



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

FACULTAD DE QUÍMICA

**DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE  
PROYECTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE  
UNA BIORREFINERÍA EN MÉXICO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

INGENIERA QUÍMICA

**PRESENTA:**

LAURA ROSARIO ROMERO DURAN



**Ciudad de Universitaria, CD.MX., 2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

PRESIDENTE	<b>PROFESOR:</b>	<b>DURAN MORENO ALFONSO</b>
VOCAL	<b>PROFESOR:</b>	<b>GARCÍA GONZÁLEZ SERGIO ADRIÁN</b>
SECRETARIO	<b>PROFESOR:</b>	<b>ÁLVAREZ MACIEL CARLOS</b>
1ER. SUPLENTE	<b>PROFESOR:</b>	<b>MENDOZA CAMPOS ALEJANDRA</b>
2DO. SUPLENTE	<b>PROFESOR:</b>	<b>MORENO AVENDAÑO LUIS ÁNGEL</b>

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

1. FACULTAD DE QUÍMICA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
2. GERENCIA DE BIOCOMBUSTIBLES, AEROPUERTOS Y SERVICIOS AUXILIARES (ASA)

**ASESOR DEL TEMA**

I.Q. CARLOS ÁLVAREZ MACIEL

---

**SUPERVISOR TÉCNICO**

I.Q. TANIA BUENROSTRO DOMÍNGUEZ

---

**SUSTENTANTE**

LAURA ROSARIO ROMERO DURAN

---





## RESUMEN

La situación mundial actual de producción y aumento en los precios del petróleo y la condición de las reservas mundiales de este recurso útil en la producción de múltiples industrias (en especial en la del transporte), está llevando a algunos países a desarrollar fuertes programas de producción de combustibles alternativos al combustible fósil, aquí nos interesa el caso de la producción de biocombustible de aviación.

Dentro de los próximos años, México enfrentará un declive en la producción de combustible de aviación, turbosina o Jet A-1, por lo que para cubrir la demanda de este combustible se recurrirá a la importación de este energético. Dicha problemática puede ser solucionada mediante la implementación de una biorrefinería para la generación de un combustible alternativo para la aviación, bio keroseno parafínico sintetizado (bio-kps).

Para determinar si con la situación actual México está preparado para la implementación de una biorrefinería a escala comercial para la generación de combustible sustentable de aviación, se realizó una propuesta conceptual de un proyecto para determinar la viabilidad de ésta, obteniendo como principal producto bio keroseno parafínico sintetizado (bio-kps), dicha propuesta fue evaluada técnica, económica y ambientalmente.

De dichas evaluaciones mencionadas anteriormente, se determinó que no es viable en el aspecto económico, pero sí en los aspectos técnicos y ambientales.

Los factores que infirieron para determinar que el proyecto no es viable en el aspecto económico fueron los altos costos del capital fijo de inversión, el costo de la materia prima, y los costos anuales de operación. Se pensó que una de las formas por las cuales el proyecto pudiera ser viable sería mediante la combinación de algún mecanismo político, como lo es una subvención, pero la evaluación económica del proyecto sigue siendo la misma, no es económicamente viable. En un caso extremo, el proyecto solo podría ser viable económicamente si el precio



de venta del producto final, bio-kps, se incrementa de 5 a 6 veces con respecto al estipulado inicialmente (mismo precio que el combustible convencional de aviación (\$10.13/litro de turbosina, (PEMEX, 2016)), pero esto no es recomendable ya que difícilmente alguna aerolínea estaría dispuesta a comprar este combustible, ya que la compra del combustible representa entre un 30 y 35% del costo de sus operaciones.

Pero no todo el panorama es negativo, ya que el proyecto es viable técnica y ambientalmente, puesto que México cuenta con un amplio potencial para para la producción de cultivos bioenergéticos de segunda generación (2G) como la *jatropha* e higuera, sumado a que en el área de investigación cuenta con una amplia experiencia y conocimiento técnico, que en un futuro le permitirán implementar una biorrefinería a escala comercial en el país. Además dentro de todo el proceso productivo se obtendrán diversos productos de origen renovable como alimentos para ganado, productos químicos y bioenergía, e indirectamente se verá un fortalecimiento de actividades nacionales de investigación, desarrollo tecnológico e innovación relacionadas con la transformación de biomasa de 2G a combustible alternativo de aviación.

La generación de biocombustible de aviación en México ofrecerá una mayor seguridad energética, propiciando el desarrollo rural, mejorando el desempeño de los aviones, además contribuirá a la mitigación del cambio climático reduciendo significativamente el ciclo de vida de las emisiones de GEI de hasta un 55% menos en comparación con los combustibles fósiles.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	i
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	vi
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	viii
<b>UNIDADES, NOTACIONES, ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS</b> .....	ix
<b>Capítulo 1 . Generalidades</b> .....	1
1. Introducción.....	1
2. Problemática .....	4
3. Justificación .....	6
4. Objetivo .....	8
<b>Capítulo 2 . Marco de Referencia</b> .....	9
1. Biocombustible .....	9
1.1. Ventajas y desventajas de los biocombustibles .....	11
2. Biocombustibles en México.....	13
2.1. Producción de biocombustibles en México.....	16
2.1.1. Biodiesel .....	16
2.1.2. Etanol.....	17
2.1.3. Biogás .....	20
3. Marco legal Mexicano dentro del sector Bioenergético .....	22
3.1. Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos .....	22
3.2. Marco legislativo mexicano para la producción de biocombustible de aviación en México .....	26
4. Sustentabilidad de los biocombustibles .....	28
4.1. Definición de sustentabilidad .....	28
4.2. Sustentabilidad en la producción de biocombustibles .....	31
4.3. Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB) .....	31
5. Biorrefinería .....	33
5.1. Definición .....	33
5.2. Análisis FODA (Fortalezas-Oportunidades-Debilidades-Amenazas) ante la construcción de una biorrefinería en México .....	38



5.2.1. Desarrollo de estrategias.....	40
6. Combustible de aviación (Turbosina, Jet A o Jet A-1) .....	42
6.1. Suministro y demanda de Turbosina en México .....	44
7. Biocombustibles para la aviación.....	50
7.1. Tecnologías para la producción de biocombustible de aviación.....	51
7.1.1. Tecnologías comerciales actuales para la producción de biocombustible de aviación por hidroprocesamiento de aceites .....	53
7.2. Técnicas de certificación de biocombustible de aviación.....	56
7.2.1. ASTM International.....	56
7.2.2. UKM of Defence (MoD)Defence Standard (DefStan) 91-91.....	57
7.2.3. Joint Inspection Group (JIG) fuel quality requirements.....	58
7.3. Potencial de mercado de biocombustible de aviación.....	59
7.3.1. Estructura de Mercado y Cadena de suministro.....	59
7.3.2. Impulsores del Mercado .....	63
<b>Capítulo 3 . Propuesta conceptual de Proyecto para la construcción de una Biorrefinería en México .....</b>	<b>66</b>
<b>I. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS.....</b>	<b>66</b>
1. Materia prima .....	66
2. Descripción de proceso de producción de biocombustible de aviación... 74	74
2.1. Proceso Químico .....	74
2.1.1. Hidroconversión de triglicéridos y ácidos grasos en combustibles líquidos74	
2.2. Proceso industrial.....	81
2.2.1. Descripción .....	82
2.2.2. Parámetros de Operación.....	85
2.2.3. Producción de hidrógeno.....	86
2.2.4. Servicios Auxiliares .....	90
2.2.5. DFP del proceso para la obtención de biocombustible de aviación mediante la tecnología HEFA.....	92
2.2.6. Perfil del producto deseado .....	98
2.2.7. Propuestas de mejora.....	100





3. Ubicación de la biorrefinería.....	105
<b>II. REQUERIMIENTOS ECONÓMICOS</b> .....	113
1. Estimación de costos de inversión.....	113
<b>1.1.</b> Costos de Capital .....	117
<b>1.2.</b> Costos operativos .....	120
<b>1.3.</b> Flujo de caja .....	120
<b>III. REQUERIMIENTOS AMBIENTALES</b> .....	127
1. Impacto ambiental en la producción de biocombustibles .....	127
2. Sustentabilidad en el proceso de generación de combustibles de aviación	128
2.1. Emisiones de GEI del combustible de aviación convencional .....	129
2.2. Emisiones de GEI del combustible biojet por hidrogenación de	
aceites vegetales .....	131
<b>Capítulo 4 . Conclusiones</b> .....	136
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	144
<b>ANEXOS</b> .....	154
<b>ANEXO A.</b> RED MEXICANA AEROPORTUARIA .....	155
<b>ANEXO B.</b> ESPECIFICACIONES PARA <i>Synthesized Paraffinic Kerosine</i> (Bio-	
SPK).....	158
<b>ANEXO C.</b> CATALIZADORES DE HIDROGENACIÓN DE ACEITES ....	160
<b>ANEXO D.</b> ESTIMACIÓN DE COSTOS .....	162



