



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ZARAGOZA

**“DISMINUCIÓN DE ALQUITRANES EN LA
GASIFICACIÓN DE BIOMASA, UTILIZANDO ESCORIA
DE ACERACIÓN”**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

ANA CELINA ARMENTA GARCÍA

TUTOR:

DR. ALEJANDRO ROGEL RAMÍREZ



Méx. D.F.

Junio 2014



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES "ZARAGOZA"

DIRECCIÓN

**JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN
ESCOLAR
PRESENTE.**

Comunico a usted que al alumno(a) Armenta García Ana Celina con número de cuenta 304130588 de la carrera Ingeniería Química, se le ha fijado el día 6 del mes de junio de 2014 a las 12:00 horas para presentar su examen profesional, que tendrá lugar en la sala de exámenes profesionales del Campus II de esta Facultad, con el siguiente jurado:

PRESIDENTE	DR. ROBERTO MENDOZA SERNA
VOCAL	DR. ALEJANDRO ROGEL RAMÍREZ
SECRETARIO	QUIM. MARTHA ORTIZ ROJAS
SUPLENTE	I.Q. JOSÉ ANTONIO ZAMORA PLATA
SUPLENTE	DR. ESTEBAN MINOR PÉREZ

El título de la tesis que se presenta es: **Disminución de alquitranes en la gasificación de biomasa, utilizando escoria de aceración.**

Opción de Titulación: Tesis profesional

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
México, D.F. a 14 de mayo de 2014.

DR. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NUÑEZ

DIRECTOR

ZARAGOZA

DIRECCION

RECIBI:

OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES
Y DE GRADO

Vo.Bo.

DR. ROBERTO MENDOZA SERNA
JEFE DE LA CARRERA DE I.Q.

Agradecimientos

A Dios

Por darme la vida y permitirme compartirla con las personas que más amo, bendecir mis pasos y llenarlos de dicha...

A mis padres Irma y Alejandro

Por su comprensión, cariño y apoyo incondicional, por creer en mí en todo momento y darme las fuerzas necesarias para enfrentar las adversidades, por soñar junto conmigo y motivarme a luchar por estos, por demostrarme que todo esfuerzo tiene su recompensa y que nunca hay que rendirse y de quienes he aprendido que la unidad de la familia es la mayor fuerza que puede existir; los mejores padres que dios me pudo elegir...

A mis abuelos Irene y Leandro

Ella, la mejor amiga que pudiera existir, guerrera incansable ante las adversidades de la vida, fuente de mi inspiración; gracias por compartirme tu sabiduría, por ser parte de tantos momentos felices, tristes y divertidos, por darme tantas lecciones de vida, por tu bondad eterna, gracias por siempre estar a mi lado, siempre serás mi consentida...

Él, el pilar más fuerte de mi familia, gracias por enseñarme tantas cosas, por tantos regaños que me diste, pero también por tantas alegrías que compartimos, gracias por

enseñarme que no hay límites más que los que nosotros mismos nos ponemos...

A mis amigos

Nevi, Laura, César y Jesús; con quienes he compartido momentos inolvidables a lo largo de la carrera, de quienes estoy orgullosa por sus logros, y con quienes sé que cuento en todo momento, gracias por hacer una pequeña familia universitaria que perdurará por siempre, los quiero...

A mi asesor el Dr. Rogel

Por creer en mí, por sus charlas tan amenas y por el respeto que me brindó, y la confianza que me otorgó, gracias por dedicar parte de su tiempo en este proyecto, por compartir sus conocimientos, lo admiro y lo respeto, gracias por su amistad...

A los sinodales involucrados en este trabajo

Gracias por el tiempo brindado y por sus valiosos comentarios...

A la UNAM

Por darme la oportunidad de ser parte de esta gran institución, y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por ser mi segundo hogar y haberme formado dentro de sus aulas como profesionista.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
JUSTIFICACIÓN.....	10
OBJETIVO GENERAL.....	10
OBJETIVOS PARTICULARES	10
CAPÍTULO 1. SITUACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES	11
1.1 PANORAMA MUNDIAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.....	11
1.1.1 POR TIPOS DE ENERGÍA.....	12
1.2 SITUACIÓN ACTUAL DE MÉXICO PARA LAS ENERGÍAS RENOVABLES	16
1.2.1 POR TIPOS DE ENERGÍA.....	16
CAPÍTULO 2. BIOENERGÍA.....	21
2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES.....	21
2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES POR GENERACIÓN.....	24
2.3 PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ENERGÍA.....	26
2.4 PROCESOS TERMOQUÍMICOS	27
2.4.1 PIRÓLISIS	28
2.4.2 GASIFICACIÓN	29
2.5 TIPOS DE GASIFICADORES.....	31
2.6 ETAPAS Y REACCIONES EN LA GASIFICACIÓN	33
2.7 SISTEMAS COMERCIALES DE GASIFICACIÓN.....	34
2.8 PRINCIPALES ELEMENTOS EN LA GASIFICACIÓN	36
2.9 CATALIZADORES.....	36
CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE EN LA GASIFICACIÓN Y ELIMINACIÓN DE ALQUITRÁN.....	37
3.1. ALQUITRÁN DE GASIFICACIÓN	37
3.2. EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y DISEÑO	38
3.3 EFECTO DE LA RELACIÓN COMBUSTIBLE/AGENTE GASIFICANTE.....	39
3.4 EFECTO DE LA TEMPERATURA.....	40
3.5 EFECTO DE LA PRESIÓN	42
3.6 EFECTO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA	43
3.7 USO DE CATALIZADORES	44

3.8	COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE GASIFICACIÓN	51
CAPÍTULO 4. GENERALIDADES DE LAS ESCORIAS		54
4.1	COMPOSICIÓN DE ESCORIA DE ACERO Y HIERRO FUNDIDO	54
4.2	ÍNDICES DE ACIDEZ/BASICIDAD	58
4.3	CAPACIDAD DE ADSORCIÓN	59
4.4	CAPACIDAD CATALÍTICA	59
CAPÍTULO 5. IMPLEMENTACIÓN EN EL GASIFICADOR		60
5.1	GASIFICADOR UNAM	61
5.2	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO	62
5.3	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO.....	63
5.4	REQUERIMIENTO DEL SYNGAS PARA TRABAJAR EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	64
5.5	PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN EN EL GASIFICADOR DE CIUDAD UNIVERSITARIA	64
5.6	DISMINUCIÓN DE ALQUITRANES EN LA GASIFICACIÓN, UTILIZANDO ESCORIA DE ACERACIÓN; PARA UN GASIFICADOR DE LECHO FIJO DE CORRIENTES PARALELAS (TEÓRICO).....	65
5.7	PROPUESTA DE ADICIÓN DE ESCORIA DE ACERACIÓN DE ALTO HORNO PARA EL PROCESO	66
CONCLUSIONES		68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		69

ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁF. 1 ESTIMACIÓN DE CONSUMO DE ENERGÍA GLOBAL DEL 2011.....	8
GRÁF. 2 PORCENTAJE ANUAL DE CAPACIDAD DE ENERGÍA RENOVABLE DE 2007-2012.....	11
GRÁF. 3 CAPACIDAD GLOBAL DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE.....	15

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA NACIONAL 2011.....	18
TABLA 2. RESULTADOS DE ESTUDIOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE RESIDUOS FORESTALES.....	19
TABLA 3. VARIACIÓN DE LA COMPOSICIÓN EN LAS ESCORIAS DE ACUERDO AL TIPO DE HORNO.....	54
TABLA 4. COMPOSICIÓN DE 2 MUESTRAS DE DIFERENTES TIPOS DE HORNO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS...55	

ÍNDICE DE FIGURAS E IMÁGENES

FIG. 1 FUENTES DE BIOMASA.....	21
FIG. 2 CLASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES DE ACUERDO A SU PROCEDENCIA Y DESTINO.....	22
FIG. 3 PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ENERGÍA.....	26
FIG. 4 PROCESOS TERMOQUÍMICOS.....	27
FIG. 5 ESQUEMA DE UN GASIFICADOR.....	29
FIG. 6 TIPOS DE GASIFICADORES.....	32
FIG. 7 ESQUEMA DE UN GASIFICADOR LUIRGI.....	34
FIG. 8 ESQUEMA DE UN GASIFICADOR WINKLER.....	35
FIG. 9 EFECTO DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN SOBRE LA COMPOSICIÓN DE ALQUITRANES.....	41
FIG. 10 EFECTO DE LA PRESIÓN EN LA COMPOSICIÓN DE ALQUITRÁN A 750°C Y UNA RELACIÓN S/B DE 1.2.....	42
FIG. 11 EFECTO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA EN LA COMPOSICIÓN DEL GAS.....	43
FIG.12 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO PARA OLIVINO, ANTES Y DESPUÉS AL TRATAMIENTO DE H ₂ , O ₂ , CO/H ₂	45

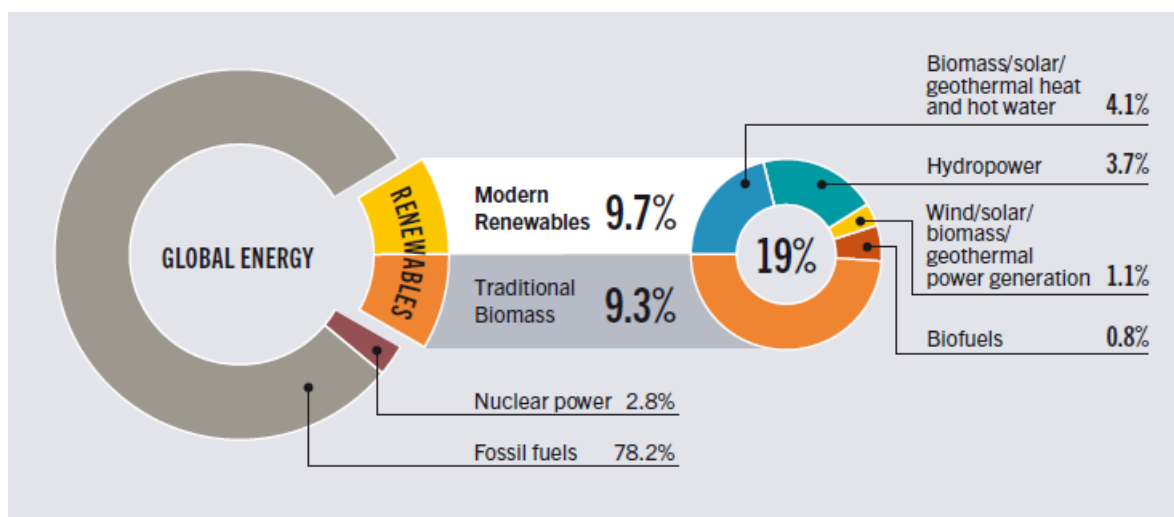
FIG. 13 RENDIMIENTO CATALÍTICO EN REFORMADO DE VAPOR SOBRE CATALIZADORES DE ALÚMINAS.....	47
FIG. 14 MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DE CATALIZADOR RH/ZEOLITA.....	48
FIG. 15 EFECTO DE LA TEMPERATURA Y EL CATALIZADOR DOLOMITA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE ALQUITRANES A 0.5 MPA	49
FIG. 16 TIEMPO DE REACCIÓN EN REFORMADO DE VAPOR DE TOLUENO Y SU EFECTO CON LA PRESIÓN....	50
FIG. 17 REFRACTOGRAMA DE UNA MUESTRA DE ESCORIA DE ALTO HORNO.....	56
FIG. 18 REFRACTOGRAMA DE UNA MUESTRA DE ESCORIA DE BOF.....	57
FIG. 19 UBICACIÓN DE PROYECTOS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOMASA FORESTAL.....	60
FIG. 20 VISTA FRONTAL DEL GASIFICADOR DE BIOMASA DE CU.....	61
IMAGEN 1. ENERGÍA EÓLICA.....	12
IMAGEN 2. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	12
IMAGEN 3. ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	13
IMAGEN 4. ENERGÍA HIDRÁULICA.....	13
IMAGEN 5. ENERGÍA OCEÁNICA.....	14
IMAGEN 6. BIOGÁS.....	14
IMAGEN 7. PARQUE EÓLICO LA VENTA OAXACA.....	16
IMAGEN 8. PARQUE SOLAR AGUA PRIETA II SONORA.....	17
IMAGEN 9. PLANTA GEOTÉRMICA CERRO PRIETO MEXICALI B.C.....	18

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global hoy en día es un problema grande; en las últimas décadas el fenómeno de la globalización mediante el TLC¹ generó el modelo económico que llevamos a cabo, que está orientado hacia el “Neoliberalismo²”, y este, tiene como consecuencia el aumento de actividades humanas asociadas al proceso de industrialización, que conduce por lo tanto, a la quema exorbitante de combustibles fósiles y al aumento en la concentración de gases como el CO₂ en la atmósfera de forma considerable. Se ha venido observando un aumento gradual en la temperatura de la superficie del planeta; parte de la radiación solar que llega hasta la tierra es retenida en la atmósfera y como resultado de esta retención de calor la temperatura promedio sobre la superficie de la tierra aumenta.

Por todo ello, existe la necesidad de buscar alternativas que ayuden sino a frenar el deterioro, por lo menos a disminuir la dependencia que se tiene de los combustibles fósiles; en un marco mundial países como Alemania, Brasil, Dinamarca, España, Canadá y Reino Unido han desarrollado tecnologías que les han permitido utilizar diversas fuentes renovables, fundamentalmente para la generación de energía eléctrica y, aunque su participación en la producción mundial aún es pequeña, estas energías representan una opción para el suministro eléctrico mundial. El análisis de las experiencias internacionales muestra que las energías renovables son un tema prioritario en las agendas energéticas, tanto en los países industrializados como en las economías en desarrollo, gracias a sus efectos positivos en las esferas ambiental, económica y social. Las energías renovables son precursoras del desarrollo y comercialización de nuevas tecnologías, creación de empleos, conservación de recursos energéticos no renovables, reducción de la dependencia de energéticos importados mediante su aprovechamiento energético de recursos locales, y de la reducción de gases de efecto invernadero y partículas que pueden dañar el ambiente y la salud pública, entre otros.

GRÁFICA 1. ESTIMACIÓN DE CONSUMO DE ENERGÍA RENOVABLE GLOBAL DEL 2011



Fuente: Renewables 2013 Global Status Report

¹ Tratado de libre Comercio (TLC) creado en 1992 y entró en operación en 1994

² Neoliberalismo. Corriente político-económica que propugna la reducción de la intervención del Estado al mínimo



De acuerdo con la *Agencia Internacional de Energía*³ (IEA), la oferta total de energía primaria en el mundo para el año 2010 fue de 12 717 millones de toneladas equivalentes de petróleo, de las cuales se produjo el 13% a partir de fuentes renovables de energía y; para el año 2011 (último año del que se tiene dato oficial) el Global Status Report del año 2013 estima que las energías renovables cubrieron el 19% de la demanda total de energía como se muestra en la Gráfica 1.

En lo que respecta a la situación actual y el potencial de las energías renovables en México, a diciembre de 2011, la capacidad de generación hidráulica que opera la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en plantas con una capacidad igual o menor que 30 MW, se ubicó en 286.6 MW, mientras que la Comisión Reguladora de Energía (CRE) registró 27 permisos de generación mediante plantas hidráulicas, con una capacidad total de 305 MW. En tema de bioenergía México tiene un gran potencial de residuos de biomasa, y con el desarrollo de nuevas tecnologías, se espera que en los siguientes años el uso de residuos de la biomasa se traduzca en una disminución en el uso de energías de origen fósil.

Con el panorama mundial de la necesidad de abastecer la demanda de energía es necesario realizar estudios que ayuden a impulsar el uso de biocombustibles, pero para ello se debe de ubicar en tiempo y espacio en qué etapa se encuentran las tecnologías para producirlos, con el fin de aumentar la eficiencia de estos en futuros desarrollos.

