



**Estudio para la determinación de rutas de conversión de biomasa lignocelulósica
hacia la producción de biocombustibles**

Manobanda Navas, Geanine Lisbeth

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Trabajo de Unidad de Integración Curricular, previo a la obtención del título de
Petroquímico

Ing. Luna Ortiz, Eduardo David

13 de abril del 2021



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE PETROQUÍMICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de integración curricular, '**Estudio para la determinación de las rutas de conversión de biomasa lignocelulósica hacia la producción de biocombustibles**' fue realizado en su totalidad por la señorita **Manobanda Navas, Geanine Lisbeth** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 13 de abril del 2021



Firmado electrónicamente por:

**EDUARDO
DAVID LUNA**

Ing. Luna Ortiz Eduardo David

C.C.: 1802724912








Reporte de verificación

Curiginal

Document Information

Analyzed document	MANOBANDA_GEANINE_BIOCOMBUSTIBLES.pdf (D101550632)
Submitted	4/14/2021 6:00:00 AM
Submitted by	Luna Ortiz Eduardo David
Submitter email	edluna@espe.edu.ec
Similarity	2%
Analysis address	edluna.espe@analysis.urkund.com

Sources included in the report

W	URL: http://www.fao.org/3/as418s/as418s.pdf Fetched: 4/14/2021 6:01:00 AM	 3
SA	TESIS HECTOR CHONG.pdf Document TESIS HECTOR CHONG.pdf (D41074680)	 1
SA	Una revisión sobre la producción de biocombustibles y su situación en el mundo.docx Document Una revisión sobre la producción de biocombustibles y su situación en el mundo.docx (D54748055)	 1
SA	PROCESO DE GASIFICACION.pdf Document PROCESO DE GASIFICACION.pdf (D92754699)	 1
W	URL: https://docplayer.es/78323506-Instituto-politecnico-nacional.html Fetched: 10/9/2019 1:45:27 PM	 1
SA	CONVERSIÓN DE LA BIOMASA SÓLIDA MEDIANTE LA PIROLISIS_.pdf Document CONVERSIÓN DE LA BIOMASA SÓLIDA MEDIANTE LA PIROLISIS_.pdf (D92760344)	 2
W	URL: http://tauja.ujaen.es/bitstream/10953_1/12079/1/Memoria_JM,Espinosa.pdf Fetched: 2/11/2021 6:34:08 PM	 1
W	URL: https://digital.csic.es/bitstream/10261/156819/1/TD_Esteban_D%C3%A1ez_Gonzalo.pdf Fetched: 4/14/2021 6:01:00 AM	 1
SA	Tesis Comparacion del proceso de pirolisis de dos biomosas(1).pdf Document Tesis Comparacion del proceso de pirolisis de dos biomosas(1).pdf (D53931696)	 5
W	URL: https://www.researchgate.net/profile/Dimas_Rua-Orozco/publication/317099547_Bioene Fetched: 7/30/2020 3:52:14 PM	 2
SA	Intriago Fuentes, J., Examen Complexivo UTE A 2020.docx Document Intriago Fuentes, J., Examen Complexivo UTE A 2020.docx (D78787326)	 1



Verificado y certificado por:
EDUARDO
DAVID LUNA



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE PETROQUÍMICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Manobanda Navas, Geanine Lisbeth** con cédula de ciudadanía N.º 1725984643, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: '**Estudio para la determinación de las rutas de conversión de biomasa lignocelulósica hacia la producción de biocombustibles**' es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 13 de abril del 2021

Manobanda Navas Geanine Lisbeth

C.C.: 1725984643



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE PETROQUÍMICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Manobanda Navas, Geanine Lisbeth**, con cédula de ciudadanía N.º 1725984643, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: '**Estudio para la determinación de las rutas de conversión de biomasa lignocelulósica hacia la producción de biocombustibles**' en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 13 de abril del 2021

Manobanda Navas Geanine Lisbeth

C.C.: 1725984643

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a:

A mí, por el arduo esfuerzo realizado durante muchos años para lograr cumplir un propósito más.

A mi papá por apoyarme siempre en el cumplimiento de mis metas y propósitos.

A mis tíos (Rosa y Edgar) por siempre brindarme un espacio en su casa y apoyarme en cada paso académico que he realizado.

A mis primos (Erika, Ronny, Andrea y Lian) por ser mis hermanos y acompañarme en cada momento que he necesitado.

A mi abuelita (Luz) por ser mi madre y educarme de la mejor manera que pudo.

Agradecimientos

Estoy totalmente agradecida con mi papá, tíos y hermanos, pues su apoyo emocional y económico ha sido fundamental para mi desarrollo personal y profesional, también quiero agradecer a un ser de luz que siempre me acompañó y en los momentos más oscuros fue la guía y fuerza para seguir, a mi abuelita.

Le agradezco también a todos los buenos docentes que me compartieron sus grandes conocimientos, consejos y valores, la lista es pequeña pero su aporte fue enorme, muchas gracias Ing. Fredy Basantes, Ing. Isabel Pazmiño, Ing. Catherine Donoso, Dr. Roman Rodríguez y Dr. Pablo Tuza.

También quiero agradecerle enormemente al Ing. David Luna por ser un amigo y maestro, por haberme apoyado en el desarrollo de este trabajo y haber confiado en mí sobre todas las cosas.

Finalmente, pero no menos importante, quiero agradecer a mis amigos Pablo, Andre, Vane, Katty, Nati, Dani y Jani, con quienes comparto un vínculo muy especial al cual valoro mucho y les agradezco por acompañarme y brindarme su apoyo en todo momento.

Índice de contenidos

Carátula	1
Certificación	2
Reporte de verificación	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimientos	7
Índice de tablas	12
Índice de figuras	13
Resumen	14
Abstract.....	15
Generalidades.....	16
Antecedentes	16
Planteamiento del problema	21
Justificación e Importancia	23
Objetivos	25
<i>Objetivo General</i>	25
<i>Objetivos específicos</i>	25
Hipótesis	25
Variables de investigación	26
<i>Variables independientes</i>	26
<i>Variables dependientes</i>	26
Marco teórico.....	27
Biorrefinería	27

<i>Clasificación de biorrefinerías</i>	27
Biorrefinería de cultivos integrales.	28
Biorrefinería verde	28
Biorrefinería lignocelulósica	28
Biorrefinería Bioquímica	29
Biorrefinería Termoquímica	30
Biomasa	30
<i>Clasificación de la biomasa</i>	31
<i>Propiedades de la biomasa</i>	31
Contenido de humedad	32
Valor calorífico	32
Proporciones de carbón fijo y volátil	33
Contenido de residuos y/o cenizas	33
Contenido de metales alcalinos.....	33
Relación celulosa/lignina	34
<i>Biomasa Lignocelulósica</i>	34
Características de la biomasa lignocelulósica	34
<i>Hemicelulosa</i>	35
<i>Celulosa</i>	35
<i>Lignina</i>	35
<i>Biomasa como potencial fuente de energía</i>	36
Uso de biomasa como combustible	37
Ventajas y desventajas del uso de biomasa como fuente de energía	37
Biocombustibles	38
<i>Ventajas del uso de biocombustibles</i>	39
<i>Tipos de biocombustibles</i>	39

Biocombustibles de primera generación	39
Biocombustibles de segunda generación.....	40
<i>Uso de biocombustibles de segunda generación.....</i>	40
Biocombustibles de tercera y cuarta generación.....	41
<i>Biocombustibles en el Ecuador</i>	41
Tecnologías de conversión de biomasa lignocelulósica a biocombustibles	42
<i>Procesos físicos.....</i>	42
<i>Procesos termoquímicos.....</i>	43
Combustión directa	43
Gasificación	44
<i>Reactores de gasificación</i>	46
Licuefacción.....	51
Pirólisis.....	52
Reformado en fase acuosa	54
<i>Procesos bioquímicos</i>	54
<i>Procesos híbridos</i>	56
<i>Procesos químicos.....</i>	57
<i>Procesos de perfeccionamiento de bioaceites</i>	57
Mejora de productos FT	57
Mejora de bioaceite de pirólisis	59
Otros procesos de mejora.....	60
<i>Posibles biocombustibles a partir de biomasa lignocelulósica.....</i>	61
Metodología	64
Modalidad de la investigación	64
Tipo de investigación	64
<i>Investigación documental-bibliográfica</i>	64

Diseño de la investigación	64
<i>Diseño documental-bibliográfico</i>	64
Nivel de investigación	65
<i>Nivel Exploratorio</i>	65
<i>Nivel Descriptivo</i>	65
Técnicas e instrumentos de recolección de información	65
Procesamiento de información.....	66
Discusión de resultados.....	66
Análisis e interpretación de resultados	67
Resultados de la investigación.....	67
<i>Producción de bioetanol</i>	67
<i>Producción de biodimetiléter</i>	71
<i>Producción de biohidrógeno</i>	74
Discusión de resultados.....	76
<i>Producción de bioetanol</i>	76
<i>Producción de biodimetiléter</i>	79
<i>Producción de biohidrógeno</i>	82
Conclusiones y Recomendaciones.....	88
Conclusiones	88
Recomendaciones	89
Bibliografía.....	90

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Ventajas y desventajas de la biomasa como fuente de energía</i>	38
Tabla 2 <i>Comparación entre procesos para la producción de bioetanol</i>	77
Tabla 3 <i>Características de las rutas de producción de DME</i>	80
Tabla 4 <i>Características de las rutas de producción de hidrógeno</i>	83

Índice de figuras

Figura 1 <i>Productos de una biorrefinería lignocelulósica</i>	29
Figura 2 <i>Tipos de gasificadores</i>	47
Figura 3 <i>Tipos de reactores de lecho fijo</i>	48
Figura 4 <i>Tipos de reactores de lecho fluidizado</i>	50
Figura 5 <i>Principales biocombustibles a partir de biomasa lignocelulósica</i>	62
Figura 6 <i>Esquema general del proceso de gasificación</i>	68
Figura 7 <i>Esquema general del sistema de fermentación de gas de síntesis</i>	71
Figura 8 <i>Esquema general de la síntesis de DME</i>	73
Figura 9 <i>Esquema de gasificación para producción de hidrógeno</i>	75

Resumen

En esta investigación se determinó bibliográficamente las rutas más viables de conversión de biomasa lignocelulósica hacia biocombustibles, con la finalidad de su implementación en el Ecuador aprovechando los residuos agroindustriales generados en la provincia de Cotopaxi. Se sabe que la producción de combustibles a lo largo de los años se ha centrado en el uso de material fósil que incide en la contaminación ambiental y el desarrollo económico de forma sectorial, por ello se han desarrollado avances tecnológicos e investigativos para la producción sostenible de combustibles a partir de biomasa; en primera instancia se estudió el uso de cultivos alimentarios como materia prima, sin embargo, su uso influyó negativamente en la producción de alimentos, por ello, recientes investigaciones se han centrado en el uso de biomasa lignocelulósica como materia prima para la obtención de combustibles sostenibles, en tal sentido este trabajo se enfocó en la recopilación y estudio de las principales rutas de conversión, analizando procesos termoquímicos, químicos, bioquímicos e híbridos, tales como gasificación, pirólisis, licuefacción, reformado en fase acuosa, extracción con agua supercrítica, fermentación, hidrólisis, fermentación de gas de síntesis, entre otros; a partir de toda la información recolectada se sugirió las mejores rutas de conversión tomando en cuenta condiciones de operación, tecnologías, viabilidad y aspectos ambientales como la emisión de CO₂.

Palabras clave:

- **BIOMASA**
- **BIOCOMBUSTIBLES**
- **RUTAS DE CONVERSIÓN**
- **VIABILIDAD**

Abstract

In this research, the most viable routes for the conversion of lignocellulosic biomass into biofuels were determined bibliographically, with the purpose of their implementation in Ecuador, taking advantage of the agro-industrial waste generated in the province of Cotopaxi. It is known that the production of fuels over the years has focused on the use of fossil material that affects environmental pollution and economic development in a sectoral way, therefore, technological and research advances have been developed for the sustainable production of fuels from biomass; in the first instance, the use of food crops as raw material was studied, however, its use had a negative influence on food production, therefore, recent research has focused on the use of lignocellulosic biomass as raw material for the production of sustainable fuels, In this sense, this work focused on the compilation and study of the main conversion routes, analyzing thermochemical, chemical, biochemical and hybrid processes, such as gasification, pyrolysis, liquefaction, reforming in aqueous phase, extraction with supercritical water, fermentation, hydrolysis, fermentation of synthesis gas, among others; From all the information collected, the best conversion routes were suggested, taking into account operating conditions, technologies, feasibility and environmental aspects such as CO₂ emissions.

Keywords:

- **BIOMASS**
- **BIOFUELS**
- **CONVERSION ROUTES**
- **VIABILITY**

Capítulo I

1. Generalidades

1.1 Antecedentes

La producción de combustibles fósiles en todo el mundo se ha basado en el uso de petróleo, un recurso no renovable que en los próximos 50 años podría verse agotado debido al consumo mundial excesivo, consumo que tiene un promedio de 89 millones de barriles por día (Kumari & Singh, 2018).

Los combustibles fósiles producidos a partir de petróleo representan el 80% de la energía primaria consumida en el mundo, de la cual el 58% es utilizada por el sector de transporte (Raud et al., 2019). Durante los últimos años se ha observado que el sector del transporte ha tenido un crecimiento rápido, tal es el caso que se estima que en 2030 existirá 1.3 billones de vehículos en las carreteras alrededor del mundo; actualmente este sector contribuye al 80% de las emisiones contaminantes a la atmósfera, además las demandas de combustibles fósiles se disparan y los recursos fósiles se agotan, por ello se ha llevado a cabo la búsqueda de fuentes de energía renovables a partir de recursos renovables que permitan cumplir con los requisitos energéticos futuros de manera sostenible (Nanda et al., 2014).

Es así que aparece el concepto de 'biocombustible', como una fuente de energía alternativa, renovable, sostenible y barata, tal es el caso de biohidrógeno, biodiésel, bioqueroseno, bioetanol, etc. Este concepto nace a partir de la idea de usar desechos de origen vegetal o desechos orgánicos (biodegradables), denominados biomasa, actualmente esta idea ha acaparado mucho la atención de investigadores que apuntan a la producción de biocombustibles a partir de biomasa como una tecnología alternativa que ayude al desarrollo económico y social de forma ecológica (Kumari & Singh, 2018).

A continuación, se mencionan algunas investigaciones que se han llevado a cabo entorno a la producción de biocombustibles a partir de biomasa, en donde se expone la metodología y los resultados que diferentes autores han encontrado en sus investigaciones.

Ma et al. (2012) recopilaron información de procesos termoquímicos para la conversión de biomasa lignocelulósica en China, un país que posee gran cantidad de biomasa, produce alrededor de 0.73 millones de toneladas de residuos agrícolas equivalente a 12000 billones de kJ de energía, esta biomasa durante muchos años se quemó directamente para la generación de energía eléctrica; no obstante, esta combustión permitió contribuir a la contaminación ambiental de forma significativa, por ello durante los últimos años, China puso en marcha el desarrollo de tecnologías que permitan convertir los diferentes tipos de biomasa en productos de alta calidad, por ejemplo biocombustibles de primera y segunda generación, todo con la finalidad de sustituir procesos y tecnología con base en petróleo para reducir las emisiones de contaminantes y sobrellevar el problema causado por el manejo de residuos. Los autores recalcan que China empezó la producción de combustibles de primera generación (etanol y biodiésel) a partir de maíz y de la transesterificación de aceites vegetales, sin embargo encontraron una limitación relacionada con la producción de alimentos debido a que el maíz y aceites vegetales sirve como alimento para 1300 millones de personas en ese país, debido a este problema surgió el concepto de combustibles de segunda generación, producidos a partir de biomasa no comestible, como residuos de cultivos o pastos, es decir biomasa lignocelulósica. La obtención de biocombustibles a partir de biomasa lignocelulósica en ese país está centrado en la investigación del desarrollo tecnológico de procesos termoquímicos mediante gasificación/ síntesis para producir metanol, dimetiléter (DME), mezclas de alcoholes y

gasolina/diésel mediante procesos Fischer Tropsch; el proceso de producción de combustibles líquidos se llevó a cabo mediante licuefacción indirecta, en donde la biomasa primero se gasifica para obtener gas de síntesis crudo, luego el gas de síntesis se transforma en combustibles usando diferentes tipos de catalizadores Fischer Tropsch, en sus resultados los autores mencionan que el proceso de gasificación de biomasa muestra una eficiencia energética baja y produce gases que tienen valores caloríficos bajos, no obstante, el proceso se ve mejorado al adaptar el componente de gas de síntesis con un proceso catalítico de Fischer Tropsch, obteniéndose hidrocarburos, DME y alcoholes mixtos con bajos índice de carbono y alto potencial de uso como combustibles. Dentro de nuevos procesos de interés mencionados en el artículo, los autores mencionan un método de biorrefinería que ha captado la atención mundial pues permite convertir la biomasa en biocombustibles que contienen hidrógeno y alcanos bajo condiciones de reformado en fase acuosa (APR por sus siglas en inglés), el proceso de APR para obtener biohidrógeno se lleva a cabo en agua líquida a temperaturas por debajo de 260°C, el criterio principal a tomarse en cuenta es el tipo de catalizador que se usa, el soporte y tipo de ensamblaje; existen estudios usando catalizadores de Pt, Ni, Ni-Sn soportados en óxido de magnesio y en soportes comerciales USY y SAPO-11, como resultados los autores mencionan que el Pt soportado en óxido de magnesio tiene alta selectividad de hidrógeno, por el contrario si los catalizadores se soportan en bases comerciales sufren desactivación por deposición de carbono.

