado de humedad por condensación en un anillo incorporado en el diseño de la tolva.

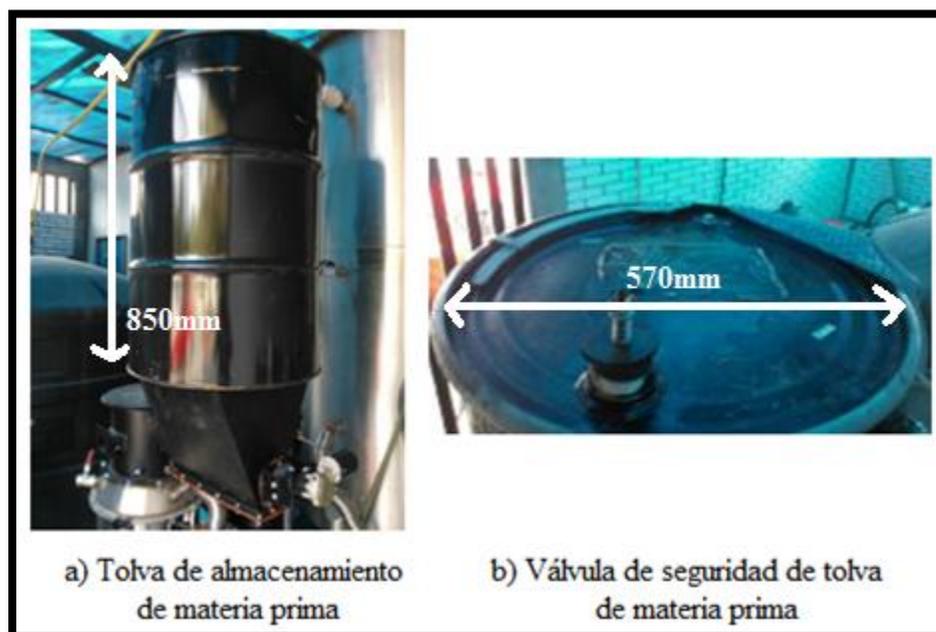


Figura 3.5 Fotografía de la tolva de materia prima

3.2.2 Zona de secado

La zona de secado es un componente metálico con forma rectangular que reduce su área conforme descende su altura. Su ubicación dentro del gasificador se localiza después de la tolva de alimentación. El combustible suministrado entra a la zona de secado que es una etapa donde se calienta la biomasa entrante con los gases calientes que salen del gasificador. Los gases calientes salen del reactor entre $250\text{-}350^{\circ}\text{C}$ y entran en el ciclón, posteriormente se produce el secado a través del cubo mediante una serie de deflectores para calentar la biomasa entrante aproximadamente a 100°C . Los deflectores golpean las partículas arrastradas en la corriente de gas. La forma de L del gasificador, tal como se muestra en la Figura 3.6b, es intencional para separar la zona de secado de la zona de pirólisis. Esto es una ventaja porque el agua compite con el calor necesario para vaporizar el alquitrán de la materia prima. El vapor de agua también reducirá la solubilidad del alquitrán de vaporización en la zona de pirólisis.

En esta etapa también se realiza el suministro de biomasa proveniente de la tolva de alimentación mediante un husillo que permite dosificar las proporciones de combustible al reactor.



Figura 3.6 Fotografías de la zona de secado

3.2.3 Control de nivel de combustible

La alimentación de la materia prima es controlada por un interruptor de nivel Marca W.E Anderson modelo FS-2, con límites máximos de presión de 10 bar y temperatura 110°C mostrado en la Figura 3.7. Este se instala en la parte superior de la tapa del reactor. El interruptor de nivel de combustible se conecta a un circuito de 12 V CC. El control de nivel realiza la función de enviar una señal al motor mediante unas paletas metálicas, modificables en altura, para que suministre combustible cuando éste comience a consumirse y el proceso no se quede sin biomasa hasta que se vacié la tolva de alimentación.

Especificaciones del fabricante del interruptor de nivel:

- Temperatura máxima: 110°C
- Presión máxima: 10 bar.
- Alimentación eléctrica: 12 VCC
- Orientación de montaje: El interruptor deberá ser instalado verticalmente en tuberías horizontales
- Punto de ajuste: Cuatro paletas de ajuste y un tornillo
- Carcasa: Aleación de aluminio
- Peso: 0.8 kg.



Figura 3.7 Fotografía del controlador de nivel

3.2.4 Intercambiador de calor

El pirocoil GEK es un intercambiador de calor de gas circulante con un volumen de 0.00821 m^3 utilizado para introducir fuentes externas de calor a la zona de pirólisis de un gasificador de tiro descendente Figura 3.8. Una fuente externa de calor para la pirólisis puede mejorar significativamente su dinámica, lo que resulta en alquitranes más fáciles de romper en sus enlaces, la eliminación de la resistencia térmica en la zona de combustión. La fuente de calor externa de mayor interés para utilizar en el gasificador es el gas de escape de un motor de combustión interna.

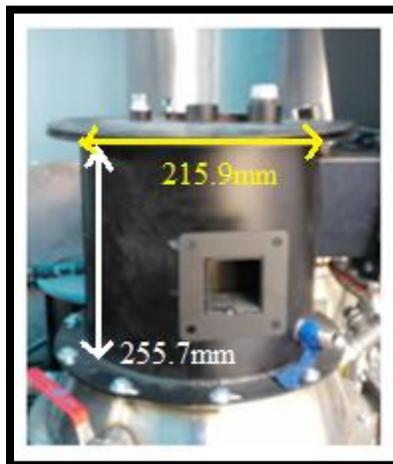


Figura 3.8 Fotografía del intercambiador de calor

3.2.5 Reactor de gasificación

El reactor es un cilindro de acero inoxidable con capacidad de almacenamiento por carga de 0.0129 m³ de biomasa. A este elemento se le considera el corazón del proceso de gasificación, al realizarse en él los procesos de combustión y reducción. El reactor es compacto de corrientes descendentes multietapas capaz de generar gas con bajo contenido de alquitranes de madera para el uso de motores de combustión interna. El reactor se muestra en la Figura 3.9, y cumple con las características observadas en la Figura 3.3.



Figura 3.9 Fotografía del reactor de gasificación

3.2.6 Entrada de aire

En la Figura 3.8a se observa la entrada de aire, esta es una válvula de aluminio tipo esfera de 1" que permite regular la entrada del agente gasificante al sistema, pero no permite que la expansión del gas de madera caliente se escape a través de la entrada durante el apagado. La válvula permite que el aire circule a través del cuello del reactor en el que el flujo de aire se divide entre las cinco mangueras metálicas de acero inoxidable flexibles, como se observa en la Figura 3.10b. El flujo de aire y el gas de síntesis que se genera en el proceso, se combinan para calentar el aire entrante mientras se enfría el gas de biomasa.



Figura 3.10 Fotografías de la entrada de aire

3.2.7 Boquillas de aire

Las toberas de aire son un arreglo de tubo galvanizado de 1/2" con reducción a 5/32" a la salida de la boquilla de aire de hierro colado.

Las boquillas de hierro colado de aire experimentan las temperaturas más altas en el reactor a medida que se introduce aire en la zona de combustión a través de ellas. Las boquillas de aire son capaces de resistir altas temperaturas y no necesitan sustitución muy a menudo, sin embargo, el reactor está diseñado para realizar el reemplazo de las boquillas si es necesario. Las boquillas de aire deben estar orientadas de modo que apunten al centro de la reducción de campana, tal como se muestra en la Figura 3.11. Las boquillas tienen la función de suministrar el aire estequiométricamente necesario para que se realice el proceso de combustión completo en las últimas etapas del proceso.

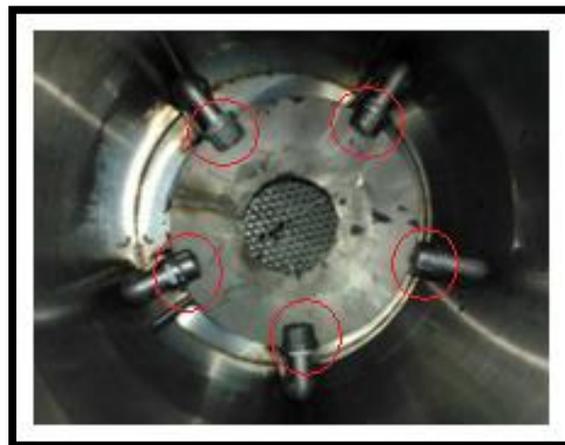


Figura 3.11 Fotografía del conjunto estrella de las boquillas de aire

3.2.8 Puerto de iluminación

El puerto de iluminación es un tubo galvanizado que proviene de la zona de combustión hasta una salida externa con un niple roscado mostrado en la Figura 3.12, permite que el operador encienda el combustible en el reactor con un soplete de gas butano en la zona de combustión durante el arranque. Este puerto se debe cerrar con una tapa de ½" una vez que el reactor se encuentra en operación. Si es necesario, se puede agregar pequeñas cantidades de cualquier tipo de combustible líquido a través del puerto para facilitar el arranque del proceso.



Figura 3.12 Fotografía del puerto de iluminación

3.2.9 Reducción de campana

La reducción de campana de acero inoxidable mostrada en la Figura 3.13 es el elemento más importante del gasificador de corriente descendente. La reducción de campana controla la velocidad de flujo con su cambio de diámetro de 6" a 3" y por lo tanto el tiempo de residencia de los gases que pasan a través de la zona de combustión y reducción. Debido a que las reacciones de combustión son mucho más rápidas que las reacciones de reducción, el diámetro del cono superior de la campana de reducción es mayor y se estrecha hacia abajo hasta una restricción para mantener estable la zona de combustión y evitar que se dé arrastre. Las reacciones endotérmicas de reducción son reacciones lentas que proceden del calor disponible de la combustión. Aquí el carbón vegetal que ha caído en la parte inferior del cono de la zona de pirólisis, reduce los productos de la combustión. El gasificador termina las reacciones en un estado metaestable antes de que la reacción alcance el equilibrio para maximizar la producción de CO y H₂. El reactor está diseñado para ser capaz de sustituir la campana de reducción si es necesario.



Figura 3.13 Fotografías de la reducción de campana

3.2.10 Rejilla

La rejilla metálica circular de cenizas que se muestra en la Figura 3.14 se encuentra debajo de la reducción de campana y su función es retener el carbón vegetal en la zona de reducción para permitir el paso de pequeñas partículas de carbón vegetal/ceniza hacia la parte más pequeña del gasificador. Los gránulos más pequeños de carbón aumentan la densidad aparente que disminuye el espacio vacío en mayor parte. La disminución en el espacio vacío limita el flujo de gas a través de los medios de comunicación y crea resistencia al flujo en el sistema.

El aumento en la cantidad de agitaciones de la rejilla puede purgar la campana demasiado rápido y sobrellenar de carbón vegetal/ceniza el depósito en la parte inferior. Una vez que este depósito se llena, la reja ya no es capaz de purgar las pequeñas partículas de carbón vegetal y el gasificador tendrá que ser cerrado y limpiado fuera.