³La Agencia Internacional de Energía (IEA) fue fundada en respuesta a la crisis del petróleo de 1973, para ayudar a los países a coordinar una respuesta colectiva a los grandes trastornos en el suministro de petróleo a través de la liberación de las reservas de petróleo de emergencia a los mercados.



JUSTIFICACIÓN

El Jardín Botánico de Ciudad Universitaria cuenta con un gasificador de flujos paralelos capaz de procesar hasta 10 – 40 Kg/h de biomasa para generar hasta 300 KW de energía, éste gasificador fue diseñado para el abastecimiento de una parte de energía eléctrica dentro de la Universidad; sin embargo de su puesta en marcha (2008) a la fecha no ha sido constante la generación de energía para el propósito que se había establecido; por ello se propone darle un nuevo uso al gasificador teniendo como base la revisión del estado del arte en materia y proponiendo el uso de escoria de aceración como material de lecho fijo, es por esto que en este trabajo se realiza un análisis teórico que permita discernir si es factible realizar dicha modificación esperando que mejore la conversión de la materia y la generación de un gas de síntesis que cumpla con las especificaciones necesarias para su uso en motores de combustión interna alternativos; y esperando que este estudio sirva como base para futuras experimentaciones.

OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio del estado del arte en la disminución de alquitranes en la gasificación, una búsqueda mundial de las tecnologías que están en desarrollo y el avance que estas tienen.

OBJETIVOS PARTICULARES

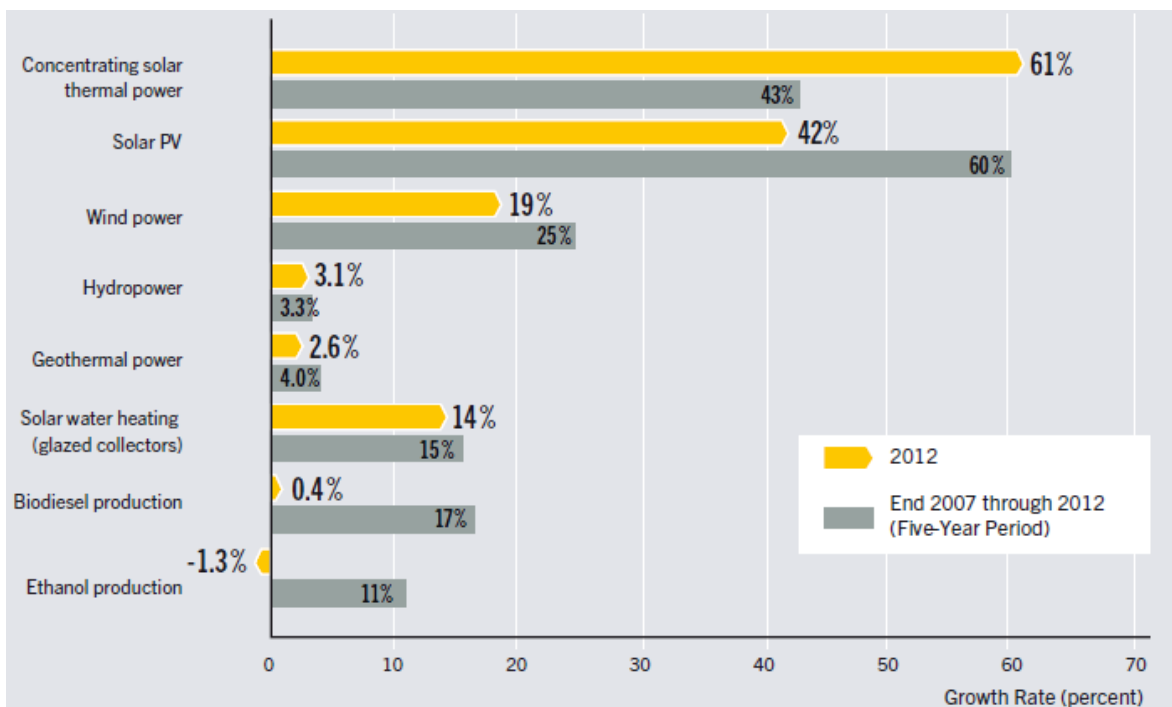
- Hacer una comparación entre estas tecnologías con el fin de facilitar la posible combinación de estas, para proponer un nuevo proceso que pueda ser validado posteriormente.
- Proponer el uso de escoria de aceración como catalizador para la ruptura térmica de los alquitranes en el proceso de gasificación.

CAPÍTULO 1. SITUACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

1.1 PANORAMA MUNDIAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

En 2012, la capacidad mundial instalada de las fuentes de energía renovable se estimó en 1 470 GW, 8.48% mayor al año antecesor, lo que llevó a representar aproximadamente un cuarto de la capacidad global instalada (estimada en alrededor de 5,360 GW en 2011) y alrededor del 19% del consumo global de energía final. Como se muestra en la Gráfica 2 de acuerdo al Global Status Report, la mitad de esta capacidad se encuentra en países desarrollados, donde tan solo Europa concentra el 20% de estas. En el sector eléctrico, las energías renovables sumaron casi la mitad del estimado de capacidad adicional en el mundo durante este año; por su parte las energías eólicas y solares fotovoltaicas fueron las que más incrementaron capacidad 20% y 40% de nueva capacidad, respectivamente.

GRÁFICA 2. PORCENTAJE ANUAL DE CAPACIDAD DE ENERGÍA RENOVABLE 2007-2012

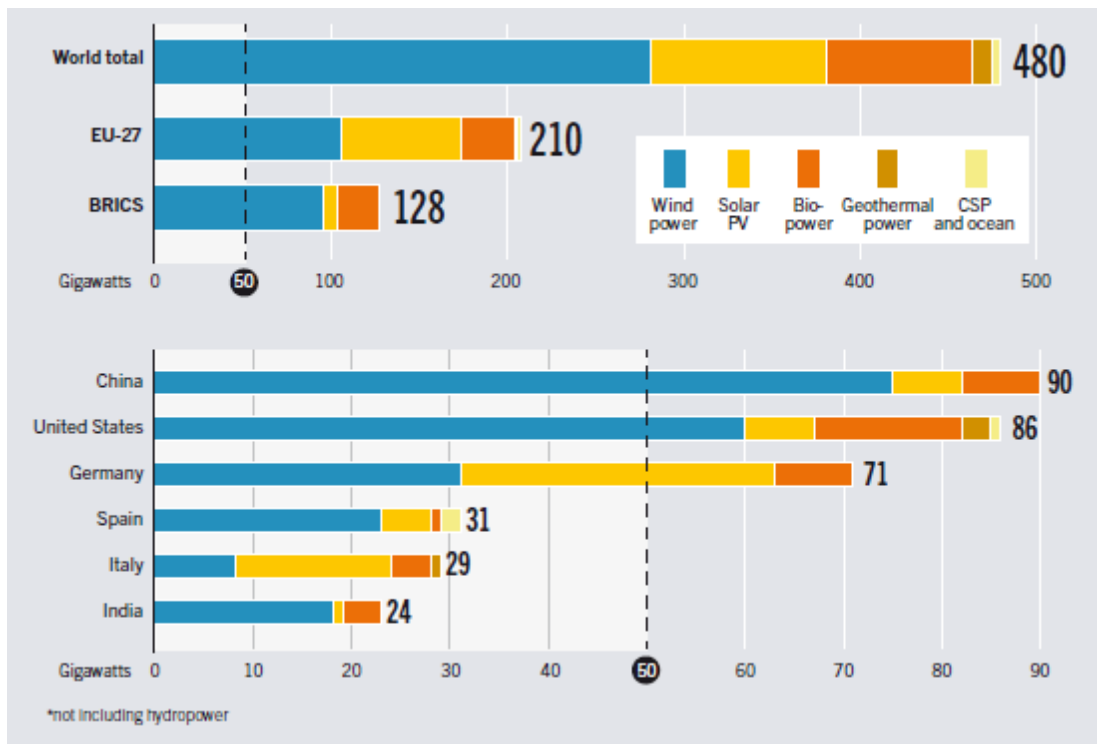


Fuente: Renewables 2013 Global Status Report



En los países miembros de la OCDE¹², el biogás ocupa el tercer lugar dentro de las fuentes renovables de mayor crecimiento para la generación de electricidad. Del total de electricidad generada a partir de biogás en el mundo en 2010, que ascendió a 43.6 TWh, Alemania es el país que tuvo una mayor participación con un 37.3% en el uso del biogás como fuente para generación de energía eléctrica, generando 16.2 TWh, siendo el mayor productor de la OCDE; seguido por Estados Unidos, con el 22.4%, es decir, 9.8 TWh del total generado a nivel mundial. En tercer lugar está el Reino Unido, con el 13.1% (5.7 TWh), e Italia en el cuarto, con 4.6% (2.0 TWh).

GRÁFICA 3. CAPACIDAD GLOBAL DE PRODUCCIÓN 2012, PRINCIPALES CIUDADES



Fuente: Renewables 2013 Global Status Report

En la gráfica 3 se muestra la capacidad global de producción para el año 2012 dónde se observa que el mayor porcentaje de esta producción está referido a la energía eólica; tanto que para bioenergía (principalmente biogás) se dio un porcentaje bajo; E.U. y China son los países en que hay mayor desarrollo y la capacidad instalada se da en mayor porcentaje.

¹² OCDE Organization for Economic Cooperation and Development

1.2 SITUACIÓN ACTUAL DE MÉXICO PARA LAS ENERGÍAS RENOVABLES

1.2.1 POR TIPOS DE ENERGÍA

Energía Eólica

Con relación a la capacidad de generación eléctrica para el servicio público, la CFE tuvo en operación, a finales de 2011, las centrales de La Venta en Oaxaca (84.7 MW), Guerrero Negro en Baja California Sur (0.6MW) y el generador de la COP (1.5 MW), lo que suma una capacidad total de generación de 86.8 MW.

Por su parte, a finales del 2011, la CRE¹³ había otorgado 27 permisos para la generación eléctrica en las modalidades de autoabastecimiento, exportación, pequeña producción y productor independiente de energía. De estos permisos, sólo siete corresponden a plantas que entraron en operación en el mismo año, ubicadas en los estados de Baja California y Oaxaca, con una capacidad autorizada total de 588.3 MW y una generación autorizada anual 2 063.59 GWh/año. En 2012 entraron en operación 3 plantas en la modalidad de productor independiente de energía, ubicadas en el estado de Oaxaca. A su vez, 17 plantas con 2 281 MW de capacidad autorizada, ubicadas en los estados de Baja California, Nuevo León, Oaxaca, San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz, se encuentran en construcción o por iniciar obras. En 2013 la generación de este tipo de energía se estimó en 1 584 870 MWh/año¹⁴. Iberdrola¹⁵ detalla en su informe anual que para este año (2014) pretende instalar 150 MW en las regiones de Puebla y Oaxaca llevando hasta el momento 70 MW instalados.

IMAGEN 7. PARQUE EÓLICO LA VENTA OAXACA



Fuente: Iberdrola México

¹³ Comisión Reguladora de Energía

¹⁴ Datos de SENER

¹⁵ Iberdrola. Empresa española dedicada a ingeniería y desarrollo de energía eólica que opera a nivel mundial.

Energía Solar

Para 2011, la capacidad total instalada de sistemas fotovoltaicos fue de 32 MW, principalmente para la electrificación rural, suministro de energía en el sector residencial, bombeo de agua, en los sectores comercial e industrial (iluminación de exteriores, alimentación de sistemas de emergencia, etc.). La empresa Abengoa¹⁶ tiene a su cargo la primera central termosolar híbrida solar-gas en el País ubicada en el estado de Sonora, dicha central “Agua Prieta II”, consiste de un sistema híbrido de ciclo combinado (477 MWe) y de un campo termosolar de canales parabólicos con una potencia de 14 MWe, iniciando operaciones en el presente año (2014). Por otra parte en La Paz Baja California se desarrolló el Proyecto Aura Solar 1 a cargo de las empresas Gauss Energía¹⁷ y Martifer Solar¹⁸ instalando una central termosolar con una capacidad de 30 MW y entró en operaciones a finales del 2013.

IMAGEN 8. PARQUE SOLAR AGUA PRIETA II, SONORA



Fuente: Abengoa España

¹⁶ Abengoa. Empresa Española dedicada al desarrollo, ingeniería y puesta en marcha de proyectos de energía Renovable a nivel mundial

¹⁷ Gauss Energía. Empresa Mexicana dedicada al desarrollo de proyectos de energía renovable para el País

¹⁸ Martifer. Empresa Española dedicada al desarrollo e ingeniería de energía solar a nivel mundial

Energía Geotérmica

De acuerdo con datos de la CFE, al 31 de diciembre de 2011 se encontraban en operación 38 unidades de generación geotermoeléctrica, con el mayor aprovechamiento localizado cerca de Mexicali, Baja California, en la central de Cerro Prieto con 645 MW. Ésta representaba 72% de la capacidad geotermoeléctrica en operación, mientras que el 28% restante estaba integrado por los Azufres, Michoacán (191.6 MW), Humeros, Puebla (40 MW) y Tres Vírgenes, Baja California Sur (10 MW), como se observa en la Tabla 1.

TABLA 1. GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA NACIONAL, 2011

Nombre de la Central	Fecha de Entrada de Operación	Capacidad Instalada Mw	Ubicación
Cerro Prieto I	1973	105	Baja California
Cerro Prieto II	1984	220	Baja California
Cerro Prieto III	1985	220	Baja California
Cerro Prieto IV	2000	100	Baja California
Los Azufres	1982	191.6	Michoacán
Los Humeros	1991	40	Puebla
Tres Vírgenes	2000	10	Baja California Sur

Fuente: CFE

En el Reporte anual de CRE para el año 2013 se estimó una generación de 5 547 644 MWh/año.

IMAGEN 9. PLANTA GEOTÉRMICA CERRO PRIETO, MEXICALI BAJA CALIFORNIA



Fuente: CFE



Energía Oceánica

Actualmente, en México no se cuenta con ningún desarrollo piloto o comercial de centrales de generación de electricidad en operación con alguna de las formas de energía oceánica presentadas; la CFE sólo reporta que licitó en mayo del 2012 un proyecto para generar energía undimotriz en el país.

Bioenergía

A inicio de 2012, la CRE¹⁹ tenía registrados 50 permisos de generación eléctrica bajo las modalidades de autoabastecimiento, cogeneración y usos propios continuos en ingenios azucareros, de los cuales 49 permisos iniciaron operación con una capacidad autorizada de 461.1 MW, y una generación anual de 852.3 GWh/año; asimismo, se tiene registrado un proyecto en construcción al cierre del año con una capacidad de 35.3 MW, con una generación de 117.3 GWh/año. De la capacidad autorizada, 94% está destinado al autoabastecimiento y usos propios continuos, el resto se genera bajo la modalidad de cogeneración.

La CRE otorgó al cierre de 2011, diez permisos para generar energía eléctrica con biogás, seis de ellos en la modalidad de autoabastecimiento en los estados de Aguascalientes, Chihuahua, Guanajuato y Nuevo León, y cuatro en la modalidad de cogeneración en Jalisco, Nuevo León, Estado de México y Querétaro. En conjunto representan una capacidad autorizada de 44.76 MW y una producción de 269 GWh/año.

El 20 de mayo del 2011 fue inaugurada una de estas plantas en el relleno sanitario de Ciudad Juárez, Chihuahua, misma que cuenta con una capacidad autorizada de 6.4 MW, y una producción de 39.2 GWh/año.