En la investigación de Kumar et al. (2019) se describe ampliamente el tema de biorrefinerías lignocelulósicas basadas en el procesamiento de biomasa utilizando métodos termoquímicos, biológicos e híbridos. Primero se mencionan los procesos termoquímicos, que son aplicables para la producción de biocombustibles líquidos,

gaseosos y sólidos de biocarbón, dentro de este grupo destacan: I. Combustión y gasificación: La combustión se realiza en presencia de aire a temperaturas mayores a 850°C, mientras que la gasificación de biomasa se lleva a cabo mediante gasificación de agua supercrítica (SCWG por sus siglas en inglés) a condiciones supercríticas de 374.29°C y 22.89 MPa, generando precursores como celulosa, glucosa, glicerol, lignina y fenólicos, a partir de los cuales se puede obtener principalmente metanol, hidrógeno e hidrocarburos sintéticos mediante síntesis Fischer Tropsch; y, II. Licuefacción termoquímica y pirólisis rápida: se describen como dos vías que permiten convertir directamente biomasa lignocelulósica en bio-oils y bio-crude, la licuefacción produce biocombustibles líquidos si es operada a temperaturas entre 523-823 K y presiones desde 5-25 MPa mediante licuefacción hidrotermal con agua o licuefacción solvática con disolventes orgánicos, mientras que los combustibles gaseosos son obtenidos en condiciones de operación con temperaturas entre 250-350°C y presiones entre 700-300 psi, este proceso incluye catalizadores como carbonato de sodio o potasio; por otro lado, la pirólisis rápida para producir biocombustibles líquidos se lleva a cabo mediante la desintegración térmica de la biomasa a temperaturas aproximadas a 773 K, en un reactor de lecho fluidizado con alta velocidad de calentamiento y enfriamiento, tiempo de residencia entre 0.5-3 segundos y un tratamiento térmico intenso. En segundo lugar, se encuentran descritos los procesos bioquímicos que se llevan a cabo para la producción de biocombustibles líquidos y gaseosos, los cuales están enfocados en la producción de precursores como celulosa, hemicelulosa y lignina a partir de biomasa lignocelulósica mediante hidrólisis enzimática microbiana, a estos precursores se los somete a procesos de fermentación utilizando biocatalizadores como *S. Cerevisiae* y *Z. Mobilia*, entonces a partir de celulosa se obtienen alcoholes que son usados como biocombustibles o aditivos para combustibles, la hemicelulosa es convertida en productos químicos de valor añadido y la lignina es usada como adhesivos o

aglutinantes. Finalmente, se describen los procesos híbridos como el acoplamiento de procesos termoquímicos, bioquímicos o biocatalíticos, un ejemplo de ello es someter la biomasa a un tratamiento pirolítico que permita producir precursores ricos en carbono, tal como gas de síntesis, azúcares, carbohidratos o monosacáridos, luego estos precursores se someten a procesos bioquímicos para obtener combustibles bio-renovables; los autores no dan detalles de las condiciones de operación de procesos híbridos.

En el Ecuador se ha llevado a cabo un estudio realizado por Posso et al. (2020) para la producción de hidrógeno a partir de residuos generados por cada provincia, basándose en los datos tabulados en el atlas bioenergético del Ecuador; los autores consideraron tres métodos de producción, el primer método se basa en la gasificación, el segundo método combina la combustión y electrólisis; y, el tercer método se basa en una digestión anaeróbica. La gasificación se describe como un proceso factible económicamente, ambientalmente y de alto rendimiento, puede ser llevado a cabo a gran escala debido a la disponibilidad de biomasa y su bajo costo, este tipo de ruta de conversión de biomasa ha sido analizada exclusivamente para biomasa lignocelulósica obteniéndose un rendimiento típico de 0.075 Kg H₂/Kg de biomasa en base seca que puede ser obtenida potencialmente de residuos forestales y agrícolas. La segunda ruta de conversión se describe en dos etapas, la primera etapa consiste en la combustión directa para la generación de electricidad, luego se pasa a la etapa de hidrólisis mediante agua alimentada por la electricidad generada en la etapa de combustión, esta ruta de conversión tiene una desventaja ambiental ligada con la etapa de combustión. Por último, la tercera ruta de conversión utiliza como biomasa el estiércol de aves y ganado, esta ruta está conformada por tres etapas a ser: generación de biogás mediante digestión anaeróbica, concentración de biometano contenido en el biogás y

por último la producción de hidrógeno mediante reformado con biometano, obteniéndose un factor de conversión de 0.3 Kg H₂/ kg de biometano. Como resultados los autores mencionan que la mejor ruta de conversión de biomasa en el Ecuador es la gasificación ya que es la ruta que más contribuye en la generación de H₂ en comparación con las otras rutas analizadas, este resultado se justifica por el aprovechamiento de la gran cantidad de residuos agrícolas generado en cada provincia del país.

De acuerdo a todo lo expuesto por diferentes autores, se puede inferir que es importante realizar una investigación detallada que permita establecer bibliográficamente las mejores rutas de conversión de biomasa lignocelulósica hacia biocombustibles aprovechando los residuos generados a partir de las actividades agroindustriales en la provincia de Cotopaxi.

1.2 Planteamiento del problema

La producción de combustibles durante muchos años se ha basado en el uso de petróleo como materia prima, sin embargo en los últimos años la producción de estos se ha visto afectada por los graves daños al medio ambiente debido a la emisión de gases de efecto invernadero, el agotamiento de los recursos fósiles y los conflictos geopolíticos por las variaciones del precio del petróleo, estos inconvenientes han impulsado a acelerar la transición hacia la producción de combustibles limpios a partir de biomasa, denominados biocombustibles (Centi et al., 2011).

En los últimos años se han desarrollado biocombustibles a partir de cultivos agrícolas, como la soja, caña de azúcar, remolacha, maíz, trigo, arroz, aceites vegetales, etc, denominados combustibles de primera generación, sin embargo, se ha presentado un grave problema debido a que estos cultivos son usados como alimentos y su producción agrícola no puede satisfacer las necesidades alimenticias y energéticas

al mismo tiempo, generando el conflicto alimentos vs energía; a partir de este conflicto surge la producción de biocombustibles de segunda y tercera generación que son producidos a partir de cultivos no alimentarios, residuos agrícolas, residuos orgánicos, pastos y algas (Kumari & Singh, 2018).

Se sabe que el diario vivir de una persona va acompañada de la generación de diferentes tipos de desechos, siendo la eliminación de estos un problema de escala mundial (Kumari & Singh, 2018). Según mencionan Magalhães et al. (2019) Sudamérica es un continente que genera gran cantidad de desechos agroindustriales a partir de paja, hojas, bagazo y racimo; en 2017 la cantidad de desechos producidos era alrededor de 800 millones de toneladas y se prevé que en 2025 esta cantidad incremente a más de 900 millones de toneladas, generando un problema ambiental en el continente.

De acuerdo con el atlas bioenergético del Ecuador elaborado por el Ministerio Coordinador de Producción, Empleo y Competitividad (MCPEC), Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) y el Instituto Nacional de Preinversión (INP) en el año 2014, se puede establecer la cantidad aproximada de residuos generados por cada provincia de acuerdo con actividades forestales, pecuarias y agrícolas; a partir de esta información se conoce que la provincia de Cotopaxi genera alrededor de 206 mil toneladas por año de residuos agrícolas con base en el banano, cacao, palma africana, plátano, y residuos forestales; desde un punto de vista bioenergético esta cantidad de residuos equivale a un total de 2475.43 TJ/año que pueden ser aprovechados en forma de biocombustibles de acuerdo a la matriz bioenergética que se plantea implementar en el país para reemplazar los combustibles fósiles utilizando biomasa.

Según Kumar et al. (2019) actualmente el uso de biomasa lignocelulósica es crucial, pues se puede obtener combustibles en estado líquido y gaseoso; sin embargo

existen limitantes relacionadas con la producción, recolección y características de conversión que deben tomarse en cuenta para lograr una viabilidad económica y tecnológica en la producción de biocombustibles. Por ello se requiere un estudio bibliográfico que permita determinar las mejores rutas de conversión de biomasa lignocelulósica hacia la producción de biocombustibles con miras a su implementación en el país utilizando residuos agroindustriales provenientes de la provincia de Cotopaxi.

1.3 Justificación e Importancia

El uso de combustibles fósiles es primordial en la sociedad para la generación de calor, energía y como combustible líquido para transporte, sin embargo, su uso convencional provoca la emisión de gases nocivos para el ambiente, la limitación en el suministro y el posible agotamiento de recursos fósiles no renovables en los próximos años; por todas estas causas, es importante la investigación de alternativas para reemplazar los combustibles fósiles por biocombustibles obtenidos a partir de biomasa (Lecksiwilai et al., 2016).

La consideración de biomasa como materia prima para la producción de biocombustibles es primordial debido a que está disponible en todo el mundo, es accesible para países que no tienen materia prima fósil, no sufre variaciones de precio en el mercado y principalmente es amigable con el ambiente debido a su neutralidad con el dióxido de carbono y su bajo contenido de azufre y metales (Gandarias et al., 2008).

En los últimos años se han realizado investigaciones importantes con respecto a la producción de biocombustibles de primera generación, que son obtenidos a partir de cultivos alimenticios, de este modo se genera una competencia con los alimentos que se ve reflejado por el incremento en los precios de los mismos; en consecuencia, se ha determinado la importancia de producir biocombustibles de segunda generación que

son obtenidos a partir de biomasa lignocelulósica, porque no compite con la producción de alimentos (Roy et al., 2012).

La producción de biocombustibles de segunda generación utiliza materia prima no alimentaria basada en biomasa lignocelulósica, siendo actualmente este un campo de interés investigativo para los científicos (Ma et al., 2012). Al parecer el uso de biomasa lignocelulósica es la clave para cumplir con un suministro continuo de biocombustibles renovables, además contribuye en el cuidado del medio ambiente disminuyendo drásticamente las emisiones de gases que producen efecto invernadero, y a su vez permite el manejo y eliminación de desechos agrícolas de forma económica y ecológica (Nanda et al., 2014).

De acuerdo con Limayem & Ricke (2012) la biomasa lignocelulósica puede proporcionarse a gran escala a partir de diferentes fuentes como residuos municipales, industriales, madereros y agrícolas. En base a la figura 1 encontrada en el artículo científico elaborado por Magalhães et al. (2019) se puede establecer que Ecuador generará alrededor de 13.7 millones de toneladas de desechos agroindustriales en 2025, esta cantidad de desechos estimada se basa en el área cosechada, la productividad de la materia prima y la generación de residuos a partir de palma, arroz, maíz y banana principalmente. Con respecto a esta información se puede inferir que el Ecuador generará altas cantidades de biomasa lignocelulósica en 2025 que puede ser utilizada potencialmente en la producción de biocombustibles.

No obstante, el principal limitante en el uso de este tipo de biomasa es la ausencia de tecnologías económicamente viables que permita superar los obstáculos presentados durante la conversión de biomasa lignocelulósica a biocombustibles, generando un interés investigativo para desarrollar procesos que sean viables desde un punto de vista productivo, económico y social (Yousuf, 2012).

En tal sentido, este estudio está proyectado a la búsqueda bibliográfica de rutas de conversión de biomasa lignocelulósica hacia la producción de biocombustibles, atendiendo a consideraciones innovadoras y viables en aspectos químicos, energéticos, económicos y medioambientales, con la finalidad de su implementación en biorrefinerías a futuro en el Ecuador.

1.4 Objetivos

1.4.1. *Objetivo General*

Determinar bibliográficamente las rutas de conversión de biomasa lignocelulósica hacia la producción de biocombustibles.

1.4.2. *Objetivos específicos*

- Investigar y establecer los diferentes procesos de biorefinación utilizados en la producción de biocombustibles.
- Analizar los procesos de producción de biocombustibles utilizando criterios de rendimiento, viabilidad química, tecnológica y medioambiental.
- Establecer las rutas de producción de biocombustibles con mayor viabilidad en aspectos químicos, catalíticos y medioambientales mediante una investigación bibliográfica.

1.5 Hipótesis

Las rutas de conversión de biomasa lignocelulósica para la producción de biocombustibles podrían ser viables considerando aspectos químicos, tecnológicos y medioambientales para la implementación de estos procesos en el Ecuador.

1.6 Variables de investigación

1.6.1 *Variables independientes*

Rutas de conversión de biomasa lignocelulósica

1.6.2 *Variables dependientes*

Aspectos químicos, tecnológicos y medioambientales para la producción de biocombustibles

Capítulo II

2. Marco teórico

2.1 Biorrefinería

El concepto biorrefinería está definido según Carvalheiro et al. (2008) como una planta de procesamiento integrada y diversificada, en donde se aprovecha la biomasa para obtener carbohidratos, aceites, lignina, entre otros, que luego serán convertidos en combustibles, productos químicos con valor agregado y otros materiales, considerando un enfoque de desperdicio cero.

Por otra parte Octave & Thomas (2009) definen a una biorrefinería como el conjunto de actividades que permiten extraer las moléculas de carbono de las plantas con la finalidad de usarlas como sustitutos de las moléculas de carbono del petróleo y gas, garantizando el desarrollo de nuevos procesos industriales y químicos basados en moléculas de origen vegetal.

A partir de estas definiciones es posible establecer una definición propia sobre el concepto de biorrefinería como el conjunto de procesos químicos en una planta industrial que permiten aprovechar los desechos de origen vegetal (biomasa) para la producción de compuestos químicos con valor agregado, tal como sucede en una refinería de petróleo.

2.1.1 Clasificación de biorrefinerías

De acuerdo con Kamm & Kamm (2004) existen tres tipos de sistemas de biorrefinerías: biorrefinería de cultivos integrales, biorrefinería verde y biorrefinería lignocelulósica.

a. Biorrefinería de cultivos integrales.

Este tipo de biorrefinería utiliza como materia prima cereales tal como centeno, maíz y trigo, se caracteriza por usar únicamente el grano, es decir la separa de su corteza; el grano es sometido a procedimientos físicos y químicos para obtener almidón que luego se convertirá en adhesivos, aglutinantes, rellenos, alcoholes, plastificantes, entre otros (Kamm & Kamm, 2004).

b. Biorrefinería verde

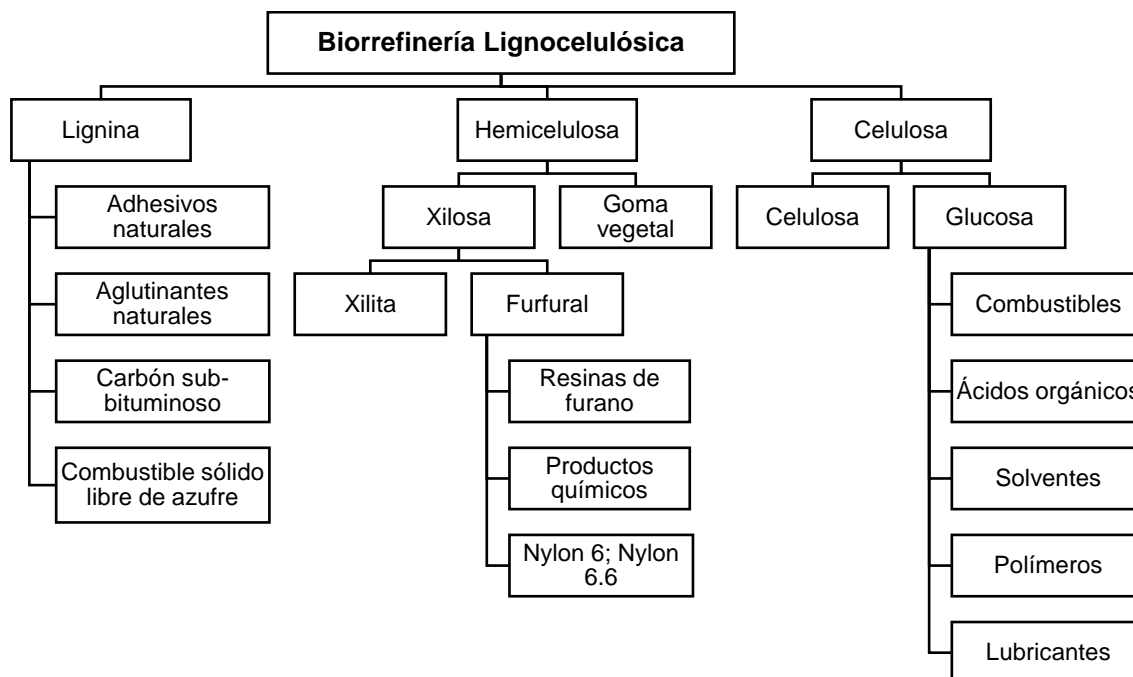
Se basa en el uso de materia naturalmente verde, tal como pastos verdes, alfalfa, trébol o cereal inmaduro. La materia prima es procesada mediante tecnologías de fraccionamiento húmedo para obtener una torta rica en fibra y un jugo verde rico en nutrientes; la torta prensada contiene celulosa, almidón, pigmentos, medicamentos crudos y compuestos orgánicos, su principal uso se enfoca en la producción de pellets de pienso verde que posteriormente podrían ser convertidos en productos químicos como el ácido levulínico, gas de síntesis e hidrocarburos; por otro lado, el jugo verde posee proteínas, aminoácidos libres, ácidos orgánicos, colorantes, enzimas y otras sustancias orgánicas y minerales, su uso está dirigido a la producción de ácido láctico, aminoácidos, etanol y proteínas (Kamm & Kamm, 2004).

c. Biorrefinería lignocelulósica

De acuerdo con Kamm & Kamm (2004) este tipo de biorrefinería utiliza materia prima lignocelulósica como paja, caña, pasto, madera, desperdicio de papel, entre otros; la biomasa lignocelulósica está conformada principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, a partir de estos componentes se puede obtener una amplia gama de productos tal como se muestra en la figura 1.

Figura 1

Productos de una biorrefinería lignocelulósica



Nota: Adaptado de *Biorefinery-Systems* (p. 2), por B. Kamm & M. Kamm, 2004, *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 18 (1).