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> CLASIFICACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES POR GENERACIÓN .....	11
<b>FIGURA 2.</b> POTENCIAL BIOENERGÉTICO EN MÉXICO .....	15
<b>FIGURA 3.</b> ESQUEMA DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL .....	17
<b>FIGURA 4.</b> ESQUEMA DE LA PRODUCCIÓN DE ETANOL ANHIDRO (BIOETANOL) .....	18
<b>FIGURA 5.</b> SUMINISTRO DE ETANOL ANHIDRO SUSTITUYENDO AL MTBE CON VENTA AL PÚBLICO .....	20
<b>FIGURA 6.</b> ESQUEMA SIMPLIFICADO DE UNA PLANTA DE COGENERACIÓN .....	21
<b>FIGURA 7.</b> ESTRUCTURA DE LA LEY DE PROMOCIÓN Y DESARROLLO DE BIOENERGÉTICOS .....	23
<b>FIGURA 8.</b> COMISIÓN INTERSECRETARIAL PARA EL DESARROLLO DE BIOENERGÉTICOS.....	24
<b>FIGURA 9.</b> CADENA DE PRODUCCIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLE DE AVIACIÓN EN MÉXICO .....	27
<b>FIGURA 10.</b> ASPECTO SUSTENTABILIDAD .....	29
<b>FIGURA 11.</b> CLASIFICACIÓN DE BIORREFINERÍAS SEGÚN SU GENERACIÓN .....	35
<b>FIGURA 12.</b> ESTRUCTURA QUÍMICA DE LOS COMPUESTOS QUE CONTIENE LA TURBOSINA (JET A o JET A-1).....	43
<b>FIGURA 13.</b> CADENA DE SUMINISTRO DE TURBOSINA .....	44
<b>FIGURA 14.</b> PARTICIPACIÓN EN LA VENTA DE PETROLÍFEROS EN MÉXICO 2005-2014 .....	45
<b>FIGURA 15.</b> DEMANDA DE TURBOSINA EN MÉXICO, 2005-2014 .....	45
<b>FIGURA 16.</b> COMERCIO EXTERIOR DE TURBOSINA, 2014-2029 .....	46
<b>FIGURA 17.</b> BALANCE DE TURBOSINA, 2014-2029.....	47
<b>FIGURA 18.</b> RED AEROPORTUARIA EN MÉXICO .....	48
<b>FIGURA 19.</b> AEROPUERTOS DE MÉXICO CON MAYOR DEMANDA DE TURBOSINA (MAYOR A LOS 100 MILLONES DE LITROS ANUALES, 2015) .....	49
<b>FIGURA 20.</b> DEMANDA DE TURBOSINA DE LA RED AEROPORTUARIA EN MÉXICO (MENOR A LOS 80 MILLONES DE LITROS ANUALES, 2015) .....	49
<b>FIGURA 21.</b> PROCESOS DE PRODUCCIÓN SUSTENTABLE DE BIOTURBOSINA.....	53
<b>FIGURA 22.</b> PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES VERDES CON TECNOLOGÍA DE UOP HONEYWELL.....	55
<b>FIGURA 23.</b> PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES CON TECNOLOGÍA DE NESTE OIL.....	56
<b>FIGURA 24.</b> CONSUMO MUNDIAL DE COMBUSTIBLE EN LA AERONÁUTICA EN LOS AÑOS 1990-2020 .....	60
<b>FIGURA 25.</b> DEMANDA MUNDIAL DE COMBUSTIBLE EN LA AERONÁUTICA, MERCADO MUNDIAL: 2011-2021 .....	60
<b>FIGURA 26.</b> ESTRUCTURA DEL MERCADO DE BIOCOMBUSTIBLE PARA LA AVIACIÓN .....	62
<b>FIGURA 27.</b> DESARROLLO DE MERCADO A LO LARGO DE LA CADENA DE SUMINISTRO DEL BIOCOMBUSTIBLE PARA LA AVIACIÓN .....	63
<b>FIGURA 28.</b> IMPULSORES DEL MERCADO DE BIOCOMBUSTIBLES DE LA AVIACIÓN.....	63
<b>FIGURA 29.</b> ACUERDOS MÁS RELEVANTES ENTRE LAS PRINCIPALES COMPAÑÍAS-CONSTRUCTORES-CLIENTES INVOLUCRADOS EN SECTOR DE BIOCOMBUSTIBLES PARA LA AVIACIÓN.....	65



<b>FIGURA 30.</b> ESTRUCTURA BÁSICA DE UN TRIGLICÉRIDO Y UN ÁCIDO GRASO COMÚNMENTE PRESENTES EN LAS GRASAS Y ACEITES VEGETALES.....	75
<b>FIGURA 31.</b> HIDROCONVERSIÓN DE TRIGLICÉRIDOS A HIDROCARBUROS .....	78
<b>FIGURA 32.</b> ESQUEMA QUE MUESTRA EL CAMBIO EN LA COMPOSICIÓN DE HRD A HRJ COMO RESULTADO DE UN HIDROPROCESAMIENTO ADICIONAL .....	79
<b>FIGURA 33.</b> BIO-SPK PROCESO DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE POR HONEYWELL / UOP .	80
<b>FIGURA 34.</b> DISEÑO ESQUEMÁTICO DE UNA PLANTA DE HIDROPROCESAMIENTO DE ACEITES ..	81
<b>FIGURA 35.</b> TECNOLOGÍAS EXISTENTES PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE DIFERENTES FUENTES DE MATERIA PRIMA Y ENERGÍA .....	88
<b>FIGURA 36.</b> REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA REFORMACIÓN DE METANO CON VAPOR DE AGUA .....	89
<b>FIGURA 37.</b> DIAGRAMA SINTETIZADO DEL PROCESO HEFA PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE DE AVIACIÓN .....	97
<b>FIGURA 38.</b> EFICIENCIA DEL PRODUCTO (%WT) PROCESO HEFA.....	100
<b>FIGURA 39.</b> DIAGRAMA GENERAL DE LA PRODUCCIÓN Y USOS DEL HIDRÓGENO A PARTIR DE BIOGÁS.....	101
<b>FIGURA 40.</b> ESQUEMA GENERAL DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE BIOGÁS ..	103
<b>FIGURA 41.</b> PROCESO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS .....	104
<b>FIGURA 42.</b> LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTADO DE CHIAPAS, MÉXICO.....	105
<b>FIGURA 43.</b> POSIBLE LOCALIZACIÓN DE LA PRIMERA BIORREFINERÍA EN EL ESTADO DE CHIAPAS, MÉXICO .....	107
<b>FIGURA 44.</b> LOCALIZACIÓN DE LA PRIMERA BIORREFINERÍA EN MÉXICO, INSUMOS, PLANTAS EXTRACTORAS DE ACEITES Y SERVICIOS .....	110
<b>FIGURA 45.</b> ZONA DE LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA PRIMERA BIORREFINERÍA EN MÉXICO, ESTADO DE CHIAPAS .....	112
<b>FIGURA 46.</b> EFECTO DEL PRECIO DE VENTA DE LOS PRODUCTOS CON UNA SUBVENCIÓN .....	125
<b>FIGURA 47.</b> EFECTO DEL PRECIO DE VENTA DE LOS PRODUCTOS Y COSTO DE ACEITE VEGETAL .....	126
<b>FIGURA 48.</b> EFECTO DEL PRECIO DE VENTA Y COSTO DE ACEITE VEGETAL (PROYECTO CON SUBVENCIÓN).....	126
<b>FIGURA 49.</b> IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO .....	127
<b>FIGURA 50.</b> ETAPAS CONSIDERADAS DURANTE EL CICLO DE VIDA DE LOS GEI DEL COMBUSTIBLE JET .....	129
<b>FIGURA 51.</b> ETAPAS CONSIDERADAS DURANTE EL CICLO DE VIDA DE LOS GEI DEL COMBUSTIBLE BIOJET A PARTIR DE BIOMASA OLEAGINOSA.....	132
<b>FIGURA 52.</b> ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE TURBOSINA Y BIO KPS (EMISIONES DE CO <sub>2</sub> ) .	133



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA 1.</b> PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES .....	9
<b>TABLA 2.</b> TIPOS DE BIOCOMBUSTIBLES .....	10
<b>TABLA 3.</b> PRINCIPIOS DE SUSTENTABILIDAD, DEFINIDOS POR LA RSB .....	32
<b>TABLA 4.</b> CLASIFICACIÓN DE BIORREFINERÍAS SEGÚN SU TIPO DE BIOMASA .....	35
<b>TABLA 5.</b> ANÁLISIS FODA (FORTALEZAS-OPORTUNIDADES-DEBILIDADES-AMENAZAS) ANTE LA CONSTRUCCIÓN DE UNA BIORREFINERÍA EN MÉXICO.....	39
<b>TABLA 6.</b> PROPIEDADES FÍSICAS DEL JET A / JET A-1 .....	43
<b>TABLA 7.</b> COMPARACIÓN DE INSUMOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE DE AVIACIÓN SUSTENTABLE EN MÉXICO .....	72
<b>TABLA 8.</b> COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE DE AVIACIÓN SUSTENTABLE EN MÉXICO .....	73
<b>TABLA 9.</b> COMPOSICIÓN TÍPICA DE VARIOS ACEITES VEGETALES .....	76
<b>TABLA 10.</b> REQUISITOS DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS DE PROCESO POR CADA 100 LIBRAS DE ACEITE VEGETAL .....	91
<b>TABLA 11.</b> REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA PARA LA GENERACIÓN DE HRJ .....	92
<b>TABLA 12.</b> LISTA DE EQUIPAMIENTO DEL DFP .....	96
<b>TABLA 13.</b> PERFIL DE LONGITUD DE DIFERENTES ACEITES RENOVABLES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES .....	98
<b>TABLA 14.</b> RESUMEN DE LOS PERFILES DE PRODUCCIÓN PARA AMBOS ESCENARIOS.....	99
<b>TABLA 15.</b> CHEMICAL ENGINEERING PLANT COST INDEX 2011 A 2016 .....	115
<b>TABLA 16.</b> COSTOS ADICIONALES PARA DETERMINAR LA INVERSIÓN TOTAL DE CAPITAL (TCI) .....	116
<b>TABLA 17.</b> ESTIMACIÓN DE COSTOS PARA UNA BIORREFINERÍA SUSTENTABLE EN MÉXICO ...	119
<b>TABLA 18.</b> COSTOS OPERATIVOS ANUALES .....	120
<b>TABLA 19.</b> ANÁLISIS DE RENTABILIDAD PARA UNA BIORREFINERÍA EN MÉXICO PARA LA OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE SUSTENTABLE DE AVIACIÓN .....	122
<b>TABLA 20.</b> EMISIONES DE GEI DURANTE EL CICLO DE VIDA DEL COMBUSTIBLE JET .....	130
<b>TABLA 21.</b> EMISIONES DE GEI DURANTE EL CICLO DE VIDA DEL COMBUSTIBLE BIOJET MEDIANTE EL HIDROPROCESAMIENTO DE DIFERENTES ACEITES VEGETALES.....	132