Actualmente ninguna de las instituciones derivadas de la SEMARNAT o propiamente esta, presentan datos de residuos forestales, solo tienen como dato que el 70% del volumen de los residuos forestal y aserrío se aprovechan. Por parte de la CONAFOR²⁰, se impulsó el desarrollo de 4 estudios que determinan las opciones más viables para el uso con fines energéticos de los residuos de aprovechamientos y aserraderos, mostrados en la siguiente tabla:

TABLA 2. RESULTADOS DE ESTUDIOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE RESIDUOS FORESTALES

	Ejido el Largo Chihuahua	Ejido el Balcón Guerrero	Ejido Noh-Bec Q. Roo	Región el Salto Durango
Valor promedio Aserrado anualmente (m³)	72 814	18 000	7 200	229 000
Residuos de Aserrío Disponibles (ton/año)	7 300	4 500	1 136	31 00
Propuesta de Generación Eléctrica	Quema de Biomasa	Quema de Biomasa	Gasificación de Carbón	Gasificación de Biomasa
Potencia a Instalar (kW)	200	200	92	-
Reducción de Emisiones (ton CO₂e/año)	1 100	1 100	123.5	46 000

Fuente: SENER con Información de CONAFOR 2012

¹⁹ Comisión Reguladora de Energía (CRE). Regula las Industrias de gas natural y electricidad en México

²⁰ Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) de la SEMARNAT



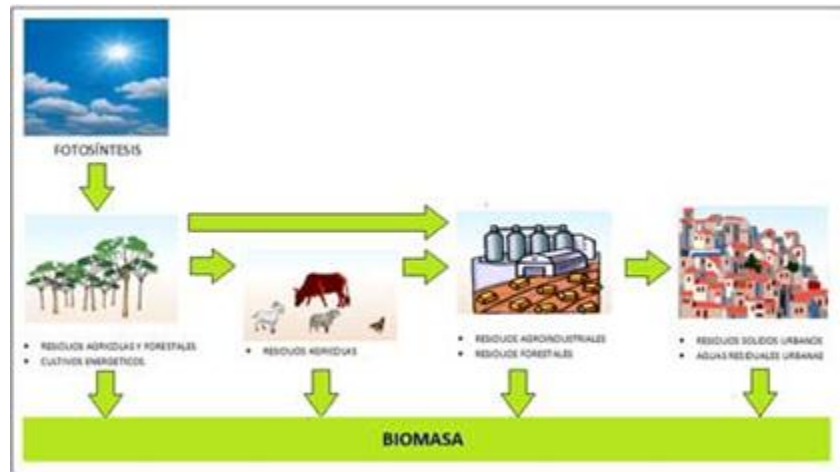
En materia de Residuos Forestales, Residuos Agrícolas, Residuos Ganaderos y Residuos Sólidos Urbanos; ya sea para generación eléctrica o para la generación de biogás²¹, el país se encuentra “fértil” pero según estudios de SENER, CONAFOR, SEMARNAT, entre otros cuenta con un amplio potencial para poder ser aprovechable. La necesidad es indudable, por ello se debe impulsar al desarrollo de las tecnologías que ayuden a abrir estos campos.

²¹Biogás es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica

CAPÍTULO 2. BIOENERGÍA

La bioenergía es un tipo de energía renovable que se obtiene de materia orgánica, la cual también es conocida como biomasa, proveniente de actividades agrícolas y pecuarias, así como de la silvicultura y de desechos urbanos e industriales, tal y como se ejemplifica en la figura 1:

FIGURA 1. FUENTES DE BIOMASA



Fuente: SENER

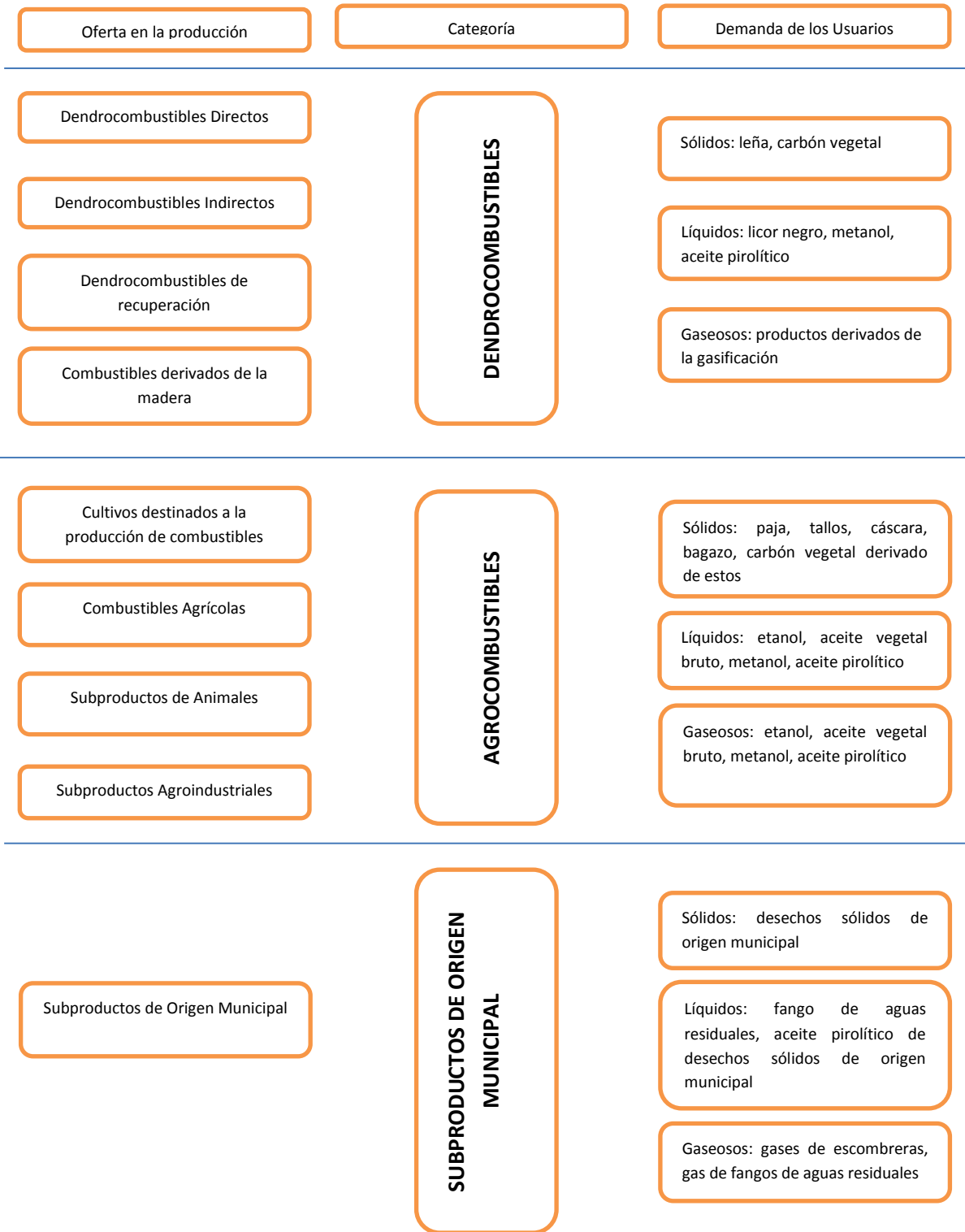
2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES

La FAO²² de las Naciones Unidas, clasifica a los biocombustibles para unificar la terminología, con el fin de designar todos los tipos de energía derivados de biocombustibles de acuerdo con las fuentes de la biomasa, esto es; los cultivos que persiguen un fin energético, el aprovechamiento de los bosques naturales, las plantaciones polivalentes y los subproductos (residuos y desechos) de la producción y de la elaboración de materias primas derivadas; los biocombustibles se clasifican en tres tipos:

- Dendrocombustibles
- Agrocombustibles
- Subproductos de Origen Municipal

²² Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)

FIGURA 2. CLASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES DE ACUERDO A SU PROCEDENCIA Y DESTINO:



Fuente: FAO



a) Dendrocombustibles:

Los Dendrocombustibles son biomasa derivada del sector forestal: bosques, terrenos boscosos y arboledas; en esta categoría figuran todos los tipos de biocombustibles derivados directa o indirectamente de los árboles y arbustos que crecen en tierras forestales y no forestales.

- El principal uso de la madera en México es como combustible, ya sea en forma de leña o carbón (Masera, 1996).
- Se estima que se extraen anualmente alrededor de 30 millones de m³ de madera para este fin, lo cual es más de tres veces la producción maderable industrial (Caballero, 2010).
- El 89% de la población rural de México (25 millones de habitantes) consume leña o carbón con fines térmicos (coCCIÓN de alimentos, principalmente) (Ghilardi Et al., 2007).
- El potencial del país para producir Dendrocombustibles se estima en 55 – 59 millones de toneladas anuales (FAO, 2010).

b) Agrocombustibles:

Los Agrocombustibles son los combustibles derivados de la biomasa agrícola y como subproductos de las explotaciones agrícolas y/o de la elaboración de materias primas (agroindustrias). Ellos comprenden principalmente materias de biomasa derivados directamente de cultivos destinados a la producción de combustible, los cuales se dividen en:

- Cultivos azucareros y amiláceos: son cultivos que se plantan básicamente para producir etanol como combustible, mediante la fermentación de la glucosa derivada de las plantas azucareras o amiláceas después de la Hidrólisis.
- Cultivos Oleaginosos: En plantas como girasol, colza, etc., para la producción de aceite vegetal para fines energéticos mediante la trans-esterificación como sucedáneo de gasóleo (para motor diesel).
- Otros cultivos energéticos: Plantas y cultivos especializados para usos energéticos.
- Granjas marinas: Algas
- Granjas de agua dulce: Jacinto acuático.

c) Combustibles derivados de Subproductos Municipales:

Comprenden los subproductos derivados de la recolección de basura, que son recolectados por las autoridades locales para su eliminación en un lugar centralizado, donde suelen incinerarse para producir energía térmica o electricidad.



2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES POR GENERACIÓN²³

Primera generación

Son los biocombustibles que provienen de cultivos alimenticios y que se procesan por medios convencionales (fermentación), como el Bioetanol que se obtiene de la caña de azúcar o la remolacha, o el biodiesel que proviene de las semillas de cártamo o girasol.

La desventaja que presentan estos biocombustibles es que ocupan tierras destinadas a cultivos alimenticios y puede existir el desabastecimiento para el consumo humano, además del encarecimiento de los cultivos.

Segunda generación

Son los biocombustibles que se elaboran a partir de materias primas que pueden convertirse en celulosa, que no entran en competencia directa con la utilización alimentaria, como los desechos de los cultivos alimenticios (por ejemplo los tallos del trigo o del maíz) e incluso el aserrín o plantas; su obtención se puede dar por 3 opciones:

1. Bioquímica que consiste en extraer los azúcares de la celulosa con la ayuda de enzimas muy activas para fermentarlos posteriormente a etanol mediante una levadura.
2. Gasificación de la materia prima con una mezcla de hidrógeno y de monóxido de carbono, transformando después esta mezcla en un carburante líquido, pasando por una serie de etapas intermediarias.
3. Pirólisis o Licuefacción que se refiere a la obtención de un combustible líquido mediante ellos.

Muchos de estos métodos están en experimentación y todavía no son económicamente rentables, pero la velocidad a la que se desarrollan sus tecnologías es muy alta, por lo que existe la posibilidad de que en el mediano plazo den resultados satisfactorios que permitan su implementación.

Tercera generación

Son aquellos que provienen de cultivos específicos no alimentarios y que tienen ventajas potenciales muy concretas, como las algas, las cuales tienen un potencial energético que puede llegar a ser 30 veces mayor que el de los cultivos energéticos en tierra, capturan una gran cantidad energía solar y se reproducen rápidamente. Existen algas que de manera natural producen Bioetanol; sin embargo, la tecnología y los procesos de producción para desarrollar este tipo de bioenergéticos aún se encuentran en etapa experimental, por lo que el uso de esta tecnología para producción en masa de biocombustibles no es económicamente viable.

²³ Red de Fuentes de Energía CONACyT



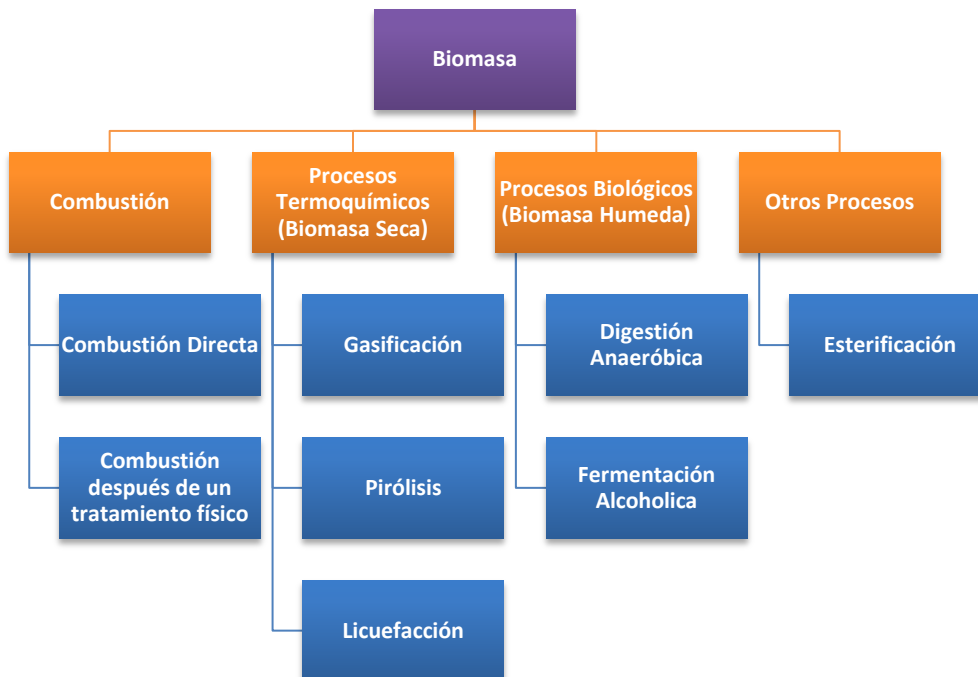
Cuarta generación

Son los producidos a partir de bacterias genéticamente modificadas, las cuales emplean anhídrido carbónico (CO_2) o alguna otra fuente de carbono. A diferencia de las generaciones anteriores, en las que también se pueden emplear bacterias y organismos genéticamente modificados como insumo o para realizar alguna parte de los procesos, en la cuarta generación, la bacteria es la que efectúa la totalidad del proceso de producción de los biocombustibles. Actualmente, esta generación de biocombustibles se encuentra en fase teórica, ya que sólo se conoce la posible ruta de síntesis del etanol a partir de anhídrido carbónico; sin embargo, depende totalmente de la información genética de una bacteria artificial y puede tener limitaciones termodinámicas importantes.