Una biorrefinería lignocelulósica es un sistema que permite obtener productos importantes dentro de la petroquímica tradicional pero a partir de materia prima renovable, por ello se prevé que este sistema sea impulsado con éxito en el futuro (Kamm & Kamm, 2004).

Por otro lado, Carvalheiro et al. (2008) clasifican a las biorrefinerías de acuerdo a los procesos tecnológicos que desarrollan, siendo las más importantes la plataforma de biorrefinería bioquímica y la plataforma de biorrefinería termoquímica.

d. Biorrefinería Bioquímica

Este tipo de biorrefinería se basa en la fermentación de azúcares obtenidos a partir de biomasa lignocelulósica; su funcionamiento empieza con el acondicionamiento

de la materia prima (reducción de tamaño), luego la biomasa es sometida a procesos de fermentación para ser convertida en azúcares u otros componentes intermedios, los mismos que son sometidos a procesos de bioconversión usando biocatalizadores para finalmente ser procesados químicamente y convertidos en productos químicos con valor agregado, tal como etanol y otros combustibles (Carvalho et al., 2008).

e. Biorrefinería Termoquímica

Es una plataforma de biorrefinería más compleja, centra su funcionamiento en procesos de gasificación y pirólisis de materia prima lignocelulósica para la producción de gas de síntesis y aceite de pirólisis respectivamente. Su sistema de funcionamiento comienza con el acondicionamiento de la materia prima lignocelulósica (secado y reducción de tamaño), luego la biomasa se somete a tecnologías de conversión termoquímicas como gasificación y pirólisis; la gasificación se lleva a cabo calentando la biomasa con un tercio del oxígeno utilizado en la combustión completa, produciendo así gas de síntesis; por otro lado, la pirólisis se realiza calentando la biomasa en ausencia de oxígeno, produciendo aceite de pirólisis; finalmente, los productos obtenidos de las tecnologías termoquímicas se someten a limpiezas y acondicionamientos, por ejemplo el aceite de pirólisis puede ser usado directamente como combustible o se puede refinar químicamente para producir combustibles más limpios (Carvalho et al., 2008).

2.2 Biomasa

Biomasa es todo material orgánico que se origina a partir de plantas, incluye toda la vegetación terrestre, acuática y desechos orgánicos; está formado principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno unidos mediante enlaces químicos que son los encargados de almacenar toda la energía producida durante la fotosíntesis (McKendry, 2002).

Por otro lado, Vassilev et al. (2010) definen a la biomasa como un producto sólido complejo y biogénico producido naturalmente o por procesos antropogénicos, además se menciona que la biomasa es una fuente importante de energía renovable, barata y ecológica.

2.2.1 Clasificación de la biomasa

Vassilev et al. (2010) clasifica la biomasa en seis grupos tomando en cuenta la diversidad biológica, fuente y origen, así:

- Madera y biomasa leñosa: Incluye tallos, ramas, follaje, corteza, astillas, trozos de madera, pellets, aserrín y otras especies de madera.
- Herbácea y agrícola: Incluye hierbas, flores, residuos de frutas, cáscaras, huesos, granos, semillas, tallos, mazorcas, bagazo, forrajes, pulpas, tortas y pajitas de cebada, frejol, lino, maíz, menta, avena, colza, arroz, centeno, girasol, trigo, entre otros.
- Biomasa acuática: Incluye algas marinas o de agua dulce, macroalgas y microalgas.
- Desechos de animales y humanos
- Biomasa contaminada y desechos industriales: Incluye residuos sólidos urbanos, madera de demolición, lodos, papeles de desecho, residuos de cartón, tableros de fibra, cajas de madera y otros.
- Mezclas: Mezcla de todos los tipos de biomasa

2.2.2 Propiedades de la biomasa

Según McKendry (2002) las propiedades de la biomasa y su fuente son aspectos importantes a tomar en cuenta si esta es usada para la generación de energía, porque determinarán la elección del proceso de conversión y cualquier dificultad presentada

durante su procesamiento, por lo tanto se mencionan seis importantes propiedades inherentes, tal es el caso:

- Contenido de humedad
- Valor calorífico
- Proporciones de carbón fijo y volátil
- Contenido de residuos y/o cenizas
- Contenido de metales alcalinos
- Relación celulosa/lignina

a. Contenido de humedad

Este parámetro puede ser expresado en términos de humedad intrínseca y humedad extrínseca; intrínseca si el contenido de humedad de la biomasa no está influenciado por los efectos climáticos y extrínseca si las condiciones climáticas influyen la humedad de la biomasa. En la práctica la humedad extrínseca es preocupante pues podría alterar otras propiedades de la biomasa debido al efecto de las condiciones climáticas durante la recolección (McKendry, 2002).

b. Valor calorífico

El valor calorífico (CV por sus siglas en inglés) de un material indica la cantidad de energía que será liberada durante la combustión, está expresado en unidades de energía por unidad de masa o volumen. El CV para los biocombustibles se puede expresar en términos de CV bruto (GCV por sus siglas en inglés), CV superior (HHV por sus siglas en inglés), CV neto (NCV por sus siglas en inglés) o CV inferior (LHV por sus siglas en inglés), de estos el HHV indica el contenido energético total liberado durante la combustión incluyendo el calor latente del vapor de agua, por ende, representa la cantidad máxima de energía que puede ser recuperada de una determinada fuente de biomasa. Cabe resaltar que el CV está relacionado directamente con la cantidad de

humedad de la materia, por ello es importante conocer el contenido de humedad cuando se requiera establecer el valor calorífico (McKendry, 2002).

c. Proporciones de carbón fijo y volátil

Estos parámetros son calculados cuando se lleva a cabo un análisis aproximado de un biocombustible en un laboratorio, el contenido de volátiles de un sólido es la parte expulsada en forma de gas durante el calentamiento, mientras que el contenido de carbón fijo es la masa restante luego de la expulsión de componentes volátiles, sin incluir las cenizas y humedad. Es importante el análisis aproximado de un biocombustible, principalmente si es obtenido mediante procesos biológicos porque permite establecer comparaciones entre biocombustibles (McKendry, 2002).

d. Contenido de residuos y/o cenizas

Estos parámetros son determinados después de la descomposición de la biomasa mediante procesos termoquímicos o bioquímicos, el contenido de ceniza se produce durante la combustión de la biomasa en el aire y se convierte en un parámetro de medición estándar para combustibles sólidos y líquidos; si la biomasa es convertida mediante un proceso bioquímico la cantidad de residuos sólidos representa la cantidad de carbono no biodegradable que se encuentra en la biomasa y será mayor que el contenido de cenizas; es importante tomar en cuenta el contenido de cenizas ya que es proporcional a la energía disponible de un biocombustible y afecta los costos de manipulación y procesamiento de biomasa (McKendry, 2002).

e. Contenido de metales alcalinos

Este parámetro está referido a la presencia de metales alcalinos como Na, K, Mg y Ca en la biomasa; es importante principalmente en procesos de conversión termoquímicos porque podrían reaccionar con la sílice presente en la ceniza y producir

un líquido pegajoso que bloquearía el sistema de ventilación de hornos y calderas, provocando dificultades operativas (McKendry, 2002).

f. Relación celulosa/lignina

El contenido de celulosa y lignina presente en la biomasa es fundamental principalmente en procesos bioquímicos, pues la celulosa al ser más biodegradable que la lignina permite una mayor conversión global de biomasa, así mismo, este parámetro permite seleccionar la materia prima para el procesamiento bioquímico (McKendry, 2002).

2.2.3 Biomasa Lignocelulósica

Se denomina material lignocelulósico a todas las plantas que presentan patrones de crecimiento perenne y poseen en sus paredes tejido estructural lignificado. Este tipo de biomasa es primordial para la producción de biocombustibles al ser una fuente abundante de material orgánico que no compite con alimentos ni forrajes (Kaltschmitt & Neuling, 2018).

Existe una variedad de material lignocelulósico que se diferencian en su origen, composición y estructura, es así que se clasifican como residuos forestales, desechos sólidos urbanos, papel de desecho y residuos de cultivos (Balat, 2011). De la misma forma Kaltschmitt & Neuling (2018) mencionan que los recursos lignocelulósicos pueden cultivarse en campos u obtenerse como subproductos de actividades primarias (forestal o agrícola) o secundarias (industrial).

a. Características de la biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica está compuesta principalmente por tres componentes: celulosa (30-50%), hemicelulosa (15-35%) y lignina(10-20%), cabe resaltar que la celulosa y hemicelulosa representan aproximadamente el 70% de la

biomasa total y están unidas a la lignina a través de enlaces covalentes o enlaces de hidrógeno, siendo esta la causa de tener una estructura muy robusta y resistente a cualquier tratamiento (Limayem & Ricke, 2012).

a.1. Hemicelulosa

Es una estructura amorfa formada por heteropolímeros de hexosas, pentosas y en algunas ocasiones ácidos de azúcar, su cadena principal está conformada en un 90% aproximadamente por D-xilosa y un 10% de L-arabinosa, cabe mencionar que estos porcentajes varían de acuerdo con la naturaleza y fuente de la materia prima (Limayem & Ricke, 2012).

a.2. Celulosa

Es una estructura lineal de cadena larga formada por monómeros de glucosa unidos mediante enlaces $\beta(1\rightarrow4)$ glucosídicos, debido a los extensos enlaces de hidrógeno presentes entre los monómeros se tiene una estructura fuerte y cristalina que requiere temperaturas de 320°C y presiones de 25MPa para pasar a una estructura amorfa en agua (Limayem & Ricke, 2012).

a.3. Lignina

Es un biopolímero aromático, rígido y de alto peso molecular, está unido mediante enlaces covalentes a la hemicelulosa, por ello la pared celular presenta rigidez y un alto nivel de compacidad. Su estructura está formada por tres monómeros fenólicos de alcohol fenil propiónico: alcohol cumarílico, coniferílico y sinapílico; si bien antes no existía interés químico de este componente, en la actualidad está ganando terreno por su potencial uso en biorrefinerías (Limayem & Ricke, 2012).

2.2.4 Biomasa como potencial fuente de energía

Los mercados energéticos de todo el mundo a lo largo de los años se han centrado en la generación de energía a través de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas natural, generando problemas ambientales y agotamiento de recursos fósiles debido al tiempo que se requiere para su formación. Estos inconvenientes han incentivado a la búsqueda de nuevas fuentes de energía que sean amigables con el medio ambiente y renovables, en tal sentido, la biomasa aparece como una fuente de energía rica en carbono y lo suficientemente grande para sustituir a los combustibles fósiles (Balat & Ayar, 2005).

A partir de biomasa se puede obtener energía renovable que no añade CO₂ al medio ambiente como lo hacen los combustibles fósiles, es la única fuente de carbono capaz almacenar energía solar, está disponible en grandes proporciones y por fuentes variadas alrededor del mundo y además puede ser convertida en diferentes productos mediante procesos químicos, termoquímicos y biológicos (Toklu, 2017).

A nivel mundial la biomasa se encuentra en cuarto lugar en la lista de principales fuentes de energía, constituye la mejor opción de energía renovable pues posee el mayor potencial para asegurar el suministro de combustibles en el futuro, tanto para países ricos como para países en vías de desarrollo. De igual forma, los productos obtenidos a partir de biomasa son económicos y proporcionan más energía que otras formas de energía (Balat & Ayar, 2005).

Maurya et al. (2018) mencionan que la generación de energía a partir de biomasa depende de múltiples factores, tal como tipo de biomasa, cantidad disponible, destino de aplicación de la energía, capital de inversión, disponibilidad de recursos y cuestiones operativas.

Es así que McKendry (2002) en su artículo sugiere algunas características que permitirán la elección óptima del tipo de biomasa para generar energía, tal como:

- Alta disponibilidad
- Baja energía requerida para la producción de energía
- Bajo costo de recolección, manejo o transporte
- Menor cantidad de contaminantes

a. Uso de biomasa como combustible

La biomasa busca satisfacer muchas necesidades energéticas a escala doméstica e industrial, tales como la generación de electricidad, calefacción de hogares, el suministro de combustible para vehículos y el suministro de calor en instalaciones industriales (Balat & Ayar, 2005).

Por su parte Maurya et al. (2018) mencionan algunas aplicaciones exitosas de biomasa como combustible que se aplican actualmente, tal es el caso:

- Sustitución de una parte de combustible fósil por biomasa en calderas de combustión existente.
- Uso de biomasa para cocción y secado a nivel doméstico
- Sustitución total de combustibles fósiles por biomasa en generadores de vapor mediante leña
- Uso de bioaceite de pirólisis para la producción de productos químicos
- Producción de gas e hidrógeno a partir de biomasa
- Producción de carbón vegetal mediante pirólisis lenta

b. Ventajas y desventajas del uso de biomasa como fuente de energía

En la tabla 1 se mencionan las principales ventajas y desventajas del uso de biomasa como fuente de energía.

Tabla 1*Ventajas y desventajas de la biomasa como fuente de energía*

Ventajas	Desventajas
Fuente de energía renovable	Bajo desempeño como biocombustibles con respecto al ciclo de vida
Baja emisión de CO ₂ y beneficios en el cambio climático	Falta de terminología, sistemas de clasificación y estándares a nivel mundial
Bajo contenido de cenizas, azufre, nitrógeno y oligoelementos	Bajo conocimientos de composición, propiedades y calidad
Alta reactividad en procesos de conversión	Altos contenido de humedad y compuestos alcalinos
Reducción de emisiones peligrosas como CH ₄ , CO ₂ , NO _x , SO _x	Baja densidad energética
Captura de elementos peligrosos por las cenizas durante la combustión	Competencia con la producción de alimentos y pastos
Gran disponibilidad y recurso barato	Daño al suelo y pérdida de biodiversidad
Diversificación del suministro de combustible	Posible lixiviación de componentes peligrosos
Seguridad energética	Posibles emisiones durante tratamiento térmico
Reducción de desechos que contienen biomasa	Disponibilidad regional
Recurso barato para la producción de químicos	Altos costos de recolección, transporte, almacenamiento y pretratamiento

Nota: Adaptado de *An overview of the chemical composition of biomass* (p. 915), por Vassilev et al., 2010, *Fuel*, 89 (1).

2.3 Biocombustibles

Los biocombustibles son combustibles de base orgánica producidos a partir de biomasa agrícola a través de diferentes procesos químicos y biológicos, con la finalidad de generar energía (Kumari & Singh, 2018).

Cabe mencionar que los biocombustibles surgieron como una alternativa prometedora para sustituir los combustibles fósiles debido a su potencial en aspectos de seguridad energética, cuestiones económicas y sostenibilidad ambiental; sin embargo, también presentan aspectos negativos en términos de política, tecnología y materia prima (Zabed et al., 2019).

2.3.1 Ventajas del uso de biocombustibles

Pandey (2009) menciona cinco ventajas del uso de biocombustibles a nivel mundial, como son:

- Está disponible a partir de fuentes comunes de biomasa
- Son neutros en dióxido de carbono
- Tienen alto potencial ecológico
- Proporciona beneficios al medio ambiente, economía y sociedad
- Son biodegradables, por lo tanto, contribuyen a la sostenibilidad

2.3.2 Tipos de biocombustibles

De acuerdo con Zabed et al. (2019), los biocombustibles se clasifican en cuatro generaciones tomando en cuenta el tipo de biomasa y las tecnologías utilizadas durante la producción del biocombustible.

a. Biocombustibles de primera generación

Son aquellos combustibles producidos a partir de cultivos alimentarios tales como cereales, caña de azúcar y cultivos oleaginosos utilizando tecnologías simples como hidrólisis, fermentación, craqueo o transesterificación; entre los ejemplos más destacados se tiene el etanol y biodiésel. Es importante mencionar que este tipo de biocombustibles tienen alta eficiencia pero presentan un inconveniente de viabilidad debido al conflicto con el suministro de alimentos (Raud et al., 2019).

b. Biocombustibles de segunda generación

Se denominan como biocombustibles lignocelulósicos porque se producen a partir de biomasa no comestible, tales como cultivos energéticos, residuos agrícolas y forestales utilizando tecnologías termoquímicas y bioquímicas. Si bien este tipo de biocombustibles presentan bajo rendimiento en comparación con los combustibles de primera generación, tienen la ventaja de no presentar problemas de competencia directa con los alimentos ya que utiliza biomasa no comestible (Raud et al., 2019).

b.1. Uso de biocombustibles de segunda generación

El uso de biocombustibles de segunda generación aparece con la finalidad de incrementar la cantidad de biocombustibles producidos de forma sostenible utilizando materia prima no alimentaria, en ese contexto se espera que los biocombustibles de segunda generación reduzcan las emisiones de carbono, aumenten la eficiencia energética, reduzcan la dependencia de combustibles fósiles y permitan superar las limitaciones presentadas por los biocombustibles de primera generación principalmente el conflicto alimentos vs energía (Antizar & Turrion, 2008).

El desarrollo de biocombustibles de segunda generación requiere mejoras de procesos en términos de energía y eficiencia para superar los límites originados por los altos costos de producción que actualmente no permiten una producción a gran escala, en ese sentido, cabe mencionar que también es necesario tener mejoras en la infraestructura con la construcción de una planta nueva que permita recolectar, transportar, almacenar y refinar la materia prima lignocelulósica. Es importante añadir que esta industria tendrá éxito sólo si el suministro de biomasa estará disponible a gran escala y bajos costos (Antizar & Turrion, 2008).

c. Biocombustibles de tercera y cuarta generación

Los biocombustibles de tercera generación son obtenidos a partir de algas o cualquier tipo de biomasa acuática, mientras que los combustibles de cuarta generación se producen utilizando algas y microorganismos genéticamente modificados; cabe mencionar que el uso de algas como biomasa presentan una gran ventaja debido su fácil disponibilidad en entornos acuáticos y poco uso de suelos, sin embargo no existen estudios suficientes de su uso en la producción de biocombustibles por lo que actualmente su implementación podría ser cara y no rentable (Raud et al., 2019).