## UNIDADES, NOTACIONES, ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

### NOTACIÓN DE ESPECIES QUÍMICAS

<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de Aluminio	<b>N<sub>2</sub></b>	Nitrógeno
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano	<b>NaOH</b>	Hidróxido de Sodio
<b>CO</b>	Monóxido de Carbono	<b>NH<sub>3</sub></b>	Amoniaco
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono	<b>NO<sub>2</sub></b>	Dióxido de nitrógeno
<b>H<sub>2</sub></b>	Hidrógeno molecular	<b>O<sub>2</sub></b>	Oxígeno molecular
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Agua	<b>SiO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Silicio
<b>H<sub>2</sub>S</b>	Sulfuro de Hidrógeno	<b>SO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Azufre
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	Ácido Sulfúrico		

### UNIDADES

<b>kW</b>	Kilovatios	<b>lb/hr</b>	Flujo másico, libras por hora
<b>lb</b>	Unidad de masa estadounidense, libra	<b>psig</b>	Unidad de presión, librafuerza por pulgada cuadrada

### ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>ASA</b>	Aeropuertos y Servicios Auxiliares	<b>HEFA</b>	<i>Hydroprocessed Esters and Fatty Acids</i>
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i>	<b>HEFA-SPK</b>	<i>Synthesized Paraffinic Kerosine from Hydroprocessed Esters and Fatty Acids</i>
<b>ATJ</b>	Alcohol To Jet	<b>HRJ</b>	<i>Hydroprocessed Renewable Jet</i>
<b>B-20</b>	Mezcla 20% biodiesel y 80% diésel convencional	<b>IATA</b>	<i>International Air Transport Association</i>
<b>bio-kps</b>	Bio keroseno parafínico sintetizado	<b>IMP</b>	Instituto Mexicano del Petróleo
<b>bio-SPK</b>	<i>Bio-Synthetic Paraffinic Kerosene</i>	<b>ISBL</b>	<i>Inside Battery Limits</i> , Límite dentro de la Batería
<b>DefStan 91-91</b>	UK Ministry of Defence (MoD) Defence Standard (DefStan) 91-91	<b>ITAKA</b>	<i>Initiative Towards sustAinable Kerosene for Aviation</i>
<b>FT-SPK</b>	<i>Fischer-Tropsch Hydroprocessed Synthesized Paraffinic Kerosine</i>	<b>LHSV</b>	Velocidad Espacial Horaria de un Líquido
<b>GEI</b>	Gas de Efecto Invernadero	<b>LPDB</b>	Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos
<b>GNL</b>	Gas Natural Licuado	<b>NETL</b>	<i>National Energy Technology Laboratory</i>



<b>NREL</b>	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>	<b>SEMARNAT</b>	Secretaría de Recursos Naturales
<b>OSBL</b>	<i>Outside Battery Limits, Fuera del Límite de la Batería</i>	<b>SENER</b>	Secretaría de Energía
<b>PADE</b>	Paquete de Almacenamiento y Dosificación de Etanol anhidro	<b>SHCP</b>	Secretaría de Hacienda y Crédito Público
<b>PECC</b>	Programa Especial de Cambio Climático	<b>SIP</b>	<i>Synthesized Paraffins Hydroprocessed Fermented Sugars</i> <i>Iso-from</i>
<b>PEMEX</b>	Petróleos Mexicanos	<b>TAR</b>	Terminal de Almacenamiento y Reparto
<b>PSA</b>	Pressure Swing Adsorption	<b>TIR</b>	Tasa Interna de Retorno
<b>RSB</b>	<i>Roundtable on Sustainable Biomaterials</i>	<b>TSD</b>	Tasa Social de descuento
<b>SAGARPA</b>	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación	<b>VPN</b>	Valor Presente Neto
<b>SCT</b>	Secretaría de Comunicaciones y transportes		

## Capítulo 1 . Generalidades

### 1. Introducción

La matriz energética mundial depende en gran medida de los combustibles fósiles. Según datos de la *World Energy*, más del 80% del consumo de la energía primaria mundial se basa en fuentes no renovables de energía (comúnmente conocidas como “energías no renovables”) y se espera que las necesidades de energía crezcan en forma sostenida en los próximos años. Asimismo, la incertidumbre por la variación en el precio del petróleo, hace que los países dependientes de este recurso, como México, busquen sustituir la fuerte dependencia de hidrocarburos por recursos renovables o bioenergéticos y que además sean económicamente viables.

Los motivos que llevan a promover el uso de los bioenergéticos es la creciente preocupación por preservar el ambiente. Algunos países han lanzado programas para la producción y/o uso de biocombustibles, con miras de poder prolongar el abastecimiento energético que consumen; o bien con el objetivo de diversificar su matriz energética. En este contexto, México posee una escasa diversificación de la oferta energética, por lo que nuestro país necesita ampliar sus recursos energéticos mediante la incorporación de fuentes renovables de energía (conocidas comúnmente como “energías renovables”) que le permitan favorecer su desarrollo tecnológico y económico.

Los hidrocarburos provenientes del petróleo continuarán siendo la fuente más importante de suministro de energía primaria en México, debido a la seguridad y continuidad en su aprovechamiento. Ante este panorama se plantea una acción inmediata para disminuir la fuerte dependencia y cubrir la demanda nacional de hidrocarburos, es decir, la producción y uso de alternativas energéticas como lo son los biocombustibles. Sin embargo la producción, distribución y uso de biocombustibles no pretende la sustitución de combustibles fósiles, sino la dilución de estos para alargar la cantidad de las reservas fósiles; esto le permitirá a México incrementar la capacidad instalada de refinación y a disminuir su dependencia de



algunos derivados del petróleo, ya que por décadas el petróleo ha sido y seguirá siendo uno de los principales rubros de exportación y de generación de ingresos en México.

Otro factor que se suma a la inversión para la producción de biocombustibles en México, son las altas emisiones de contaminantes del aire debido al uso de combustibles fósiles, como son el CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, entre otros, los que repercuten negativamente en la salud de los habitantes, además del impacto negativo que ocasionan al ambiente.

Desde el siglo pasado, el cambio climático ha afectado el comportamiento ambiental del planeta, al grado de provocar desastres naturales inimaginables. A pesar de ser varios los factores, las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) han sido identificadas como la principal causa.

A nivel global la industria de la aviación produce el 2% de estas emisiones (en México corresponden al 1.1%), lo que representa 689 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año (en México esta cifra asciende a 7.3 millones de toneladas). Por ello, las principales autoridades aeronáuticas mundiales reconocieron que el uso de combustibles alternativos de segunda generación representa una de las mejores opciones para reducir la huella de carbono a escala considerable.

Los biocombustibles de aviación son recursos energéticos renovables y sustentables, los cuales podrían llegar a sustituir al combustible tradicional, la turbosina, a largo plazo. La obtención de estos combustibles sería a partir de fuentes biológicas, grasas recuperadas y en algunos casos a través de biotecnología. Por lo que durante la última década ha habido un creciente interés en la investigación y el desarrollo para su producción óptima.

Actualmente existen diferentes procesos para producir biocombustibles de aviación a través de diversas materias primas, pero hasta el momento sólo cuatro **de ellas están certificadas bajo la norma ASTM D7555, "Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons"**, para su uso en la aviación civil; por lo que diversas aerolíneas alrededor del mundo ya los están





utilizando en vuelos comerciales. El Hidroprocesamiento de Ésteres y Ácidos Grasos (HEFA por sus siglas en inglés) es uno de los procesos certificados por la ASTM para producir biocombustible de aviación. El proceso HEFA consiste en un hidroprocesamiento catalítico para la conversión de ésteres y ácidos grasos presentes en los aceites vegetales como microalgas, camelina o jatropha, o bien grasa animal llamada sebo, en parafinas e isoparafinas dentro de los intervalos del combustible de aviación convencional, mejor conocido como Biokeroseno Parafínico Sintetizado (bio kps o Bio-SPK por sus siglas en inglés).

En México, el desarrollo de los combustibles alternativos de aviación es impulsado desde el 2009 por Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA), órgano descentralizado de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

ASA al ser hasta el momento el único proveedor de combustible de aviación en México, juega un papel muy importante, ya que al ser el último actor dentro de la cadena de suministro tiene un rol y visión estratégicos desde los cuales puede fungir como promotor y catalizador de la industria de los biocombustibles sustentables de aviación en el país.

Durante 2010 y 2011, ASA llevó a cabo la iniciativa ***Plan de Vuelo hacia los Biocombustibles Sustentables de Aviación en México***, y el resultado de esta iniciativa fue la integración de la cadena de suministro y, la identificación de los cuellos de botella más importantes, como la insuficiente producción de materia prima, la falta de infraestructura de biorrefinación y la ausencia de una legislación adecuada, para implementar una industria sólida de biocombustibles sustentables de aviación en México.

Derivado de los resultados obtenidos en el ***Plan de Vuelo hacia los Biocombustibles Sustentables de Aviación en México***, en el presente trabajo se realizó una investigación bibliográfica para definir conceptualmente los requerimientos económicos, técnicos y ambientales para llevar a cabo la construcción de una biorrefinería en México, para que sea sustentable y sobre todo factible la obtención de biocombustible de aviación como principal producto, y así

implementar la primera infraestructura de biorrefinación a escala comercial en México.

De acuerdo con estudios realizados, los biocombustibles producidos de manera sustentable ofrecen una reducción de hasta el 80%, en las emisiones de CO<sub>2</sub> a lo largo de su ciclo de vida, comparados con los combustibles tradicionales.

En México no hay ni una sola biorrefinería a escala comercial que pueda producir biocombustible de aviación sustentable, por lo que se debería buscar la manera de construir la primera biorrefinería en el país enfocada a obtener principalmente este producto, y además le daría al país la oportunidad de seguir siendo reconocido como un país con acciones concretas para contribuir a mitigar los efectos del cambio climático generados por el sector aeronáutico.

## 2. Problemática

Como ya se sabe la contaminación ambiental ha aumentado considerablemente, hasta el punto de poner en riesgo la estabilidad de nuestro planeta debido al cambio climático que amenaza a la humanidad por la emisión global de gases de efecto invernadero (GEI). Estas emisiones corresponden en un 14% al transporte terrestre, un 29% a la electricidad, a las actividades del sector primario el 16%, a la construcción 15%, a la aviación comercial internacional 2%, y el resto a otras actividades.