2.3 PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ENERGÍA

Es de suma importancia identificar las características de la biomasa de la que se pretende extraer algún contenido energético, ya que en función de ello algunas veces se puede emplear la biomasa directamente como combustible, o bien, someterla a diversos tratamientos y procesos antes de su aprovechamiento. En general se puede clasificar en procesos de combustión, termoquímicos, biológicos, entre otros, como se muestra a continuación:

FIGURA 3. PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ENERGÍA

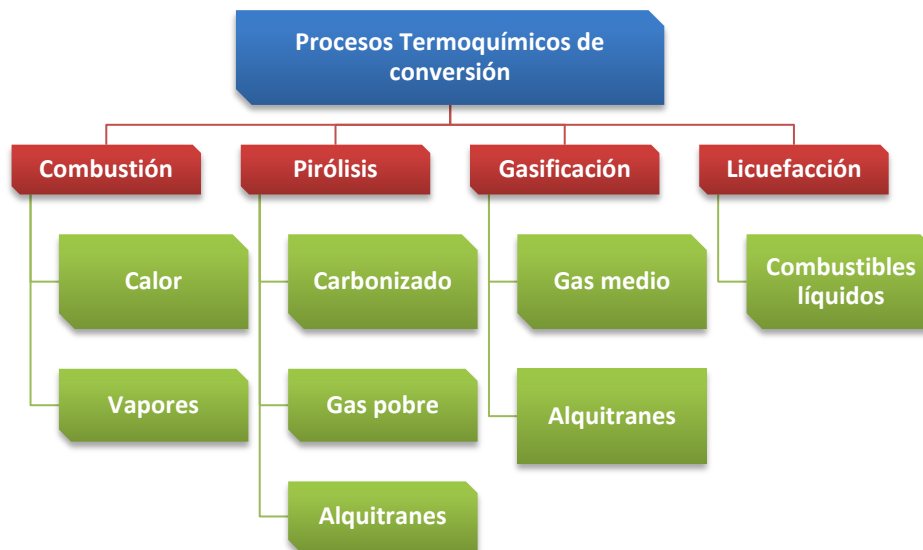


Fuente: Energía de Biomasa y de los Residuos Sólidos. SENER

2.4 PROCESOS TERMOQUÍMICOS

Son aquellos en los que la biomasa es transformada mediante diferentes procesos de oxidación, bajo ciertas condiciones de temperatura y presión, éstos permiten obtener combustibles en estado sólido, líquido o gaseoso. Si el proceso se realiza en ausencia parcial de oxígeno se conoce como gasificación, si el proceso se lleva a cabo sin presencia de oxígeno, se denomina pirólisis.

FIGURA 4. PROCESOS TERMOQUÍMICOS



Fuente: Elaboración Propia



2.4.1 PIRÓLISIS

Pirólisis proviene de las palabras griegas *piro*, fuego y *lisis*, rotura; es la descomposición de un compuesto químico por acción del calor, normalmente en ausencia del oxígeno. La pirólisis es un proceso utilizado comúnmente en la producción de energía de biomasa. Se inicia con un material orgánico completamente seco; esto se calienta en un ambiente anaeróbico (sin oxígeno) hasta que logre la rotura de los compuestos de carbono, dando como resultado carbón, agua y varios gases. Dependiendo del tipo de materia orgánica y el tipo de pirólisis que se utilice, la pirólisis puede producir subproductos tóxicos.

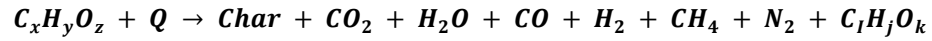
La pirólisis se puede clasificar aún más en la pirólisis lenta y pirólisis rápida. Para pirólisis lenta, se lleva a cabo con velocidad de calentamiento entre 5-7 °K/min lo que aumenta el tiempo de residencia en el reactor, en este tipo de pirólisis se produce menor cantidad de aceite y gases, así como mayor cantidad de alquitrán. Para pirólisis rápida, la reacción se da prácticamente en segundos lo que minimiza las reacciones secundarias pues se lleva a cabo con una velocidad de calentamiento de aproximadamente 500 ° K/min y como resultado se descompone para generar en su mayoría vapores, aerosoles y carbón, la pirólisis rápida se utiliza para obtener el alquitrán de alto grado o aceite de pirólisis que al condensarse se forma un líquido móvil de color marrón oscuro que tiene un valor de calentamiento alrededor de la mitad que la de aceite de combustible convencional.²⁴

²⁴ Azpiazu Méndez Arturo. Tesis "Estado del Arte en la Tecnología de Pirólisis"

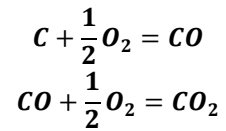


Las Reacciones generales en el Proceso de Gasificación son mostradas a continuación

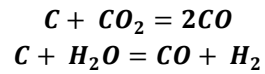
Reacción General



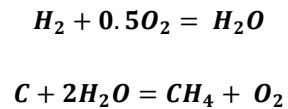
Reacciones de Combustión (Exotérmicas)



Reacciones de Gasificación (Endotérmicas)



Otras Reacciones (Exotérmicas)





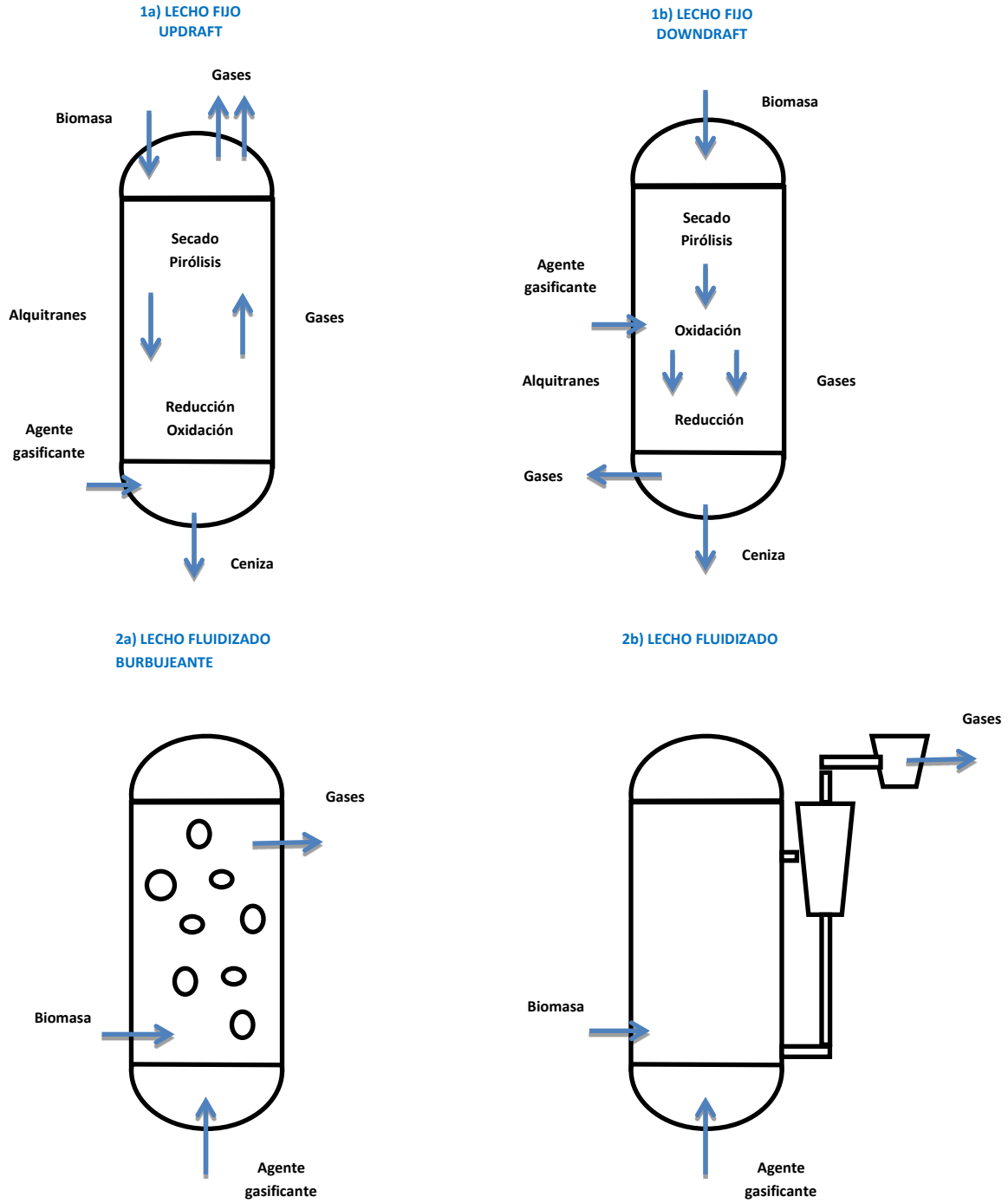
2.5 TIPOS DE GASIFICADORES

Se han desarrollado varios tipos de gasificadores, estos gasificadores tienen diferente hidrodinámica (especialmente la forma en que se ponen en contacto el combustible sólido y el agente de gasificación) y las condiciones de funcionamiento, tales como la temperatura y la presión.

Los Gasificadores de lecho fijo son los más adecuados para la gasificación de biomasa, estos gasificadores implican recipientes del reactor en el que el material de biomasa se envasa o se mueve lentamente, con los gases que fluyen entre las partículas, son normalmente alimentados desde la parte superior del reactor y se pueden diseñar en configuraciones de corrientes ascendentes (updraft) o descendentes (downdraft). Con los gasificadores de lecho fijo de aire ascendente, el agente gasificante pasa hacia arriba a través de una zona reactiva caliente cerca de la parte inferior del gasificador en una dirección contracorriente con el flujo de material sólido, ellos se pueden ampliar, sin embargo, producen un gas producto con concentraciones muy altas de alquitrán. Este alquitrán debe retirarse de la mayor parte del gas, creando una solución de limpieza de gases externa (ciclón). Para los Gasificadores de corriente descendente de lecho fijo están limitadas en escala y requieren un combustible bien definido, lo que no puede ser flexible. Instalaciones a pequeña escala de gasificador de lecho fijo corriente descendente (150 kWe-1 MWe) se pueden emplear para la conversión en el sitio de la biomasa en electricidad y calor.

Gasificadores de lecho fluidizado son un desarrollo más reciente, que se aprovecha de las excelentes características de la mezcla y las altas tasas de reacción del método de gas-sólido de contacto, estos suelen funcionar a 1075-1275 K (limitado por las propiedades de fusión del material del lecho) y por lo tanto generalmente no son adecuados para la gasificación del carbón, debido a la menor reactividad de carbón en comparación con la biomasa. Los ejemplos de los sistemas de gasificación de lecho fluidizado están gasificadores de lecho fluidizado burbujeante, gasificadores de lecho arrastrado, y los gasificadores de lecho fluidizado.

FIGURA 6. TIPOS DE GASIFICADORES



Fuente: Elaboración Propia



2.6 ETAPAS Y REACCIONES EN LA GASIFICACIÓN

Con independencia de que el lecho sea fluidizado o móvil, la biomasa pasa por:

1. Etapa de calentamiento hasta 100 °C, que provoca el secado de la biomasa por evaporación del agua contenida en la misma, y que absorbe el calor sensible para elevar la temperatura, además del necesario para la evaporación del agua.
2. Pirólisis (que también absorbe calor), en la que se rompen las moléculas grandes dando lugar a otras de cadena más corta que, a la temperatura del reactor, están en fase gaseosa.
 - Para los gasificadores “Updraft:
3. La tercera etapa es la reducción, por combinación del vapor de agua producido en la primera etapa, con el dióxido de carbono que viene arrastrado por la corriente del gasificante, desde la cuarta etapa (oxidación).
4. La última etapa es la oxidación de la fracción más pesada (carbonosa) de la biomasa al entrar en contacto con el agente gasificante (aire, oxígeno, o vapor de agua).
 - En sentido del Agente Gasificante

La tercera etapa Oxidación parcial del residuo carbonoso y caliente de la biomasa, eleva mucho su temperatura, ya que las reacciones de oxidación son exotérmicas, en la zona de reducción, la falta de oxígeno unida a la disponibilidad de carbono, CO₂ y vapor de agua, hace que se produzca una recombinación hacia hidrógeno molecular y monóxido de carbono.

La cuarta etapa en el sentido del gas es la pirólisis en la que, por efecto del calor, los componentes más ligeros de la biomasa se rompen y convierten en gas, uniéndose a la corriente. Por último, los gases calientes evaporan el agua contenida en la biomasa entrante.



2.8 PRINCIPALES ELEMENTOS EN LA GASIFICACIÓN

AGENTES GASIFICANTES

Según el agente gasificante que se emplee se producen efectos distintos en la gasificación, y el gas producto final varía en su composición y poder calorífico.

Aire: si se gasifica con él, parte de la biomasa procesada se quema con el oxígeno presente y el resto de la biomasa sufre la reducción. No obstante, el 50% del gas de síntesis es nitrógeno y, en términos de poder calorífico, el gas ronda los 5,5 MJ/Nm³. Este gas de síntesis es apropiado para motores de combustión interna convencionales.

Vapor de Agua: mejora el rendimiento global y aumenta la proporción de hidrógeno en el gas de síntesis ya que promueve principalmente la reforma de vapor de carbón y los alquitranes y la reacción de desplazamiento agua-gas (mejorando la producción de H₂), como se ha señalado por varios autores. Es el sistema más adecuado de producir este gas si se desea emplearlo como materia prima para producir metanol o gasolina sintética. Si bien el aire es gratuito y el vapor de agua se produce a partir del calor contenido en el gas de síntesis, el oxígeno tiene un coste energético y económico.

Hidrógeno: permite obtener un gas de síntesis que puede sustituir al gas natural, pues puede alcanzar un poder calorífico de 30 MJ/kg. No obstante, el hidrógeno es el mejor de los combustibles, susceptible de usarse en cualquier dispositivo termoquímico o electroquímico, por lo que no es muy recomendable como gasificante en el ámbito industrial, excepto en los casos de excedentes de baja pureza, no aptos para otra aplicación como una pila de combustible.

2.9 CATALIZADORES

Un catalizador es un compuesto que al ser introducido en un proceso puede acelerar y favorecer algunas reacciones, esto es de acuerdo a sus propiedades principalmente el pH y su composición química, ya que de acuerdo a esto favorecerá o disminuirá las interacciones entre los compuestos. Para el proceso de gasificación los más utilizados son los catalizadores metálicos por su capacidad de ionización.

Se han mostrado varios avances en estudios realizados, sin embargo aún falta bastante por realizar, por ejemplo se ha demostrado que la eficiencia global de la tecnología de gasificación aún sigue siendo baja en cuanto a costos se refiere y la mayor parte de esto se debe a que una vez obtenido el gas de síntesis se le debe dar un tratamiento posterior para lavarlo, ya que en el proceso de gasificación la conversión de alquitranes no se da totalmente, así que aumenta la cantidad de cenizas y la cantidad de alquitranes arrastrados en el gas de síntesis.



CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE EN LA GASIFICACIÓN Y ELIMINACIÓN DE ALQUITRÁN

El alquitrán o alquitranes se define como todos los componentes orgánicos con un peso molecular y el punto de ebullición más alto que el benceno, consisten en una mezcla compleja de compuestos orgánicos (incluyendo especies aromáticos y hetero-aromáticos, así como compuestos aromáticos policíclicos, PAHs), que se comienzan a producir desde la etapa de devolatilización o pirólisis (conocido como aceite de licuefacción y comúnmente utilizado como combustible), y aún en la etapa de gasificación (se da como subproducto inevitable, cuya condensación influirá al funcionamiento del sistema y a la utilización del gas final).

Los alquitranes son formados a partir de la descomposición térmica del compuesto orgánico, son directamente dependientes de la temperatura, conforme esta va incrementándose, las cadenas de alto peso molecular se empiezan a romper haciéndolas más “ligeras” que sin embargo el hecho de aumentar demasiado la temperatura no proporciona la certeza que exista una conversión total de materia sólida a gas; así como se van rompiendo enlaces se van generando nuevas moléculas que a la vez se van condensando, siendo éste el principal problema en el proceso pues disminuyen la eficiencia del proceso y elevan el costo del mismo, siendo esta la razón por la cual se realiza este estudio.

3.1. ALQUITRÁN DE GASIFICACIÓN

Durante la gasificación de la biomasa se dan una serie de reacciones complejas que producen gases combustibles útiles, carbón y productos químicos, pero también algunos subproductos como cenizas volátiles, NO_x, SO_x y alquitrán. El Alquitrán en los gases producto se condensa a baja temperatura, y la cantidad de éste depende en gran medida de las condiciones de operación (Presión, Temperatura, tiempo de residencia en el reactor, etc.); así como el agente gasificante utilizado (aire, oxígeno y vapor de agua), el tipo de gasificador (corriente descendente, corrientes paralelas, contraflujo); la composición de la alimentación, el origen de la materia orgánica a la que se le pretende extraer la energía y el porcentaje de humedad presente en la alimentación (se sugiere alimentar biomasa con un elevado poder calorífico y con un bajo porcentaje de humedad (>15%) pues un excedente de ésta haría perder una gran cantidad de energía para el secado y como consecuencia un gas más pobre), de acuerdo al tamaño de la cadena la composición del alquitrán se divide en, hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH's); benceno, tolueno, etilbenceno y Xileno (BTEX); y Fenol, en orden decreciente.