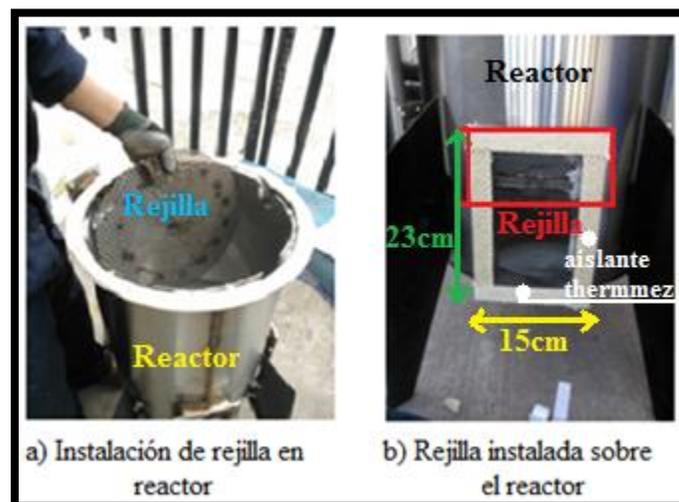


Figura 3.14 Fotografías de la rejilla

3.2.11 Ciclón

Después de que el gas de síntesis sale del gasificador de biomasa, éste pasa a través del ciclón mostrado en la Figura 3.15. Se caracteriza por ser un cilindro metálico de 0.001 m³ de capacidad que separa las partículas más grandes que pueden haber sido arrastradas en la corriente de gas. El condensado y las partículas caen a través de la trampa en la parte inferior del ciclón. El frasco de condensado o tarro de vidrio del ciclón debe vaciarse antes de cada operación, para así evitar que se alcance su máxima capacidad durante el funcionamiento del gasificador. El ciclón se encarga de eliminar la mayoría de las partículas antes del secado para evitar la obstrucción del intercambiador de hollín.

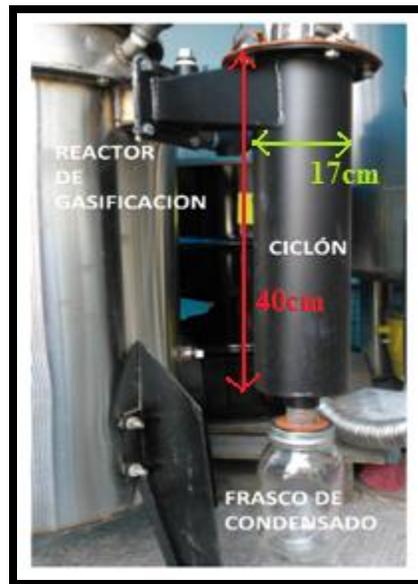


Figura 3.15 Fotografía del ciclón

3.2.12 Filtro de gas de lecho empacado

El filtro de lecho compacto es el cilindro metálico de la Figura 3.16 que tiene capacidad de 0.06 m³ y se llena de carbón con tamaño de partícula entre 1.16 a 1.4". Cualquier carbón vegetal puede ser utilizado, la carbonilla que se purga del gasificador se puede recoger y cernir para obtener el tamaño de partícula requerido y usado en el filtro. Se recomienda utilizar el carbón activo sobrante del gasificador, porque la base de alta temperatura de carbón absorbe los alquitranes de madera como la mayoría de los compuestos del alquitrán que son ácidos. El espacio de 5 pulgadas por debajo del fondo de filtro y la rejilla está reservado para la condensación en el filtro y hay un tapón para el drenaje del condensado.

En la parte superior del filtro debe haber un filtro fino tal como una tela o malla fina para evitar que partículas finas en la corriente de gas salgan. El tamaño del filtro final dependerá del requerimiento del gas para su uso final.

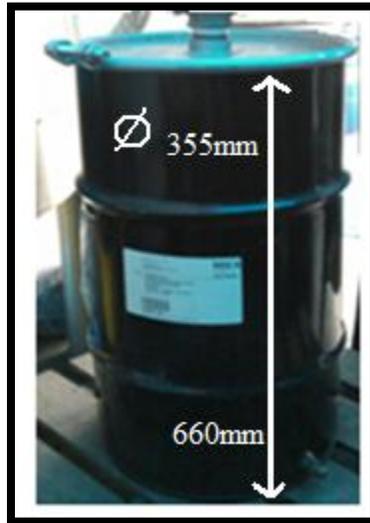


Figura 3.16 Fotografía del filtro de gas

3.2.13 Sistema de transmisión de gas

El sistema de transmisión de gas se utiliza para impulsar el flujo a través del sistema durante el arranque, éste arreglo se muestra en la Figura 3.17. A medida que aumenta el flujo, la temperatura aumenta. Cuando la temperatura del reactor alcanza la temperatura mínima de 750 °C, (> 800°C idealmente), el contenido de alquitrán en la corriente de gas puede ser lo suficientemente bajo para uso en motores.

Un eyector Venturi es un sistema de transmisión que aumenta la velocidad de los gases y mezcla el aire con el gas de síntesis. El eyector funciona proporcionando aire comprimido a 100 psi mediante la boquilla del eyector. La relación de aire comprimido y gas es de sólo 25% necesario para la bengala. Una válvula manual mezcla previamente el gas justo antes del eyector Venturi que permite la entrada del aire necesario para la relación aire/combustible para el quemador. Mientras que el eyector Venturi puede funcionar en una amplia gama de caudales, sin partes móviles, este sistema de accionamiento tiene una demanda de potencia más alta para un flujo dado y puede no ser apropiado para aplicaciones fuera de la red para el sistema de liberación para esta versión.

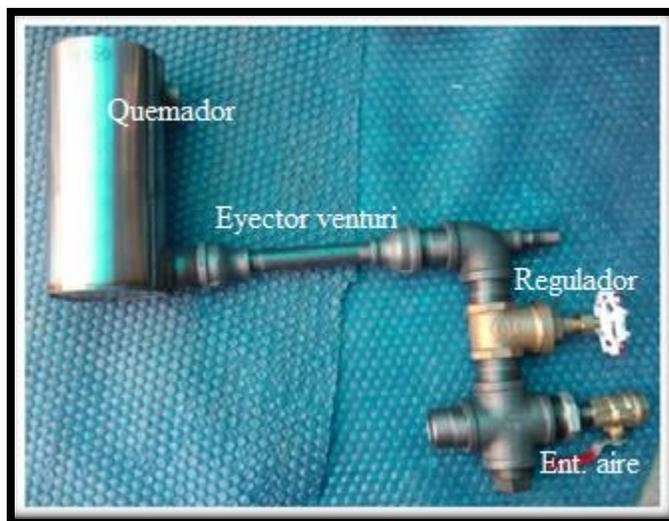


Figura 3.17 Fotografías del sistema de transmisión de gas

3.2.14 Quemador

La llama se podrá observar al obtener gas que salga por el tubo del quemador de acero inoxidable de la Figura 3.18. Al observar al gas saliendo del filtro será necesario colocar la flama de un soplete de gas butano a través del orificio pequeño ubicado en la parte superior, para así generar el fuego en la antorcha y cumplir con las expectativas del equipo.



Figura 3.18 Fotografía del tubo quemador de acero inoxidable

3.2.15 Alarma de monóxido de carbono (CO)

La alarma de CO, Figura 3.19, es un instrumento de laboratorio necesario para prevenir accidentes de intoxicación y problemas respiratorios a los usuarios que operan el

gasificador. El medidor se encarga de alertar cuando existe una fuga de monóxido de carbono en el equipo de gasificación.

Especificaciones técnicas de acuerdo al fabricante de la alarma de monóxido de carbono:

- Dimensiones del producto: 114.3mm x 69.85mm x 38.1mm
- Peso: 0.3 kg.
- Baterías: 3AAA
- Capacidad de detección: 11 a 999 PPM



Figura 3.19 Fotografía alarma de monóxido de carbono

3.2.16 Medición de temperatura

El equipo cuenta con dos lecturas diferentes de temperatura, una ubicada en la parte superior del reactor y la segunda en la parte inferior

- La temperatura de la parte superior de reducción de campana mide la temperatura de la zona combustión en 3/8", dentro de la restricción de la campana de la reducción.
- La temperatura de la parte inferior de la reducción de campana mide la temperatura de la zona de reducción a 1", dentro de la abertura inferior de la campana Reducción.

Especificaciones técnicas del medidor de temperatura de acuerdo al fabricante:

- Precisión de lectura: 0.3%
- Conversión automática de °C a °F y K
- Doble canal de entrada
- Resolución: 0.1°C o 0.1°F
- Rango de medición: -50°C a 1300°C
- Alta precisión y tiempo de respuesta corto
- Retención datos: SI
- Peso: 0.294 kg
- Medida diferenciada de la temperatura (T1-T2)
- Dimensiones: 149 x 71 x 41m m

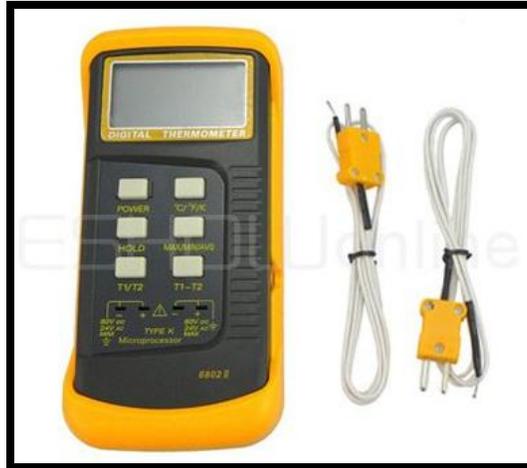


Figura 3.20 Imagen de termómetro digital de dos canales

3.2.17 Medición de humedad

El medidor de humedad determina la cantidad de vapor de agua contenida en un determinado volumen de aire. Por definición, se expresa en porcentaje (%). Es importante que para aprovechar a la biomasa ésta debe tener un porcentaje de humedad menor al 15%. El aparato que determina el vapor en la madera se muestra en la Figura 3.21.

Especificaciones técnicas del medidor de humedad de acuerdo al fabricante:

- La humedad rango de nivel: 5% a 40%
- Resolución: 1%
- Precisión: $\pm 1\%$
- Retención de datos (función de memoria)
- Fuente de alimentación: 1 batería de 9V (incluido)
- Tamaño: 129 x 63 x 32 mm
- Peso: 0.116 kg



Figura 3.21 Imagen del medidor de humedad

Tabla 3.2 Resumen de componentes del equipo de gasificación

	Componente	Especificaciones	Funcionamiento
1	Tolva de materia prima	Barril de acero de 0.113 m ³	Almacenar la materia prima
2	Zona de secado	Elemento de acero y en forma de "L"	Calentar y disminuir la humedad de la materia prima
3	Controlador de nivel	Paletas ajustables 12VCC	Accionar el suministro de combustible cuando el nivel baje durante la operación
4	Intercambiador de calor	Elemento de acero	Zona donde se realiza la etapa de pirólisis, se enfría la aire y se calienta la biomasa
5	Reactor de gasificación	Acero inoxidable	Corazón del proceso en él se lleva a cabo el proceso de combustión y reducción
6	Entrada de aire	Válvula de esfera de 1"	Permitir la entrada del agente gasificante al sistema
7	Boquillas de aire	Hierro colado de 3/8" y orificio de 5/32""	Elementos que direccionan el aire al proceso de combustión
8	Puerto de iluminación	Niple cuerda corrida de 1/2"	Conducto que permite se encienda el combustible en el reactor
9	Reducción de campana	Reducción de 6 a 3" de acero inoxidable	Controla la velocidad de flujo y por lo tanto el tiempo de residencia de los gases que pasan a través de la zona de combustión y reducción
10	Rejilla	Metálica circular	Sostiene el carbón vegetal de la zona de reducción
11	Ciclón	Cono metálico	Separa las partículas más grandes que pueden haber sido arrastradas en la corriente de gas
12	Filtro de gas	Barril de acero de 0.063 m ³	Absorbe la mayoría de los alquitranes presentes en el gas de síntesis
13	Sistema de transmisión de gas	Presión recomendada 200 psi	Impulsa el flujo a través del sistema durante el arranque
14	Tubo quemador	Material: acero inoxidable	Mantiene la flama que se produce con el gas de síntesis
15	Alarma de monóxido de carbono	Detecta concentraciones de CO de 11 hasta 999 PPM	Alerta sobre concentraciones de monóxido de carbono
16	Termómetro digital	Rango de Temperatura de -50°C hasta 1300°C	Registra la temperatura del proceso de gasificación en sus diferentes etapas
17	Medidor de humedad	Rango de medición de humedad del 5% - 40%	Registra la humedad relativa de la madera a gasificar
18	Compresor de aire	Capacidad mínima de suministro 200psi	Suministra aire necesario para la combustión del gas de síntesis

Capítulo IV. RESULTADOS

Es importante saber la magnitud de los elementos para conocer la superficie que se requiere para fijar e instalar el gasificador de flujo descendente GEK. Es necesario que para su armado se tomen en cuenta las medidas, así como considerar un espacio adicional, de tal manera que, el usuario pueda desplazarse, manipular y trabajar de forma segura al operar el gasificador.