El consumo de combustibles fósiles, tales como el petróleo, el carbón y el gas natural, dan lugar a estas emisiones, que contribuyen al calentamiento gradual del planeta. Ante el aumento continuo total de emisiones, demuestra que existe una necesidad mundial de buscar alternativas distintas a las convencionales que se conviertan en fuentes de generación de energía y logren mitigar estos impactos ambientales.

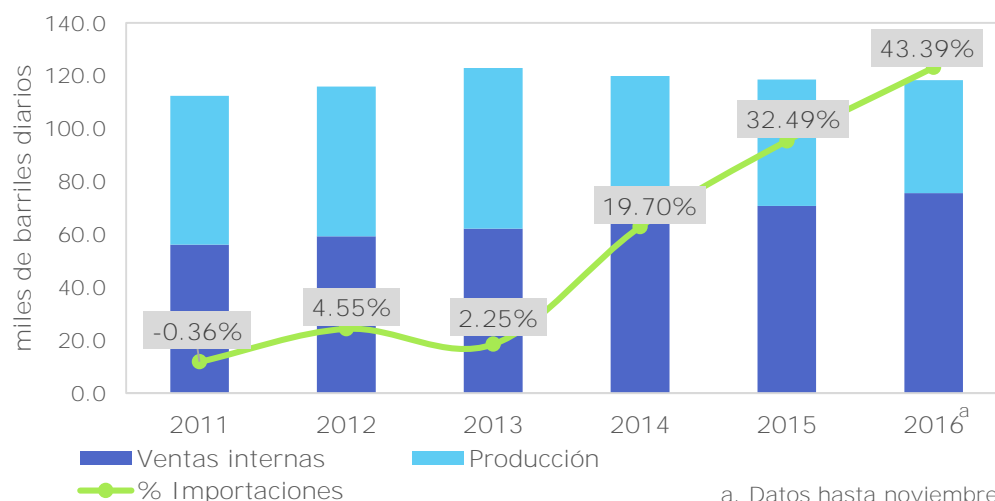
Aunado a esto, es importante destacar que algunos países han estado inmersos en conflictos sociopolíticos creando así una fuerte crisis del petróleo como ha

sucedido a través de la historia. La dependencia de los países hacia este producto es tal que una dificultad de aprovisionamiento (costo, disminución de la producción) puede justificar un conflicto. Se estima que en los próximos años se alcancen los niveles máximos de producción, por lo que se espera que a partir de este momento la disminución en las reservas de hidrocarburos provoque un alza desahorada en los precios de éstos.

Por mencionar, tan solo en el 2014, las reservas mundiales de petróleo fueron de 1,700 mmmb (miles de millones de barriles), lo que significó una reducción de 0.1% en comparación con 2013. En términos de reservas de petróleo, México se ubica dentro de los 18 países con mayores volúmenes de reservas de petróleo, las cuales sumaron 9.7 mmmb en 2014. Mas sin embargo, en ese mismo año la producción de petrolíferos en el Sistema Nacional de Refinación (SNR) presentó una reducción de 5.8% a lo registrado en 2013, resultado de un menor volumen de crudo enviado y procesado en refinerías (SENER, 2015).

México, hasta 2011, había sido autosuficiente en la producción de turbosina para cubrir la demanda del sector aéreo nacional, pero a partir del año siguiente comenzaron a registrarse las primeras importaciones, tendencia que se mantendrá de manera creciente hasta el 2029 (SENER, 2015).

**Figura A.** Producción, importación y ventas internas de turbosina en México



a. Datos hasta noviembre 2016

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE (PEMEX, 2016)



De acuerdo con la Prospectiva de Petróleo Crudo y Petrolíferos de la Secretaría de Energía (SENER), para satisfacer la demanda interna de turbosina será necesario recurrir a importaciones, las cuales serán de hasta 53.8 mbd en 2029. Esto debido a que la producción estimada del Sistema Nacional de Refinación de Petróleos Mexicanos (Pemex) estará orientada a incrementar la capacidad de producción de destilados ligeros e intermedios, gasolinas y diésel de Ultra Bajo Azufre (UBA)

El incremento en la demanda de este energético por parte del sector aéreo será la razón principal de este aumento en las importaciones, y en consecuencia, un déficit comercial.

El aumento sustancial de las importaciones de petrolíferos, representa un factor de riesgo para la soberanía energética del país, ya que no es posible disminuir las adquisiciones de hidrocarburos en el exterior sin poner en riesgo el abasto del mercado nacional; por tanto, es necesario realizar un plan estratégico de inversión para la producción de bioenergéticos que garantice la demanda nacional de combustibles en el futuro (González & Castañeda).

### 3. Justificación

Entre las iniciativas para el abatimiento de las emisiones de GEI, principalmente CO<sub>2</sub>, se han establecido como una de las soluciones más promisorias a largo plazo, **el uso de fuentes renovables de energía (conocidas comúnmente como "energías renovables")**, tal es el caso de los biocombustibles.

En virtud de lo anterior, recientemente el sector de transporte aéreo nacional ha mostrado un interés prioritario en el uso de biocombustibles de aviación. Con lo anterior, se espera frenar el impacto de las fluctuaciones en los precios del petróleo sobre los costos de los combustibles para la aviación y, a su vez, reducir el impacto ambiental de dicha actividad.

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) han reconocido la importancia de la

investigación y desarrollo de fuentes de energía renovables que permitan la disminución del impacto de las operaciones de transporte aéreo al medio ambiente y se han fijado objetivos medioambientales para la reducción de emisiones de carbono.

Por lo cual, el sector aeronáutico se ha dado a la tarea de investigar el bio keroseno parafínico sintetizado (bio kps o bio SPK por sus siglas en inglés) como un combustible alternativo para la aviación producido a partir de fuentes biológicas, pero que hasta el momento no ha sido capaz de abarcar una demanda energética global.

Poniendo a consideración la inexistencia del sector productivo de biocombustibles para la aviación en México, se pretende que mediante la generación de estos se desarrolle una nueva industria nacional, lo que le dará a México la oportunidad de seguir siendo reconocido como un país con acciones concretas para contribuir a mitigar los efectos del cambio climático.

El impacto concreto de la consolidación de esta nueva industria se centra en la disminución de los gases de efecto invernadero, la promoción de la agricultura en zonas marginadas, la generación de empleo y una industria que aportará riqueza al país.

El beneficio es global por su contribución a frenar el cambio climático. En términos nacionales, beneficiará a los campesinos, agricultores y productores de materia prima, a la industria de transporte, a las líneas aéreas y a las instituciones académicas y de investigación. Adicionalmente, la instalación de biorrefinerías dará empleo a la industria química y de construcción, lo cual representará una gran derrama para la economía regional y nacional.

## 4. Objetivo

Evaluar económica, técnica y ambientalmente una propuesta conceptual de un proyecto para determinar la viabilidad de una biorrefinería en México, obteniendo como principal producto bio keroseno parafínico sintetizado (bio kps). A fin de establecer en México la tecnología de proceso requerida para la generación de biocombustible de aviación. Lo anterior, a partir de aceites vegetales provenientes de materias primas no destinadas a la alimentación (fuentes de segunda generación).

## Capítulo 2 . Marco de Referencia

### 1. Biocombustible

Los biocombustibles son recursos energéticos procesados por el ser humano a partir de materias producidas recientemente por seres vivos, a las cuales se les denomina “biomasa” (Álvarez, 2009). El término biomasa, en el sentido amplio, se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en el proceso biológico de organismos recientemente vivos, como plantas, o sus desechos metabólicos (por ejemplo el estiércol); el concepto de biomasa comprende productos tanto de origen vegetal como de origen animal (Salinas & Gasca, 2009).

Se puede contar con diferentes métodos para obtener biocombustibles: procesos mecánicos, termoquímicos, biotecnológicos y extractivos.

**Tabla 1.** Proceso de obtención de biocombustibles

	Técnicas	Productos	Aplicaciones
Mecánicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Astillado</li> <li>▪ Trituración</li> <li>▪ Compactación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Leñas</li> <li>▪ Astillas</li> <li>▪ Briquetas<sup>1</sup></li> <li>▪ Aserrín</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Calefacción</li> <li>▪ Electricidad</li> </ul>
Biotecnológicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fermentación</li> <li>▪ Digestión anaerobia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Etanol</li> <li>▪ Biogás</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Transporte</li> <li>▪ Industria química</li> <li>▪ Calefacción</li> <li>▪ Electricidad</li> </ul>
Extractivos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Extracción fisicoquímica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aceites</li> <li>▪ Ésteres</li> <li>▪ Hidrocarburos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Transporte</li> <li>▪ Industria química</li> </ul>

FUENTE: (Álvarez, 2009)

<sup>1</sup> La briqueta o bloque sólido es un combustible para la estufa o chimenea, en forma de ladrillo, que sustituye a la leña. El bloque sólido es una alternativa a la leña en variadas aplicaciones (como la quema de ladrillos y de cal) que consumen grandes cantidades de madera.

Los biocombustibles pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos, y su finalidad última es liberar la energía contenida en sus componentes químicos mediante una reacción de combustión.

Existen varios tipos de biocombustibles, a los cuales se les clasifica de acuerdo al insumo o materia prima y a la tecnología empleada para producirlos. Debido a los avances en la tecnología, esta clasificación se realiza por generaciones, ver Figura 1 (Álvarez, 2009).