Dado que la formación de alquitranes es dependiente de varios factores trataré de resumir algunos de ellos.



3.2. EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y DISEÑO

Juan F. Pérez, Et al (11 de Febrero de 2012) de la Universidad Nacional de Colombia en Medellín, estudiaron el efecto de los parámetros de funcionamiento y diseño en un gasificador de lecho fijo corriente descendente para encontrar la optimización del proceso de gasificación y la producción de gas de síntesis con la más baja cantidad de alquitrán, utilizando corteza de pino como recurso biomásico teniendo como resultado lo siguiente: en las condiciones de entrada la velocidad superficial del aire como agente gasificante debe ser de 0.06 m/s, en tanto que el tamaño de partícula de la biomasa debe oscilar entre 2 y 6 mm ya que el área de transferencia de masa aumenta con la disminución del tamaño de partícula, el porcentaje de Humedad debe ser de 10.62% ya que valores mayores disminuyen la eficiencia del proceso de conversión de materia; por otro lado, para las variables de respuesta se tuvo que la relación equivalente de combustible aire debe ser de 3.2 y la tasa de consumo de biomasa de 125 kg/h/m², obteniendo un poder calorífico inferior del gas de síntesis de 2965.6 KJ/Nm³ y una composición de 8% de C, 13% CO, 1.4% CH₄, 14.9% CO₂ y 62.7% de N₂, en tanto que el valor de la concentración de alquitrán de 7.73 g/Nm³, realizando estas comparaciones con el programa estadístico Statgraphics para los valores promedio de la prueba.



3.3 EFECTO DE LA RELACIÓN COMBUSTIBLE/AGENTE GASIFICANTE

De los agentes gasificantes que existen el aire es el más utilizado en los desarrollos experimentales, no por el buen rendimiento que pueda proporcionar, sino por el bajo costo en comparación con el vapor de agua o hidrógeno ya que a una mayor disponibilidad de oxígeno en el favorece a la destrucción a través de la oxidación de la materia volátil liberada en la etapa de pirólisis; entonces, la relación combustible/ agente gasificante (o inversamente la proporción equivalente ER), se define como la relación de masa entre los dos parámetros a la estequiometría; se considera uno de los principales parámetros de funcionamiento en procesos de gasificación, ya que influye en la conversión del combustible, el valor de calentamiento del gas producto y la producción de alquitrán.

Matthias Mayerhofer, Et al (2012), realizaron el estudio para definir la mejor proporción equivalente en el caso de gasificación con lecho fluidizado, con valores de 0.8 – 1.2 vapor de agua/biomasa a una temperatura de 800° C, teniendo que el contenido mínimo de alquitrán total se observó en la relación S/B 1.2 esto concuerda con lo esperado ya que un mayor contenido de vapor de agua favorece el reformado de hidrocarburos.

J.J. Hernández, Et al (enero el 2013), observaron el efecto de las condiciones de operación en el proceso de gasificación para la producción total de alquitranes, en el caso de la relación combustible/aire obtuvieron que la relación ideal para la menor producción total de alquitranes es de $F= 1.5$ a una temperatura constante de 1200° C ya que se da una tendencia lineal, es decir, conforme el valor de la relación aumenta el proceso se aproxima a una pirólisis y el combustible deja de reaccionar.



3.4 EFECTO DE LA TEMPERATURA

La temperatura es uno de los principales parámetros de funcionamiento que afectan a la producción de alquitrán y composición. En realidad, la temperatura influye en todas las etapas que tienen lugar durante el proceso de conversión termoquímica de gas sólido: devolatilización de combustible, y las reacciones de gasificación de carbón.

Ke Qin, Et al (2012), de la Technical University of Denmark estudiaron los efectos de la temperatura de reacción, así como la relación molar de vapor/carbón y la relación de aire en exceso para un reactor de lecho fluidizado a escala laboratorio con pellets de madera como biomasa y vapor como agente gasificante; teniendo como resultado un incremento del gas pobre (mezcla de H_2 , CO, CO_2 e hidrocarburos) en un 72% cuando la temperatura incrementó de $1000^\circ C$ a $1350^\circ C$ logrando asegurar una gran disminución de alquitrán en el gas de síntesis junto con el aumento del rendimiento del hollín; con respecto a la relación molar de $H_2O/C = 1$ obtuvieron que puede reducirse de 20 a 50 % el rendimiento de hollín, por otra parte la relación de aire en exceso dio lugar a una fuerte caída de la producción de hollín (75%) siendo 0.25 – 0.35 el mejor intervalo para que la cantidad de gas de síntesis se mantuviera constante.

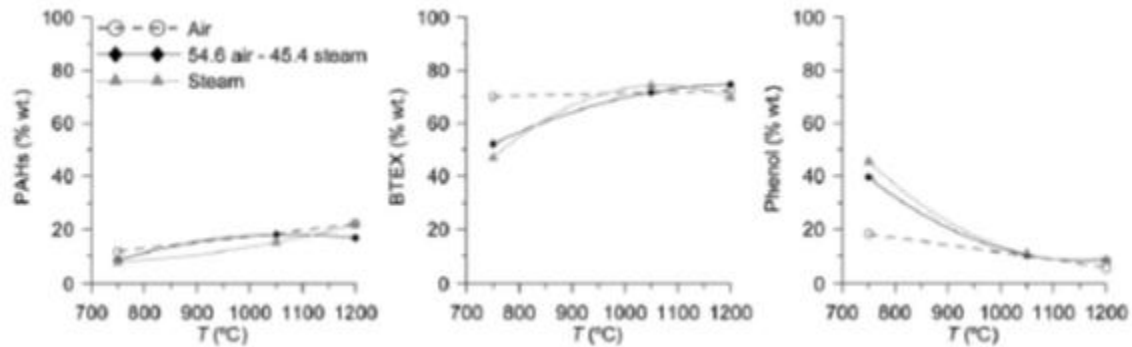
Matthias Mayerhofer, Et al (2012), del Institute of Energy Systems en Alemania, utilizaron un gasificador de lecho fluidizado burbujeante que trabajó con pellets de madera de 8 mm de diámetro como biomasa para determinar la influencia de la temperatura, presión y la relación de vapor/biomasa en la formación de alquitranes; en el caso de la temperatura llegaron a la conclusión que con el aumento de ésta se da una notoria disminución de alquitranes, sin embargo existe un aumento en el contenido de naftaleno para estas condiciones (la temperatura del gasificador solo podía soportar $850^\circ C$).

Leila Emami Taba, Et al (agosto del 2012), realizaron una comparación del proceso de gasificación con tres tipos diferentes de ésta: gasificación de carbón (CG), gasificación de biomasa (BG) y CO-gasificación (COG) con la finalidad de observar el efecto de la temperatura en cada proceso. Los autores detallan que en la gasificación de biomasa se da la mayor producción de alquitranes y esto provoca una restricción para la producción de H_2 , e informan que un aumento de temperatura en el reactor provoca un aumento en las reacciones endotérmicas, tales como el craqueo; por ello están de acuerdo con el uso de catalizadores, sin embargo sugieren tres métodos diferentes: aumentar el tiempo de residencia, el contacto directo con la superficie caliente y la oxidación parcial.

J.J. Hernández, Et al (enero del 2013), comprobaron que en el caso de utilizar aire puro o vapor de agua puro, la cantidad de alquitranes generados en el proceso se reduce a medida que aumenta la temperatura, lo que indica un grado más alto en el craqueo térmico y las reacciones de reformado con vapor. Sin embargo esta tendencia no es lineal, para el caso de gasificar con vapor la reducción de alquitranes se dio con un aumento de temperatura de $750^\circ C$ a $1050^\circ C$ que con un aumento de $1050^\circ C$ a $1200^\circ C$. Por otro lado, en el caso de la gasificación con una mezcla de aire y vapor de agua (Y_{H_2O} en peso=45.4%), se ha obtenido una tendencia peculiar: la reducción de la producción de alquitrán comienza a ser significativa sólo a temperaturas superiores a $1050^\circ C$, siendo la cantidad de alquitranes producidos similar a la gasificación de vapor puro en $750^\circ C$ y $1050^\circ C$.

En los tres casos se observó una producción mayor de BTEX (Etilbenceno y Xileno) y Fenol, siendo los PAH's (policíclicos aromáticos) los menos producidos en un orden menor a los 50 mg/Nm³, como se muestra en la figura 9 la composición de alquitrán en función de la temperatura de operación y el agente gasificante utilizado.

FIGURA 9. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN SOBRE LA COMPOSICIÓN DE ALQUITRANES



Como conclusión describen que debe encontrarse un equilibrio termodinámico pues existen limitaciones importantes debido al efecto que causa sobre:

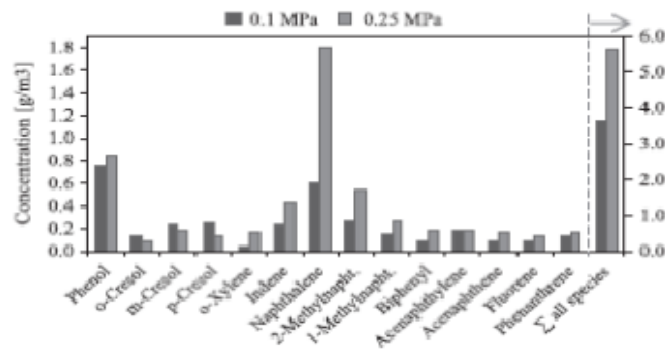
- el contenido de materia volátil en los combustibles
- los materiales de construcción utilizados en el gasificador
- la producción de gases indeseables tales como NOx y 4) su efecto sobre la producción de ceniza.

3.5 EFECTO DE LA PRESIÓN

Siguiendo el principio de Le Chatelier, un aumento en la presión del sistema desplaza el equilibrio hacia un menor número de moléculas para contrarrestar el cambio, esto dificulta la reforma y las reacciones de craqueo en la fase de gas; a causa de esto se espera un aumento de alquitrán y el contenido de hidrocarburos con el aumento de la presión.

Matthias Mayerhofer, Et al (2012), estudiaron el efecto de la presión en un gasificador de lecho fluidizado burbujeante y concordaron con la literatura; el aumento de la presión conduce a un aumento en el contenido de alquitrán total, lo que se debe principalmente a un contenido de naftaleno creciente. La razón se supone que es la diferente composición de los alquitranes primarios y secundarios liberados y la tendencia a la formación de un menor número de moléculas en la fase de gas de acuerdo con el principio de Le Chatelier. La composición del gas se desplaza hacia una mayor CH_4 y el contenido de CO_2 mientras que el CO disminuye.

FIGURA 10. EFECTO DE LA PRESIÓN EN LA COMPOSICIÓN DE ALQUITRÁN A 750° C Y UNA RELACIÓN S/B DE 1.2

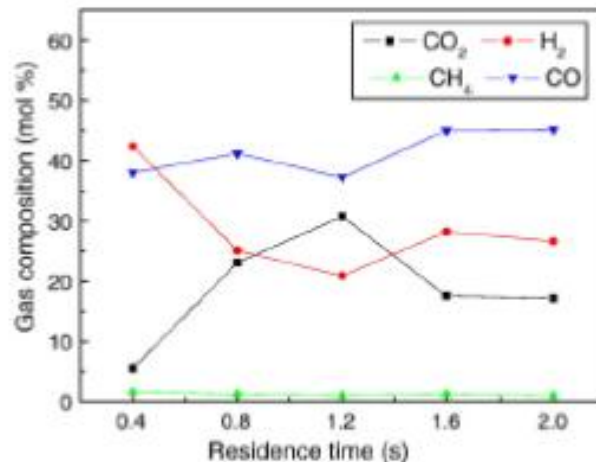


Como se observa en la figura 10 a una Presión de 0.25 MPa (la mayor presión ocupada para dicho experimento), la concentración de alquitranes aumentó significativamente dando una mayor tendencia al grupo Naftaleno; teniendo como diferencia alrededor de 2 unidades en comparación a la concentración para 0.1 MPa.

3.6 EFECTO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA

Jinsong Zhou, Et al (2009), llevaron a cabo experimentos para investigar la influencia de algunos factores en la gasificación como la Temperatura, la relación de Oxígeno/Biomasa y Tiempo de residencia en un gasificador de biomasa de flujo arrastrado a escala laboratorio, los autores detallan que el tiempo de residencia está dividido en 4 etapas, la primera de estas de 0 – 0.4 s es la etapa en donde entra la biomasa y se lleva a cabo la pirólisis para poder desprender los gases volátiles y producir semi-coque; durante la segunda etapa 0.4-1.2 s comienza la quema con el Oxígeno y aumenta la concentración de CO y disminuye el H₂ pero es en esta etapa donde se encuentra la mayor cantidad de ceniza; la tercera etapa 1.2 - 1.6 s donde aumentan las reacciones de reducción por lo tanto el H₂ y CO aumentan pero el CO₂ disminuye, durante la cuarta etapa 1.6 – 2 segundos las curvas aumentaron muy lentamente, lo que indicó que la gasificación ya había terminado; con esto llegaron a la conclusión que el tiempo de residencia óptimo es de 1.6 s ya que tiempos más cortos pueden llevar a una gasificación incompleta y tiempos más largos disminuiría la eficiencia del sistema; el valor óptimo para la relación de Oxígeno/Biomasa fue de 0.4 y la temperatura óptima de gasificación fue de 1300 °C.

FIGURA 11. EFECTO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA EN LA COMPOSICIÓN DEL GAS



Como se observa en la figura 11, el valor de la composición para cada uno de los gases permanece pudiera decirse “constante” a partir de los 1.6 segundos, por ello se concluye que la gasificación había terminado.

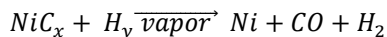
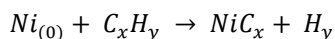
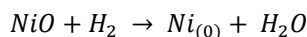


3.7 USO DE CATALIZADORES

Dependiendo de la tecnología que se utilice, y de las condiciones de gasificación (relación biomasa/gasificante, tiempo de residencia, etc.) se pueden usar catalizadores para inducir ciertas reacciones y que se produzca prioritariamente algún componente; *la eficiencia de un catalizador depende en gran medida su capacidad de dispersión en toda la matriz de carbono para formar las interfaces necesarias en el proceso.*

Ni/Dolomita

Anawat Ketcong Et al (2009), desarrollaron un catalizador a base de Níquel y Dolomita para la gasificación de biomasa y reformado de alquitranes simultáneamente, utilizando un gasificador de lecho fluidizado, concluyendo que la adición de Níquel a la dolomita fue eficaz y dio un mejor rendimiento para los alquitranes de craqueo; llevándose a cabo las siguientes reacciones:



Jingyu Ran Et al (marzo del 2012), analizan la alternativa de utilizar paneles de cerámica como soporte del catalizador para reciclar el calor del gas de síntesis y aumentar la eficiencia en la conversión, diseñaron un reactor que instala simétricamente dos paneles cerámicos (que por su estructura porosa funciona como intercambiador de calor además de un soporte ideal para catalizadores) en los dos lados de la zona de gasificación para proporcionar mayor temperatura al agente de gasificación (adicionando un tubo de purga para evitar la mezcla con el gas de síntesis), esto hace que exista un mayor aprovechamiento de la energía disponible disminuyendo la cantidad de alquitranes presentes en el gas de síntesis.