2.3.3 Biocombustibles en el Ecuador

El Ministerio de Minas y Petróleos menciona que el Ecuador es un país que dispone de una variedad de recursos agrícolas que podrían ser utilizados en la producción de biocombustibles, generando la posibilidad de sustituir las importaciones de gasolina y diésel por combustibles renovables. Hay que mencionar que el uso de biocombustibles constituye una opción de diversificación de fuentes energéticas y además permite reducir la contaminación ambiental causada por el uso de combustibles fósiles (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2011).

De acuerdo con el informe presentado por FAO (2011), la producción y exportación de biocombustibles en el Ecuador está impulsada por la empresa privada que busca aprovechar las oportunidades comerciales del mercado internacional enfocándose a la producción de etanol a partir de caña de azúcar y biodiésel a partir de palma africana. Puede agregarse que los efectos de estas iniciativas generaron un aumento en los tributos del Estado y un impacto en la cadena agroindustrial que permitió asegurar a los productores de caña de azúcar y palma africana un mercado para sus productos, incentivos, trabajo rural, expansión de cultivos y la aplicación de

tecnologías que permitan mejorar el rendimiento de las especies; todo esto sin poner en riesgo la situación alimentaria del país y sin afectar la naturaleza, dando paso al comienzo del desarrollo de biocombustibles en el Ecuador.

La producción de biocombustibles en el país abrirá una ruta para el desarrollo de la agroindustrial con efectos positivos en la economía, sin embargo, el desarrollo de esta actividad a gran escala presenta riesgos para los inversionistas, repercusiones en el sector rural e impactos negativos en el medio ambiente, por ello, si se desea producir y utilizar biocombustibles es necesario tomar en cuenta los beneficios y amenazas que implica. Se debe agregar que el estado ecuatoriano con la finalidad de garantizar un desarrollo responsable ha adoptado políticas de precaución y cautela que cada proyecto encaminado a la producción de biocombustibles debe cumplir mediante diagnósticos, análisis y estudios de factibilidad sobre criterios económicos, técnicos, medioambientales y sociales, los cuales deberán ser presentados y evaluados por todos los actores involucrados (FAO, 2011).

2.4 Tecnologías de conversión de biomasa lignocelulósica a biocombustibles

Existen diferentes rutas para la producción de biocombustibles líquidos y gaseosos a partir de biomasa lignocelulósica, entre las que se encuentran procesos físicos, termoquímicos, bioquímicos y químicos; siendo los procesos termoquímicos y bioquímicos los principales (Naik et al., 2010).

2.4.1 *Procesos físicos*

De acuerdo a la información proporcionada por Naik et al. (2010) existen tres procesos físicos para la transformación de biomasa en biocombustibles, como son extracción mecánica, el briquetado y la destilación, sin embargo la extracción mecánica y la destilación son tecnologías que pueden ser consideradas como un pretratamiento

de biomasa y no como una ruta para convertir biomasa en biocombustible, por ello solo se ha tomado en cuenta el briquetado de biomasa como un proceso físico.

- **Briquetado de biomasa**

Es un proceso físico de conversión exclusiva de biomasa lignocelulósica debido a que es difícil utilizarla como biocombustible por la diferencia en las características de los residuos utilizados como materia prima; el proceso se basa en la densificación de biomasa en formas compactas regulares a través de cámaras de compresión, la densificación puede ser llevada a cabo por prensado y maceración, esta ruta de conversión permite utilizar los briquetes de biomasa para la generación de energía a través de una combustión directa (Naik et al., 2010).

2.4.2 Procesos termoquímicos

Es un conjunto de procesos que se basan en el calentamiento de la biomasa en presencia de diferentes concentraciones de oxígeno, estos procesos tienen la ventaja de convertir todos los componentes orgánicos que posee la biomasa en biocombustibles líquidos y gaseosos (Naik et al., 2010).

Entre los procesos termoquímicos más representativos se tiene:

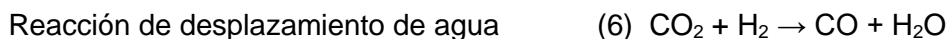
a. Combustión directa

Este proceso se basa en la quema directa de biomasa en presencia de oxígeno generando así energía en forma de calor que es ampliamente usada a escala doméstica para la cocción de alimentos, calderas domésticas, entre otras aplicaciones; es importante mencionar que este tipo de aprovechamiento de biomasa ha sido realizado a lo largo de los años y constituye una buena alternativa al consumo de combustibles fósiles ya que disminuye la emisión de azufre u otro contaminante a la atmósfera, sin embargo tiene un rendimiento muy bajo (Naik et al., 2010).

b. Gasificación

Este proceso está basado en la reacción de biomasa con aire, oxígeno o vapor para producir CO, CO₂, H₂, CH₄, N₂ y un amplio espectro de hidrocarburos, su objetivo principal es maximizar los rendimientos de productos gaseosos, así como minimizar la cantidad de hidrocarburos condensables y carbón sin reaccionar; el gas que se obtiene como producto posee diferentes características que dependen del tipo de alimentación, parámetros del proceso y el tipo de reactor de gasificación (Ibarra & Rong, 2019).

De acuerdo con Pandey (2009), las principales reacciones que se producen durante la gasificación son:



Formando finalmente gas de síntesis constituido por una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno, metano y pequeñas cantidades de dióxido de carbono y nitrógeno (Pandey, 2009).

El gas de síntesis formado en el proceso es utilizado como un producto intermedio para la producción de productos químicos y combustibles, por ejemplo, hidrógeno, queroseno, diésel, metanol, dimetiléter, amoníaco, entre otros. Los principales combustibles obtenidos usando gas de síntesis son hidrógeno mediante la reacción de desplazamiento gas-agua (WGSR por sus siglas en inglés)', hidrocarburos a partir de la síntesis Fischer Tropsch (FT por sus siglas en inglés) y combustibles líquidos oxigenados a partir de la síntesis metanol y una reacción adicional (Ibarra & Rong, 2019).

- **Síntesis Fischer Tropsch**

Este proceso fue establecido por dos científicos alemanes, Franz Fischer y Hans Tropsch en 1923, tiene como objetivo la síntesis de hidrocarburos de cadena larga a partir de gas de síntesis (Pandey, 2009).

El gas de síntesis formado en la gasificación de biomasa se introduce en un reactor Fischer Tropsch (FT) acoplado con un catalizador metálico soportado, el catalizador metálico generalmente es de Fe, Co, Ru, Rh y Ni (Ibarra & Rong, 2019). Por otra parte, Pandey (2009) menciona que los catalizadores más utilizados en procesos FT son los que se basan en hierro soportado en aluminosilicatos, debido a que presentan múltiples ventajas como su alta selectividad, bajo costo y excelente actividad de reacción de desplazamiento agua-gas.

El proceso FT puede ser llevado a cabo en dos regímenes: FT de bajas temperaturas (LTFT por sus siglas en inglés) o FT de altas temperaturas (HTFT por sus siglas en inglés); el proceso LTFT se realiza a temperaturas entre 200-250°C utilizando reactores de suspensión trifásica o de lecho fijo tubular acoplados con catalizadores de hierro o cobalto, durante este proceso se producen hidrocarburos de cadena larga. Por otro lado, el proceso HTFT se lleva a cabo a temperaturas entre 320-375°C utilizando

un reactor de lecho fluidizado de dos fases con catalizadores de hierro, durante este proceso se generan hidrocarburos de cadena más corta. Además es importante añadir que los productos obtenidos mediante síntesis FT son una mezcla de hidrocarburos, componentes aromáticos y oxigenados, por lo tanto se requiere una mejora del producto para que pueda ser comercializado como combustible sintético, para ello se emplean procesos de isomerización, hidrotratamiento, alquilación, aromatización y oligomerización (Ibarra & Rong, 2019).

- **Reacción de desplazamiento gas-agua**

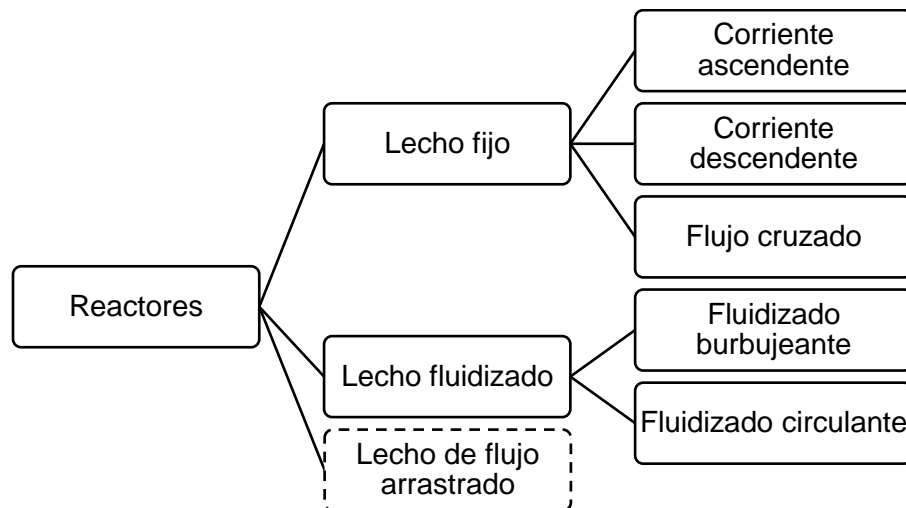
Este proceso se lleva a cabo mediante una reacción a temperaturas superiores a 875 K y presión superior al punto crítico del agua, en la condición de temperatura especificada el agua se convierte en un oxidante fuerte y el oxígeno de la molécula de agua se transfiere a los átomos de carbono de la biomasa, formando CO_2 y trazas de CO por oxidación del carbono, por otro lado, los átomos de hidrógeno del agua y biomasa se liberan para formar hidrógeno. Es importante mencionar que este proceso tiene una desventaja relacionada con el intercambio de calor requerido entre corrientes de entrada y salida del reactor (Demirbas, 2009).

b.1. Reactores de gasificación

El reactor es considerado como el corazón del proceso de gasificación, existen tres tipos de reactores que se indican en la figura 2, estos han sido diseñados para gasificar carbón, sin embargo, pueden ser utilizados para la gasificación de biomasa (Zhang et al., 2013).

Figura 2

Tipos de gasificadores



Nota. Adaptado de *Lignocellulosic biomass gasification technology in China* (p.178), por Zhang et al., 2013, *Renewable Energy*, 49(1)

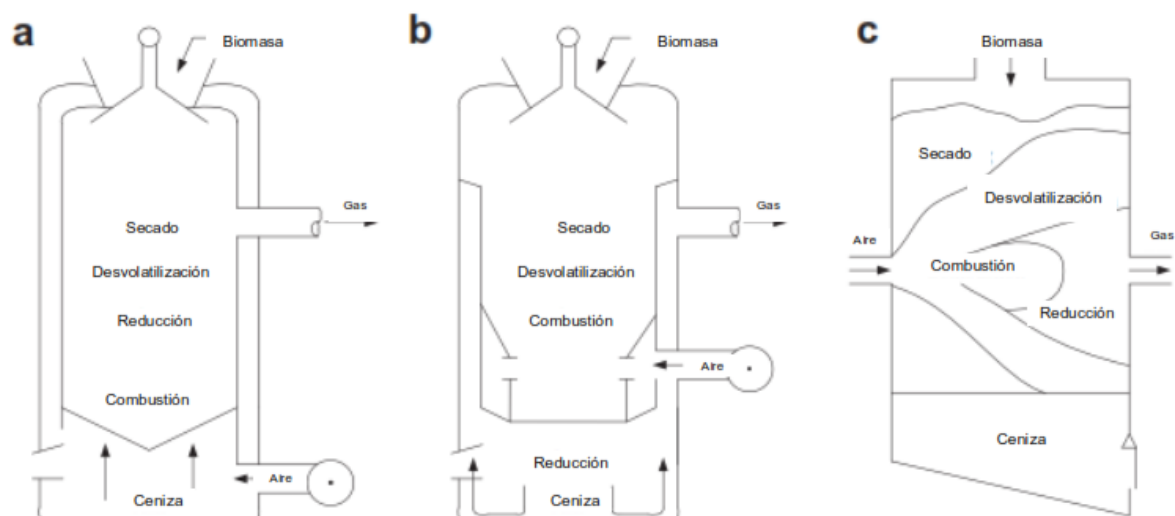
Es importante añadir que los reactores de lecho de flujo arrastrado requieren una alimentación con partículas muy finas, generando un problema con respecto al pretratamiento que se le debe dar a la biomasa lignocelulósica; por ello este tipo de reactores no es adecuado para la gasificación de biomasa y no será considerado en este estudio (Zhang et al., 2013).

- **Reactores de lecho fijo**

Existen tres tipos de reactores de lecho fijo cuya característica principal depende de la dirección del flujo de gas, tal como muestra la figura 3.

Figura 3

Tipos de reactores de lecho fijo



Nota. Tomado de *Lignocellulosic biomass gasification technology in China* (p.179), por Zhang et al., 2013, *Renewable Energy*, 49(1)

La figura 3a muestra un reactor de lecho fijo de corriente ascendente, en donde la biomasa es alimentada por la parte superior y el aire se alimenta por la parte inferior a través de una rejilla, en la parte superior del reactor se produce el secado de la biomasa y la pirólisis, las cenizas generadas caen a través de la rejilla y los gases calientes se trasladan a una zona de reducción ascendente, es importante mencionar que la temperatura del sistema aumenta desde el fondo del reactor hasta el lugar donde se produce la combustión que es el punto de máxima temperatura, mientras que desde la zona de reducción hasta la zona de secado la temperatura disminuye gradualmente (Zhang et al., 2013).

El esquema 3b corresponde a un reactor de lecho fijo de corriente descendente cuya característica principal está dada porque la biomasa y el gas fluyen en la misma dirección, se diferencia del reactor de lecho fijo ascendente ya que la temperatura

disminuye gradualmente desde de la zona de combustión hacia la zona de desvolatilización así como hacia la zona de reducción (Zhang et al., 2013).

El esquema 3c muestra un reactor de lecho fijo de flujo cruzado en donde la alimentación de biomasa se realiza desde la parte superior mientras que el aire es alimentado desde la parte lateral del reactor y el gas producido se extrae del lado opuesto al mismo nivel que se alimenta el aire, se diferencia de los otros tipos de reactores porque la combustión se lleva a cabo alrededor de la entrada de aire. Es necesario añadir que este tipo de reactor tiene baja eficiencia en la conversión (Zhang et al., 2013).

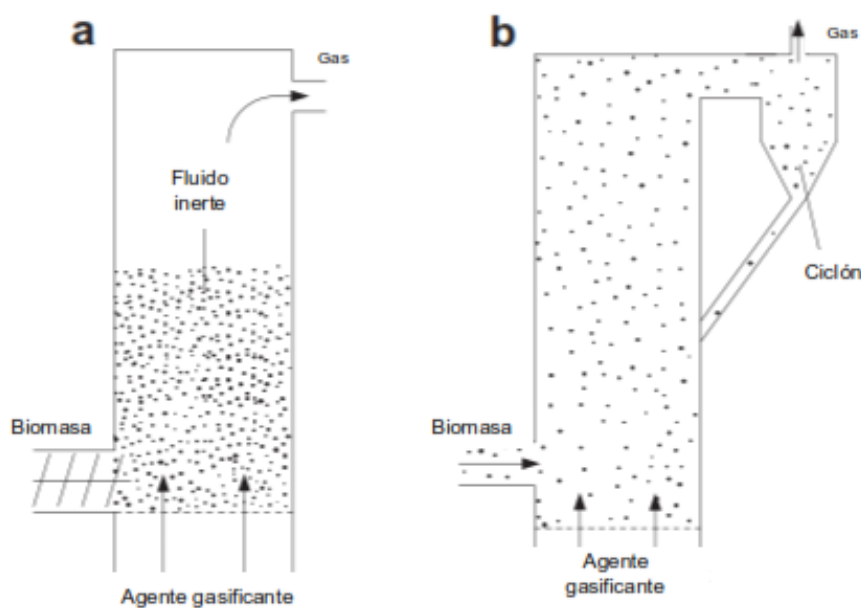
- **Reactores de lecho fluidizado**

Este tipo de reactores se caracteriza porque las partículas de biomasa se encuentran suspendidas con la ayuda de un agente gasificante, lo que permite tener una distribución uniforme de temperatura, mejores velocidades de transferencia de calor y mayor contacto gas-sólido. Debido a que la densidad de partícula de la biomasa es más baja que la densidad de partícula del carbón, dentro del lecho se puede producir coalescencia de burbujas que afecta al sistema de fluidización, por ello la alimentación se da en conjunto con partículas inertes o catalizadores naturales/artificiales como dolomita, olivina, entre otros, con la finalidad de mejorar la fluidización y reducir los alquitranes producidos (Zhang et al., 2013).

De acuerdo con Zhang et al. (2013) los reactores de lecho fluidizado se clasifican con base al patrón de fluidización y su forma de combinación, es así que se tiene reactores de lecho fluidizado burbujeante, circulante y dual, cuyos esquemas se muestran en la figura 4.

Figura 4

Tipos de reactores de lecho fluidizado



Nota. Tomado de *Lignocellulosic biomass gasification technology in China* (p.179), por Zhang et al., 2013, *Renewable Energy*, 49(1)

El reactor de lecho fluidizado burbujeante se puede observar en la figura 4a, consiste en un recipiente que posee en la parte inferior un distribuidor de agente gasificante, mientras que la alimentación se realiza justo encima del distribuidor; una vez fluidizada la biomasa dentro del lecho se da lugar la pirólisis de carbón, gas y otros compuestos de alto peso molecular generando una ruptura de moléculas debido a la alta temperatura del lecho que generalmente se encuentra entre 700-900°C (Zhang et al., 2013).