**Tabla 2.** Tipos de biocombustibles

Sólidos	Líquidos	Gaseosos
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Paja</li> <li>▪ Leña sin procesar</li> <li>▪ Astillas</li> <li>▪ Briquetas y pellets<sup>2</sup></li> <li>▪ Triturados finos</li> <li>▪ Carbón vegetal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alcoholes</li> <li>▪ Biohidrocarburos<sup>3</sup></li> <li>▪ Aceites vegetales</li> <li>▪ Ésteres derivados de aceites vegetales (Biodiesel)</li> <li>▪ Aceites de pirólisis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gas de síntesis</li> <li>▪ Biogás</li> <li>▪ Hidrógeno</li> </ul>

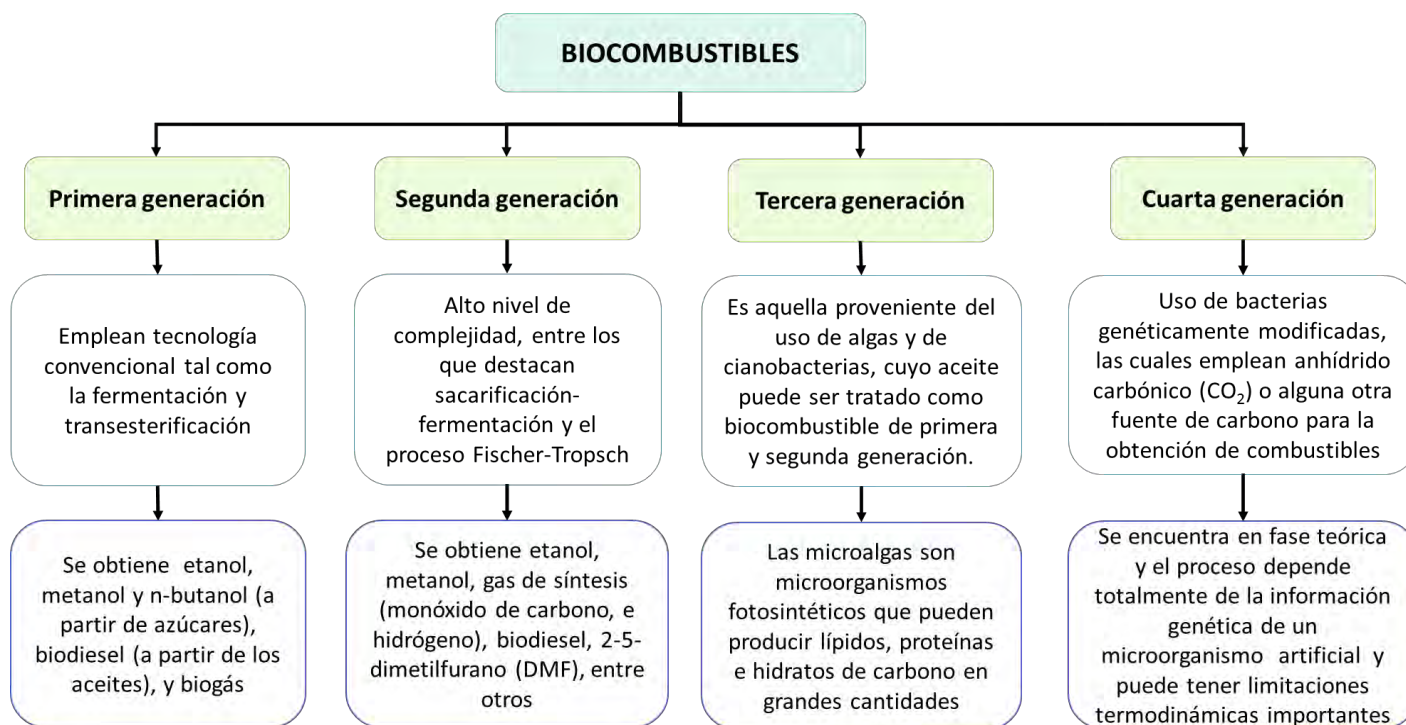
FUENTE: (Álvarez, 2009)

<sup>2</sup> El término *pellet* se refiere a pequeñas porciones de aserrín comprimido con forma de tableta, utilizadas como combustible.

<sup>3</sup> El prefijo "bio" hace referencia a un insumo biológico. En el caso particular de los biohidrocarburos, estos pueden ser extraídos de algún microorganismo (algas principalmente), o pueden ser sintetizados mediante el proceso GTL (Gas-To-Liquids, siglas en inglés) a partir de gas de síntesis producido con materia vegetal.



**Figura 1.** Clasificación de los biocombustibles por generación



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE (Álvarez, 2009)

### 1.1. Ventajas y desventajas de los biocombustibles

La producción global de biocombustibles está creciendo sostenidamente y continuará haciéndolo. Los biocombustibles ofrecen mayor seguridad energética, menores emisiones de GEI y de material particulado, propician el desarrollo rural, mejoran el desempeño de los vehículos y reducen la demanda de petróleo (SciDev, 2015).

Pero también plantean cuestionamientos apremiantes que deben enfrentarse antes de que los biocombustibles se expandan a través del mundo y, en particular, en México. Éstos se relacionan con los requerimientos de tierra, su disponibilidad, políticas, conocimiento, estándares, conciencia, participación e inversión

Así como los biocombustibles ofrecen un enorme potencial, también presentan riesgos que pueden contrarrestarse con políticas de desarrollo fuerte y coherente.



### **Ventajas de los biocombustibles**

- Su uso se adapta con mayor flexibilidad a la tecnología ya existente.
- Las mezclas de biocombustible con combustible convencional o fósil permiten que los motores funcionen mejor.
- Se dispone de una mayor variedad de materia prima y, si ésta no es comestible, no compiten con el sector alimentario.
- Incentivan el desarrollo tecnológico con efectos de diversificación en el sector agroindustrial.
- Son altamente eficientes para reducir las emisiones de GEI, particularmente de CO y CO<sub>2</sub> del corto al mediano plazo.
- A largo plazo pueden abaratar los costos de producción respecto a los combustibles convencionales.
- Se genera un balance positivo en la emisión de gases de efecto invernadero.
- En el caso de las microalgas, su alta capacidad de absorción de CO<sub>2</sub> los convierten en una posible herramienta para la lucha en contra del cambio climático (Fernández, 2014).
- Algunos insumos vegetales pueden hacer uso de terrenos degradados o contaminados.

### **Desventajas de los biocombustibles**

- La principal desventaja es respecto al impacto ambiental.
- **“Crisis alimentaria”.** Puede implicar un incremento en los precios de los alimentos de hasta un 70% (Salinas & Gasca, 2009). Dado que algunos biocombustibles se producen a base de alimentos (maíz, caña de azúcar) o bien compiten por la tierra que puede ser utilizada para producir alimentos, esta situación impacta en un alza de precios.
- Se emplean insumos provenientes de hidrocarburos, tanto en la fertilización como en la fumigación y en uso de la maquinaria agrícola.
- El cultivo de la materia prima para biocombustibles ha generado un proceso de deforestación.



- El costo de su producción es considerablemente mayor que el de los combustibles fósiles, incluso teniendo en cuenta el incremento en los precios del petróleo.
- Sus precios al consumidor son elevados debido a que están en el umbral de comercialización por su gasto relativamente alto de manufactura.
- Los procesos de obtención de biocombustibles se encuentran en fase de desarrollo.
- Para la producción de este bioenergético mediante el uso de microalgas, los costos de la inversión y del mantenimiento de estos cultivos son todavía muy elevados (Fernández, 2014).
- Su aprovechamiento final en el sector transporte requiere de modificaciones a las partes internas de los motores y a las piezas del vehículo que están en contacto con el bioenergético.

## 2. Biocombustibles en México

Durante los últimos años, México ha asignado una alta prioridad política a combatir el cambio climático. Desde 2005, se ha reforzado sustancialmente el marco institucional, ha aumentado la asignación de recursos y se ha promovido una mayor concientización pública sobre este desafío (OCDE, 2013).

En 2008, el gobierno mexicano aprobó una serie de leyes para reformar el sector energético y hacer frente a la caída en la producción de petróleo. Como parte de esta reforma, México empezó a promover las energías renovables y la eficiencia energética tras la aprobación de la Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, así como la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (OCDE, 2013).

La industria de los bioenergéticos en México (ver Figura 2) se desarrolla a partir de la integración de actividades de los sectores público, privado y social con base a la Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos. En este sentido, gran parte de las inversiones necesarias para el desarrollo de la bioenergía son emprendidas



por el sector privado, con el impulso público de los gobiernos federales, estatales y municipales.

El Gobierno Federal tiene un papel destacado en las cadenas de producción y consumo de los biocombustibles, por lo que se prevé que en la mayoría de los casos, dada la estructura nacional para la producción, refinación, distribución y comercialización de los combustibles, Petróleos Mexicanos (PEMEX) jugará hasta el momento un papel fundamental.

México tiene el desafío de desarrollar una cadena de producción y consumo de bioenergéticos competitiva, rentable y sustentable, que sirva como ejemplo de organización e integración productiva. Para esto, se han integrado la economía agrícola y la energética, a fin de determinar la magnitud de la industria, las tecnologías de conversión dominantes y los cultivos que permitan las mejores condiciones para el aprovechamiento sustentable de los recursos y de los balances energético, económico y ambiental.

De esta manera, la bioenergía deberá cumplir con los requisitos de calidad del mercado nacional, hasta contar con capacidad para la exportación. La integración de las cadenas de producción y consumo de biocombustibles permitirá el desarrollo rural sustentable y la creación de empleos de alta calidad, así como la investigación y el desarrollo tecnológico.

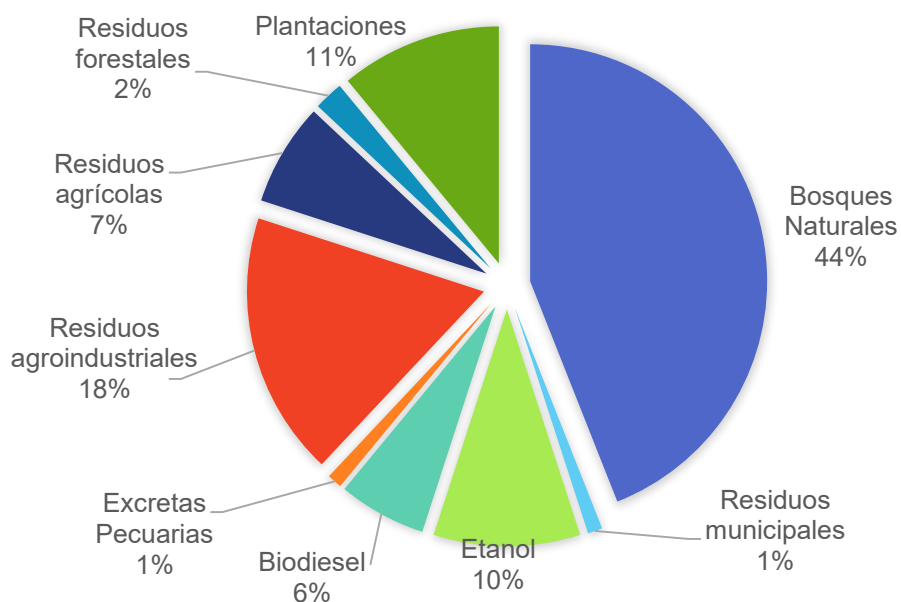
Para fomentar la introducción de los bioenergéticos se requiere conocer con mayor certeza los efectos de la cadena productiva en los diversos sectores, desde la producción de insumos hasta el uso de bioenergéticos, con la finalidad de establecer los procesos y tecnologías más adecuadas, revisando los balances ambientales, económicos y energéticos, motivo por el cual se propuso el desarrollo de pruebas piloto. En México ya se desarrollan proyectos para producir biocombustibles a partir de desechos orgánicos, como cáscaras de frutas o aceite quemado (Espinoza, Goddard, Gutiérrez, & Bonfil, s.f).