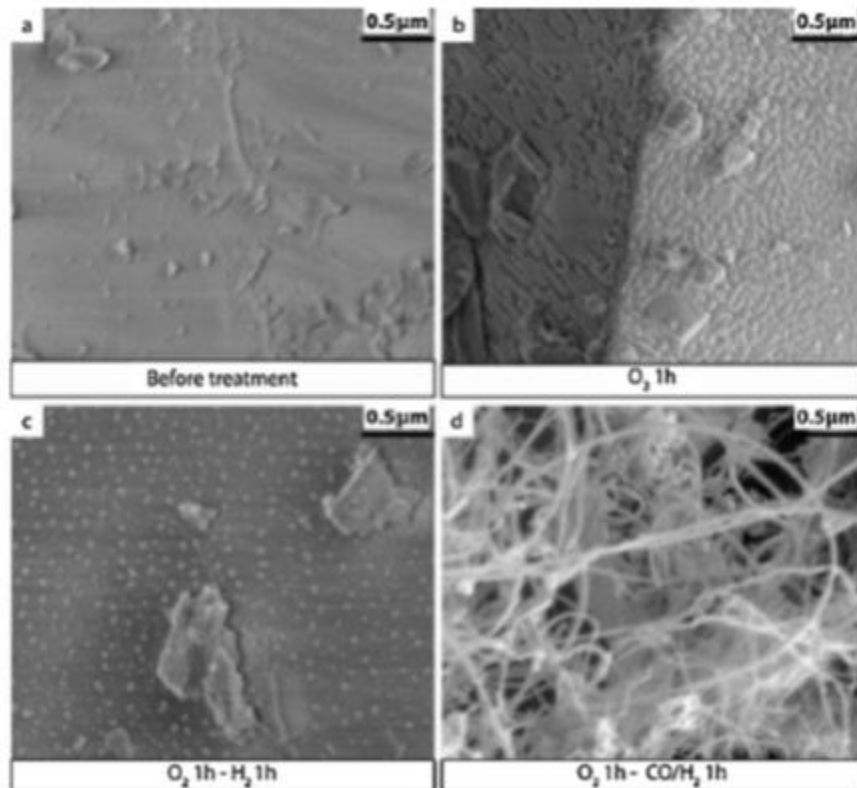
NiLaFe/ γ -Al₂O₃

Jianfet Li Et al (Septiembre del 2012), realizaron el estudio del rendimiento de un catalizador tri-metálico: nano NiLaFe/ γ -Al₂O₃, en un reactor de lecho fijo con la finalidad de aumentar la producción de Hidrógeno y la eliminación del alquitrán en el proceso de gasificación; utilizando como biomasa residuos sólidos municipales, obteniendo como resultado el 99% de eficacia de eliminación de alquitrán a 800° C debido predominantemente al craqueo secundario de vapores durante la catálisis; sin embargo este rendimiento varía de acuerdo a la relación de masa del catalizador, además del tamaño de partícula de la alimentación.

OLIVINO ((Mg, Fe)₂SiO₄)

Hans O.A. Fredriksson, Et al (7 de Febrero 2013), estudiaron el comportamiento del Olivino (Austriaco) a condiciones hostiles, semejantes a las presentes en el proceso de gasificación para determinar su carácter como catalizador en un reactor de lecho fluidizado dual (donde la gasificación se lleva a cabo en ausencia de aire y el vapor se utiliza como un medio de gasificación), utilizando aire como agente gasificante; para efectuar las pruebas correspondientes el Olivino utilizado de tamaño de partícula de 10mm tuvo que ser molido hasta obtener tamaños de partícula de 0.5µm para poder ser evaluado eficazmente, la caracterización del Olivino y sus fases se dieron por las pruebas de SEM, XRD, XAS and XPS, en la figura 12 se muestra el cambio de la estructura con respecto al tiempo, donde notoriamente se van formando cristales en la superficie del material hasta llegar a una estructura fibrosa depositada que corresponden a fibras de carbono acumuladas como se muestra específicamente en la imagen d.

FIGURA 12. MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO PARA OLIVINO, ANTES Y DESPUÉS AL TRATAMIENTO DE H₂, O₂, CO/H₂



Los análisis realizados pudieron determinar que el Olivino no es un material estable, se descompone a las temperaturas aplicadas generalmente durante la gasificación (entre 700 y 1000 ° C), el material sólo es termodinámicamente estable en las composiciones de gas con presiones parciales de oxígeno dentro de un intervalo bastante estrecho (los gases incluso que son nominalmente libres de oxígeno pueden tener una presión parcial de oxígeno debido a las reacciones de equilibrio químico).



Los autores indican que el Hierro es el elemento activo catalíticamente en el Olivino, sin embargo diferentes estados de oxidación del Fe catalizan diferentes reacciones; por ejemplo, Fe_2O_3 cataliza el hollín y la conversión de NO_x , Fe_3O_4 es un buen catalizador de desplazamiento del gas de agua y Fe metálico cataliza la reacción para la descomposición de alquitrán.

Por lo tanto la conclusión general a la que llegaron es que si el material alcanza el equilibrio termodinámico, o está cinéticamente impedida de hacerlo, su desactivación depende de la temperatura y tiempo de residencia en el gasificador, por lo cual no es considerado como un buen catalizador para el proceso de gasificación de biomasa.

Al, Mg, Ce, - Ni/SiO₂

Paula H Blanco et al (Mayo del 2013), del Instituto de Investigación de Energía en Reino Unido, determinaron la idoneidad de una serie de catalizadores de Ni/SiO₂ y la adición de metales como Al, Mg, Ce para la producción de hidrógeno y reducción de alquitrán en un sistema de reformado de pirólisis a 600° C de dos etapas y con el uso de derivados de residuos como materia prima; obteniendo el mejor rendimiento de catalizador preparado por sol-gel utilizando el 20% en peso de Ni/SiO₂ observando la mayor concentración de H₂ del 57.9% en volumen y cantidad menor en el contenido de alquitrán: 0,24 mg_{tar}; sin embargo la adición de los metales se mostró influencia significativa en cuanto al rendimiento; se identificaron en el alquitrán de pirólisis principalmente estireno, fenol, indeno, cresoles, naftaleno, fluoreno, fenantreno y alcoholes a partir del alqueno.

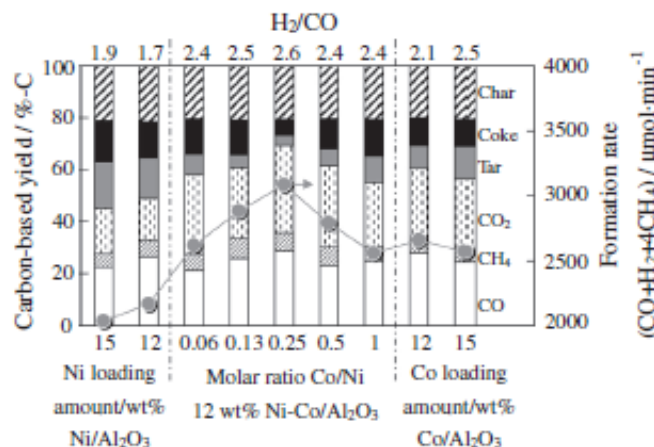
Zn, Cu

Thomas Kienberger Et al (Mayo del 2013), Investigaron la actividad de catalizadores de ZnO y CuO dentro de la etapa combinada de metanización catalítica y alquitrán reformado (in situ) en un reactor politrópico (solo enfriado por pérdidas térmicas), etapa en donde la reacción de metanización se da demasiado rápida y es altamente exotérmica, con el fin de eliminar los componentes H₂S en el gas de síntesis; logrando una conversión de alquitrán del 90%, la composición del gas de síntesis contiene una carga de alquitrán de alrededor de 6 g/Nm³ y un contenido de H₂S en torno al 10 ppm y llegando a la conclusión de que se necesitan tiempos de residencia del gas más largos para llegar a una conversión completa y proponiendo un sistema de limpieza de gas caliente.

Ni-Co/Al₂O₃

Lei Wang, (Octubre de 2013), investigaron el rendimiento catalítico de tres catalizadores en el reformado de vapor de alquitrán en un gasificador de lecho fijo, en el estudio realizado pudieron determinar el comportamiento de el catalizador de alúmina con la mezcla de Níquel y Cobalto (Ni-Co/Al₂O₃), y los catalizadores con cada uno de los elementos por separado (Ni/Al₂O₃ y Co/Al₂O₃), al comparar la actividad catalítica de cada uno observaron que la mayor actividad y rendimiento lo obtuvo la alúmina con aleación de Níquel y Cobalto, demostrando también que obtuvo la menor formación de coque como se observa en la figura 13:

FIGURA 13. RENDIMIENTO CATALÍTICO EN REFORMADO DE VAPOR SOBRE CATALIZADORES DE ALÚMINAS

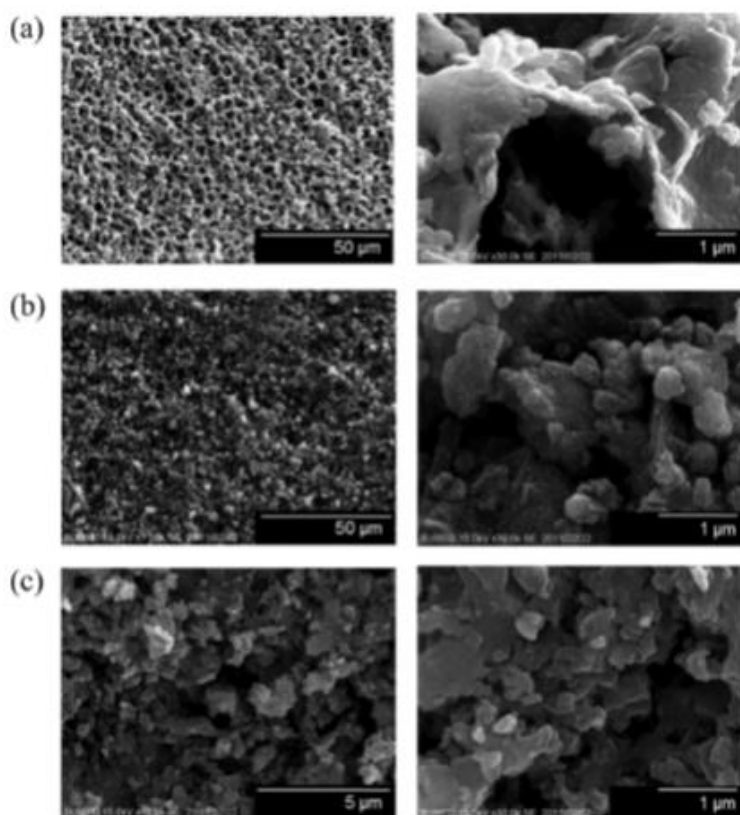


Los autores detallan que la sinergia existente entre el Ni y Co es estrecha por su estructura electrónica lo que da a un alta capacidad de reducción del catalizador, como conclusión abordan que la adición de Cobalto a Ni/Al₂O₃ optimizó dicho catalizador ya que tuvo un gran efecto para la disminución de alquitranes en el proceso, el catalizador mostró ser estable a las condiciones de operación además de tener un amplio tiempo de desactivación por la deposición de Carbón.

Rh/ Zeolita

Malinee Kaewpanha, Et al (Noviembre de 2013), investigaron los efectos de la cantidad de carga de metal a Zeolita comercial y la temperatura de reacción en la eficacia de eliminación de alquitrán y la reutilización de los catalizadores utilizados; como metales utilizaron tres tipos de catalizadores, Fe/Zeolita, Ni/Zeolita, Rh/Zeolita, en un reactor de lecho fijo a 680° C con vapor saturado como agente gasificante.

FIGURA 14. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DE CATALIZADOR RH/ZEOLITA

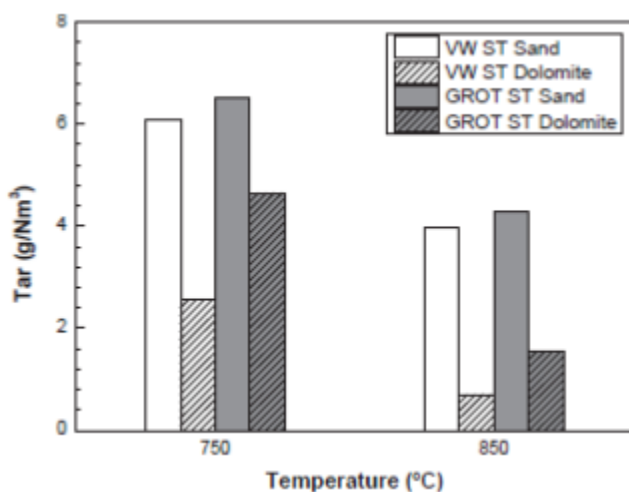


El mejor rendimiento lo tuvo el catalizador con 0.5% en peso de Rh en la menor cantidad de carga, en él se dio la mayor producción de H_2 dejando como conclusión que el catalizador de metal debe ser dispersado en la superficie de la zeolita con un tamaño de partícula más pequeño con el fin de obtener sitios más activos, pues con el aumento de la cantidad de carga, podría ocurrir la sinterización de partículas de metal durante la calcinación, dando como resultado la disminución de los sitios catalíticamente activos; en cuanto a la actividad catalítica y el posible rehúso del catalizador, la producción de H_2 y el rendimiento del catalizador disminuyeron ligeramente, además se observó un aumento en la cantidad de azufre lo que se cree que puede envenenar los poros activos disponibles de la superficie del catalizador sin embargo esto sucedió en la 3ª reutilización del material, por lo que se cree que pudiera ser conveniente para disminuir los costos de producción de gas de síntesis.

Ca Mg(CO₃) Dolomita

C. Berruero, Et al (11 de Enero 2014), investigaron el efecto de la dolomita y arena como catalizadores, y el efecto de la temperatura en la destrucción de alquitranes en un gasificador de lecho fluidizado, utilizando una mezcla de O₂/vapor como agente gasificante, con tamaños de partícula del catalizador de 150 – 200 μm, y una composición de dolomita de: 30.2% de CaO, 21.6% de MgO, 0.06% de Al₂O₃, 0.1 de SiO₂, 0.03% de Fe₂O₃ y 44.4% de carbonato (como CO₂). Como resultado los datos muestran una disminución significativa en el contenido de alquitrán cuando se utilizó dolomita como material del lecho, siendo este efecto más significativo a temperatura más alta utilizada (850° C) pues el contenido de alquitrán se redujo de 2.6 g/Nm³ a 750° C a 0.7 g/Nm³ a 850 °C durante VW-ST y 4.3 a 1.6 g/Nm³ para GROT-ST. Lo que concluye a la Dolomita como buen catalizador de craqueo de alquitranes, sin embargo los autores detallan que en cada experimento realizado a nuevas condiciones de operación cambiaban la dolomita, lo que no permite saber hasta que temperatura permanece estable ni en qué tiempo comienza a presentarse la desactivación debido al depósito de carbono en la superficie del catalizador.