4.1 Armado de equipo de gasificación

Un punto muy importante que se debe considerar antes de comenzar con el armado del equipo de gasificación es, contar con un kit de herramienta básica enlistada en el capítulo anterior, el cual será indispensable a lo largo del proceso de instalación para facilitar la tarea.

4.1.1 Colocar piernas a la cubierta de gas

Para colocar las piernas es necesario girar de cabeza la cubierta de gas, de forma que los birlos se ubiquen en la parte superior como se muestra en la Figura 4.1a. Una vez que sean identificadas las patas se deberán instalar alternadas en dirección a las manecillas del reloj, ya que cada pierna trae un dobléz a la izquierda o derecha como en la Figura 4.1b.

Asegurarse de apretar adecuadamente las tuercas a los tornillos para posteriormente girar la cubierta de tal modo que quede de pie el arreglo Figura 4.1c.



Figura 4.1 Fotografías de la etapa de armado de piernas en reactor

4.1.2 Colocar junta en la brida superior del reactor

Para colocar la cinta aislante THERMEEZ de 1/8"x1" de alta temperatura alrededor de la brida, es necesario ir separando el doble contacto conforme se adhiere la cinta en el reactor tal como se observa en la Figura 4.2. Conforme se pega a través de la circunferencia se tiene que ir realizando pequeños cortes transversales a la cinta para lograr un buen contacto alrededor de la superficie circular. La cinta aislante deberá reemplazarse una vez se destape el reactor y la cinta visualmente se encuentre deteriorada.



Figura 4.2 Fotografía de la adherencia de junta aislante en reactor

4.1.3 Aislamiento y camisa de acero inoxidable para cubierta de gas

La fibra de vidrio es el material que se utiliza como aislante en las paredes del reactor. Para manipular el aislamiento de fibra de vidrio de forma segura y fácil, es indispensable utilizar guantes de látex y lentes de protección. Al desenrollar la fibra de vidrio de su empaque, requiere de mucha precaución ya que el aislante es un material muy frágil y cualquier movimiento sin cuidado o brusco puede ocasionar que la tela de fibra se rompa fácilmente.

Una vez que el material se retira de su empaque y se extiende, se coloca el aislante a través de las paredes internas de la cubierta de gas. Todo este trabajo requiere el mismo cuidado que cuando se desempacó, una vez instalada la tela de fibra de vidrio alrededor del reactor, es importante cerciorarse de no obstruir ninguna de las salidas laterales del equipo.

Dentro del material incluido en el kit de gasificación hay dos camisas de acero inoxidable. Para no tener inconvenientes y colocarlas adecuadamente, se deberán comparar los patrones de la camisa y el reactor. Una vez que se eligió la correcta, se utilizaron los pequeños orificios ubicados en la parte inferior de la camisa para fijar la base circular en la que se colocaría la rejilla circular de ceniza. Se prosiguió comprimiendo y con esto se redujo el

diámetro de la camisa con la finalidad de que entrara al interior de la cubierta de gas sin empujar el aislamiento de fibra de vidrio, anteriormente colocado a la parte inferior del cilindro.

Finalmente se expandió la camisa de acero inoxidable hasta el límite que la cubierta de gas lo permitió y ya colocada en posición y ajustada lo más posible a las paredes de la cubierta, se fijó la camisa metálica con tres pequeñas pijas.



Figura 4.3 Fotografías de etapa de armado del interior de la cubierta de gas

4.1.4 Armado del reactor

4.1.4.1 Líneas de gas

Una vez que las líneas metálicas de gas fueron desenredadas lo más rectas posible, es necesario para su colocación se gire de cabeza el reactor GEK. Los 5 tubos metálicos para gas se conectan a las boquillas del reactor de manera que cada uno se enrede alrededor de la cubierta de gas en dirección a las manecillas del reloj, al otro extremo de las líneas de gas

se hace un doblado de 90° en aproximadamente 2 pulgadas y se conectan sobre el acoplamiento en la brida del reactor.

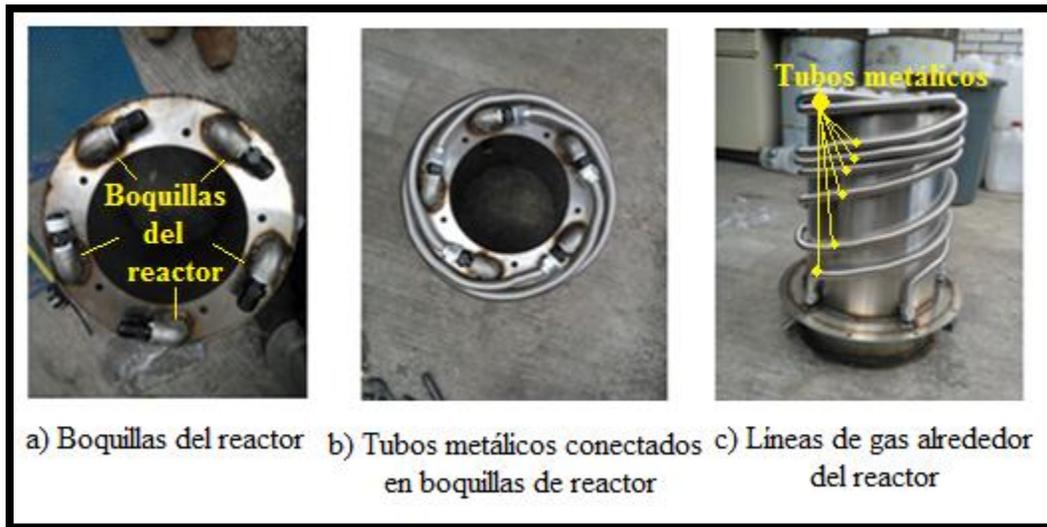


Figura 4.4 Fotografías de líneas de gas del reactor gasificador

4.1.4.2 Boquillas de aire

En el interior del reactor hay 5 orificios de 1/2" con cuerda en su interior, ahí se instalan los nipples de 6" con cuerda a los extremos. Los nipples sirven como guía para colocar adecuadamente la reducción de campana sobre el reactor.



Figura 4.5 Fotografía de boquillas de entrada de aire

4.1.4.3 Conexión reducción campana

En la brida inferior de la reducción campana se adhiere la cinta aislante en todo su alrededor. Para lograr una buena adherencia se recorta parcialmente la cinta cada que ésta se arruga. Una vez colocada la cinta, es importante cortar el aislamiento en las muescas de

la reducción, esta acción permite que las boquillas de aire, anteriormente instaladas, pasen libremente a través de la reducción.

Para fijar la campana al reactor es necesario realizar dos pasos.

1.- Se coloca silicón rojo RTV de alta temperatura sobre la cinta aislante que se le instaló a la brida de la reducción de campana

2.- Se sujeta la reducción de campana por la parte inferior del reactor con los tornillos y tuercas de 1/2"



Figura 4.6 Fotografías de instalación de reducción de campana

4.1.4.4 Boquillas de entrada de aire

Se atornillan las tapas circulares de 3/8" con orificio al centro en las toberas de aire. Una vez armado el conjunto tapas y toberas, se añade pegamento rojo de alta temperatura a la parte exterior del niple de 6x1/2" y se cuida que el pegamento no se introduzca al interior del tubo al momento de deslizar las boquillas de aire a través del niple. Esto con la finalidad de no obstruir el flujo de aire durante el proceso.

Una vez que las 5 boquillas de aire ajustaron con la reducción de campana, se alinean de tal manera que el conjunto de boquillas formen una estrella al orientarlas directamente hacia al centro de la reducción de campana. Es importante que las boquillas estén centradas para asegurar simetría en la reacción.

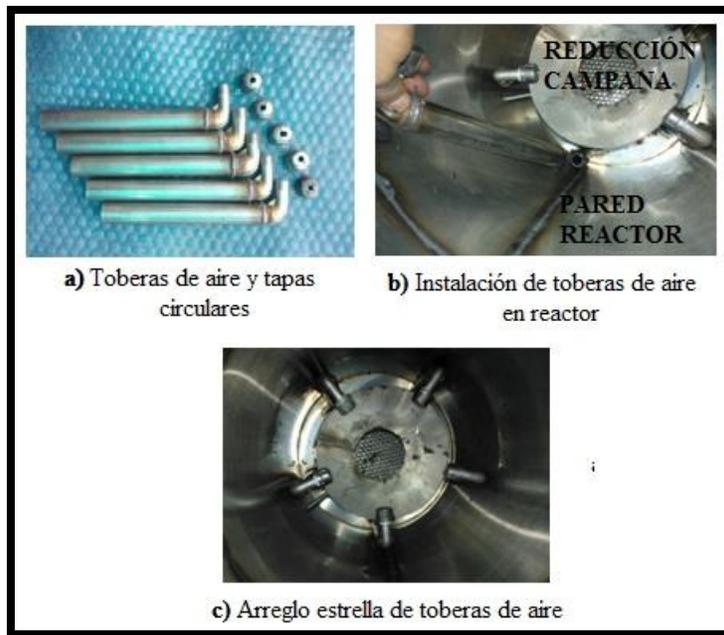


Figura 4.7 Fotografías de armado de boquillas de aire

4.1.4.5 Controlador de flujo del reactor

Se coloca la cinta metálica encima de las boquillas de entrada de aire de tal forma que cubra el interior del reactor, así la biomasa durante el proceso se deslice completamente hacia abajo para que sea totalmente procesada.

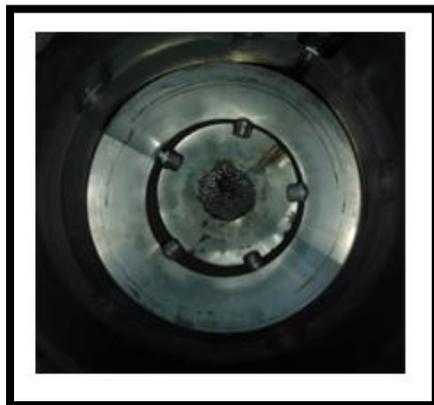


Figura 4.8 Fotografía de cinta metálica en reactor

4.1.5 Reactor dentro de la cubierta de gas y ajuste de parrilla

Antes de colocar el reactor, se posiciona la rejilla circular en la parte inferior interna de la cubierta de gas. Se inserta el reactor dentro de la cubierta de gas. Para que esta tarea sea más sencilla se expande al máximo la camisa de acero inoxidable al interior de la cubierta de gas, además de colocar las líneas de gas lo más cercanas hacia la periferia del reactor.

Una vez instalado el reactor se alinean el niple soldado en el reactor de forma ascendente con la salida cuadrada de aire de la cubierta de gas, además de hacer coincidir los orificios de ambas bridas para finalmente colocar las tuercas y tornillos que fijen ambos elementos.