Actualmente en México existe el Programa Especial de Cambio Climático (PECC), del que uno de sus objetivos fundamentales es reducir las emisiones de gases

efecto invernadero para transitar a una economía competitiva y a un desarrollo bajo en emisiones. Este programa sectorial incluye el papel de la agricultura como proveedor de biocombustibles con el objetivo de reducir las emisiones de GEI de los combustibles líquidos, aunque el PECC no cuantifica el efecto de esto sobre la reducción de emisiones para 2012. La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) anunció en diciembre 2007 que para 2012 México dedicaría cerca de 300,000 hectáreas para el cultivo de especies para producir biocombustibles.

En México no existe una producción a gran escala de biocombustibles tales como el etanol o biodiesel. La caña de azúcar podría ser una potencial materia prima para la producción de etanol de primera generación, pero no se considera comercialmente viable, puesto que los costos de producción en México son relativamente altos (World Bank, 2009). La producción de segunda generación podría ser más factible. El desarrollo de los biocombustibles está en una atapa relativamente temprana. El marco normativo actual no ofrece garantías contra la deforestación o la competencia por la tierra para la producción de alimentos (OCDE, 2013).

**Figura 2. Potencial bioenergético en México**



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE (Gracida & Pérez, 2014)



## 2.1. Producción de biocombustibles en México

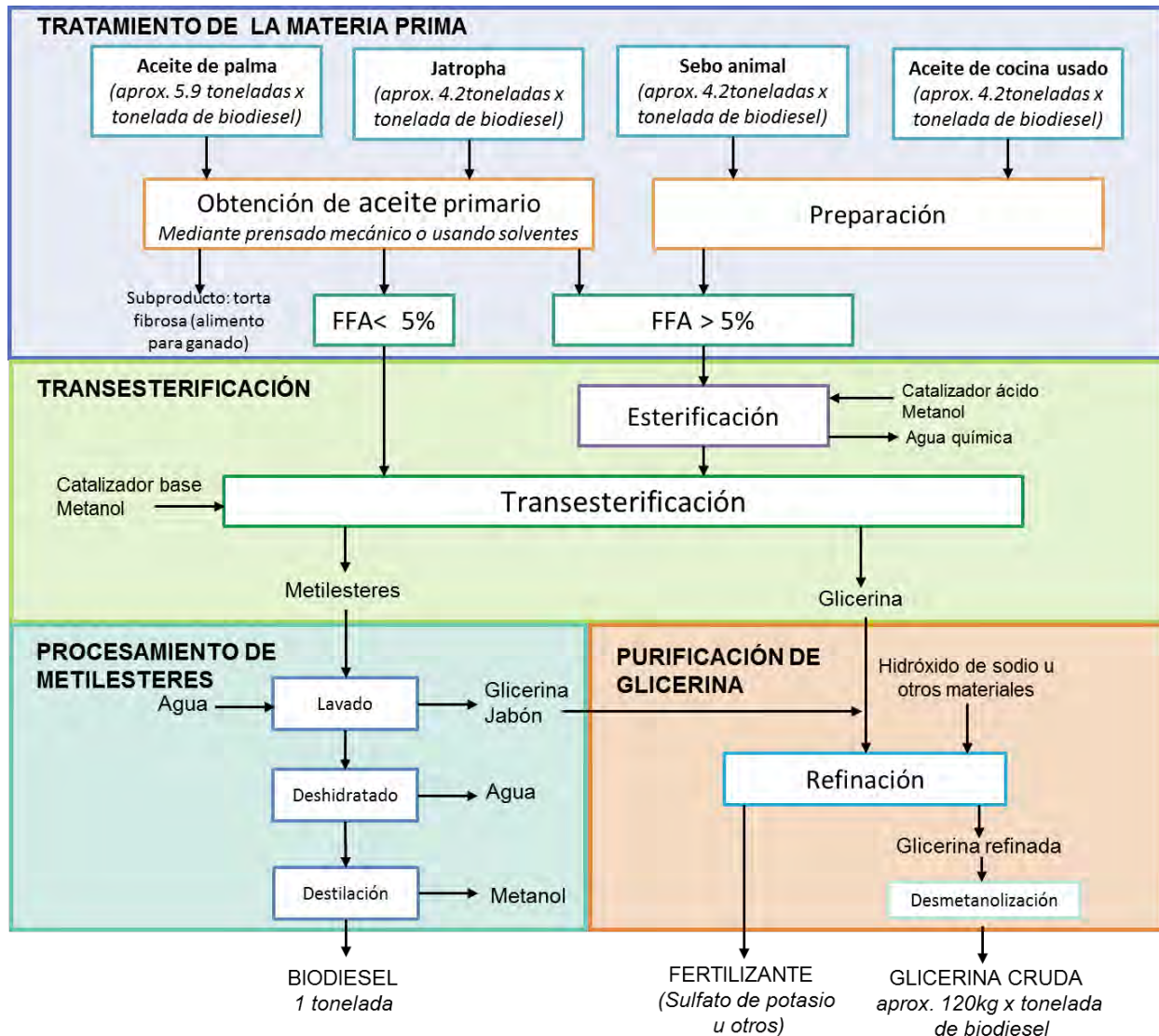
Considerando a los biocombustibles como una oportunidad de desarrollo sustentable, el gobierno mexicano se ha enfocado principalmente en la producción de biocombustibles líquidos tales como el etanol, biodiesel e incluso biogás.

### 2.1.1. Biodiesel

El biodiesel se produce a partir de aceites orgánicos al convertir los triglicéridos (moléculas de grasa) de estos aceites en compuestos denominados ésteres. En este proceso químico, que se conoce como transesterificación, los ésteres presentes en los triglicéridos reaccionan con un alcohol (metanol) en presencia de un catalizador líquido ácido o alcalino ( $H_2SO_4$ ,  $NaOH$ ) y los productos finales son glicerina y un metiléster de ácido graso, que es el combustible, llamado biodiesel. Las moléculas de oxígeno que retiene el biodiesel le otorgan propiedades favorables para la combustión. Estas cadenas no contienen azufre, que es considerado un contaminante ambiental potente. Por otro lado, la glicerina, luego de su purificación, puede ser utilizada como insumo para las industrias farmacéutica y cosmética. Este proceso requiere de altas temperaturas y un catalizador para que se complete la reacción (Espinoza, Goddard, Gutiérrez, & Bonfil, s.f), ver Figura 3.

Por su parte, en materia de biodiesel el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) ha establecido como una de las áreas prioritarias de desarrollo para la industria petrolera nacional la producción de biocombustibles y su integración con los combustibles fósiles. Hasta el momento dicho instituto ha realizado estudios sobre este bioenergético, comprobando que su uso como aditivo para mejorar las características de lubricación resulta factible. Las pruebas realizadas por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) indican que es necesario utilizar biodiesel en proporciones de 0.5 a 1.0 % para alcanzar una lubricidad menor a  $520 \mu m$ . Se ha encontrado en algunos casos que usar biodiesel por arriba de 0.5% en volumen puede resultar en una baja tolerancia al agua, lo que puede ocasionar separación agua/hidrocarburo (Solís & Zamarripa, 2013).

**Figura 3.** Esquema de la producción de biodiesel



FUENTE: (Solís & Zamarripa, 2013)<sup>4</sup>

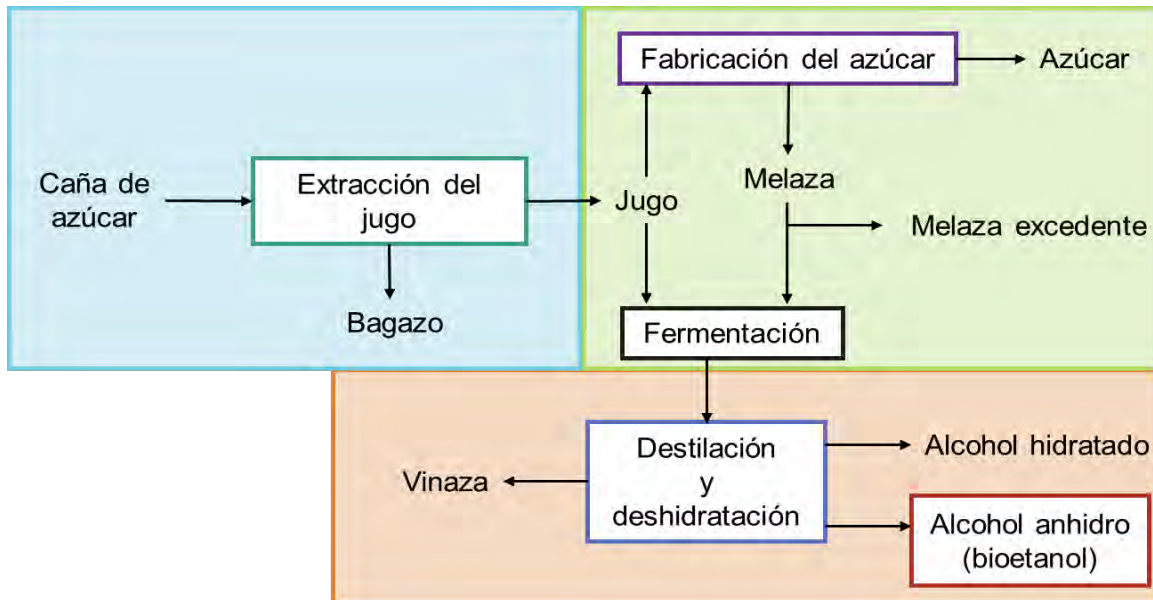
### 2.1.2. Etanol

El bioetanol se produce (al igual que la cerveza) a partir de la fermentación por levaduras de los azúcares que se encuentran en los tejidos vegetales. Se obtiene de plantas con un alto contenido de azúcares o celulosa, separando posteriormente, por destilación, los diferentes componentes líquidos de una mezcla de etanol y agua. El bioetanol puede mezclarse con la gasolina (Espinoza, Goddard, Gutiérrez, & Bonfil, s.f), ver figura 4.