En la figura 4b es posible observar el esquema de un reactor de lecho fluidizado circulante, en donde el material del lecho se hace circular entre la zona de reacción y el ciclón; el ciclón tiene como objetivo primordial atrapar los sólidos que se encuentra en el producto gaseoso y posterior a ello reciclarlo hacia del reactor (Zhang et al., 2013).

c. Licuefacción

Naik et al. (2010) en su artículo mencionan que el proceso de licuefacción de biomasa puede realizarse en presencia de soluciones alcalis, glicerina, propanol, butano, mediante una licuefacción directa (también llamada licuefacción hidrotermal) o licuefacción indirecta.

- **Licuefacción directa**

Es un proceso termoquímico que tiene la finalidad de producir combustibles líquidos en presencia de agua caliente presurizada, durante suficiente tiempo que permita descomponer la estructura polimérica de la biomasa en componentes líquidos. Este proceso se realiza a presión y temperatura suficientemente elevadas para mantener el agua en estado líquido o en estado supercrítico, tiene la ventaja de no secar la biomasa como lo requieren otros procesos ya que utiliza agua como disolvente, sin embargo presenta desventajas en el alto tiempo de residencia (aproximadamente 0.2 -1 hora) y la alta relación agua-biomasa (3:1 o 10:1) que requiere el proceso; es importante mencionar que debido a la alta presión del proceso (5-20 MPa) existe mayor penetración del disolvente en la estructura de la biomasa que facilita la descomposición de la misma (Ibarra & Rong, 2019).

El mecanismo de reacción que se lleva a cabo comienza con la descomposición de biomasa lignocelulósica en moléculas pequeñas que son inestables y reactivas, y que luego se repolimerizan formando compuestos aceitosos de diferentes pesos moleculares, este aceite generado por la repolimerización contiene ácidos, alcoholes, cetonas, ésteres, fenoles y compuestos aromáticos que dificultan la operación y obtención de un combustible que cumpla con los estándares necesarios, por esta razón este proceso no se ha comercializado (Ibarra & Rong, 2019).

- **Licuefacción indirecta**

De acuerdo con Pandey (2009) la licuefacción indirecta sigue el mismo mecanismo que la licuefacción directa, se diferencian en que la licuefacción indirecta utiliza catalizadores para transformar productos gaseosos no condensables en productos líquidos, este proceso generalmente se realiza luego de pirólisis o gasificación.

d. Pirólisis

Es un proceso termoquímico que está basado en la degradación térmica de la biomasa mediante calor en ausencia de oxígeno produciendo carbón vegetal, bioaceite y combustibles gaseosos, este proceso tiene la finalidad de recuperar biocombustibles de poder calorífico medio bajo; de acuerdo a las condiciones de operación se clasifican en pirólisis convencional, pirólisis rápida y pirólisis instantánea (Naik et al., 2010).

La pirólisis generalmente requiere que la materia prima se encuentre en partículas pequeñas, su funcionamiento se lleva a cabo en diferentes reactores, pero los más importantes son las configuraciones con lechos fluidizados y con lechos fluidizados y circulantes, debido a su facilidad de operación. Este proceso tiene como características altas velocidades de calentamiento, cortos tiempos de residencia del vapor, temperatura moderada y controlada, y enfriamiento rápido o extinción de vapores de pirólisis. Es importante mencionar que existen varios tipos de pirólisis que se mencionan a continuación (Ibarra & Rong, 2019).

- **Pirólisis convencional**

Este proceso se produce en tres etapas, con condiciones de velocidad de calentamiento lenta (de 0.1 a 1 K/s) y tiempo de residencia de 45 a 550 s. En la primera etapa se da lugar la eliminación de agua, rotura de enlaces, aparición de radicales libres, formación de grupos carbonilo, carboxilo e hidroperóxido, la segunda etapa

consiste en la descomposición sólida a ritmo elevado, es la etapa principal del proceso y donde se producen los productos de pirólisis; la tercera etapa consiste en la descomposición del carbón de forma muy lenta formando residuos sólidos ricos en carbono (Naik et al., 2010).

- **Pirólisis rápida**

Este proceso da lugar en un alto rango de temperaturas (850-1250 K) con una velocidad de calentamiento rápida (10-200 K/s) y un corto tiempo de residencia (0.5-10 s) usando biomasa en pequeñas partículas (< 1 mm); este proceso es recomendable para la producción de productos líquidos y gaseosos con alto potencial de uso como combustible (Naik et al., 2010).

- **Pirólisis instantánea**

Este tipo de pirólisis se produce a temperaturas muy altas (1050-1300 K) con una velocidad de calentamiento rápida (> 1000 K/s) y tiempo de residencia corto (< 0.5 s) usando materia prima con partículas de tamaño menores a 2 mm. El producto de este tipo de pirólisis es un bioaceite que puede ser mezclado con carbón para formar bioslurry, el cual mediante gasificación puede transformarse en gas de síntesis (Naik et al., 2010).

Pandey (2009) menciona que la pirólisis instantánea se clasifica en:

- Hidropirólisis: Es aquella que se realiza en presencia de hidrógeno y usando presiones de 20 MPa.
- Pirólisis solar: Utiliza energía solar para el proceso.
- Proceso térmico rápido: El proceso se realiza mediante calentamiento rápido a temperaturas entre 900-950°C con tiempos de residencia entre 30 ms y 1.5 s.

- Pirólisis al vacío: La pirólisis se realiza al vacío, generando múltiples ventajas tales como reducción de reacciones secundarias, alto rendimiento en la producción de líquidos y baja producción de gases.
- Pirólisis catalítica: El proceso se realiza utilizando catalizadores como zeolitas, este tipo de pirólisis permite mejorar la calidad del aceite de pirólisis reduciendo costos.

e. Reformado en fase acuosa

Este proceso utiliza como reactivos derivados de biomasa tal como azúcares y polioles que deben ser solubles en agua, la reacción se lleva a cabo en temperaturas entre 180-260°C y presiones entre 25 – 60 bar en reactores discontinuos, semicontinuos y de lecho fijo tanto en flujo paralelo como contracorriente; es importante señalar que a temperaturas más bajas al rango no se produce la reacción, mientras que a temperaturas más altas se puede producir descomposición de los reactivos y envenenamiento del catalizador. Los catalizadores usados generalmente son metales como Pt, Ni, Co, Fe, entre otros; soportados en MgO, ZrO₂, TiO₂, Al₂O₃ o SiO₂-Al₂O₃ (Cavani et al., 2016).

2.4.3 Procesos bioquímicos

Estos procesos han sido los más investigados a lo largo de los años, está conformado por dos etapas principales que son hidrólisis y fermentación, obteniéndose principalmente alcoholes como productos, los cuales pueden usarse como biocombustibles al ser transformados posteriormente o como aditivo de las gasolinas convencionales.

- **Hidrólisis**

Es un proceso que permite convertir los materiales lignocelulósicos en azúcares simples antes de la fermentación, puede realizarse a través de dos métodos: hidrólisis química e hidrólisis enzimática. La hidrólisis química implica el uso de sustancias químicas, principalmente ácidos, durante cierto periodo de tiempo y temperatura específica, mientras que la hidrólisis enzimática utiliza enzimas biológicas que favorezcan la conversión del material lignocelulósico en glucosa (Balat, 2011).

- **Fermentación**

Luego de la hidrólisis se lleva a cabo la fermentación de los productos obtenidos usando microorganismos como levaduras, bacterias transgénicas, entre otras; este proceso se lleva a cabo en reactores continuos tipo Bach, biorreactores o sistemas de membranas para formar alcoholes y agua, que luego pueden ser separados usando sistemas de membranas, destilación, solventes o prevaporación (Saxena et al., 2009)

Es importante mencionar que es posible combinar el proceso de hidrólisis y fermentación mediante tres esquemas: Hidrólisis y fermentación separada (SHF por sus siglas en inglés), sacarificación y fermentación simultánea (SSF por sus siglas en inglés) y conversión microbiana directa (DMC por sus siglas en inglés) (Balat, 2011).

- **Foto-fermentación**

De acuerdo con Kirtay (2011), la foto-fermentación se basa en el uso de la enzima nitrogenasa para convertir biomasa en condiciones de deficiencia de nitrógeno y a través de la utilización de energía lumínica, también menciona que este proceso alcanza altas tasas de producción de hidrógeno pero posee inconvenientes con respecto al tipo de enzima que usa, la dependencia de energía solar y el diseño de fotobiorreactores.

- **Fermentación oscura**

Este proceso permite producir hidrógeno usando bacterias anaeróbicas que son cultivadas en la oscuridad mediante sustratos ricos en carbono tal como la biomasa, esta ruta de conversión es prometedora en comparación con rutas fotosintéticas ya que las bacterias anaeróbicas se forman sin presencia de luz; este proceso se lleva a cabo a temperaturas entre 298-353 K (Kirtay, 2011).

2.4.4 Procesos híbridos

- **Fermentación de gas de síntesis**

Es una tecnología híbrida, pues requiere un paso previo que implica la gasificación termoquímica de la biomasa para producir el gas de síntesis; el gas de síntesis obtenido se fermenta con bacterias acetogénicas que utilizan la vía Wood-Ljungdahl para producir combustibles y productos químicos, tales como acetato, butanol, etanol y 2,3-butanodiol, entre otros (Daniell et al., 2012).

En cuanto al diseño de reactor, este proceso se ha investigado usando biorreactores CSR con microdispersadores, columnas empaquetadas, columnas de burbujas, lechos de goteo y reactores de fibra hueca (Devarapalli et al., 2016).

La vía Wood-Ljungdahl fue propuesta por Wood y Ljungdahl en 1966 y diseñada para la producción de acetato a partir de la fermentación de CO y/o CO₂ y H₂ usando microorganismos acetogénicos, sin embargo, en los últimos años se han realizado avances en la producción de otros compuestos químicos y combustibles usando diferentes organismos acetogénicos como *C. ragsdalei*, *C. autoethanogenum* y *A. bacchi*, entre otros (Daniell et al., 2012).

2.4.5 Procesos químicos

- **Conversión con agua supercrítica**

Es importante empezar señalando que un fluido supercrítico es aquel que se encuentra en condiciones de temperatura y presión por encima de su punto crítico, en este punto un fluido no es líquido ni gas (Naik et al., 2010).

El proceso de conversión de biomasa usando agua supercrítica permite convertir rápidamente la celulosa en glucosa y la biomasa una mezcla de aceites, ácidos orgánicos, alcoholes y metano; su mecanismo de reacción se basa en la ruptura de los enlaces de celulosa y hemicelulosa para producir moléculas pequeñas de glucosa, xilosa y oligosacáridos, esto se produce porque en estado supercrítico los componentes ácidos y básicos del agua se disocian y son absorbidos por la biomasa (Naik et al., 2010).

2.4.6 Procesos de perfeccionamiento de bioaceites

Se sabe que los bioaceites producidos generalmente en procesos termoquímicos poseen baja densidad energética, alto contenido de humedad y alto contenido de compuestos oxigenados, reduciendo su estabilidad en el tiempo y poder calorífico, provocando dificultades en su uso como combustibles alternativos a combustibles fósiles; por ello es importante realizar un mejoramiento a los bioaceites producidos con la finalidad de cumplir los estándares establecidos para los combustibles (Ibarra & Rong, 2019).

a. Mejora de productos FT

- **Tail gas FT**

El tail gas está formado por hidrocarburos con cadenas de un carbono o dos (C_1 - C_2) que generalmente no son convertidos en nafta por ello se utiliza generalmente como gas natural sintético(Ibarra & Rong, 2019) .

- **Dimerización/Oligomerización de olefinas**

La dimerización de olefinas se basa en el acoplamiento de dos olefinas mientras que la oligomerización permite acoplar hasta cinco olefinas, estos procesos de mejora se realizan con la finalidad de convertir los gases olefínicos en productos líquidos para producir gasolina, combustible para aviones y diésel (Ibarra & Rong, 2019).

- **Aromatización y reformado de nafta FT**

El reformado catalítico permite transformar la nafta de bajo octanaje a nafta de alto octanaje mediante la conversión de parafinas y ciclo parafinas en compuestos aromáticos, para conseguir esto se utiliza catalizadores basado en metales preciosos y reactores de lecho fijo o en movimiento (Ibarra & Rong, 2019).

- **Hidro craqueo de cera FT**

Las ceras FT (C_{20+}) poseen puntos de ebullición superior a $370^{\circ}C$ por lo tanto es necesario convertirlas en destilado medio de flujo frío a través del hidro craqueo, en el cual ocurren dos reacciones en paralelo que son hidroisomerización e hidro craqueo. La hidroisomerización mejora las propiedades de flujo en frío y el hidro craqueo rompe los enlaces de la cera para convertirla en productos deseados, estos productos dependen principalmente del tipo de catalizador que se use (Ibarra & Rong, 2019).

- **Refinación de la fracción acuosa**

Durante el proceso FT se forma una fase acuosa que consiste en una mezcla de alcoholes de cadena corta, compuestos carbonílicos, ácidos carboxílicos y agua; la recuperación de compuestos orgánicos a partir de esta fase acuosa representa un gran desafío, principalmente para los compuestos ácidos. La recuperación de compuestos orgánicos consiste en la deshidratación catalítica de alcoholes a olefinas en presencia de catalizadores de alúmina y en condiciones de temperatura de $275^{\circ}C$, otra alternativa es la hidrogenación parcial de esta fase rica en compuestos oxigenados para separarlos

en productos ricos en carbonilo y alcohol, facilitando su separación en cetonas y aldehídos que luego serán convertidos en sus respectivos alcoholes (Ibarra & Rong, 2019).

b. Mejora de bioaceite de pirólisis

Para obtener biocombustibles como diésel, gasolina, queroseno y subproductos a partir del aceite de pirólisis es necesario una desoxigenación completa y refinado convencional, para ello es necesario utilizar unidades de hidroprocesamiento o craqueo catalítico (Ibarra & Rong, 2019).

- **Hidroprocesamiento**

Este proceso se basa en la eliminación de oxígeno en forma de agua y óxidos de carbono a través de reacciones de hidrodeshidrogenación y descarboxilación a temperaturas moderadas (hasta 400°C) y altas presiones (hasta 200 bares). Se sabe que el hidroprocesamiento en una sola etapa no es ventajoso, por lo tanto, es recomendable realizar el hidroprocesamiento en varias etapas, generalmente son dos etapas; la primer etapa utiliza un reactor catalítico de lecho único que opera en condiciones de temperatura entre 180-250°C y presión de 138 bar, como catalizador se usa sulfuro de cobalto y molibdeno; de forma similar, la segunda etapa consiste en un reactor catalítico a condiciones de temperatura entre 350-425°C utilizando catalizadores basados en rutenio (Ibarra & Rong, 2019).

Los productos obtenidos de la última etapa de hidrocraqueo consisten en dos fracciones líquidas y una parte gaseosa; el producto gaseoso es una mezcla de metano, etano, propano, dióxido de carbono e hidrógeno y las fracciones líquidas son una fase acuosa y una fase oleosa; la fase acuosa contiene muy poco carbono mientras que la fase oleosa consiste en una mezcla de hidrocarburos con bajo contenido de

compuestos oxigenados, por ello esta fase puede ser fraccionada en gasolina, diésel e hidrocarburos pesados (Ibarra & Rong, 2019).

- **Craqueo Catalítico**

El craqueo catalítico se lleva a cabo generalmente en un reactor catalítico a temperaturas entre 350-600°C, presión atmosférica y tiempos de residencia de 15 minutos, se utiliza N₂ como estabilizador de productos y principalmente zeolitas como catalizador, este proceso tiene la finalidad de eliminar el oxígeno en forma de CO₂, dando lugar a la formación de hidrocarburos aromáticos, pero simultáneamente la formación de coque sobre el catalizador (Ibarra & Rong, 2019).

Los productos obtenidos del craqueo catalítico son aceite mejorado (29% en peso), gases (25% en peso), fracción acuosa (21% en peso) y sólidos (18% en peso), estos sólidos corresponden a la formación de coque, carbón y alquitrán, dando lugar a la coquización del catalizador, pese a este inconveniente, el craqueo catalítico representa una mejor alternativa al hidroprocesamiento debido a sus leves condiciones de operación y menor costo operativo (Ibarra & Rong, 2019).

c. Otros procesos de mejora

- **Oligomerización de gas rico en olefinas**

Este proceso es indicado para la conversión de fracciones gaseosas ricas en olefinas hacia iso-olefinas y iso-alcanos (C₅-C₇), aumentando así la producción de gasolinas. El proceso se lleva a cabo en presencia de catalizadores sílice-alúmina amorfa en condiciones de temperatura de 280°C y presiones entre 3-4 MPa, es importante mencionar que este proceso puede ser acoplado a la pirólisis catalítica (Ibarra & Rong, 2019).