Figura 4.9 Fotografías de armado de reactor y cubierta de gas

4.1.6 Puertos para ajuste de rejilla y limpieza del reactor

En la cubierta de gas existen dos puertos, cada una con una tarea específica en el proceso de gasificación. Antes de preparar y colocar cada una de las tapas se coloca cinta aislante alrededor de las bridas rectangulares de cada puerto. Para una mejor hermeticidad se unta pegamento de alta temperatura sobre la cinta.

El puerto más pequeño sirve para mover la rejilla que se ubica debajo de la reducción de campana y así remover la ceniza estancada para hacerla descender al fondo del reactor. Para hacer útil este componente es necesario realizar el siguiente procedimiento. A la tapa que ajusta al tamaño de este puerto se coloca el tramo corto de manguera naranja, al otro extremo se instala el componente tipo manivela y ambos extremos se aseguran con una abrazadera.

El puerto de mayor tamaño tiene la funcionalidad de limpiar la ceniza que se acumula durante el proceso, esta tarea de limpieza permite que la gasificación se realice de forma fluida y sin ningún problema. Para colocar la tapa en la cubierta de gas, primero se rellena el espacio interior de la tapa con el aislamiento de fibra de vidrio.

Las tapas, corta y larga después de ser preparadas para su instalación se colocan en la entrada que ajusta con su tamaño y orificios de las bridas. Una vez identificada su posición se procede a apretar las tuercas en los tornillos para asegurar las tapas.



Figura 4.10 Fotografías de colocación de manivelas de limpieza

4.1.7 Ciclón

En la brida rectangular donde se instaló el ciclón, es necesario colocar cinta aislante con la finalidad de obtener una conexión completamente hermética. Después de realizar estos pasos, se prosigue a unir ambos elementos colocando los tornillos y tuercas firmemente de manera segura.

En la brida superior del ciclón para asegurar una hermeticidad total, es necesario colocar la junta plástica color naranja y a su vez untar sellador rojo de alta temperatura entre la tapa circular con orificio al centro y el componente principal. Una vez que la tapa con orificio se fija, la manguera metálica más corta se instala dejando sin conectar la parte superior, que más adelante se conectar: Para asegurar el sello y evitar fugas se aprieta una abrazadera a cada extremo al mayor grado posible.

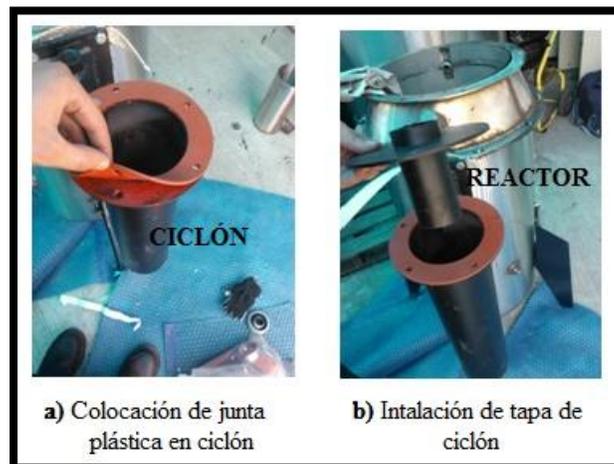


Figura 4.11 Fotografías de armado de ciclón

4.1.8 Frasco de condensado

El frasco de condensado es la parte inferior del ciclón que almacena el gas condensado de la gasificación. Para colocar el frasco en el ciclón, únicamente se coloca la junta plástica color naranja en la parte superior del recipiente, justamente entre la tapa y la parte roscable del frasco, para posteriormente unirlos.



Figura 4.12 Fotografía de frasco de condensado

4.1.9 Eyector Venturi

Se deberá ensamblar el conjunto del eyector Venturi como se muestra a continuación. El arreglo de conexiones que conforma a todo el conjunto juega un papel muy importante en el proceso de combustión, pues funge como regulador que permite el control en el suministro, salida del gas de síntesis y del comburente. Es necesario encintar con teflón cada una de las conexiones del arreglo. Para el uso del eyector Venturi es necesario de un compresor de aire para lograr el proceso de combustión adecuado.



Figura 4.13 Arreglo del eyector Venturi

4.1.10 Aislamiento granular

Como aislamiento granular se utilizó piedra pómez cernida a 2 mm aproximadamente. Para mantener una temperatura uniforme en la zona de combustión y reducción, es necesario llenar el espacio entre la reducción de campana y la camisa del reactor con aislamiento granular hasta aproximadamente una pulgada por debajo de la reducción de campana tal como se muestra en la Figura 4.14.



Figura 4.14 Fotografía aislamiento granular alrededor de reducción de campana

4.1.11 Motor y tornillo sinfín

El tornillo sinfín es el componente que suministra la biomasa al reactor a través del cubo de secado. Para colocarlo se adhiere con pegamento de alta temperatura la junta circular plástica entre la brida y la base del motor. Finalmente para fijar el motor se colocan los tornillos y tuercas, es importante asegurar que se encuentren perfectamente apretadas para evitar que se desajusten durante la operación.



Figura 4.15 Fotografías del motor y tornillo sinfín en zona de alimentación de combustible

4.1.12 Zona de secado – intercambiador de calor

El pirocoil y la zona de secado se convierten en un solo elemento que se inserta en el reactor, al unir ambos componentes a través de los birlos que tiene la zona de secado. Una vez posicionados ambos elementos (pirocoil y zona de secado) se aprietan las tuercas en los birlos y se asegura la alineación de la tuerca-birlo. Ya unidos el pirocoil y la zona de secado se proseguirá a insertar la parte del pirocoil dentro del reactor. Antes de insertarlos, se deberá adherir la cinta aislante a la brida del reactor. Un punto importante para la fácil instalación de los elementos, dentro del reactor, es expandir la camisa metálica, que permite una acción más sencilla y rápida en su ejecución.

También durante el proceso de colocación se inserta la zona de secado y pirocoil dentro del reactor, se coloca la parte cilíndrica del pirocoil y se cuida que el ciclón permanezca alineado con el cubo de secado. Una vez instalado y sin modificar considerablemente la posición, se ajustan las bridas de tal modo que los orificios coincidan para poder ser atornillados.

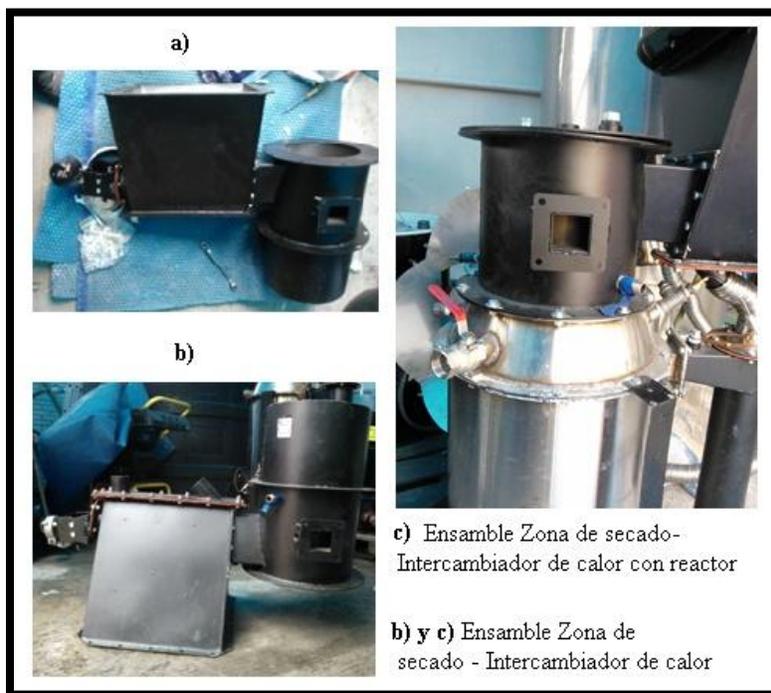


Figura 4.16 Fotografía de arreglo zona de secado-intercambiador de calor

4.1.13 Filtro de gas

El filtro de gas es el último elemento que elimina las impurezas del gas de síntesis durante el proceso de gasificación. Para su óptimo funcionamiento se pueden utilizar como elementos filtrantes los siguientes materiales:

- Granos de carbón,
- Astillas de madera,
- Granos pequeños de biomasa

Aunque los granos de carbón son probablemente los mejores, los otros materiales pueden funcionar bien. Cualquiera que sea el material a utilizar se recomienda sea de manera estratificada, comenzando con una cama de piezas grandes y continuar reduciendo progresivamente el tamaño del grano a medida que se llena hasta 4" antes de la cima.

Para el filtro de gas de la Facultad de Ingeniería se utilizaron astillas de madera de aproximadamente 7cm de largo las más grandes y 1cm las más pequeñas.

Para el armado del filtro de gas Figura 4.17 se inicia colocando la rejilla circular en la parte inferior del lecho. Posteriormente se prosigue a llenar el tambor con diversas capas del material filtrante en diversos tamaños hasta aproximadamente 4" del límite superior del filtro. Finalmente para obtener un mejor resultado y evitar que los pequeños granos se arrastren con el flujo de gas final, se deberá colocar un pedazo de tela "de cielo" en el extremo superior y sobre él el disco metálico circular para asegurar su posición en todo momento. En la parte externa inferior del filtro hay un orificio de salida de 2" de diámetro, en él se coloca la manguera metálica proveniente del cubo de secado con ayuda de un cople plástico. Para asegurar conexiones herméticas sin fuga de gas, es necesario aplicar aislante rojo de alta temperatura y una abrazadera a cada extremo de la manguera.



Figura 4.17 Fotografía de filtro de gas

4.1.14 Conexión de línea de gas de la zona de secado - ciclón

En esta etapa se instala la placa “flyng-V”. En ella se conecta la tubería que sale del ciclón y entra al cubo de secado, y la que sale del cubo de secado y entra al filtro de gas. Para la instalación de este componente se agrega aislante rojo de alta temperatura alrededor de la brida rectangular ubicada en la parte inferior del cubo de secado. Una vez agregado el aislante la brida se posiciona con la junta plástica color naranja. Finalmente se fija con tuercas y tornillos proporcionados.

Para concluir se aplica sellador rojo de alta temperatura alrededor de las salidas del ciclón y del Flying-V. La manguera metálica más corta se conecta del ciclón a la salida inclinada del cubo de secado y la otra manguera se coloca a la salida restante del cubo de secado y a la entrada inferior del filtro de gas.



Figura 4.18 Fotografía de conexión de línea de gas

4.1.15 Tolva

La tolva es un depósito que almacena y distribuye la biomasa al reactor. Se fija al cubo de secado, con aislamiento rojo de alta temperatura y una junta plástica sobre la brida superior del cubo de secado. Finalmente se coloca la tolva o barril de alimentación sobre la zona de secado y se fija con las turcas y tornillos de 1/2”.



Figura 4.19 Fotografía de tolva de alimentación

4.2 Operación del gasificador de flujo descendente

Es importante que para la puesta en marcha se conozcan los componentes que conforman al equipo de gasificación. En los temas anteriores ya se explicó a detalle cada elemento y ahora se continuará con el procedimiento para la puesta en marcha del gasificador.

4.2.1 Preparación final antes de la puesta en marcha

La puesta en marcha del equipo de gasificación de flujo descendente, requiere de diferentes etapas antes de iniciar la operación.