<sup>4</sup> Las siglas FFA están en inglés y corresponden a Free Fatty Acids (ácidos grasos libres).



**Figura 4.** Esquema de la producción de Etanol anhidro (bioetanol)



FUENTE: (Salinas & Gasca, 2009)

En México, desde hace varios años se produce etanol de caña de azúcar en los diferentes ingenios del país que cuentan con destilerías, sólo que su uso es para la industria de alimentos (bebidas alcohólicas principalmente), para la industria farmacéutica y para otras industrias, no para su uso como combustible, lo cual requiere que el etanol no contenga agua, es decir, sea anhidro. Se produce etanol hidratado al 96% en volumen principalmente de melazas de caña de azúcar y con una tecnología tradicional bastante conocida.

Ahora bien, falta decir que no todo el etanol producido en México es anhidro. Se estima que la capacidad instalada para etanol combustible sería de 33 millones de litros por año, producidos fundamentalmente en los ingenios La Gloria y San Nicolás, ambos ubicados en el estado de Veracruz.

Otro detalle muy importante a resaltar es que, según los registros estadísticos, la producción de etanol ha venido disminuyendo en México. En 1988 se llegó a producir 70 millones de litros, y ya para el 2004 sólo se producían 35 millones de litros, aproximadamente (Becerra Pérez ).

El etanol sirve para mezclarse con las gasolinas puras para oxigenarlas. De esta manera el rendimiento del combustible aumenta (López, 2012), así como los



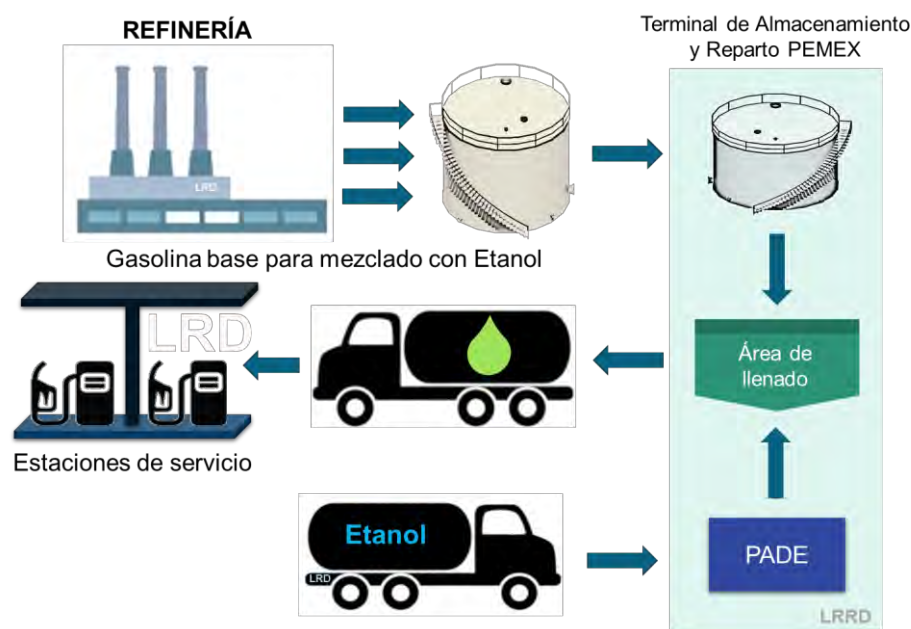


inventarios de gasolina alcanzan para más vehículos en el país. Petróleos Mexicanos (Pemex) y las Secretarías de Energía (SENER) y la SAGARPA, al concluir el Primer Congreso de la Agroindustria Azucarera Mexicana Zafranet 2013, anunciaron que México incursionará en la producción de etanol y su utilización como biocombustible.

En la conferencia "***Diversificación agrícola e industrial en México, ¿futuro incierto o ciencia ficción?***", el asesor técnico en la Dirección General de Pemex Refinación, Wilfrido Mendizábal, resaltó la decisión de Pemex para apoyar el proyecto de biocombustibles con base en energías más limpias. Mendizábal destacó sin embargo, que los motores actuales sólo aceptan el 6% de etanol en la mezcla. Agregó que en las plantas de Cadereyta y Salina Cruz, en los estados de Nuevo León y Oaxaca respectivamente, ya puede iniciarse la producción de combustibles, lo cual representa para los consumidores una alternativa con eficiencia en sus vehículos y a los campesinos una oportunidad de elevar su nivel de vida (Informador, 2012). La prueba se llevó a escala piloto, para lo cual Petróleos Mexicanos requirió instalar un Paquete de Almacenamiento y Dosificación de Etanol anhidro (PADE), junto con la implementación de algunos ajustes al interior de la refinería que pasaron por un control de calidad previo a su envío a las estaciones de servicio.

Se verificó que el etanol suministrado cumpliera con las especificaciones propuestas por Petróleos Mexicanos, con límites mínimos de pureza, teniendo especial cuidado con el grado de acidez, así como con el contenido de agua, sólidos, gomas y azufre. El costo final de esta prueba fue de 14.5 millones de pesos, lo que incluye la adquisición del etanol, así como la adecuación de la infraestructura y equipos de la Terminal de Almacenamiento y Reparto, ver siguiente figura.

**Figura 5.** Suministro de Etanol Anhidro sustituyendo al MTBE con venta al público



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE (SENER, 2009)

Posteriormente se realizó la fase de distribución en la que se utilizó un lote de gasolina base producida en la refinería y 151,600 litros de etanol anhidro obtenido de la caña de azúcar. La formulación de la gasolina se realizó en la Terminal de Almacenamiento y Reparto de Cadereyta, Nuevo León, distribuyendo un total de 2.53 millones de litros a 4 estaciones de servicio, con venta al público.

El registro de la prueba y la aprobación de los recursos adicionales por las instancias correspondientes tuvieron lugar durante el segundo semestre de 2008. La prueba se desarrolló del 11 de diciembre de 2008 al 6 de febrero de 2009, y el reporte del IMP señala que se obtuvieron resultados satisfactorios (Solís & Zamarripa, 2013).

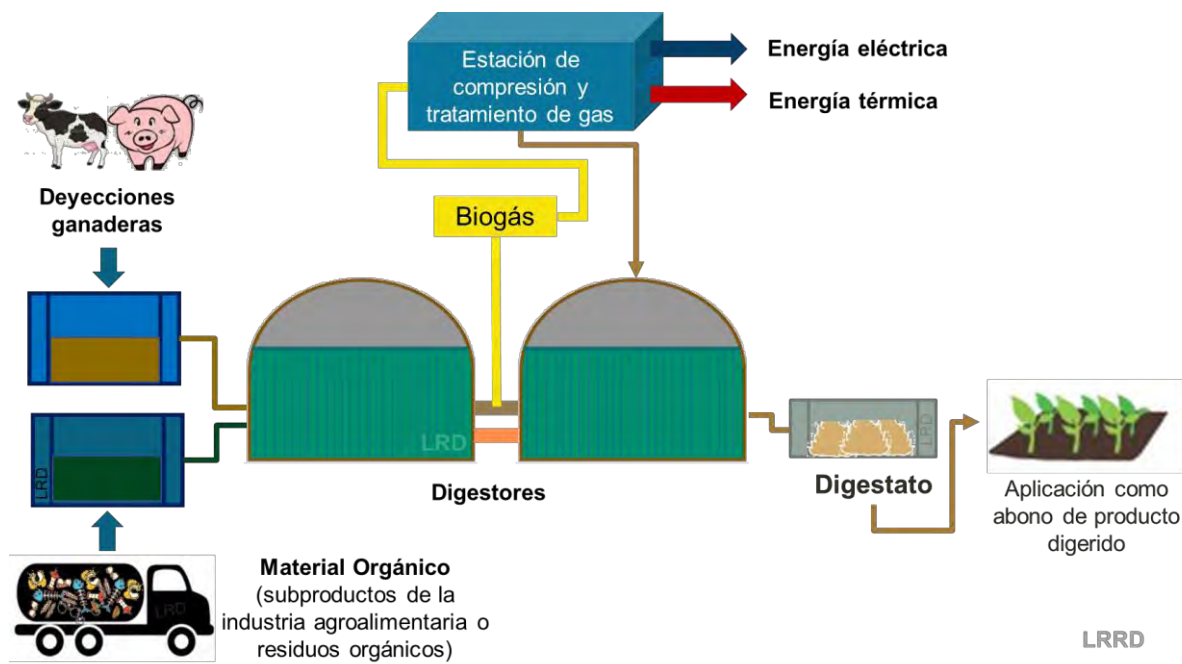
### 2.1.3. Biogás

El biogás es una mezcla conformada principalmente por CH<sub>4</sub> (50%-70%) y CO<sub>2</sub> (25%-40%), que se genera por el proceso biológico de biodigestión anaerobia, que consta de una serie de reacciones bioquímicas en la que residuos orgánicos son degradados o consumidos por un conjunto de microorganismos. La acción de estos microorganismos produce calor, mismo que se usa para mantener el

proceso en su temperatura ideal (35°C). En el proceso también se generan efluentes líquidos y sólidos que pueden ser utilizados como fertilizante orgánico (RMB, s.f.).