- **Hidrotratamiento o hidrodeseoxigenación**

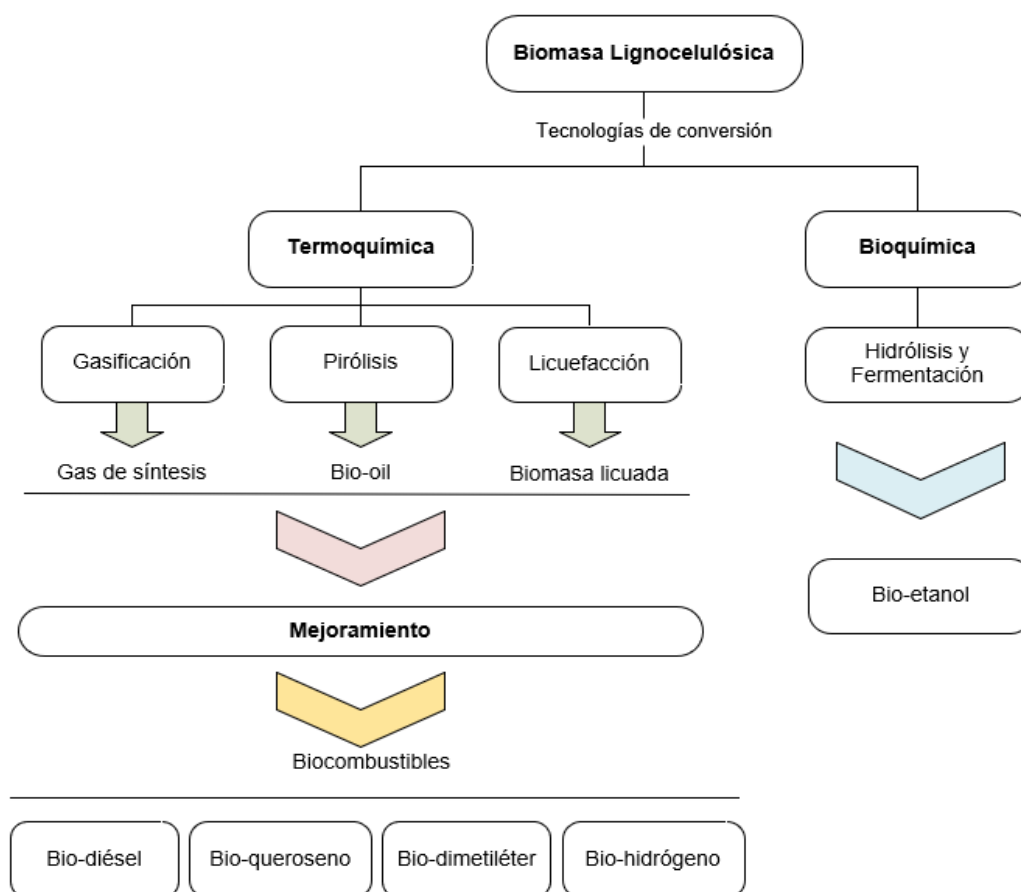
Este proceso es generalmente utilizado como mejoramiento de la biomasa lignocelulósica licuada en condiciones de temperatura de 300°C y presión de 8 MPa en un reactor de suspensión utilizando catalizadores basados molibdeno y tungsteno sin soporte, tiene la finalidad de convertir compuestos oxigenados en hidrocarburos que puedan ser usados como combustibles (Ibarra & Rong, 2019).

2.4.7 Posibles biocombustibles a partir de biomasa lignocelulósica

En la figura 5 se muestran los biocombustibles más representativos obtenidos a partir de la conversión de biomasa lignocelulósica mediante tecnologías termoquímicas y bioquímicas, es importante mencionar que tres de estos biocombustibles serán estudiados a lo largo de este trabajo y han sido elegidos debido a su potencial producción y usos.

Figura 5

Principales biocombustibles a partir de biomasa lignocelulósica



- **Bio-oil**

Es un compuesto de color negro o marrón oscuro que contiene menos del 30% en peso de agua y cientos de componentes oxigenados, se produce generalmente en procesos de pirólisis y síntesis FT, no es utilizado directamente como combustible y debe ser mejorado para obtener biocombustibles de alta calidad como diésel, gasolina y queroseno (Ibarra & Rong, 2019).

- **Bio-dimetiléter**

Es un combustible limpio derivado de biomasa y de encendido por compresión, presenta alta eficiencia y reduce las emisiones de compuestos NO_x y SO_x, puede ser utilizado como sustituto del gas licuado de petróleo (GLP por sus siglas en inglés), como aditivo oxigenado en gasolinas o como sustituto de biodiésel en motores modificados (Lecksiwilai et al., 2016).

- **Bio-hidrógeno**

Es hidrógeno obtenido de cualquier recurso de biomasa, posee buenas características como combustible de transporte, tal como una velocidad de combustión rápida, alto índice de octanaje efectivo, cero toxicidades y ningún riesgo de formación de ozono, además presenta ventajas relacionadas con los costos de gestión de desechos y reducción de emisiones de CO₂ (Lecksiwilai et al., 2016).

- **Bio-etanol**

El etanol derivado de biomasa lignocelulósica es un combustible con alto rendimiento energético y a su vez altos costos de producción ocasionado por el grado de hidrólisis y sacarificación que necesita este tipo de biomasa, sin embargo los costos de producción pueden reducirse en pequeña proporción si se desarrolla métodos de pretratamiento más efectivos (Lecksiwilai et al., 2016).

- **Biodiésel**

Es un combustible oxigenado a base de ésteres monoalquílicos derivados de fuentes biológicas renovables, actualmente constituye un combustible alternativo al diésel obtenido a partir de petróleo ya que ofrece muchas ventajas con respecto al contenido de azufre, punto de inflamación, contenido de aromáticos y biodegradabilidad (Demirbas, 2009).

Capítulo III

3. Metodología

En este capítulo se presentará una descripción detallada de la metodología necesaria que se seguirá con la finalidad de cumplir los objetivos establecidos para este estudio.

3.1 Modalidad de la investigación

Esta investigación es de carácter cualitativa, debido a que está encaminada a una descripción, análisis e interpretación de información proporcionada por diferentes autores con respecto a la rutas de conversión de biomasa lignocelulósica hacia biocombustibles.

3.2 Tipo de investigación

3.2.1 Investigación documental-bibliográfica

Este estudio llevará a cabo una investigación del tipo documental-bibliográfica con la finalidad de buscar, recolectar, organizar, valorar, analizar e interpretar la información bibliográfica más representativa con base a las variables de investigación buscando dar solución al problema planteado.

3.3 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación está relacionado con el tipo de investigación que se utilizará y permitirá establecer los criterios que se seguirán como esquema de trabajo.

3.3.1 Diseño documental-bibliográfico

Se utilizará información recopilada a partir de fuentes secundarias, como son: libros, revistas, tesis y artículos científicos; la información recopilada permitirá desarrollar los criterios considerados en las variables de investigación. Es importante

mencionar que este tipo de diseño investigativo se llevó a cabo durante el desarrollo del marco teórico.

3.4 Nivel de investigación

El nivel de investigación permitirá establecer la profundidad que tendrá el estudio.

3.4.1 Nivel Exploratorio

Se establece este nivel de investigación debido a que no existen investigaciones previas relacionadas directamente con la determinación de rutas de conversión de biomasa lignocelulósicas hacia biocombustibles, con énfasis en el aprovechamiento de tres residuos agroindustriales de la provincia de Cotopaxi.

3.4.2 Nivel Descriptivo

Se establece este nivel porque en el estudio se describirán los parámetros de proceso, equipos y tecnologías usadas en las rutas de conversión de biomasa lignocelulósicas hacia la producción de etanol, dimetiléter e hidrógeno.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de información

De acuerdo con Arias (2012) las técnicas de recolección de información permiten identificar el procedimiento seguido para recolectar dicha información, en tal sentido, menciona que para una investigación de carácter documental, las técnicas son: análisis documental y análisis de contenido.

- **Análisis documental**

Se utilizará este tipo de técnica debido a que la información recopilada de fuentes secundarias a través del internet, serán clasificadas y almacenadas de acuerdo a una variable de interés, para ello se utilizará como instrumento un computador portátil.

- **Análisis de contenido**

Esta técnica será utilizada para identificar las características bibliográficas de la fuente durante la creación de citas y referencias bibliográficas, usando como instrumento el gestor bibliográfico con software libre Mendeley.

3.6 Procesamiento de información

La información recopilada será procesada con base a una revisión crítica que tendrá la finalidad de eliminar la información que sea contradictoria, que esté incompleta, que sea incomprensible, etc.

3.7 Discusión de resultados

La discusión de resultados será llevada a cabo en base a los procesos de conversión de biomasa lignocelulósica hacia la producción de biocombustibles establecidos, sustentando bibliográficamente las razones de su elección.

Capítulo IV

4. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Resultados de la investigación

Los siguientes resultados se han obtenido siguiendo el diseño investigativo propuesto en el capítulo anterior y están enfocados al uso de biomasa lignocelulósica como bagazo de caña de azúcar, residuos de banano, palma africana y cacao, ya que estos representan los principales residuos agroindustriales de la provincia de Cotopaxi.

Las rutas de conversión se han elegido siguiendo los criterios de la variable dependiente planteada para este estudio y en función de tres biocombustibles que son: bioetanol, biodimetiléter y biohidrógeno.

4.1.1 Producción de bioetanol

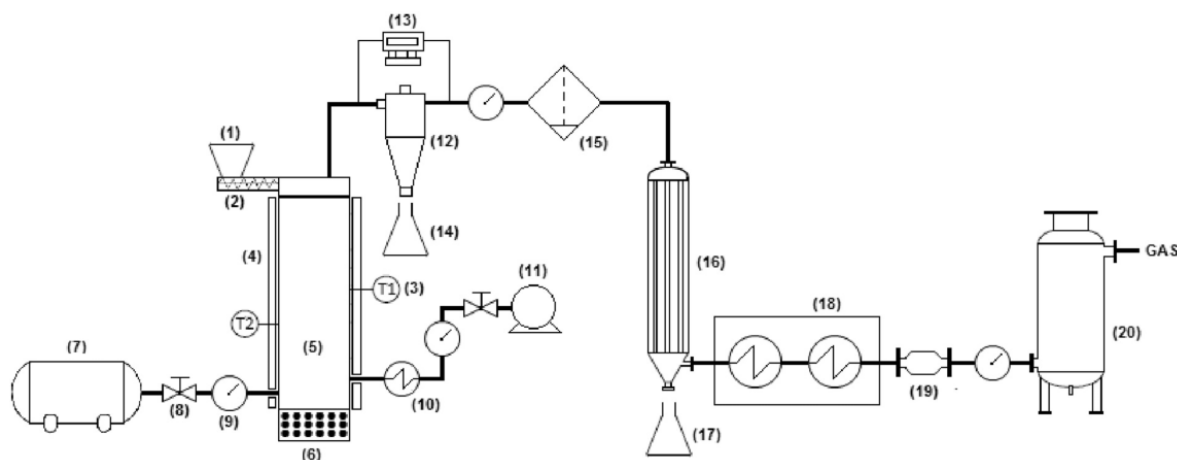
El estudio para la producción de bioetanol se llevó a cabo mediante una revisión bibliográfica de procesos bioquímicos, termoquímicos e híbridos; con base a la información consultada es posible establecer bibliográficamente que una de las mejores rutas para su producción es el proceso de fermentación de gas de síntesis, que implica también un proceso de gasificación termoquímica para la generación del gas a partir de biomasa lignocelulósica, estos procesos se describen a continuación:

- **Generación de gas de síntesis (Gasificación)**

La gasificación es un paso importante para la ruta de obtención de bioetanol elegida, pues provee la materia prima para la fermentación, por ello se ha seleccionado un proceso de gasificación que está constituido por un reactor gasificador, un ciclón, un sistema de limpieza, un sistema de alimentación y un sistema de enfriamiento, tal como se muestra en la figura 6.

Figura 6

Esquema general del proceso de gasificación



Nota: (1) Entrada de alimentación, (2) Alimentador de tornillo, (3) Termopar, (4) Calentador, (5) Gasificador, (6) Arena de sílice, (7) Generador de vapor, (8) Válvula, (9) Caudalímetro, (10) Intercambiador de calor, (11) Compresor de aire, (12) Ciclón, (13) Controlador de temperatura, (14) Tanque de almacenamiento de sólidos, (15) Sistema de filtrado, (16) Condensador, (17) Almacenamiento de alquitrán, (18) Sistema de enfriamiento, (19) Liberación de presión y (20) Recolección de muestras gaseosas.

Tomado de *Syngas production from air-steam gasification of biomass with natural catalysts* (p.519) por Tian et al., 2018, *Science of the Total Environment*, 645.

La gasificación se lleva a cabo en un reactor de lecho fluidizado con diámetro exterior de 120 mm y altura de 610 mm, fabricado en acero inoxidable de 7.5 mm de espesor; como agente de gasificación se utiliza una mezcla de aire-vapor, como material de lecho se usa arena de sílice y un catalizador de dolomita con tamaños de partícula entre 0.4-0.5 mm (Tian et al., 2018).

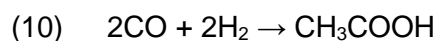
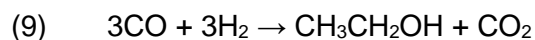
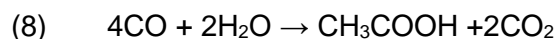
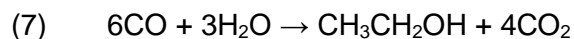
El proceso se inicia con el calentamiento indirecto del reactor usando calentadores eléctricos a una velocidad de 10°C/min hasta alcanzar las temperaturas de reacción que oscilan entre 800-1000°C, la relación vapor-biomasa (V/B) se ajusta en

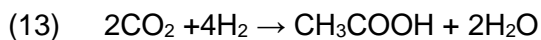
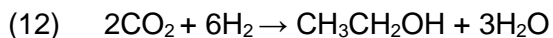
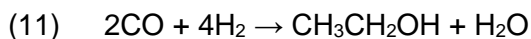
0.6, el radio de equivalencia (ER) en 0.14 y la biomasa debe ser alimentada en forma de pequeñas partículas con tamaños entre 2-3 mm, luego de darse las reacciones de gasificación, los productos finales (gas, alquitrán y carbón) se envían a un ciclón, los alquitranes se separan de la mezcla mediante un condensador y se recogen en un tanque de almacenamiento, luego se utiliza diclorometano para eliminar los restos de alquitranes del condensador, por otro lado, el gas de síntesis generado se pasa por intercambiadores de calor para alcanzar una temperatura de 175°C, luego se recoge muestras en bolsas de gas y se envían para análisis de composición (Tian et al., 2018).

- **Fermentación de gas de síntesis**

Este proceso utiliza gas de síntesis generado a partir de biomasa lignocelulósica, se realiza en un biorreactor de lecho percolador (TBR por sus siglas en inglés) que funciona en modo co-corriente y sistema semicontinuo, su diseño interno se basa en vidrio de borosilicato con dimensiones de 5.1 cm de diámetro y 61 cm de largo, como material de empaque se utiliza perlas de vidrio de cal sodada de 6 mm de diámetro y en el interior del reactor se coloca una rejilla de 3 mm de abertura a 9 cm del fondo para que sostenga el empaque. (Devarapalli et al., 2016).

Como microorganismo y medio para que se produzca la fermentación se utiliza el microorganismo *Clostridium Ljungdahlii* y un medio de cultivo constituido por licor de maceración de maíz y una solución metálica de Ni⁺², el medio debe tener un pH entre 4-5, mediante las siguientes reacciones (Daniell et al., 2012).

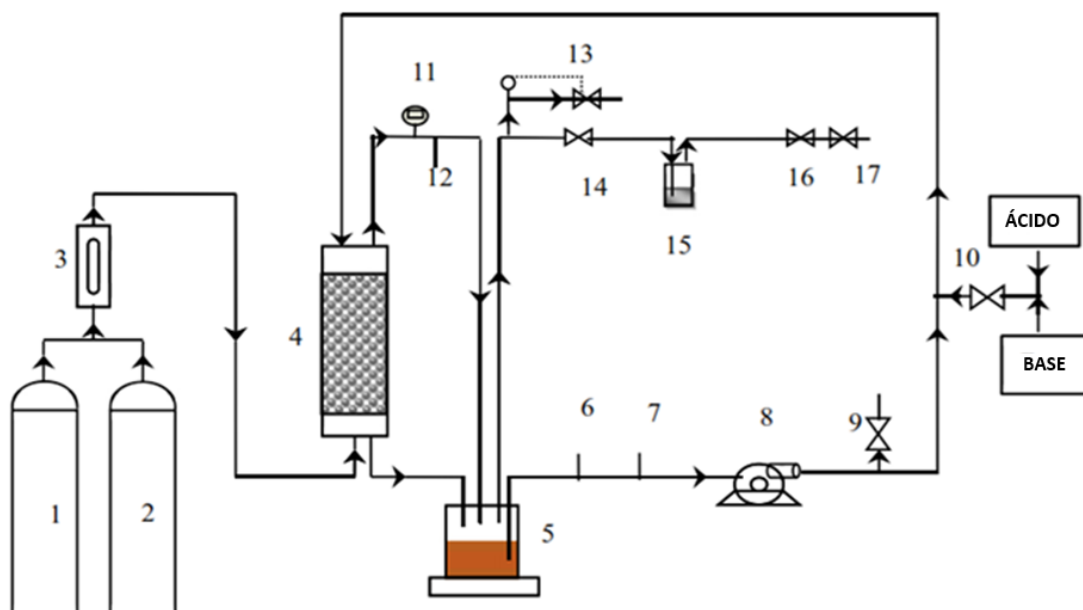




El proceso se inicia con la esterilización del reactor a 121°C usando N₂ por 6h para mantener condiciones anaerobias, paralelo a ello, 200 mL del medio se colocan en botellas de suero de 500 mL, se hierve y purga usando N₂ durante 3-5 minutos, posterior a ello se sella herméticamente y se esteriliza, luego de la esterilización se presuriza la botella que contiene el medio con la finalidad de facilitar su transferencia hacia el reactor por diferencia de presión; se transfiere el medio fresco usando un tubo de teflón estéril con agujas 22G de 38 mm a través de la entrada de muestra líquida, luego de la inserción del medio se vuelve a esterilizar el reactor con N₂ durante 8 h, posterior a este tiempo se transfiere el inóculo del microorganismo igual que cuando se transfirió el medio líquido; el reactor opera a temperaturas de 37°C con un caudal de líquido de 200 mL/min y un caudal de gas de 4.6 sccm. Es importante mencionar que cada cierto tiempo se retira del reactor una cantidad determinada de medio y se suministra medio fresco en una proporción más baja, por otro lado, durante el proceso se deben recolectar muestras líquidas y gaseosas para su monitoreo; en la figura 5 se muestra un esquema general del proceso (Devarapalli et al., 2016).