- a) El primer paso a seguir es la recolección de la biomasa en forma de astillas no mayores a 5cm y no menores a 1cm de longitud. Para obtener una reacción uniforme a lo largo de la astilla y mayor provecho de la madera, es necesario llevar a cabo esta indicación de lo contrario quedarán muchas astillas sin reaccionar y la eficiencia del gasificador disminuirá. La biomasa utilizada para el gasificador de la Universidad Nacional Autónoma de México es la madera recaudada de la poda de los árboles de toda Ciudad Universitaria.
- b) Es necesario clasificar la biomasa a utilizar de tal manera que, sea biomasa homogénea tanto en grosor como en longitud. La biomasa a utilizar debe tener de máximo 30% de humedad. Esta información se puede obtener al tomar aleatoriamente 5 muestras y medir su porcentaje de humedad con el analizador. Una vez que la biomasa tiene las características mencionadas anteriormente, se llena la tolva de alimentación con la biomasa hasta el nivel que se desea utilizar. Como pruebas preliminares únicamente se llenó hasta completar la capacidad interna del reactor con humedad promedio de 0%.
- c) Después de rellenar con biomasa el sistema de alimentación del gasificador, se quita la tapa de la zona de pirólisis y en la parte superior de la reducción de campana se llena con carbón de mezquite. Después de llenar la reducción se agita la manivela del reactor con la finalidad de que el carbón ocupe los espacios vacíos. Se realiza esta acción hasta que el carbón se ubique a 1" o 2" por encima del puerto de encendido, de tal manera que éstos al encenderlos ayuden a acelerar el proceso de arranque.

4.2.2 Ignición

Para encender los pedazos de carbón se requiere de la ayuda de algún tipo de combustible líquido. A través del puerto de iluminación se introduce el combustible y se enciende con un soplete de gas butano. Asegúrese de que el aire fluya a través del reactor, puede que tenga que mantener uno o dos minutos la antorcha para encender el carbón. Una vez que se observa la flama en el carbón se procede a cerrar las tapas y suministrar poco a poco la biomasa al reactor. Para lograr la ignición en el gasificador se utilizó diésel, se rocío sobre el carbón de mezquite y se inyectó un poco de este combustible a través del puerto de iluminación, con ayuda de un soplete de gas butano se proporcionó la flama que encendió la madera.

4.2.3 Lllamarada

A los pocos segundos de la iluminación, el gas va a salir de la antorcha. Al principio esto puede no ser un gas combustible hasta que la temperatura se eleve en el reactor. Asegúrese de tener un soplete de gas butano para ayudar a quemar el alquitrán y el humo del vapor en el arranque.

Después de unos minutos puede ser posible apagar el soplete y ajustar la mezcla de oxígeno en el arreglo del eyector Venturi (válvula de 3/4). Se recomienda mantener a la mano el soplete en caso de que la antorcha de gas de síntesis se apague y se tenga que encender de nuevo. No debe respirarse el gas cuando esté sin quemar. Después que se quema es muy limpio.

Aviso: Cuando la válvula O₂ se cierra demasiado, la llamarada no tiene suficiente oxígeno y evitará que se levante de la antorcha porque posiblemente no haya suficiente oxígeno para quemar completamente el monóxido de carbono e hidrógeno. Puede haber algo de monóxido de carbono que es lanzado hacia la llamarada que no se queman. Al abrir la válvula de O₂, la bengala se mostrará de nuevo en la antorcha. Todos los gases de madera se deben quemar antes de la mitad del camino a lo largo de la antorcha. Esto asegura una combustión completa.

Una vez encendida la madera con el carbón de mezquite empezó a salir gas color blanco a través del quemador. Acto seguido se encendió el compresor de aire y se conectó la manguera a la conexión rápida del eyector Venturi. Se reguló la presión del aire de tal modo que se consiguiera un flujo constante y moderado del gas de síntesis generado por el proceso de gasificación. Se acercó el soplete de gas butano al quemador, poco a poco se abrió la llave de entrada de aire al eyector Venturi hasta conseguir una flama regulada.

4.2.4 Diagrama de flujo

En la Figura 4.20 se muestra el diagrama de flujo del sistema de gasificación. Ahí se puede observar la transformación del combustible desde su forma sólida hasta el producto o gas de síntesis. La biomasa inicia el proceso al ingresar por la tolva de alimentación, conforme

recorre se llega a la zona de secado donde se reduce la humedad del combustible, el proceso de gasificación inicia al pasar por el pirocoil en la etapa de pirólisis, continúa el flujo descendente hasta la parte inferior en donde hay cenizas y gas a su máxima temperatura, el gas al pasar por el ciclón condensa las pequeñas partículas sólidas que arrastra la corriente. El gas pierde temperatura al pasar por la zona de secado para seguir por la etapa de filtrado y terminar con el descenso de temperatura. El producto se mezcla con aire ambiente y es como se puede obtener la flama dentro del quemador.

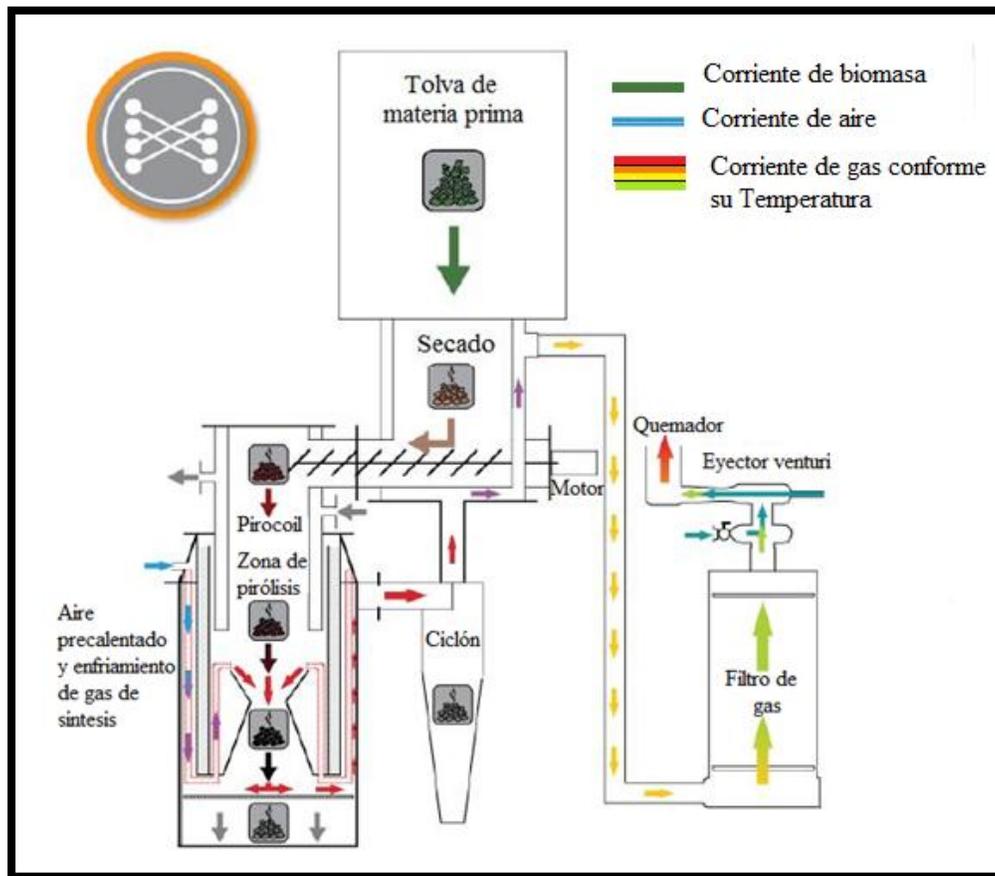


Figura 4.20 Diagrama de flujo del sistema de gasificación

4.2.5 Especificaciones de operación del sistema

En la Figura 4.21 se pueden ver los medios que influyen y forman parte del proceso de gasificación. El proceso inicia en la Tolva de alimentación para descender a la zona de secado y continuar con el pirocoil. A partir de esta etapa hacia adelante inicia la conversión termoquímica de la biomasa. En la pirólisis el combustible comienza a perder peso, continúa la combustión etapa donde hay una entrada de aire m_{aire} . Aquí existe un incremento de temperatura para que en la reducción el sólido remanente de la combustión,

se convierta en gas. El gas producido circula en sentido ascendente hacia el ciclón, para condensar los alquitranes presentes para asegurar la pureza del gas, el filtro se encarga de limitar el paso a las partículas de mayor tamaño. Finalmente el gas de síntesis se mezcla con aire atmosférico que al aplicar una chispa producen una flama, que se podrá visualizar en el tubo quemador.

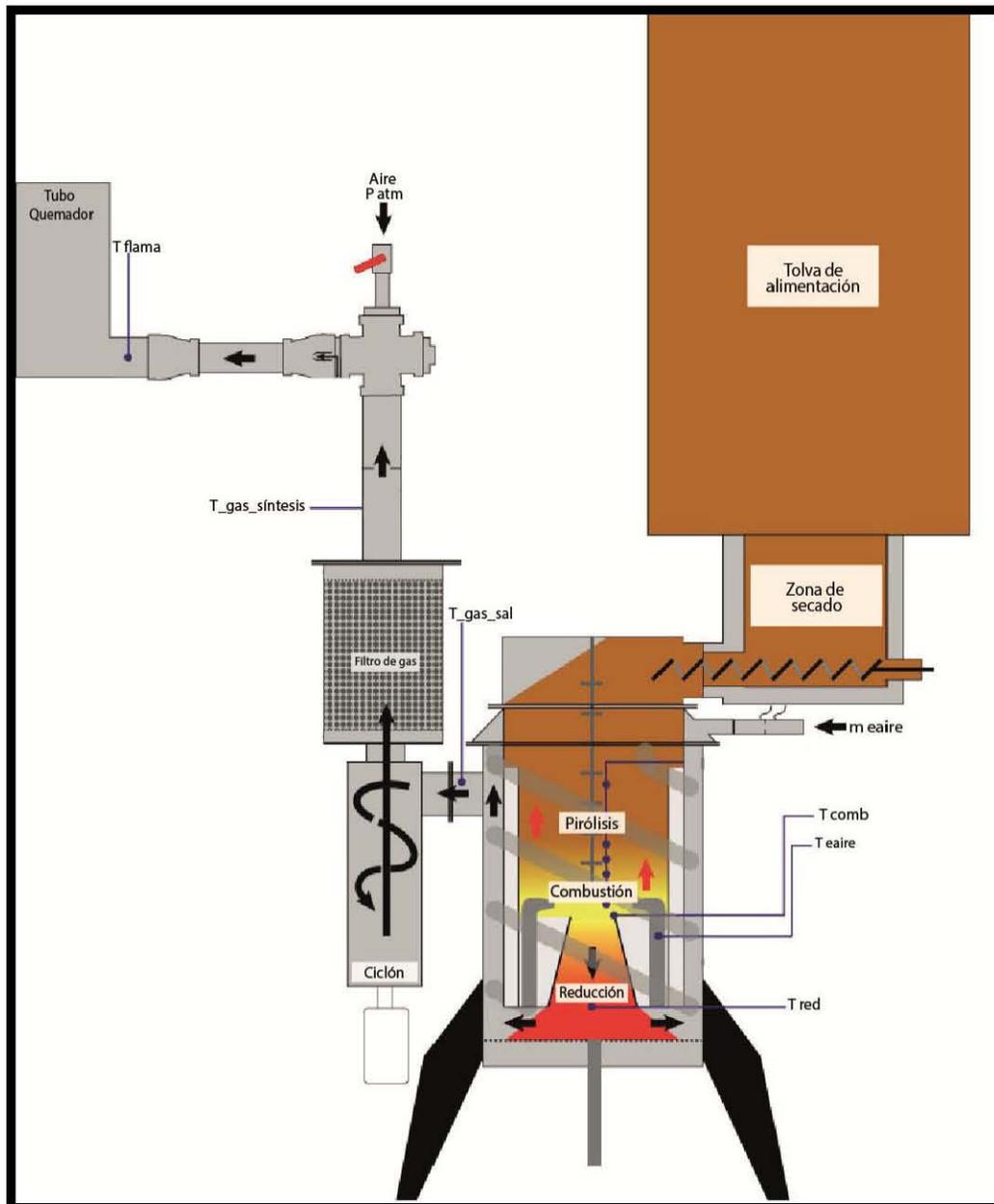


Figura 4.21 Diagrama de sistema de gasificación

4.2.5.1 Presión de trabajo

La presión de trabajo es uno de los parámetros importantes ya que influye en la composición del gas obtenido. Para los gasificadores de flujo descendente operado con biomasa es más favorable la gasificación a presión atmosférica (101,325 kPa), con ligera depresión (Cuba, 2011). Para el caso de la Ciudad de México el gasificador operara a una presión atmosférica de 77.89 kPa.