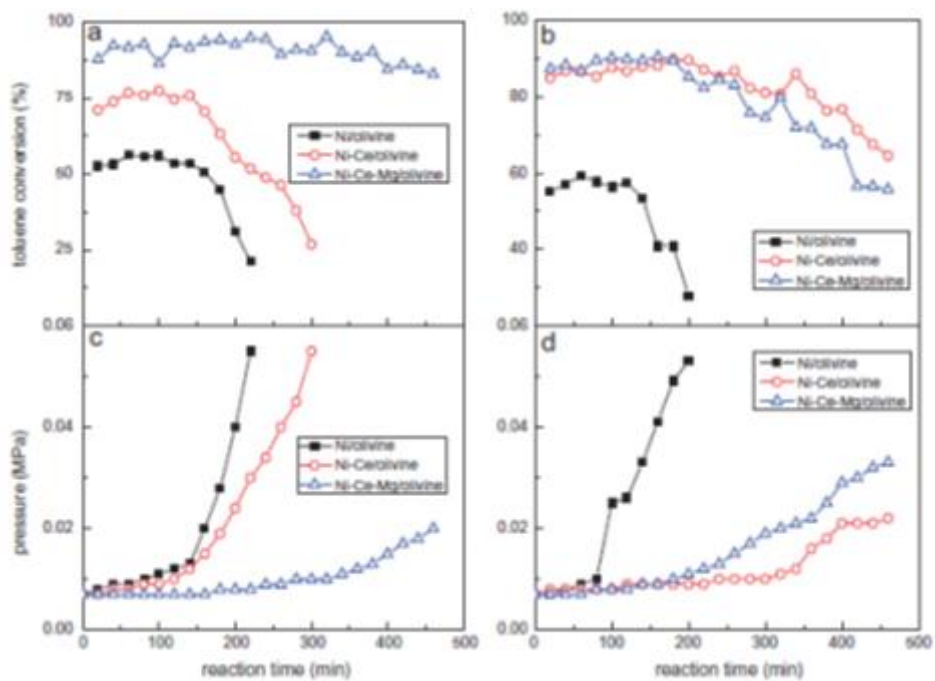
FIGURA 15. EFECTO DE LA TEMPERATURA Y EL CATALIZADOR DOLOMITA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE ALQUITRANES A 0.5 MPA



Ni-Ce- Mg/Olivino

Ruiqin Zhang, Et al (Febrero 2014), evaluaron la conversión de reformado de vapor con tres catalizadores a base de Níquel: Ni / olivino, Ni-Ce/olivino y Ni-Ce-Mg/olivino, utilizando Tolueno como compuesto modelo para el alquitrán, en sus resultados la adición de Ce al catalizador Ni-Mg/olivino tiene la mayor conversión de tolueno y exhibe un rendimiento constante hasta 400 min a 790 °C, los autores describen que quizá dicho comportamiento se debe a el enlace de Mg y Ce lo que sugiere que en el estado MgO y CeO₂ pueden inhibir la acumulación de grafito en la superficie del catalizador lo que prolonga su desactivación.

FIGURA 16. TIEMPO DE REACCIÓN EN REFORMADO DE VAPOR DE TOLUENO Y SU EFECTO CON LA PRESIÓN



3.8 COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE GASIFICACIÓN

En base a los datos recabados y mostrados con anterioridad, se hace una comparación de las tecnologías en base a los datos recabados con el fin de facilitar la propuesta que se planteará en capítulos posteriores.

1. POR TIPOS DE GASIFICADOR





2. POR LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

TEMPERATURA

...

- Es el factor principal para que exista una buena conversión de biomasa, propiamente la gasificación comienza cuando se alcanzan temperaturas mayores a los 700° C y dependiendo el tipo de gasificador puede llegar a un límite de 1200° o más.

PRESIÓN

...

- La Presión también juega un papel muy importante, el aumento de la presión conduce al aumento en la producción de alquitranes de alta densidad parecidos al coque y difíciles de romper, por lo que es recomendable trabajar con presiones bajas, regularmente atmosféricas.

TIEMPO DE RESIDENCIA

...

- Los tiempos de residencia en la gasificación son muy cortos o rápidos, duran pocos segundos, también varían de acuerdo al gasificador utilizado, normalmente varían por milésimas de segundos; 1.6 segundos es el tiempo propiamente de la gasificación.

% DE HUMEDAD

...

- El % de humedad de la biomasa ideal es de 10.6 %, un porcentaje mayor conduce a la pérdida de energía durante la evaporación de agua, y un porcentaje menor también conduce a un gasto excesivo de energía mediante otros procesos de secado.

RELACIÓN BIOMASA/AGENTE GASIFICANTE

...

- La relación Biomasa/Agente Gasificante es incierta o carece de estudios, uno de éstos detalla que a una $F=1.5$ a 1200° se da una tendencia lineal y la mínima producción de alquitranes; lo que se puede deducir que conforme el valor de la relación aumenta el proceso se aproxima a una pirólisis y el combustible deja de reaccionar.



3. POR TIPOS DE CATALIZADOR

Dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	<ul style="list-style-type: none">• Es un mineral compuesto por carbonato de calcio y magnesio, comunmente es utilizada para la fabricación de materiales refractarios. Se concluye como buen catalizador para la gasificación en un tamaño de partícula de 150 - 200 μm, mostrando la reducción de alquitranes en el gas de síntesis; sin embargo no se tiene dato de temperatura máxima a la que permanece estable.• Adicionando metales como Ni y Ce, se concluye que aumenta la estabilidad del catalizador debido en palabras de los autores a que la adición de los metales inhibe la acumulación de grafito en la superficie y la desactivación del catalizador.
Olivino $(\text{Mg, Fe})_2 \text{SiO}_4$	<ul style="list-style-type: none">• Es un mineral en la familia de los Silicatos rico en magnesio y hierro, comunmente utilizado para la extracción de magnesio o para la purificación del hierro. Los estudios analizados concluyen que para la gasificación es considerado un mal catalizador ya que se desactiva a las temperaturas de ésta.
Alúmina Al_2O_3	<ul style="list-style-type: none">• Es el Oxido de Aluminio utilizado mayormente como aditamento para los aislantes térmicos y para fabricar esmaltes o cerámicas. El estudio analizado refiere la adición de metales (Ni, La, Fe) que concluye como "buen" catalizador pues disminuye eficazmente los alquitranes presentes, sin embargo no se detallan valores concretos de esto, además que no se tiene certeza de la estabilidad.• En adición con metales de Ni y Co, se observó un mejor rendimiento del catalizador al disminuir la producción de coque y alquitranes presentes en la gasificación.
Zeolita T_1O_4	<ul style="list-style-type: none">• Son minerales aluminosilicatos microporosos que destacan por su capacidad de hidratación y deshidratación reversible. En su fórmula TO_4 T es el catión puede ser silicio, aluminio, etc; en el caso con adición de Rh se da un buen aprovechamiento tanto del catalizador como en la producción de gas de síntesis, su actividad catalítica continúa hasta la 3a reutilización del material.



CAPÍTULO 4. GENERALIDADES DE LAS ESCORIAS

Una escoria es un subproducto en estado líquido fundido, de un proceso primario de recuperación de un metal o en el proceso de refinación del mismo; es una mezcla de óxidos metálicos (SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , FeO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O) y pequeñas proporciones de sulfuros, fluoruros, fosfatos, nitratos, carburos y boratos. La escoria es presentada una vez fría como un mineral sólido rugoso y es clasificada según el proceso metalúrgico de dónde provino (alto horno, horno de arco eléctrico, horno eléctrico de inducción, horno básico de oxígeno), también puede clasificarse dependiendo del material recuperado (acero, hierro y cobre).

4.1 COMPOSICIÓN DE ESCORIA DE ACERO Y HIERRO FUNDIDO

La variación en la composición química de las escorias depende del proceso siderúrgico aplicado y del tipo de metal extraído, en la siguiente tabla se muestra la variación en la composición de acuerdo a esto.

TABLA 3. VARIACIÓN DE LA COMPOSICIÓN EN LAS ESCORIAS DE ACUERDO AL TIPO DE HORNO

Compuesto	Horno básico de Oxígeno	Horno de Arco Eléctrico	Alto Horno
CaO	44-50	13-38	32-48
SiO ₂	10-15	8-30	32-42
Al ₂ O ₃	<2	3-27	7-16
MgO	1-9	4-15	5-15
FeO	1-20	10-18	1-1.5
MnO	<4	0.1-6.5	<1
P ₂ O ₅	1-3	<1	0.2-1
Cr ₂ O ₃	<1	<1	
S	0.5-1	0.02-0.2	1-2

Sin embargo, para un mismo acero, las composiciones químicas de las escorias de alto horno son bastantes similares. Los coeficientes de variación del SiO_2 , CaO y Al_2O_3 son inferiores al 2 %. Para el MgO alcanza valores del 6,5 % y para el $\text{NaO} + \text{KO}$ está alrededor del 20 %. En general, las mayores desviaciones se obtienen para los elementos que están presentes como trazas.

Las tablas siguientes son datos proporcionados del Instituto de Investigación y Materiales de reportes de un análisis por Difracción de Rayos X de dos muestras de Escoria de Aceración, uno correspondiente a escoria de Horno Básico de Oxígeno (por sus siglas en inglés BOF) y el otro de escoria de Alto Horno, provenientes de la siderúrgica de Lázaro Cárdenas, Michoacán.



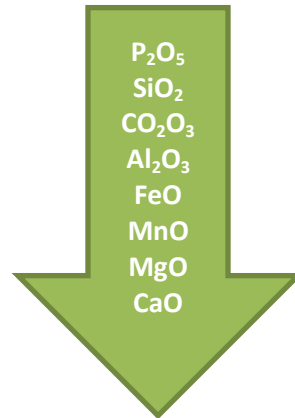
Tabla 4. Composición de 2 muestras de diferentes tipos de horno por Difracción de Rayos X

ESCORIA DE BOF		ESCORIA DE ALTO HORNO	
COMPUESTO	% PESO	COMPUESTO	% PESO
CaO	44.00	CaO	57.6
MgO	8.15	Fe ₂ O ₃	13.67
SiO ₂	14.00	SiO ₂	12.04
MnO	5.90	MgO	7.19
FeO	23.00	Al ₂ SO ₃	3.41
Lb ₂	3.20	SO ₃	2.12
P	0.60	MnO	1.41
S	0.10	V ₂ O ₅	0.66
Al ₂ O ₃	1.20	P ₂ O ₅	0.63
		Na ₂ O	0.54
		TiO	0.45
		Cl	0.15
		K ₂ O	0.09
		ZnO	0.04
		SrO	0.02



4.2 ÍNDICES DE ACIDEZ/BASICIDAD

En las soluciones acuosas los ácidos son aceptores, mientras que en las bases son donadores del ión hidronio de acuerdo con el concepto de Brønsted-Lowry, en las escorias se utilizan los mismos términos pero referidos a los óxidos.



ÍNDICE DE ACIDEZ A BASICIDAD PARA LOS COMPONENTES DE LA ESCORIA

El carácter acido-base de un óxido aislado se puede cuantificar mediante la energía de enlace metal-oxígeno, el carácter ácido está íntimamente relacionado con su capacidad relativa para producir O^{2-} cuando están disueltas en la escoria, la base fuerte CaO se puede disociar completamente en los cationes metálicos y los iones oxígeno, por el contrario el SiO_2 , ácido fijo, no tiene tendencia a disociarse en los iones silicio y oxígeno, en realidad consume iones oxígeno cuando está disuelto en la fase fundida.

Las escorias en la fundición de hierro y acero son de tal importancia que a los procesos de los suele llamar ácido-básicos, sin embargo, se han realizado formulas empíricas para medir la basicidad o acidez de la escoria y generalmente se utiliza la relación másica de calcio:

$$basicidad = \frac{CaO}{SiO_2}$$

Teniendo que: > 2 se considera una escoria básica

$1-2$ se considera una escoria semibásica

< 1 se considera una escoria ácida

El contenido de CaO y SiO_2 puede determinarse mediante la técnica de FRX²⁶ o un análisis elemental.

²⁶ FRX: Fluorescencia de Rayos X



4.3 CAPACIDAD DE ADSORCIÓN

Las escorias de hierro y acero demuestran ser muy eficientes para adsorber sustancias, por ello han sido utilizadas en el tratamiento de agua residual, como adsorbentes de bajo costo siendo una alternativa al carbón activado granular. Sin embargo la capacidad de adsorción de las escorias depende del pH y la hidratación de los componentes de la escoria, que en solución acuosa aumentan su pH a alcalino, en estas condiciones la escoria está cargada negativamente por lo tanto adsorbe cationes como sodio y metales, el mecanismo de intercambio iónico es rápido y reversible y las condiciones de equilibrio existen entre los cationes solubles e intercambiables.

4.4 CAPACIDAD CATALÍTICA

El uso de la escoria como catalizador está despuntando recientemente, sus características físicas y químicas han despertado el interés de investigar su capacidad de catalizar ciertas reacciones como la descomposición de peróxido de hidrogeno en radicales hidroxilo para oxidar sustancias orgánicas, la escoria en estado de fusión tiene la capacidad de disolver cantidades considerables de gases y éstas tienden a desintegrarse en gránulos al enfriarse.

CAPÍTULO 5. IMPLEMENTACIÓN EN EL GASIFICADOR

Para la República Mexicana a través de la CONAFOR se desarrolló el Programa Nacional de Dendroenergía (2007-2012) dónde se pretende fomentar el aprovechamiento óptimo de la energía producida a partir de combustibles procedentes de bosques, selvas y zonas áridas, así como fomentar la investigación, desarrollo y transferencia de tecnología en materia de producción dendroenergética, e Integrar la producción de Dendroenergía en el Manejo Forestal Sustentable.

En base a ello, se desarrollaron los 4 estudios mencionados en el capítulo 1 que pretenden determinar las opciones más viables de uso con fines energéticos de los residuos de aprovechamientos y aserraderos; sabiendo que con datos de la SEMARNAT Los residuos de aprovechamiento forestal y aserrío representan más del 50% del volumen del arbolado que se aprovecha, dichos residuos tienen un uso limitado, representando un “problema” su manejo en la mayoría de los casos y desperdiciando un potencial muy importante en las tendencias actuales de generación de energías renovables.

FIGURA 19. UBICACIÓN DE PROYECTOS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOMASA FORESTAL



Fuente: CONAFOR



De estos 4 proyectos solo 1 corresponde al método de gasificación de biomasa de residuos forestales que se lleva a cabo en el estado de Durango, región en donde se producen anualmente alrededor de 88 000 toneladas de residuos de aserrío y dónde se podría producir anualmente entre 7 y 11 MW de energía eléctrica suficiente para abastecer a 100 mil hogares.

5.1 GASIFICADOR UNAM

El Instituto de Ingeniería de la UNAM cuenta con una planta piloto de Gasificación ubicada en el jardín botánico de Ciudad Universitaria, el gasificador es del tipo downdraft de flujos paralelos con una capacidad de generación de energía de 250-300KW y capaz de procesar un flujo de alimentación de 10-40 kg/h de biomasa.

FIGURA 20. VISTA FRONTAL DEL GASIFICADOR DE BIOMASA DE CU



Fuente: Tesis Durán Moreno Efen



5.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO

El recurso biomásico es transportado mediante un tornillo sinfín desde la tolva almacenadora de biomasa hasta la boquilla de alimentación del gasificador, donde es depositada en el lecho biomásico acción de la gravedad. El agente gasificante a 500° C (aire) es alimentado en cuatro boquillas simétricamente colocadas a la misma distancia por medio de un intercambiador de calor con los gases efluentes del gasificador. Las reacciones son llevadas a cabo en esta etapa y empieza la producción de los gases efluentes (una mezcla de N₂, H₂, CO₂, CO, CH₄, alquitranes) que son transportados a un ciclón dónde son separados los sólidos arrastrados disueltos en los gases para posteriormente llevarlos al lavador de gases que actúa con agua de lavado a contracorriente que a la vez disminuye la temperatura que trae consigo el gas de los procesos anteriores, y pasa a la última zona de filtrado que asegura el mayor retiro de partículas en el gas de síntesis y el acondicionamiento del gas para las especificaciones requeridas en el motor de combustión interna que producirá energía mecánica y electricidad.



5.4 REQUERIMIENTO DEL SYNGAS PARA TRABAJAR EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA²⁷

Cuando se emplea un gasificador junto con un Motor de Combustión Interna se tienen los siguientes requerimientos en el syngas:

- Debe tener como mínimo un poder calorífico de 4.2 MJ/Nm³ para mantener una eficiencia razonable
- Debe ser lo suficientemente libre de polvo, alquitranes y ácidos, las cantidades tolerables de estas sustancias varían dependiendo del motor, aunque como referencia se puede considerar:

Partículas	50 mg/m ³
Tamaño de Partícula	3 – 10 micras
Alquitranes	100 mg/m ³
Ácidos	50 mg/m ³

5.5 PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN EN EL GASIFICADOR DE CIUDAD UNIVERSITARIA

Como ya se observó en capítulos anteriores, el panorama mundial de la tecnología de gasificación ha tenido mayor impacto en los últimos años a nivel mundial; los países desarrollados o en vías de desarrollo, optan por las alternativas de ahorro de energía mediante desarrollo de procesos que cuenten con la viabilidad económica sustentable y además eficiente, que contribuyan tanto al sector económico como al ambiental.