Figura 7

Esquema general del sistema de fermentación de gas de síntesis

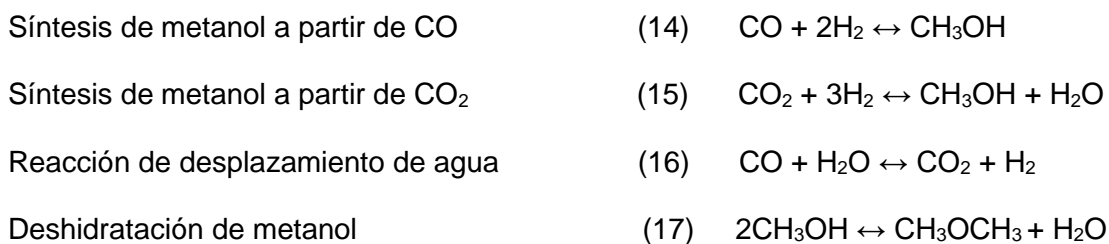


Nota: (1) Tanque de N₂, (2) Tanque de gas de síntesis, (3) Rotámetro, (4) Reactor TBR, (5) Sumidero del medio, (6) Prueba ORP, (7) Prueba pH, (8) Bomba de flexión, (9) Muestreo líquido, (10) Adición ácido-base, (11) Manómetro, (12) Muestreo de gas, (13) Línea de derivación, (14) Regulador de contrapresión, (15) Burbujeador, (16) Válvula de retención y (17) Válvula de bola. Recuperado de *Ethanol production during semi-continuous syngas fermentation in a trickle bed reactor using Clostridium ragsdalei* (p. 58), por Devarapalli et al., 2016, *Bioresource Technology*, 209.

4.1.2 Producción de biodimetiléter

En la producción de biodimetiléter (DME) se estudiaron dos rutas termoquímicas, la ruta directa que se realiza en un solo paso y la ruta indirecta que requiere dos pasos; a partir de la información analizada se determinó que la ruta directa es la más indicada para la producción de biodimetiléter, esta ruta utiliza como alimentación gas de síntesis que es obtenido a partir de biomasa lignocelulósica.

De acuerdo con (Azizi et al., 2014) la ruta directa para la producción de DME se lleva a cabo a través de 4 reacciones, como siguen:



Debido a que este proceso requiere gas de síntesis como alimentación se tomará en cuenta el mismo proceso de gasificación que fue analizado para la producción de etanol en el apartado anterior.

- **Síntesis directa de DME**

La síntesis directa de DME se lleva a cabo en un reactor de lecho fijo con un catalizador híbrido conformado por una parte de Cu-ZnO/Al₂O₃ y otra parte de γ - Al₂O₃ modificado, las reacciones de síntesis de metanol se dan lugar en el catalizador Cu-ZnO/ Al₂O₃, mientras que la deshidratación de metanol se da lugar en la parte ácida del catalizador híbrido que es γ - Al₂O₃ (Gogate, 2018).

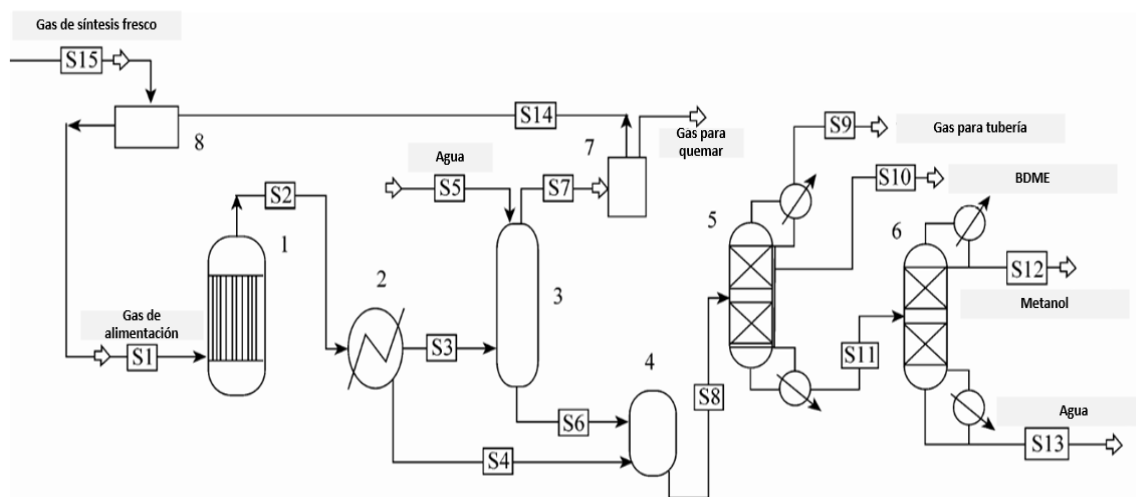
El proceso está limitado por el tipo de catalizador, temperatura, presión, radio de alimentación de H₂/CO y velocidad espacial, por ello el proceso debe operarse a temperaturas entre 230-270°C con presiones de 4 MPa, con una relación H₂/CO entre 1-1.4 y una velocidad espacial entre 15 000 – 30 000 ml/gcat/h (Lu et al., 2004).

En la figura 8 se muestra un esquema general del proceso que empieza con la mezcla del gas de síntesis fresco con el gas reciclado desde el absorbedor, esta mezcla se introduce en el reactor en donde se producen las reacciones correspondientes, los productos del reactor se envían a un condensador para obtener dos fracciones, una líquida y una gaseosa, la fracción gaseosa es introducida al absorbedor a una presión

más baja que la inicial, el gas residual obtenido de la parte superior del absorbedor es reciclado a la alimentación mientras que la parte líquida del absorbedor se mezcla con la fracción líquida del condensador para ser alimentados a un destilador que permite obtener DME por un conducto lateral en la etapa adecuada, el destilado del destilador de DME es enviado a tuberías para su combustión, mientras que los fondos se envían a otro destilador para obtener metanol y agua que usualmente son pequeñas cantidades (Han et al., 2009).

Figura 8

Esquema general de la síntesis de DME



Nota: (1) Reactor de lecho fijo, (2) Condensador, (3) Absorbedor, (4) Mezclador, (5) Destilador de DME, (6) Destilador de metanol, (7) Divisor, (8) Compresor. Recuperado de *Modeling and Simulation of Production Process on Dymethyl Ether Synthesized from Coal-based Syngas by One-step Method* (p.109) por Han et al., 2009, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 17(1).

4.1.3 Producción de biohidrógeno

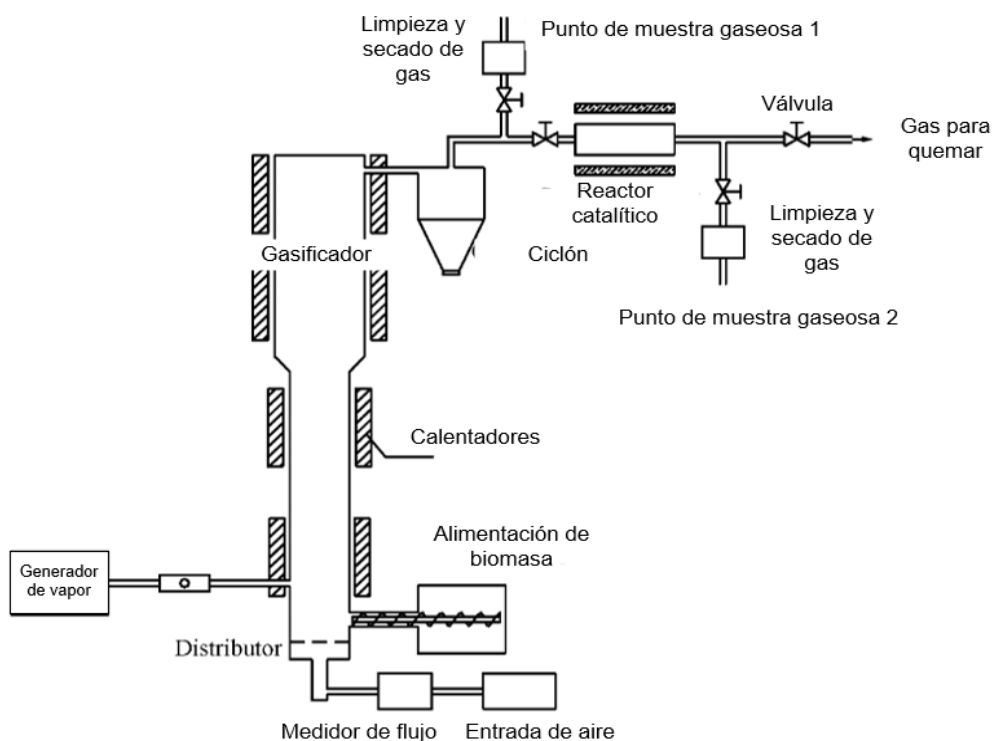
Se ha escogido la gasificación como una ruta principal para la conversión de biomasa lignocelulósica en hidrógeno, se determinó adoptar un sistema de gasificación similar al proceso mencionado en el apartado 4.4.1 pero con algunas modificaciones, tal como se describe a continuación.

La gasificación se lleva a cabo en un reactor de lecho fluidizado con diámetro exterior de 120 mm y altura de 610 mm, fabricado en acero inoxidable de 7.5 mm de espesor; como agente de gasificación se utiliza una mezcla de aire-vapor, como material de lecho se usa arena de sílice y un catalizador de dolomita con tamaños de partícula entre 0.4-0.5 mm (Tian et al., 2018).

Adicional al uso de dolomita como catalizador se añadirá el uso de un catalizador de Ni que se coloca en un segundo reactor aguas abajo del gasificador, usando un reactor catalítico de lecho fijo fabricado en acero inoxidable con 400 mm de longitud y 38.5 mm de diámetro interior, el esquema del proceso está dado de acuerdo a la figura 9 (Lv et al., 2004).

Figura 9

Esquema de gasificación para producción de hidrógeno



Nota: Adaptado de *Hydrogen-rich gas production from biomass catalytic gasification* (p. 229), por Lv et al., 2004, *Energy and Fuels*, 18(1),

El proceso se inicia con el calentamiento indirecto del reactor usando calentadores eléctricos a una velocidad de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ hasta alcanzar las temperaturas de reacción que oscilan entre $800\text{-}1000^{\circ}\text{C}$, la relación vapor-biomasa (V/B) se ajusta en 0.8, el radio de equivalencia (ER) en 0.14 y la biomasa debe ser alimentada en forma de pequeñas partículas con tamaños entre 2-3 mm (Tian et al., 2018).

Luego de darse las reacciones de gasificación, el gas producido se envía al ciclón que debe encontrarse a una temperatura de 200°C y luego hacia el reactor catalítico, es importante mencionar que el reactor catalítico debe calentarse a la misma temperatura que el gasificador, finalmente el gas producido es acondicionado y luego se

recoge muestras en bolsas de gas y se envían para análisis de composición (Lv et al., 2004).

4.2 Discusión de resultados

En este apartado se justificará la razón de elección de los procesos para cada biocombustible, en tal sentido se describirán el efecto de la selección del tipo de reactor, catalizador, temperaturas y condiciones de operación en cada ruta seleccionada.

4.2.1 Producción de bioetanol

En el proceso de gasificación se eligió un reactor de lecho fluidizado ya que este tipo de reactor es el más usado a nivel industrial y permite obtener gas con bajo contenido de alquitrán y altos rendimientos (Daniell et al., 2012). Como agente gasificante se escogió una mezcla de aire-vapor porque permite obtener gas de síntesis con alto valor calorífico y emisiones de CO₂ dentro del límite permitido, la relación E/R se ajustó en 0.4 dado que está dentro del límite establecido en bibliografía el cual va desde 0.2 a 0.4 y se sugiere trabajar con 0.4 cuando se opera a temperaturas superiores a 850°C; la relación V/B se estableció en 0.6 pues los resultados indican que es la relación óptima para obtener gas rico en H₂ y CO (Tian et al., 2018). En cuanto al catalizador se determinó usar dolomita porque permite eliminar los hidrocarburos de la corriente de gas, es barato, es regenerable y disminuye la aglomeración en el lecho fluidizado en comparación con catalizadores de olivina, álcalis y metálicos (Alauddin et al., 2010).

La fermentación de gas de síntesis derivado de biomasa lignocelulósica ha sido considerada como una buena ruta para la producción de bioetanol debido a que presenta múltiples ventajas en comparación con enfoques síntesis Fischer-Tropsch y bioquímicas, la tabla 2 muestra un cuadro comparativo de las características más representativas de los tres enfoques analizados:

Tabla 2*Comparación entre procesos para la producción de bioetanol*

	Fermentación de Gas	Procesos Bioquímicos	Síntesis Fischer Tropsch
Pretratamiento de materia prima	No requiere	Si requiere	Si requiere
Rendimiento de conversión de carbono	Alta	Baja	Alta
Consumo de energía	Medio	Bajo	Alto
Catalizador	Biológico	Biológico	Catalizadores metálicos robustos
Envenenamiento de catalizador	Bajo	Bajo	Medio-alto
Regeneración de catalizador	Si	Si	Si, pero costoso
Costos de catalizador	Medio	Medio	Medio-alto
Selectividad de catalizador	Alta selectividad	Alta selectividad	Alta selectividad
Condiciones de operación	Temperaturas y presiones moderadas	Temperaturas y presiones moderadas	Altas temperaturas y presiones
Costos de operación	Bajo	Bajo	Alto
Productos secundarios	Si	Si	Si

Nota: Adaptado de *Commercial Biomass Syngas Fermentation* (p.5376), por Daniell et al., 2012, *Energies*, 5(12)

Como se puede observar en la tabla 2, el proceso de fermentación de biogás tiene mejores condiciones en cuanto al tipo de biomasa que utiliza ya que en la gasificación todos los componentes de la biomasa son aprovechados, de la misma

forma posee buenas características en cuanto al tipo de catalizador ya que utiliza catalizadores biológicos que son tolerantes a muchos contaminantes y pueden ser regenerados, de acuerdo al tipo de catalizador usado se puede obtener alta selectividad hacia el etanol con la producción de compuestos secundarios en pequeñas cantidades que podrían ser separados mediante procesos de destilación, además posee bajos costos de operación pues opera a condiciones ambientales y sus costos operativos está dado principalmente por el proceso de gasificación.

En cuanto al tipo de reactor, se ha seleccionado un reactor TBR debido a que posee mejores características en cuanto a la transferencia de masa, productividad y conversión de gas en comparación con reactores empaquetados y CSTR, además no posee partes móviles por lo tanto se reduce el requerimiento de energía si se compara con un reactor CSTR, el reactor está construido con vidrio de borosilicato pues este material evita la corrosión y permite tener reacciones de calidad, por otra parte, se escogió un empaque de perlas de vidrio de cal sodada debido a que mejora la transferencia de masa y se estableció un sistema de funcionamiento semicontinuo que permitirá realizar un suministro de medio de inoculación fresco y de esta forma garantizar la continuidad en la actividad del catalizador, finalmente se escogió un sistema co-corriente para el reactor con la finalidad de evitar inundaciones (Devarapalli et al., 2016).

El biocatalizador seleccionado fue *C. Ljungdahlii*, debido a que posee mayor selectividad hacia la producción de etanol, además opera alrededor de temperaturas de 37°C y presión atmosférica, tiene una tolerancia de 50 g/L de etanol y su rendimiento está relacionado con el medio en que se cultiva. En ese sentido, se estableció como medio al licor de maceración de maíz pues de acuerdo a investigaciones reemplaza con éxito a componentes de medios de vitaminas y minerales más costos, de la misma

manera se seleccionó como cofactor metálico a una solución rica en níquel debido a que mejora la productividad microbiana hacia la producción de etanol (Daniell et al., 2012).

4.2.4 Producción de biodimetiléter

Para la producción de DME se analizó dos rutas que son directa e indirecta, a partir de ello se estableció la ruta directa como la más prometedora en comparación con la ruta indirecta, en tal sentido, en la tabla 3 se muestran las principales diferencias entre estas dos rutas.

Tabla 3*Características de las rutas de producción de DME*

	Ruta directa	Ruta indirecta
Proceso	Un solo paso	Dos pasos
Requerimiento energético	Medio-alto	Alto
Tipo de catalizador	Bifuncional	Heterogéneo con base metálica
Envenenamiento o desactivación de catalizador	Medio	Medio-alto
Selectividad	Alto	Alto
Costos de producción	Medio	Alto
Conversión de carbono	Alto	Alto
Reactor	Un solo reactor	Dos reactores
Emisiones de CO₂	Medio	Alto

Nota: Adaptado de Recent progress for direct synthesis of dimethyl ether from syngas on the heterogeneous bifunctional hybrid catalysts (p.504), por Saravanan et al., 2017, Applied Catalysis B: Environmental, 217.

Como se puede observar en la tabla 3 el proceso directo presenta ventajas en cuanto al tipo de ruta, reactor y catalizador usado; se seleccionó esta ruta como la más potencial porque en comparación con el proceso indirecto que involucra etapas de síntesis de metanol, purificación de metanol y luego su conversión en DME, el proceso directo permite producir simultáneamente la síntesis de metanol y su deshidratación para la producción de DME en un solo reactor sin necesidad de la etapa de purificación de metanol, esta característica influye significativamente en los costos del proceso.

Dado que el proceso se da en un solo reactor usando un catalizador híbrido se reducen las limitaciones termodinámicas en la síntesis de metanol conduciendo a una mayor conversión de CO, mayor selectividad de DME y menor demanda de hidrógeno en la alimentación (Saravanan et al., 2017).

Se estableció el uso de un catalizador híbrido con base en cobre constituido por Cu-ZnO/Al₂O₃ y γ -Al₂O₃ que, aunque son diferentes son compatibles y permiten catalizar las cuatro reacciones involucradas de forma paralela, además su estudio se encuentra bien desarrollado y presentan centros activos selectivos y estables, sin embargo, el uso de γ -Al₂O₃ puro puede presentar inconvenientes por la presencia de agua durante la reacción de desplazamiento de gas, sin embargo este inconvenientes se puede reducir por el uso de γ -Al₂O₃ modificado. El uso de este tipo de catalizador permitió establecer la temperatura de reacción entre 230-270°C ya que a temperaturas superiores a 270°C el catalizador se desactiva, por ello se estableció ese rango de temperaturas pues diversos estudios muestran una alta conversión y buena actividad del catalizador (Azizi et al., 2014).