4.2.5.2 Caudal de biomasa

El caudal de entrada depende del tipo de biomasa que se utilice. De acuerdo al fabricante el rango de consumo se encuentra 2.5 – 14 kg/hr.

4.2.5.3 Temperatura

La temperatura de gasificación dentro de un reactor de flujo descendente operado con biomasa está dentro del intervalo 700-1400°C. Para este caso y condiciones de operación, el valor registrado es de 850°C.

4.2.5.4 Agente gasificante

Son diversas las opciones que se pueden utilizar como agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua, hidrógeno). El agente gasificante que se eligió para operar el gasificador de flujo descendente fue aire. A pesar de obtener un poder calorífico menor con respecto a los demás, se obtiene la energía necesaria para mantener el proceso y su costo es nulo.

4.3 Diagrama de bloques del proceso de gasificación

En la Figura 4.22 se explica el proceso de gasificación mediante un diagrama de bloques donde se muestran los elementos más relevantes que intervienen en el proceso.

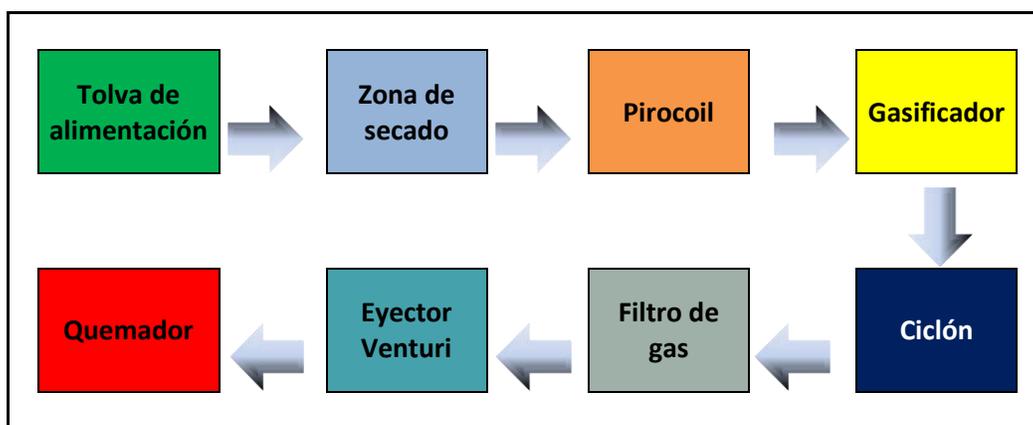


Figura 4.22 Diagrama de bloques del proceso

En la Figura 4.23 se muestra al equipo de gasificación de flujo descendente trabajando con biomasa, obtenida como ya se mencionó de la poda de los árboles de Ciudad Universitaria. En la imagen se observa que el producto del proceso termoquímico, el gas de síntesis, se utiliza como combustible para la generación de energía térmica mediante una flama.



Figura 4.23 Fotografía del gasificador operando

4.3.1 Balance de masa y energía

La Figura 4.24 muestra la entrada y salida de masa o energía de los elementos más representativos del proceso.

El proceso inicia en la Tolva de alimentación con m_{1mad} y E_{1mad} que corresponden a la biomasa que será procesada para la obtención de gas de síntesis, y procede en la zona de secado donde E_{2mez} procedente del ciclón contribuye a la evaporación del agua contenida en la biomasa entrante, cambiando las propiedades de la materia en m_{2mad} y E_{2mad} . En el pirocoil comienza la etapa de pirólisis donde al elevarse la temperatura del proceso y se da la descomposición de la biomasa, la madera pierde masa m_{3mad} . Es importante mencionar que al haber un incremento en la temperatura existe una pérdida de energía representada con E_{1perd} . En la gasificación hay una entrada de aire m_{1aire} , E_{1aire} aquí es donde ocurren la mayor cantidad de reacciones y por tanto hay un incremento en la temperatura, generación de alquitranes, cenizas y el gas de síntesis representado con m_{1mez} y E_{1mez} . El producto de la gasificación pasa a través del ciclón donde existe una condensación de alquitranes y la energía de los gases generados es utilizada para calentar la biomasa en la tolva de secado. La m_{2mez} pasa por su última etapa de purificación a través del filtro de gas, las impurezas se quedan atrapadas permitiendo únicamente el acceso al gas de síntesis m_{3gsin} para continuar por el eyector Venturi donde se mezclan aire atmosférico, aire comprimido y el gas m_{4mix} para dar como resultado el gas de síntesis indicado como “humo” para la generación de una flama a través del quemador.

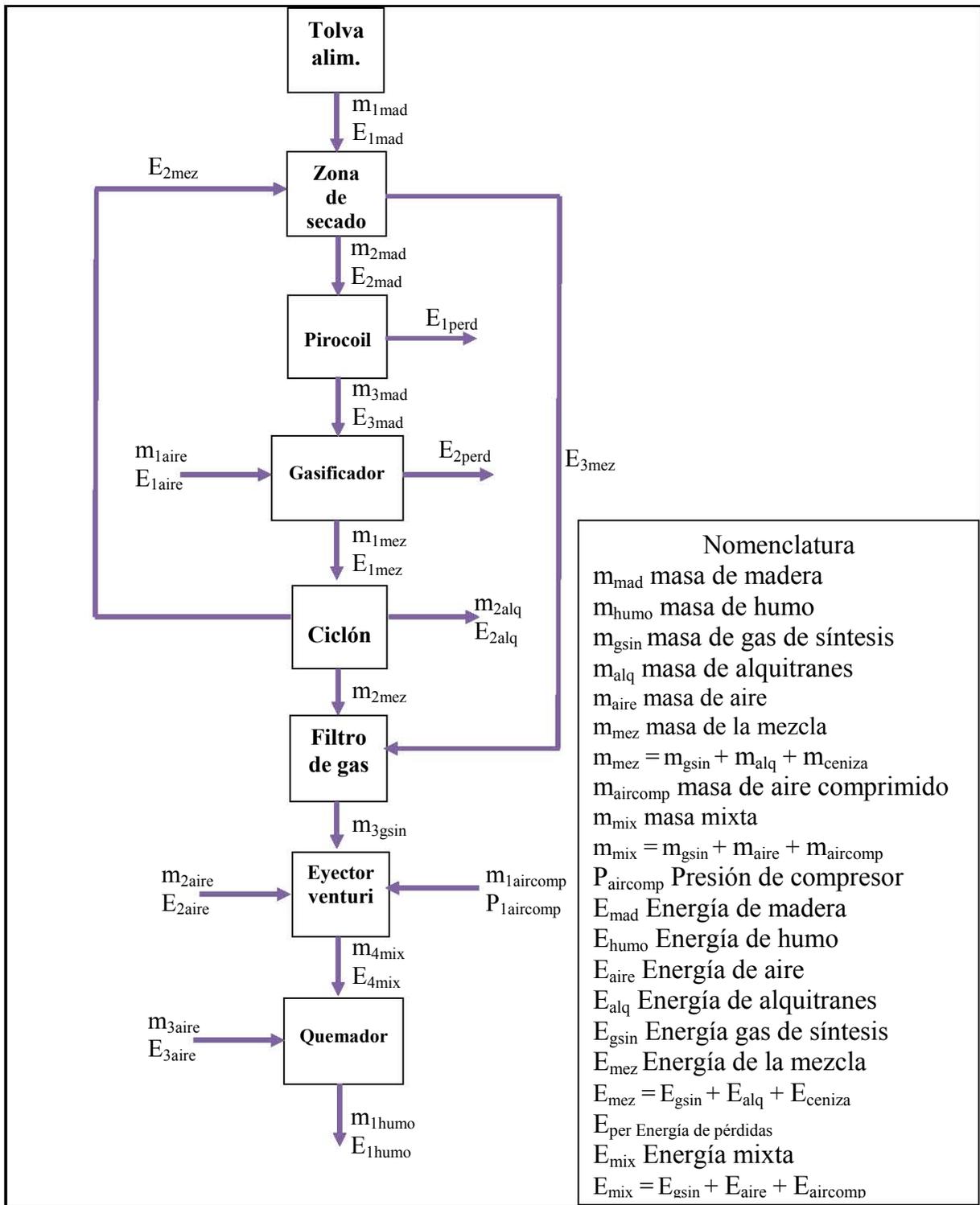


Figura 4.24 Diagrama de balance de masa y energía

4.4 Cálculo de la eficiencia

Es importante determinar el funcionamiento técnico real y la viabilidad de uso de un equipo. Se debe cuantificar la capacidad de conversión de lo suministrado contra lo entregado tal como lo define FAO, (1993). Existen dos diferentes definiciones para determinar la eficiencia del gasificador, si se emplea el gas para aplicaciones de motor y si se emplea el gas para combustión directa.

Para aplicaciones de motor:

$$\eta_m = \frac{H_g * Q_g}{H_s * M_s} \times 100 \quad (\%) \quad (4.1)$$

Para aplicaciones de combustión directa:

$$\eta_{TH} = \frac{(H_g * Q_g) + (Q_g * \rho_g * C_p * \Delta T)}{(H_s * M_s)} \times 100 \quad (4.2)$$

η_m = Eficiencia mecánica de la gasificación (%)

η_{TH} = Eficiencia térmica de la gasificación (%)

H_g = Valor calorífico del gas (kJ/m³)

Q_g = Flujo de volumen de gas (m³/s)

H_s = Valor calorífico inferior del combustible del gasificador (kJ/kg)

M_s = Consumo de combustible sólido del gasificador (kg/s)

ρ_g = densidad del gas (kg/m³)

C_p = Calor específico del gas (kJ/kg°K)

ΔT = Diferencia de temperaturas entre el gas de salida del quemador y el combustible que entra al gasificador (°K)

Debido a que al producto del proceso de gasificación se utilizará para la producción de energía térmica, se debe de utilizar la Ecuación 4.2, para poder calcular la eficiencia del equipo de gasificación.

Es importante destacar que se determinará la eficiencia térmica del gasificador con datos teóricos del combustible FAO (1993) y con valores técnicos del equipo de gasificación de acuerdo al fabricante. Se consideran estos valores ya que la Universidad Nacional

Autónoma de México no tiene el equipo especializado para analizar el gas producto del proceso de gasificación con madera de la poda de los árboles de Ciudad Universitaria.

Para la Tabla 4.1 Se considera el PCI, debido a que se desconoce el contenido real de humedad del combustible.

En la Tabla 4.2 se dan las composiciones de gas que se obtienen de los gasificadores comerciales de flujo descendente, de madera y carbón vegetal, que operan con combustibles con una humedad de baja a media (20% para madera y 7% para carbón vegetal) (FAO, 1993).