México cuenta con pocos avances dentro de la tecnología de Gasificación, la mayoría de ellos enfocados al modelado y a la simulación del proceso; mientras que en otros países ya se investiga sobre todos los efectos termodinámicos en base a los parámetros de operación del propio gasificador, para su autoabastecimiento.

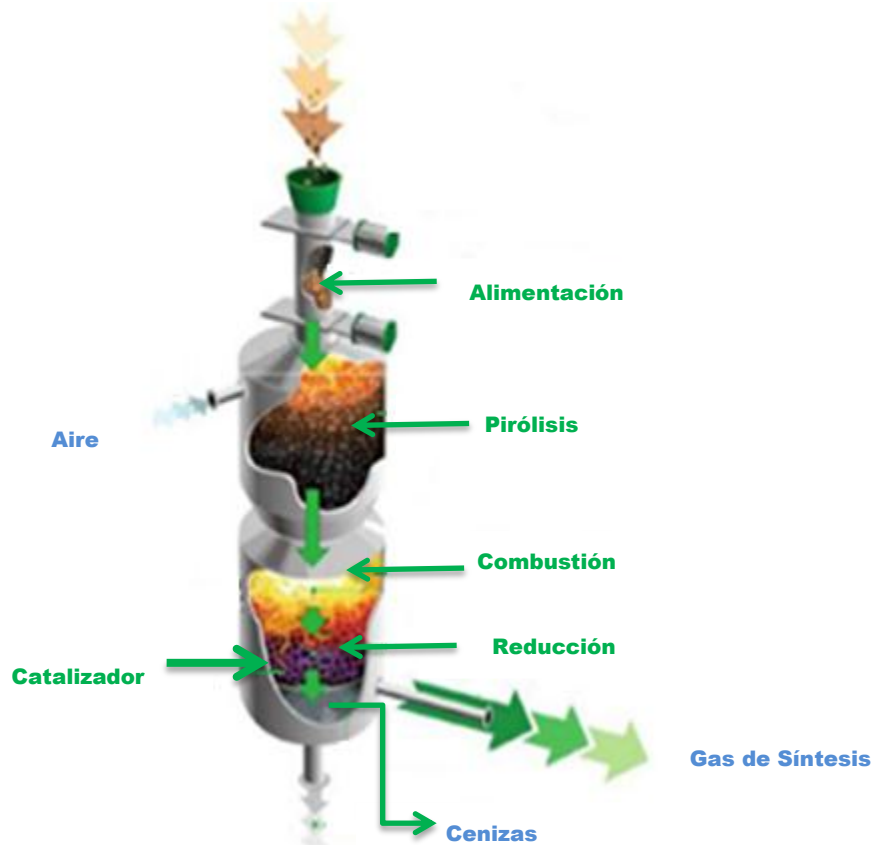
Es por ello se realizó este trabajo y con base a la investigación realizada, se propone dar una alternativa en el proceso de gasificación para que en un futuro pueda validarse experimentalmente.

En términos generales, la eficiencia de este proceso es muy baja, pues se está desperdiciando mayor energía de la que se puede generar; el paso intermedio entre la salida del gas de síntesis y la entrada al motor de combustión interna quizás podría ser eliminado si se encuentra un método eficiente que produzca un gas de síntesis con la menor cantidad de alquitranes posible y la permitida por las especificaciones del motor, evitando así costos de operación y desperdicios de energía. Esto sería si se pudiese encontrar la termodinámica perfecta que englobe a las reacciones endotérmicas y exotérmicas que autoabastezcan el gasto de energía necesario para obtener la mayor extracción de gases en el proceso de gasificación.

²⁷ Tesis: Fonseca González Natalia. Motores de Combustión Interna Alternativos. CIEMAT

5.7 PROPUESTA DE ADICIÓN DE ESCORIA DE ACERACIÓN DE ALTO HORNO PARA EL PROCESO

En relación a la biomasa, los estudios realizados indican que los pellets de madera, aserrín, o desechos forestales, generan combustibles con cantidades aceptables de gases útiles en comparación con otro tipo de biomasa. El porcentaje de humedad para el gasificador estudiado se encuentra entre el rango de 10-30%, lo que es un rango elevado, el porcentaje óptimo de humedad es de 10.62% (Juan F. Pérez), quizás disminuir el rango de 10-15% de humedad sería más conveniente, tal vez exponiendo los pellets de madera a los rayos directos del sol por cierto tiempo, se logre evaporar la mayor cantidad de agua en los poros y así asegurar estar dentro del intervalo propuesto; el tamaño de partícula para tener una mayor área de transferencia debe ser de 2 – 6 mm (Juan F. Pérez) y puede ser obtenido mediante el molino de cuchillas existente en la planta piloto y asegurando la homogeneidad de estas con un tamiz que permita ese diámetro.



Se tiene un gasificador downdraft de corrientes paralelas lo que asegura un bajo contenido de alquitranes por su diseño, sin embargo este valor aún no es lo necesariamente bajo para las condiciones de uso, obviamente el diseño no se puede cambiar, pero si se puede adicionar un catalizador que promueva las reacciones de craqueo de alquitranes; en capítulo 3 se detallaron los principales catalizadores utilizados en la gasificación y su desempeño que tuvieron en ella.



Como conclusión general se obtuvo que los catalizadores con adiciones de metales soportan mayormente las condiciones de operación dentro del gasificador, tienen un tiempo de desactivación más largo que los minerales por sí solos, todos ellos son adsorbentes sin embargo la adición de metales “retarda” la impregnación en la superficie del catalizador y promueve las reacciones de craqueo de los alquitranes; por otro lado la escoria de aceración es una mezcla de óxidos metálicos que también presenta propiedades adsorbentes, que bien podría funcionar como catalizador en el proceso.

En cuanto a las condiciones de operación, se sabe que el aumento de la Presión conduce a un aumento en la generación de alquitranes, por lo que la idea de presurizar el proceso es nula; el aumento de la temperatura viene ligado al craqueo sin embargo de acuerdo con los reportes analizados existe una zona en la que la conversión no parece variar (900 – 1100 °C) con la creencia de que la acumulación de alquitranes o coque genera enlaces fuertes que vuelve a “iniciar” el proceso de craqueo pasando esas temperaturas, quizás el ocupar como catalizador la escoria de acero mejore estas condiciones dado que tiene una gran cantidad de metales que como en las experiencias reportadas genere enlaces que permitan el craqueo en menor tiempo y a menor temperatura.

El agente gasificante seguiría siendo el mismo (aire a 500°C) y la relación biomasa/agente gasificante sería $F=1.5$ pues conforme el valor de la relación aumenta el proceso se aproxima a una pirólisis y el combustible deja de reaccionar.

El tiempo de residencia es muy corto, se demostró que tiempos mayores a 1.6 segundos no mostraron cambios en la producción de gas de síntesis, lo que concluye que la gasificación había terminado; así que tiempos mayores a eso se estaría desperdiciando energía. Así que la propuesta quedaría de la siguiente manera:

Recurso biomásico: Pellets de madera (2-6 mm) con 10-15% de humedad

Agente Gasificante: Aire (500° C)

Relación Biomasa/Agente gasificante: 1.5

Catalizador: Escoria de aceración de alto horno

Presión: atmosférica

Tiempo de residencia: 1.6 segundos



CONCLUSIONES

El presente trabajo cumple con el objetivo de revisar el estado del arte en cuanto a la eliminación de alquitranes en la gasificación, con el fin de poder proporcionar datos de investigaciones que pudiesen facilitar trabajos posteriores que se enfoquen en la experimentación para eficientar el proceso.

El principal cuello de botella en el desarrollo de tecnologías basadas en la gasificación de biomasa para la producción de electricidad es el contenido de alquitranes presentes en el gas producto; en la bibliografía existen diferentes enfoques en cuanto al tema de reducción de alquitranes, la mayoría de los estudios recabados para este trabajo se encuentran enfocados al abatimiento de alquitranes “in situ” ya sea mediante craqueo o reformado, hasta ahora el método que se necesita eficientar.

El uso de catalizadores es la manera más prometedora para eficientar la tecnología, basado en que se puede generar un gas producto de calidad si se optimiza el funcionamiento del gasificador; los materiales de lecho hasta ahora utilizados en su mayoría son minerales que incluyen metales en su composición (alúmina, olivino, dolomita, etc.), sin embargo no todos ellos cumplen con la actividad catalítica necesaria para asegurar una buena conversión de biomasa que conduzca al equilibrio beneficio-costos. De todos ellos destaca la zeolita TO_4 donde “T” es el metal catalíticamente activo que cumple con la función de romper los enlaces y liberar la mayor parte de los gases presentes, por ésta experiencia es que se propone la escoria de aceración como material del lecho, además que, por sus propiedades como material adsorbente y su índice de basicidad que puede llegar a presentar se piensa que podría cumplir con la función de un buen catalizador.

La naturaleza de los alquitranes (cantidad y composición) depende del diseño del gasificador, y es explicado a través de los efectos fluido-dinámicos, de mezclado y de concentración local de oxígeno existente para cada diseño, eso no está en tela de juicio y no es el enfoque de éste trabajo, sin embargo con los estudios analizados se direccionó a una propuesta en la configuración de las condiciones de operación en el proceso que desde mi punto de vista pudiesen beneficiar al producto final del proceso de la gasificación.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**WEB**

1. Renewables 2012 Global Status Report. REN21. 2012. (Paris: REN21 Secretariat).
2. Renewables 2013 Global Status Report. REN21. 2013. (Paris: REN21 Secretariat).
3. "Prospectiva de Energías Renovables 2012-2016". SENER; México
4. Contexto Mundial y Nacional de los Bioenergéticos. SENER Septiembre de 2012
5. International Energy Agency. 2012. World Energy Balances.http://www.iea.org/stats/balancetable.asp?country_code=29
6. <http://www.ocean-energy-systems.org/>
7. Instituto de Investigaciones Eléctricas. de la SENER:
<http://vmwl1.iae.org.mx/sitioIIE/sitio/indice.php>
8. Renewables 2012, Global Status Report (REN 21)
http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/%20GSR_2012%20highres.pdf
9. El Desarrollo de los Biocombustibles en México. www.iniciativasustentable.com.mx
10. Prontuario Estadístico del Sector Energético. Febrero 2013. De la SENER
11. Terminología Unificada sobre la Bioenergía. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Diciembre 2004

ARTICULOS CIENTÍFICOS

12. **Fiorenzo Ambrosino**, Et al, Entrained-flow gasification of coal under slagging conditions: Relevance of fuel-wall interaction and char segregation to the properties of solid wastes. *Fuel*, Vol. 114, Diciembre 2013.
13. **C. Berruenco**, Et al; Effect of temperature and dolomite on tar formation during gasification of torrefied biomass in a pressurized fluidized bed, *Energy*, Enero 2014.
14. **Ruiqin Zhang**, Et al; Catalytic reforming of toluene as tar model compound: Effect of Ce and Ce-Mg promoter using Ni/olivine catalyst. *Chemosphere*, Vol. 97, Febrero 2014.
15. **Malinee Kaewpanha**, Et al; Steam reforming of tar derived from the steam pyrolysis of biomass over metal catalyst supported on zeolite. *Revista del Instituto de Taiwán de Ingenieros Químicos*, Volumen 44, No.6, noviembre 2013.
16. **Carolina Font Palma**; Modeling of tar formation and evolution for biomass gasification: A review. *Applied Energy*, Vol. 111, November 2013.
17. **Fernanda M. Josuinkas**, Et al; Steam reforming of model gasification tar compounds over nickel catalysts prepared from hydrocalcite precursors. *Fuel Processing Technology*, Vol. 121, May 2014.
18. **Lei Wang**, Et al; Catalytic performance and characterization of Ni-Co catalysts for the steam reforming of biomass tar to synthesis gas *Fuel*, Vol. 112, Octubre 2013.
19. **Young-Kwang Kim**, Et al; Low-temperature catalytic conversion of lignite: 3. Tar reforming using the supported potassium carbonate. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 20, Enero 2014.



20. **Min Lu**, Et al; The study of bimetallic Ni-Co/cordierite catalyst for cracking of tar from biomass pyrolysis. *Renewable Energy*, Volume 60, Diciembre 2013.
21. **Hans O.A. Fredriksson**; Et al; Olivine as tar removal catalyst in biomass gasification: Catalyst dynamics under model conditions. *Applied Catalysis B: Environmental*, Vols. 130–131, Febrero 2013.
22. **J.J. Hernández**, Et al; Characterization of tars from biomass gasification: Effect of the operating conditions. *Energy*, Vol. 50, Febrero 2013.
23. **Jianfen Li**, Et al; Experimental study on catalytic steam gasification of municipal solid waste for bioenergy production in a combined fixed bed reactor *Biomass and Bioenergy*, Vol. 46, Noviembre 2012.
24. **Ke Qin**, Et al; High-temperature entrained flow gasification of biomass. *Fuel*, Vol. 93, Marzo 2012.
25. **Anawat**, Et al; The Development of Ni/Dolomite Catalyst in Simultaneous Biomass Gasification and Reforming in Fluidized Bed. *American Journal of Environmental Sciences*, Vol. 3, 2009.
26. **Juan F. Pérez**, Et al; Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study. *Fuel*, Vol. 96, Junio 2012.
27. **Jinsong Zhou**, Et al; Biomass–oxygen gasification in a high-temperature entrained-flow gasifier. *Biotechnology Advances*, Vol. 27, Octubre 2009.
28. **Matthias Mayerhofer**, Et al; Influence of pressure, temperature and steam on tar and gas in allothermal fluidized bed gasification. *Fuel*, Vol. 99, September 2012.
29. **Paula H. Blanco**, Et al; Characterization and evaluation of Ni/SiO₂ catalysts for hydrogen production and tar reduction from catalytic steam pyrolysis-reforming of refuse derived fuel. *Applied Catalysis B: Environmental*, Vols. 134–135, Mayo 2013.
30. **Mustafa Balat**, Et al; Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, Diciembre 2009.

TESIS

31. Rogel R. Alejandro; Estudio numérico experimental de un gasificador estratificado que opera con biomasa utilizando CFD. UNAM 2007
32. Nazario Deviana Et al; Modelado matemático para un equipo de gasificación que opera con residuos sólidos biomásicos (madera). UNAM 2005
33. Velasco C. Adriana; Propuesta conceptual de un sistema de gasificación de residuos sólidos urbanos integrado a un sistema de generación de energía, UNAM 2008
34. Barrera G. Mario; Instrumentación de una planta piloto de gasificación de residuos biomásicos de 250 KWe. UNAM 2008
35. Vargas C. Griselda; Estudio Exploratorio de la gasificación de biomasa para la producción de Hidrógeno. IPN 2008
36. Huanosta G. Thalía; Aprovechamiento de escorias como adsorbentes y catalizadores para remover Fenol. UNAM 2009
37. De la Rosa U. Daniel; Estudio de la producción de gas de síntesis en un gasificador que opera con residuos sólidos. UNAM 2010
38. Durán M. Efrén; Estimación de la generación de alquitranes obtenidos en la gasificación de biomasa para uso en motores de combustión interna. UNAM 2013



BIBLIOGRAFÍA



39. Aspiazu M. Arturo; Estado del arte en la tecnología de pirólisis rápida de biomasa para la producción de biocombustibles. UNAM 2013
40. Fonseca G. Natalia; Motores de Combustión Interna Alternativos. CIEMAT 2003