En cuanto al tipo de reactor es recomendable usar un reactor de lecho fluidizado porque permite un mejor control de temperatura pero está limitado por su poco estudio y su factibilidad no está establecida, por otro lado, el reactor de suspensión también es sugerido como una buena alternativa para la producción de DME con un alto control de temperatura pero está limitado por la resistencia a la transferencia de masa producida por el uso de un medio en el que se encuentra suspendido el catalizador y a través del cual debe burbujear el gas, por ello se eligió un reactor de lecho fijo, debido a su sencillez de diseño, fácil operación y menor resistencia a la transferencia de calor (Lu et al., 2004).

4.2.5 Producción de biohidrógeno

Para establecer una ruta de producción de hidrógeno se estudiaron procesos termoquímicos y bioquímicos tales como gasificación catalítica, pirólisis, electrolisis, fotocátalisis bioquímica, fermentación oscura, foto-fermentación, reformado en fase acuosa (APR por sus siglas en inglés) y gasificación usando agua supercrítica, en la tabla 4 se detallan algunas características que permitieron seleccionar a la gasificación catalítica como la ruta con mejores condiciones en aspectos de eficiencia energética, tamaño o escala de producción, desventajas y ventajas.

Tabla 4*Características de las rutas de producción de hidrógeno*

	Eficiencia energética	Tamaño de producción	Tipo de catalizador	Desventajas	Ventajas
Gasificación catalítica	40-50%	Medio/ disponible actualmente	Minerales, álcalis y metales	Disponibilidad estacional, dificultad operacional, problemas de transportación, variación en el contenido de H ₂	Proceso renovable, utiliza todos los componentes de biomasa
Pirólisis	56%	Medio/ disponible actualmente	Metales	Disponibilidad estacional, dificultad operacional, problemas de transportación, variación en el contenido de H ₂ , generación de subproductos difíciles de manejar y fácil desactivación del catalizador	Proceso renovable, utiliza todos los componentes de biomasa
Electrólisis	25%	Pequeña/ disponible actualmente y en investigaciones	No usa	Bajas eficiencias globales y altos costos	Tecnología novedosa, bajas emisiones de CO ₂

	Eficiencia energética	Tamaño de producción	Tipo de catalizador	Desventajas	Ventajas
Fotocatálisis biológica	10-14%	Actualmente en investigaciones	No usa	Caro, bajas eficiencias y altos costos de capital	Proceso renovable y una fuente alternativa de H ₂
Fermentación oscura	Sin información	Actualmente en investigaciones	No usa	Bajo uso de energía para la producción de H ₂	Renovable, presenta un tratamiento simultáneo de los desechos, es un proceso simple y barato
Fotofermentación	Sin información	Actualmente en investigaciones	Enzimas nitrogenasa	Alta demanda de energía por parte del catalizador, baja conversión de energía solar y requiere grandes áreas para la instalación de fotobiorreactores anaeróbicos	Alto rendimiento de conversión teórico, no utiliza oxígeno reduciendo el potencial de inhibición.
APR	Sin información	Bajo/ disponible actualmente	Metales nobles con soportes ácidos	Requiere un pretratamiento intenso para sacarificar la biomasa, variación de contenido de H ₂ y baja conversión de biomasa	Operación a bajas temperaturas

	Eficiencia energética	Tamaño de producción	Tipo de catalizador	Desventajas	Ventajas
Gasificación con agua supercrítica	Alrededor de 40-50%	Bajo	Sales álcalis o metales	Su rendimiento depende de las condiciones de operación, alimentación y diseño del reactor; presenta altos costos de procesamiento y obstrucción por sales en el reactor.	Presenta selectividad para la producción de H ₂ y CO.

Nota: Adaptado de Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield - A review (p.572), por Parthasarathy & Narayanan, 2014, Renewable Energy, 66.

A partir de la tabla 4 se puede determinar que la gasificación catalítica, pirólisis, APR y gasificación con agua supercrítica son procesos que se pueden desarrollar actualmente pues poseen investigaciones avanzadas, de estas cuatro opciones y tomando en consideración las características, ventajas y desventajas descritas anteriormente se seleccionó el proceso de gasificación catalítica como la mejor ruta para producir hidrógeno a partir de biomasa lignocelulósica ya que presenta un rendimiento de H_2 significativo, aunque su rendimiento es menor al reportado para la pirólisis no produce compuestos secundarios que puedan afectar significativamente el proceso tal como ocurre durante la pirólisis; en comparación con el APR, la gasificación permite utilizar todos los componentes presentes en la biomasa incluida la lignina, lo que no ocurre en el proceso APR ya que este requiere un pretratamiento para hidrolizar la biomasa en el cual solo se aprovecha la celulosa y hemicelulosa; con respecto a la gasificación con agua supercrítica, este proceso está limitado por sus altos costos de producción y por ello no se analizó a fondo su funcionamiento.

En el proceso de gasificación se eligió un reactor de lecho fluidizado ya que este tipo de reactor es el más usado a nivel industrial y permite obtener gas con bajo contenido de alquitrán y altos rendimientos (Daniell et al., 2012). Como agente gasificante se escogió una mezcla de aire-vapor porque permite obtener gas de síntesis con alto valor calorífico y emisiones de CO_2 dentro del límite permitido, la relación E/R se ajustó en 0.4 dado que está dentro del límite establecido en bibliografía el cual va desde 0.2 a 0.4 y se sugiere trabajar con 0.4 cuando se opera a temperaturas superiores a $850^{\circ}C$; la relación V/B se estableció en 0.8 pues los resultados indican que es la relación óptima para obtener gas rico en H_2 en función con el tipo de catalizador (Tian et al., 2018). En cuanto al catalizador se determinó usar dolomita porque permite eliminar los hidrocarburos de la corriente de gas, es barato, es regenerable y disminuye

la aglomeración en el lecho fluidizado en comparación con catalizadores de olivina, álcalis y metálicos (Alauddin et al., 2010).

Con respecto al reactor catalítico añadido en este proceso, se lo eligió porque permite mejorar el rendimiento en la producción de H_2 y reducir el contenido de CO y CO_2 , aunque se esperaría un incremento en el costo de producción su adhesión al proceso se puede justificar por el incremento de H_2 en la corriente de salida que conlleva a reducir costos durante la limpieza de esta corriente y la separación de CO y CO_2 presentes. Para esta sección se eligió un reactor de lecho fijo debido a que su diseño es simple y de fácil funcionamiento, como catalizador se utilizó Ni ya que este catalizador posee alta selectividad de H_2 y al encontrarse luego del gasificador su vida útil se incrementa pues el gas a la salida del gasificador de lecho fluidizado contiene un nivel bajo de alquitrán (Lv et al., 2004).

Capítulo V

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

- De acuerdo a la investigación realizada se puede establecer que los procesos de biorefinación para la producción de biocombustibles que poseen investigaciones profundas y detalladas, se basan principalmente en procesos termoquímicos y bioquímicos.
- Las rutas seleccionadas bibliográficamente para la conversión de biomasa lignocelulósica hacia biocombustibles cumplen criterios de viabilidad en aspectos químicos, tecnológicos y medioambientales; y, han sido sustentadas por investigaciones previas.
- Las rutas de conversión fueron seleccionadas con la finalidad de transformar biomasa lignocelulósica generada principalmente por caña de azúcar, banano, palma africana y cacao, en etanol, dimetiléter e hidrógeno, de modo que se impulse el aprovechamiento de los residuos agroindustriales de la provincia de Cotopaxi.
- Se determinó bibliográficamente que la mejor ruta para la producción de bioetanol es la unión de un proceso termoquímico y un proceso químico, como son la gasificación para la producción de gas de síntesis y su posterior fermentación usando microorganismos.
- Se encontró bibliográficamente que para la producción de dimetiléter la mejor ruta es la síntesis directa a partir de gas de síntesis obtenido de biomasa lignocelulósica por gasificación.

- En la producción de hidrógeno se estableció bibliográficamente a la gasificación como la mejor ruta para obtener gas de síntesis rico en H₂ que puede ser usado directamente como combustible y/o precursor de químicos o combustibles.
- La gasificación es la principal ruta de conversión de biomasa lignocelulósica en precursores o directamente en combustibles, esto quedó evidenciado por su actuación para la producción de etanol, dimetiléter e hidrógeno.
- La revisión bibliográfica llevada a cabo permitió conocer que la gasificación de biomasa lignocelulósica sigue un esquema similar a la gasificación de carbón lo que la convierte en una ruta potencial para aprovechar los residuos agroindustriales e impulsar el desarrollo de biorrefinerías en el Ecuador.

5.2 Recomendaciones

- Es recomendable ampliar los horizontes de investigación con respecto a los tipos de biocombustibles que se pueden obtener a partir de biomasa lignocelulósica.
- Es recomendable enfocar la investigación bibliográfica en un solo biocombustible con la finalidad de analizar minuciosamente los factores que afectan su producción desde la generación de biomasa lignocelulósica hasta el producto terminado.
- Se recomienda realizar una investigación bibliográfica que permita establecer las mejores rutas de producción de biocombustibles de primera, segunda y tercera generación con la finalidad de realizar una comparación entre los diferentes tipos de biocombustibles y determinar el grado de investigación que se tiene hasta la actualidad.

Bibliografía

- Alauddin, Z., Lahijani, P., Mohammadi, M., & Mohamed, A. (2010). Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2852–2862.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.026>
- Antizar, B., & Turrion, J. (2008). Second-generation biofuels and local bioenergy systems. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2(1), 455–469.
<https://doi.org/10.1002/bbb>
- Arias, F. (2012). *El proyecto de investigación* (6ta ed.). Editorial Episteme.
- Azizi, Z., Rezaeimanesh, M., Tohidian, T., & Rahimpour, M. (2014). Dimethyl ether: A review of technologies and production challenges. *Chemical Engineering and Processing*, 82, 150–172.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.06.007>
- Balat, M. (2011). Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway : A review. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 858–875.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.013>
- Balat, M., & Ayar, G. (2005). Biomass energy in the world, use of biomass and potential trends. *Energy Sources*, 27(10), 931–940.
<https://doi.org/10.1080/00908310490449045>
- Carvalho, F., Duarte, L., & Gírio, F. (2008). Hemicellulose biorefineries: a review on biomass pretreatments. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 67(8), 849–864.

- Cavani, F., Albonetti, S., Basile, F., & Gandini, A. (Eds.). (2016). *Chemicals and Fuels from Bio-Based Building Blocks* (1ra ed.). Wiley.
- Centi, G., Lanzafame, P., & Perathoner, S. (2011). Analysis of the alternative routes in the catalytic transformation of lignocellulosic materials &. *Catalysis Today*, 167(1), 14–30.
<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2010.10.099>
- Daniell, J., Köpke, M., & Simpson, S. (2012). Commercial Biomass Syngas Fermentation. *Energies*, 5(12), 5372–5417.
<https://doi.org/10.3390/en5125372>
- Demirbas, A. (2009). *Biofuels* (1ra ed.). Springer.
- Devarapalli, M., Atiyeh, H., Phillips, J., Lewis, R., & Huhnke, R. (2016). Ethanol production during semi-continuous syngas fermentation in a trickle bed reactor using *Clostridium ragsdalei*. *Bioresource Technology*, 209, 56–65.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.086>
- Gandarias, I., Barrio, V., Requies, J., Arias, P., Cambra, J., & Güemez, M. (2008). From biomass to fuels: Hydrotreating of oxygenated compounds. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(13), 3485–3488.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.12.070>
- Gogate, M. (2018). The direct dimethyl ether (DME) synthesis process from syngas I. Process feasibility and chemical synergy in one-step LPDME process. *Petroleum Science and Technology*, 36(8), 547–554.
<https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1428628>

- Han, Y., Zhang, H., Ying, W., & Fang, D. (2009). Modeling and Simulation of Production Process on Dimethyl Ether Synthesized from Coal-based Syngas by One-step Method. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 17(1), 108–112.
[https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(09\)60041-0](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(09)60041-0)
- Ibarra, P., & Rong, B. (2019). A review of the current state of biofuels production from lignocellulosic biomass using thermochemical conversion routes. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(7), 1523–1535.
<https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.09.018>
- Kaltschmitt, M., & Neuling, U. (2018). *Biokerosene: Status and prospects* (1ra ed.). Springer.
- Kamm, B., & Kamm, M. (2004). Biorefinery - systems. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 18(1), 1–6.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-444-59561-4.00014-0>
- Kirtay, E. (2011). Recent advances in production of hydrogen from biomass. *Energy Conversion and Management*, 52(4), 1778–1789.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.11.010>
- Kumar, G., Dharmaraja, J., Arvindnarayan, S., & Shoban, S. (2019). A comprehensive review on thermochemical , biological , biochemical and hybrid conversion methods of bio-derived lignocellulosic molecules into renewable fuels. *Fuel*, 251(1), 352–367.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.049>

- Kumari, D., & Singh, R. (2018). Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *90*, 877–891.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.111>
- Lecksiwilai, N., Gheewala, S., Sagisaka, M., & Yamaguchi, K. (2016). Net Energy Ratio and Life cycle greenhouse gases (GHG) assessment of bio-dimethyl ether (DME) produced from various agricultural residues in Thailand. *Journal of Cleaner Production*, *134*(Part B), 523–531.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.085>
- Limayem, A., & Ricke, S. (2012). Lignocellulosic biomass for bioethanol production: Current perspectives, potential issues and future prospects. *Progress in Energy and Combustion Science*, *38*(4), 449–467.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.03.002>
- Lu, W., Teng, L., & Xiao, W. (2004). Simulation and experiment study of dimethyl ether synthesis from syngas in a fluidized-bed reactor. *Chemical Engineering Science*, *59*(22–23), 5455–5464.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.07.031>
- Lu, P., Chang, J., Wang, T., Fu, Y., Chen, Y., & Zhu, J. (2004). Hydrogen-rich gas production from biomass catalytic gasification. *Energy and Fuels*, *18*(1), 228–233.
<https://doi.org/10.1021/ef0301203>
- Ma, L., Wang, T., Liu, Q., Zhang, X., Ma, W., & Zhang, Q. (2012). A review of thermal-chemical conversion of lignocellulosic biomass in China. *Biotechnology Advances*, *30*(4), 859–873.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.01.016>

- Magalhães, A., de Carvalho, J., de Melo Pereira, G., Karp, S., Câmara, M., Coral, J., & Soccol, C. (2019). Lignocellulosic biomass from agro-industrial residues in South America: current developments and perspectives. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(6), 1505–1519.
<https://doi.org/10.1002/bbb.2048>
- Maurya, R., Patel, A., Sarkar, P., Singh, H., & Tyagi, H. (2018). Biomass, Its Potential and Applications. *Biofuel and Biorefinery Technologies*, 4(1), 25–52.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-67678-4_2
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37–46.
[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
- Naik, S., Goud, V., Rout, P., & Dalai, A. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 578–597.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>
- Nanda, S., Mohammad, J., Reddy, S. N., Kozinski, J. A., & Dalai, A. K. (2014). Pathways of lignocellulosic biomass conversion to renewable fuels. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 4(2), 157–191.
<https://doi.org/10.1007/s13399-013-0097-z>
- Octave, S., & Thomas, D. (2009). Biorefinery: Toward an industrial metabolism. *Biochimie*, 91(6), 659–664.
<https://doi.org/10.1016/j.biochi.2009.03.015>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2011). *Estado del Arte y Novedades de la Bioenergía en el Ecuador*.
<http://www.fao.org/3/as418s/as418s.pdf>
- Pandey, A. (2009). *Handbook of plant-based biofuels* (1ra ed.). CRC Press.
- Parthasarathy, P., & Narayanan, K. (2014). Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield - A review. *Renewable Energy*, 66, 570–579.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.025>
- Posso, F., Siguencia, J., & Narváez, R. (2020). Residual biomass-based hydrogen production: Potential and possible uses in Ecuador. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(26), 13717–13725.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.235>
- Raud, M., Kikas, T., Sippula, O., & Shurpali, N. (2019). Potentials and challenges in lignocellulosic biofuel production technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 44–56.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.020>
- Roy, P., Tokuyasu, K., Orikasa, T., Nakamura, N., & Shiina, T. (2012). A Review of Life Cycle Assessment (LCA) of Bioethanol from Lignocellulosic Biomass. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 46(1), 41–57.
<https://doi.org/10.6090/jarq.46.41>
- Saravanan, K., Ham, H., Tsubaki, N., & Bae, J. (2017). Recent progress for direct synthesis of dimethyl ether from syngas on the heterogeneous bifunctional hybrid catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 217, 494–522.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.05.085>

- Saxena, R., Adhikari, D., & Goyal, H. (2009). Biomass-based energy fuel through biochemical routes : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(1), 167–178.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.07.011>
- Tian, Y., Zhou, X., Lin, S., Ji, X., Bai, J., & Xu, M. (2018). Syngas production from air-steam gasification of biomass with natural catalysts. *Science of the Total Environment*, 645, 518–523.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.071>
- Toklu, E. (2017). Biomass energy potential and utilization in Turkey. *Renewable Energy*, 107(1), 235–244.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.008>
- Vassilev, S., Baxter, D., Andersen, L., & Vassileva, C. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Yousuf, A. (2012). Biodiesel from lignocellulosic biomass - Prospects and challenges. *Waste Management*, 32(11), 2061–2067.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.008>
- Zabed, H. M., Akter, S., Yun, J., Zhang, G., Awad, F., Qi, X., & Sahu, J. (2019). Recent advances in biological pretreatment of microalgae and lignocellulosic biomass for biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105(1), 105–128.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.048>
- Zhang, K., Chang, J., Guan, Y., Chen, H., Yang, Y., & Jiang, J. (2013). Lignocellulosic biomass gasification technology in China. *Renewable Energy*, 49(1), 175–184.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.037>