Tabla 4.1 Promedio de valores caloríficos inferiores (FAO, 1993)

Combustible	Contenido de humedad [%]	Valor Calorífico [kJ/kg]
Madera	20 – 25	13 - 15,000
Carbón vegetal	2 – 7	29 - 30,000

Tabla 4.2 Composición del gas procedente de gasificadores comerciales (FAO, 1993)

Componente	Gas de madera [%]	Gas de carbón vegetal [%]
Nitrógeno	50 - 54	55 - 65
Monóxido de Carbono	17 - 22	28 - 32
Dióxido de Carbono	9 – 15	1 - 3
Hidrógeno	12 - 20	4 – 10
Metano	2 – 3	0 – 2
Valor calorífico del gas [kJ/m ³]	5,000 - 5,900	4,500 - 5,600

Paredes y Baca (2006) realizaron una investigación sobre la Pre factibilidad de instalación de central de generación de Energía Eléctrica con Gasificación de carbón Antracita. La Libertad – Perú, de los resultados se tomó el valor de densidad y de calor específico del gas de síntesis.

$$\rho_g = 0.650 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$C_p = 4.100 \text{ [kJ/kg}^\circ\text{K]}$$

$$H_g = 5,000 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

$$Q_g = 0.00138 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

$$H_s = 13,000 \text{ [kJ/kg]}$$

$$M_s = 0.00069 \text{ [kg/s]} = 0.00069 * \left[\frac{60s}{1min} \right] * \left[\frac{60min}{1 r} \right] * \left[\frac{24 rs}{1d a} \right] * \left[\frac{365d a}{a o} \right] = 21,759.84 \text{ [kg/año]}$$

$$\Delta T = 338.15 \text{ [°K]}$$

De la Ecuación 4.2

$$\eta_{TH} = \frac{(5,000 * 0.00138) + (0.00138 * 0.650 * 4.100 * 338.15)}{(13,000 * 0.00069)} * 100 = 90.78\% \text{ (4.3)}$$

Tabla 4.3 Eficiencia obtenida con combustible de madera

Gas madera			
$\rho_g =$	0.65 [kg/m ³]	$\rho_g =$	0.65 [kg/m ³]
$C_p =$	4.1 [kJ/kg°K]	$C_p =$	4.1 [kJ/kg°K]
$H_g =$	5000 [kJ/m ³]	$H_g =$	5900 [kJ/m ³]
$Q_g =$	0.00138 [m ³ /s]	$Q_g =$	0.00138 [m ³ /s]
$H_s =$	13000 [kJ/kg]	$H_s =$	15000 [kJ/kg]
$M_s =$	0.00069 [kg/s]	$M_s =$	0.00069 [kg/s]
$\Delta T =$	338.15 [°K]	$\Delta T =$	378.15 [°K]
$\eta =$	90.78 (%)	$\eta =$	92.1 (%)

Tabla 4.4 Eficiencia obtenida con combustible de carbón vegetal

Gas de carbón vegetal			
$\rho_g =$	0.65 [kg/m ³]	$\rho_g =$	0.65 [kg/m ³]
$C_p =$	4.1 [kJ/kg°K]	$C_p =$	4.1 [kJ/kg°K]
$H_g =$	4500 [kJ/m ³]	$H_g =$	5600 [kJ/m ³]
$Q_g =$	0.00138 [m ³ /s]	$Q_g =$	0.00138 [m ³ /s]
$H_s =$	12000 [kJ/kg]	$H_s =$	14000 [kJ/kg]
$M_s =$	0.00069 [kg/s]	$M_s =$	0.00069 [kg/s]
$\Delta T =$	338.15 [°K]	$\Delta T =$	273.15 [°K]
$\eta =$	90.02 (%)	$\eta =$	94.4 (%)

4.5 Cálculo del ahorro económico

Con base en los resultados obtenidos en el punto anterior tenemos que

$$\eta_{TH} = \frac{(H_g * Q_g) + (Q_g * \rho_g * C_p * \Delta T)}{(H_s * M_s)} = \frac{Q_{gen}}{Q_{sum}} \quad (4.4)$$

Donde

Q_{gen} = Energía generada [kJ/kg]

Q_{sum} = Energía suministrada [kJ/kg]

$$Q_{gen} = (H_g * Q_g) + (Q_g * \rho_g * C_p * \Delta T) \quad (4.5)$$

$$Q_{gen} = (5,000 * 0.00138) + (0.00138 * 0.650 * 4.100 * 338.15) = 8.144 \left[\frac{kJ}{s} \right] \quad (4.6)$$

Por lo tanto al año, se genera:

$$Q_{gen} = 8.144 \left[\frac{kJ}{s} \right] * \left[\frac{60s}{1min} \right] * \left[\frac{60min}{1 r} \right] * \left[\frac{24 rs}{1d a} \right] * \left[\frac{365d a}{a o} \right] * \left[\frac{1GJ}{1000000kj} \right] \quad (4.7)$$

$$Q_{gen} = 256.817 \left[\frac{GJ}{a o} \right] \quad (4.8)$$

Si se considera Q_{gen} como la energía que se genera en un año por medio del gasificador, se analizará la cantidad de gas L.P. que se requiere para obtener la misma cantidad de energía en el mismo tiempo.

$$M_{SLP} = \frac{Q_{gen}}{(\eta_{TH} * H_{SLP})} \quad (4.9)$$

Donde

H_{sLP} = Valor calorífico del gas LP (kJ/m^3)

M_{sLP} = Consumo de combustible gas LP (kg/año)

η_{THquLP} = Eficiencia térmica del quemador de gas LP (%)

Datos

$\eta_{\text{THquLP}} = 90 \%$

$H_{sLP} = 44,715 \text{ [kJ/kg]}$

$$M_{sLP} = \frac{256,817,019 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{a o}} \right]}{0.90 * 44,715 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]} = 6,381.57 \left[\frac{\text{kg}}{\text{a o}} \right] \quad (4.10)$$

$$M_{sLP} = 6,381.57 \left[\frac{\text{kg}}{\text{a o}} \right] \quad (4.11)$$

Si el costo del gas L.P. a enero de 2015 en el Distrito Federal es de 14.14 \$/kg

$$\text{Ahorro} = 6381.7 * 14.14 = 90,235.50 \left[\frac{\$}{\text{a o}} \right] \quad (4.12)$$

$$\text{Ahorro} = 90,235.50 \left[\frac{\$}{\text{a o}} \right] \quad (4.13)$$

Por lo tanto, considerando que el gasificador hace efectivas 8760hrs tendrá una producción de gas de 256.81 GJ al año. Si esta cantidad de energía la utilizamos en un quemador de gas LP, el ahorro obtenido será de 90,235.5 pesos, considerando el costo de kg del gas LP de 14.14 pesos en enero 2015.

4.6 Cálculo de Emisiones de CO₂

Conforme la Ecuación 4.11 se requieren 6,381.57 kg de gas LP para producir una energía de 256.817[GJ/año], el uso de este combustible causa la emisión de CO₂, de acuerdo a la publicación de OCCC (2014) el factor de emisión de CO₂ correspondiente a cada combustible se presenta en la Tabla 4.5:

Tabla 4.5 Factor de emisión de la energía (OCCC, 2014)

Combustible	Factor de Emisión
Gas LP	2.96 kg CO ₂ /kg GLP
Biomasa	Neutro (El CO ₂ emitido ha sido absorbido previamente)

Para obtener las emisiones de CO₂

$$Emisión\ CO_2\ LP = 6,381.57 \left[\frac{kg}{año} \right] * 2.96 \left[\frac{kg\ CO_2}{kg} \right] = 18,889.44 \left[\frac{kg\ CO_2}{año} \right] \quad (4.14)$$

Por lo tanto, el ahorro de emisión de CO₂ es la misma que se produce al utilizar gas LP ya que las emisiones al utilizar biomasa se consideran neutras.

$$Disminución\ Emisión\ CO_2 = 18,889.44 \left[\frac{kg\ CO_2}{año} \right] \quad (4.15)$$

Capítulo V. CONCLUSIONES

En los últimos 15 años los países desarrollados han encontrado en la bioenergía un medio alternativo para la producción de energía, la gasificación es una fuente tecnológica que ha resurgido para la generación electricidad. En México, las universidades desarrollan proyectos bioenergéticos por el gran potencial que representan para la reducción del uso o sustitución de los combustibles fósiles.

La gasificación es un proceso termoquímico en un ambiente pobre en oxígeno que permite la transformación de un material orgánico en combustible. De acuerdo al uso del gas de síntesis a obtener, se elige la configuración adecuada del reactor. La configuración con mayores ventajas de uso según las necesidades de un gas de síntesis más limpio y libre de alquitranes, es el gasificador de flujo descendente o corrientes paralelas.

Mi proyecto de tesis consistió en la instalación y arranque de un gasificador de flujo descendente de la marca GEK TOTTI con torre de integración térmica. El equipo fue armado y probado en las instalaciones de la empresa Servicios de Disposición Energreen, S.A de C.V. Las pruebas se realizaron con una mezcla de astillas de madera producto de la poda de los árboles de Ciudad Universitaria de la UNAM, el resultado fue satisfactorio, el gas de síntesis obtenido, generó una flama bastante consistente y así la producción de energía térmica limpia.

De acuerdo a las características técnicas del equipo, se calculó que el gasificador tiene una eficiencia térmica de hasta 92.1% trabajando con madera, lo que implicaría un ahorro económico por cada 8760 hrs de trabajo de 90,235.50 pesos sustituyendo el gas de síntesis generado por gas LP. Esta sustitución de hidrocarburo representaría una disminución de 18,889.44 kg de CO₂.

La tecnología de gasificación es un proceso que con el paso de los años ha ido ganando terreno como una fuente importante para la sustitución de combustibles fósiles. Por lo tanto, se puede determinar que con base en los resultados obtenidos este proceso representa beneficios económicos y ecológicos que deben motivarnos para aportar nuestro mayor esfuerzo en el cuidado y preservación del planeta.

REFERENCIAS

- AIE, 2007. Renewables in global energy supply. Publicado por Agencia Internacional de Energía. París, Francia.
- AIE, 2010. Perspectivas sobre tecnología energética. Publicado por Agencia Internacional de Energía. París, Francia.
- AIE, 2011. Clean energy: Progress report. Publicado por Agencia Internacional de Energía. París, Francia.
- Alonso, C. y Rodríguez, V. 1985. Alternativas energéticas. Fondo de Cultura Económica. México, D.F., México.
- AMBIENTUM, 2013. Energía: La biomasa y su contribución al abastecimiento energético mundial. Publicado por AMBIENTIUM. Madrid, España
- ANES, 2013. Energía renovable. Publicado por Asociación Nacional de Energía solar. México, D.F., México.
- Bailie, R. C. 1979. Technical and economic assesment of methods for direct conversion of agricultural residue to usable energy. Reporte final publicado por la West Virginia Universidad Morgantown, preparado para la Energy Research and Development Administration. Washington D.C., EE.UU.
- Ben, P. 2003. Energía y atmósfera. Publicado por Jornadas Técnicas de Ciencias Ambientales. Madrid, España.
- Boles, M. A. y Cengel, Y. A. 2006. Termodinámica, Quinta edición. Pág. 487. McGraw Hill. México, D.F., México.
- Bordas, A. S. y Elías, C. X. 2011. Energía, agua, medioambiente territorialidad y sostenibilidad. Páginas: 118, 812-814. Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España.
- Braunstein, H. 1981. Biomass energy systemss and the environment. Pág. 182. Pergamon Press. Nueva York, EE.UU.
- Byun, I.S. Choi, O.L. Choi J.G. y Lee S.H. 2002. In situ photoacoustic study of water gas shift reaction over magnetite/chromium oxide and copper/ zinc oxide catalysts. Publicado por el bolletin Korean Chemical Society. Seúl, Corea del Sur.
- Campoy, N. M. 2009. Gasificación de biomasa y residuos en lecho fluidizado: estudios en planta piloto. Tesis de doctorado de Ingeniería Química y Ambiental, Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Sevilla, España.

Canneto, G. Fanelli, E. Nanna, F. Freda, C. Braccio, G.Jand, N. y Foscolo, P.U. 2008. Syngas production by means of oxygen-steam biomass gasification in a fluidized-bed gasifier with two interconnected chambers. En: 16th European Biomass Conference and Exhibition. Valencia, España.

Castells, X. Cadavid, C. Campos, E. Flotats, X. García, J. Gaya, J. Jurado, L. Ruíz-Álvarez F. Cremades, L. y Velo, E. 2005. Tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España.

CFE, 2012. CFE y la electricidad en México. Publicado por Comisión Federal de Electricidad. México, D.F., México.

CPSUZ., 2006 Proceso termoquímicos. Publicado por el Centro Politécnico Superior Universidad de Zaragoza. Zaragoza, España.

CONUEE, 2012. Recursos no renovables. Publicado por Secretaría de Energía. México, D.F., México.

Creus, A. 2004. Energías renovables. Ediciones CEYSA. Barcelona, España.

Cuba, A. 2011. Piloto de gasificador downdraft operado con biomasa. Tesis de Maestría en Energía. Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Cataluña, UPC. Cataluña, España

Díaz, R. 2000. Consumo de leña en el sector residencial de México; Evolución histórica y emisiones de CO₂. Tesis de Maestría División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria, D.F., México.

Elliot D. C. 1982. Thermochemical production of liquids from biomass, proceedings solar World Forum; Solar Technology in the Eighties Vol. 2. Págs. 1286-1291. Pergamon Press, Oxford, Inglaterra.

Espinosa y col., 1979. Alternatives for energy savings at plant level for the production of alcohol as automotive fuel. En: 8 Simposium Biotechnology and Bioengineering. Nueva York, EE. UU.

FAO, 1993. El gas de madera como combustible para motores. Estudio FAO Montes. Publicación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.

FAO, 2008. Bosques y energía. Estudio FAO Montes. Publicado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.

FIDA, 2012. Pirólisis. Publicado por la Fundación para la Investigación y el Desarrollo Ambiental. Madrid, España.

Garay, C. Guevara, C. y Sorto, J. 2008. Desarrollo de una nueva cocina mejorada para leña basada en el principio de gasificación de flujo cruzado natural. Tesis de licenciatura de

Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Centroamericana José Simeón cañas. Cuscatlán, El Salvador.

García, R. Aguilar, T. González, H. Márquez, M. Carballo, A. 2006. Diseño y construcción de un gasificador de lecho fluidizado a escala de laboratorio para el tratamiento térmico de los residuos de tabaco. Publicado por Universidad de Pinar del Río. Pinar del Río, Cuba.

Garduño R. 1998. Cambio Climático una visión desde México: ¿Qué es el efecto invernadero? Publicado por la Secretaría de Medio Ambiente Recursos y Naturales (SEMARNAT). México, D.F., México.

GERTEK, 2012. Mantenimiento a gasificadores. Publicado por Grupo Gertek S.A. Tecnología Científica de Energía Renovable. Guatemala, Guatemala.

Gil, J., Corella, J., Aznar, M.P. y Caballero, M.A. 1999. Biomass Gasification in Atmospheric and Bubbling Fluidized Bed: Effect of the Type of Gasifying Agent on the Product Distribution. *Biomass & Bioenergy* 17(5):389-403.

González V., 2009. Energías renovables. Editorial Reverté. Barcelona, España.

Grønli, M.G., Varhegyi, G. y Di Blasi, C. 2002. Thermogravimetric Analysis and Devolatilization Kinetics of wood. Publicado por Industrial and Engineering Chemistry Research. Nápoles, Italia.

Guillén, O. 2004. Energías Renovables: Una perspectiva ingenieril. Trillas. México, D.F., México.

Hardy, R, P. Wright, J. Gribbin y J. Kingston, 1986. El libro del clima, Vol. III. Barcelona: Ediciones Orbis, S.A. Barcelona, España.

IDAE, 2007. Biomasa: Gasificación. Publicación del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid, España.

IDAE, 2010. Diseño de centrales de calor eficientes. Publicación del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid, España.

IPCC, 2001. Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of working group to the third assessment report UNEP. Cambridge: Cambridge University Press. Publicado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Inglaterra.

IPCC, 2007. Cambio Climático 2007: Informe de síntesis. Publicado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza.

Janeiro M. R. 2009. Estudio de la gasificación para diferentes tipos de combustibles. Tesis de Maestría en Generación Eléctrica: Ciclos Combinados, Cogeneración y Sistemas Avanzados. Universidad de Zaragoza. Zaragoza, España.

Jeantet, R., Croguennec, T., Schuck, P. y Brulé, G. 2006. Ciencia de los alimentos Bioquímica-Microbiología-Procesos-Productos, Estabilización biológica y fisicoquímica. Ed. ACRIBIA. Vol. I. Zaragoza, España.

Kirubakaran, V., Sivaramakrishnan V., Nalini R., Sekar T., Premalatha M. y Subramanian P. 2007. A review on gasification of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13:180-184.

Kurkela, E., Nieminen, M. y Simell, P. 2004. Development and Commercialization of Biomass and Waste Gasification Technologies from Reliable and Robust co-Firing Plants Towards Synthesis Gas Production and Advanced Power Cycles. En: Segunda Conferencia Mundial de Biomasa. Roma, Italia.

Liu, Y. 2007 Chinese biofuels expansion threat en ecological disaster. Publicado por el Worldwatch Institute. Washington, D.C. EE.UU.

Maa, P.S y Bailie RC. 1973. Influence of particle sizes and environmental conditions on high temperature pyrolysis of cellulose material. Publicado por West Virginia University. Virginia, EE.UU.

Madrid, V. 2009. Energías renovables. Fundamentos, tecnologías y aplicaciones. Mundi prensa. Madrid, España.

Magaña, V. 2001. Cambio Climático una visión desde México. En Las fases científicas. Publicado por SEMARNAT. México, D.F., México

Martínez, C. 2006. Diseño de una planta de gasificación de lodos de EDAR para tratamientos de 28000 Mg/año de fango seco. Tesis de Maestría en Energía. Ingeniería Química, Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña, España.

Masera, O. 2003. Bioenergy use patterns in Mexico. En el Seminario internacional en bioenergía y desarrollo de sustentabilidad rural. Michoacán, Morelia, México.

Matsuoka, K., Kuramoto, K., Murakami, T. y Suzuki, Y. 2008. Steam Gasification of Woody Biomass in a Circulating Dual Bubbling Fluidized Bed System. *Energy & Fuels*, Págs.22, 1980-1985. Springer. Beijing, China.

Míguez, 2007. Procesos termoquímicos para la obtención de energía a partir de la fitomasa residual (Combustión, gasificación, pirólisis). Publicado por Procesos bio. San Francisco California, EE. UU.

Moilanen, A. Nasrullah, M. y Kurkela, E. 2009. The effect of biomass feedstock type and process parameters on achieving the total carbon conversion in the large scale fluidized bed gasification of biomass. Publicado por Environmental Progress and Sustainable Energy. Helsinki, Finlandia.

NRC (National Research Council), 1981. Methane Generation form Human, Animal and Agricultural Wastes. En: Informe de un panel del Comité Consultivo sobre innovación Tecnológica. Washinton, D.C. EE.UU.

NETL, 2010. Gasifipedia: Gasification in detail Types of Gasifiers. Publicación del National Energy Technology Laboratory. Pittsburgh, EE.UU.

Nemtsov, D.A. y Zabaniotou, A. 2008. Mathematical modelling and simulation approaches of agricultural residues air gasification in a bubbling fluidized bed reactor. *Chemical Engineering Journal*. 143(1-3). 10-31.

Nogués, S., García-Galindo, D. y Rezeau A. 2010. Energía de la biomasa (Volumen 1). Pág. 401-429. Prensas Universitarias de Zaragoza. Zaragoza, España.

Oñate, A. D. 2006. Gasificación y Biomasa: Una simbiosis del futuro. Publicado por Diego Oñate Arresti. Coruña, España.

Overend R. P. 1982. Biomass Conversion Technologies Proceedings Solar World Forum: Solar Technology in the Eighties, Hall D. O. Morton J. Págs. 1211-1220. Pergamon Press. Oxford, Inglaterra.

Paredes, R. y Baca, M. 2006. Pre Factibilidad de Instalación de Central de Generación de EE con Gasificación de Carbón Antracita en el Departamento La Libertad – Perú. Publicado por Florida Atlantic University FAU. Florida, EE. UU.

Perley, C. 2008. The status and prospects for forestry as a source of bioenergy in Asia and the Pacific. Fiat Panis. Bangkok, Tailandia.

Rauch, R. Hofbauer, H. Bosch, K. Siefert, I. Aicherning, C. Tremmel, H. Voigtlaender, K. Koch, R. Lehner, R. 2004. Steam Gasification of biomass at CHP Plant in Güssing. En 2da Conferencia mundial “Status of the demonstration plant”. Roma, Italia,

Raveendran, K., Ganesh, A. y Khilar, K.C. 1995. Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics. *Fuel*. 74(12). 1812–1822.

RENOVETEC, 2013. Centrales termoeléctricas de la biomasa. RENOVETEC. Madrid, España.

Roma, 2011. Energías sostenibles para el agro. Publicado por Club de Roma. Buenos Aires, Argentina.

OCCC, 2014. Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero. Publicado por la Oficina Catalana del Canvi Climatic. Cataluña, España.

Safi, MJ, Mishra, I.M. y Prasad, B. 2004. Global degradation kinetics of pine needles in air. *Thermochimica Acta*. 412(2):155–162.

SEMARNAT. 1999. Anuario estadístico de la producción forestal. Publicado por Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.

SENER, 2008. Tratamiento de agua para su utilización en calderas. Publicado por la Secretaría de Energía. México, D.F., México.

SENER, 2010. Balance Nacional de Energía 2010. Publicado por la Secretaría de Energía. México, D.F., México.

SENER, 2011. Balance Nacional de Energía 2011. Publicado por la Secretaría de Energía. México, D.F., México.

SENER, 2013. Energía derivada de biomasa. Publicado por la Secretaría de Energía. Buenos Aires, Argentina

Shafizadeh, F. 1968. Pyrolysis and combustion of cellulosic material. Publicado por Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry. Montana, EE.UU.

Steingress F. M. Frost H. J. , Walker D. R. 2003. High Pressure Boilers. American Technical Publishers, Incorporated. Illinois, EE.UU.

UNAM, 1983. Tecnologías energéticas del Futuro; Foros de consulta permanente del programa universitario de energía. Publicado por Coordinación de la Investigación Científica UNAM, México, D.F., México.

Toharia, M., 1984. Tiempo y clima. Salvat Editores. Madrid, España.

Van der Meijden, C.M., Van der Drift, A. Vreugdenhil, B.J. y Veringa, H.J. 2008. First Results from the 800 kWt Allothermal Biomass Gasifier Milena. En: 16th European Biomass Conference & Exhibition. Valencia, España.

Voituriez, B. 1994. La atmósfera y el clima: Conocer la Ciencia. RBA Editores. Madrid, España.

Wang, Y. y Kinoshita, C.M. 1992. Experimental Analysis of Biomass Gasification with Steam and Oxygen. *Solar Energy* 49(3):153-158.

Williams, P.T. y Besler, S. 1993. The pyrolysis of rice husks in a thermogravimetric analyzer and static batch reactor. *Fuel*. 72(2):151–1599.

Williams P.T. y Besler, S. 1996. Influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass. *Renewable Energy*. 7(3):233–250.