México cuenta con una gran cantidad de unidades productivas (en particular granjas de cerdos y establos lecheros) que generan desechos orgánicos representando un grave problema de contaminación y salud pública. Sin embargo, actualmente se ha visto una gran oportunidad para su aprovechamiento como fuente de energía renovable, por el uso de las excretas para la producción de biogás, que puede ser utilizado para generar energía eléctrica y/o térmica (Solís & Zamarripa, 2013). En los últimos años muchas unidades han incorporado sistemas de biodigestión dentro de sus procesos productivos, el fin concreto de la instalación de esta tecnología fue en un principio la comercialización de Bonos de Carbono, para la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). En la actualidad se han visualizado diversos usos y aplicaciones, tales como la reducción de contaminantes en las descargas de aguas residuales de las unidades pecuarias y la generación de energía eléctrica.

**Figura 6.** Esquema simplificado de una planta de cogeneración



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE (MINENERGÍA/GIZ, 2012)



### 3. Marco legal Mexicano dentro del sector Bioenergético

El calentamiento global provocado por los gases de efecto invernadero, y el declive en los picos de producción de las fuentes primarias de energía son dos problemas ligados al uso de combustibles fósiles, principal fuente de generación de energía en México.

Ante la reciente crisis del aumento en los precios del petróleo, la mayoría de los países desarrollados han adoptado una serie de acciones y marcos regulatorios que promuevan el uso de diversas fuentes de energía renovables a diferentes niveles.

En nuestro país, la falta de información, de incentivos fiscales y en general de un marco legal regulatorio provoca que el aprovechamiento de estas energías esté rezagado en su mayoría (ANES, s.f.).

#### 3.1. Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos

Actualmente en México ya se está implementando el uso de bioenergéticos como una fuente alternativa al uso de combustibles convencionales de origen fósil. Los bioenergéticos ya son promovidos activamente en diferentes sectores industriales y agrícolas en México, aunque nuestro país lleva un retraso considerable en el uso y aprovechamiento de estas opciones bioenergéticas en comparación con otros países. El uso de este tipo de combustibles renovables debe de cumplir con ciertos lineamientos bajo un marco legal, los cuales deben de cumplir con reglamentos y leyes que sean vigentes y aplicables en México.

Desde el punto de vista legal, los bioenergéticos en México no fueron materia de regulación hasta el 1º de febrero de 2008, cuando se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LPDB), la cual está reglamentada bajo los artículos 25 y 27 fracción XX de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, primer ordenamiento que norma el desarrollo de la industria de los biocombustibles.

La LPDB combina ambiente y energía, con producción agrícola y el empleo productivo a través del uso de los bioenergéticos y para su aplicación se combinan la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), la Ley de Desarrollo Rural Sustentable (LDRS) y los tratados internacionales relacionados de los que México es signatario: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y Protocolo de Kyoto. La LPDB consta de 31 artículos en cuatro títulos y 4 artículos transitorios.

**Figura 7.** Estructura de la Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE (LPDB, 2008)

Esta ley tiene por objeto como su mismo nombre lo dice, promover el desarrollo de bioenergéticos, diversificar el sector energético, apoyar al campo mexicano, reducir la emisión de gases contaminantes y resguardar la seguridad y soberanía alimentaria, mediante la coordinación de las acciones entre los gobiernos Federal, Estatal y Municipal a través de la participación de los sectores sociales y privados.

Mediante esta Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, se crea la Comisión Intersecretarial de Bioenergéticos, integrada por las Secretarías siguientes: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, SAGARPA; Secretaría de Energía, SENER; Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT; Secretaría de Economía, SE;

Secretaría de Hacienda y Crédito Público, SHCP; de acuerdo al Artículo 8 de la LPDB (CEDRSSA, 2015).

**Figura 8.** Comisión intersecretarial para el desarrollo de bioenergéticos

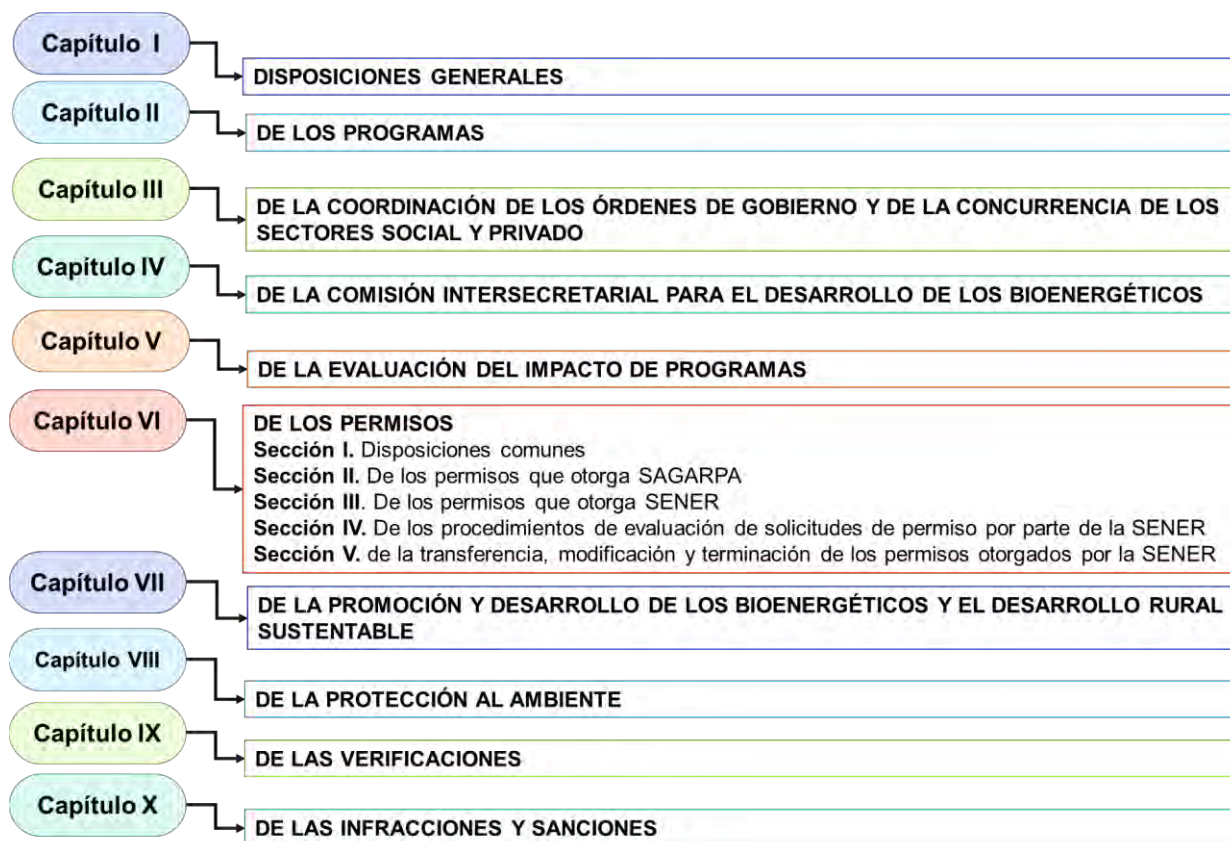


Las principales funciones de esta comisión son:

- ✓ Participar en el marco del Plan Nacional de Desarrollo y de los programas sectoriales en la elaboración de programas de fomento a los biocombustibles.
- ✓ Establecer las bases y lineamientos para la suscripción de acuerdos o convenios de coordinación entre los gobiernos federal, estatales, y municipales.
- ✓ Dar seguimiento a los programas derivados de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos y establecer indicadores para determinar el grado de cumplimiento.
- ✓ Fomentar la agroindustria, la inversión y la infraestructura necesaria, así como el uso de tecnologías eficientes.
- ✓ Revisar la congruencia de las Normas Oficiales Mexicanas.

En el artículo cuarto transitorio de la LPDB, especifica que el Ejecutivo Federal expedirá un Reglamento de la Presente Ley en un periodo no mayor a nueve meses a partir de la publicación de la presente Ley. Este reglamento está conformado de la siguiente manera:





FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Este reglamento contiene disposiciones en relación con (RLPDB, 2009):

- Elementos de la Comisión Intersecretarial para el Desarrollo de Bioenergéticos y sus acuerdos.
- Criterios para la evaluación de impacto de programas gubernamentales en la materia.
- Procesos y requisitos para el otorgamiento de los permisos de los que habla la ley.
- Condiciones para producir bioenergéticos y fomentar el desarrollo rural sustentable.
- Lineamientos generales para la generación de criterios para la protección del medio ambiente durante el desarrollo de bioenergéticos.



### 3.2. Marco legislativo mexicano para la producción de biocombustible de aviación en México

La Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LPDB), está enfocada únicamente al etanol anhidro, biodiesel y biogás. La bioturbosina, legalmente hablando, es un concepto que aún no existe en México ya que no tiene una definición o apartado en esta ley, pero basándose en el concepto de bioenergético que dicha ley define: ***"...combustibles obtenidos de la biomasa provenientes de materia orgánica de las actividades agrícola, pecuaria, silvícola, acuacultura, algacultura, residuos de la pesca, domésticas, comerciales, industriales, de microorganismos, y de enzimas, así como sus derivados, producidos por procesos tecnológicos sustentables que cumplan con las especificaciones y normas de calidad establecidas..."***, la bioturbosina debería ser considerada mediante esta vía legal como un bioenergético y por tanto se le debería de incluir en la LPDB; ya que no sería viable trabajar con el concepto de bioturbosina en el futuro con una legislación y normatividad que están enfocadas únicamente al etanol y al biodiesel.

Si la bioturbosina entrara dentro del marco definido de bioenergético que establece la LPDB, todas sus actividades relacionadas en la cadena de suministro (ver Figura 9) estarían sujetas a permiso desde la producción, almacenamiento, transporte, distribución por autotank y ducto, y comercialización; dichos permisos deben ser tramitados conforme a las disposiciones jurídicas aplicables hasta el momento en México.



**Figura 9.** Cadena de producción de los biocombustible de aviación en México



FUENTE: ASA, Aeropuertos y Servicios Auxiliares , 2015

Para la producción de biocombustible de aviación existe la necesidad de incorporar instrumentos de apoyo para la producción de insumos de este bioenergético jurídicamente, así como la necesidad de contar con disposiciones específicas para extracción y refinación, ya que en México el aspecto de construcción e infraestructura de refinación única y exclusivamente le corresponde a PEMEX hasta el momento (2016), por lo cual este proceso es relativamente complicado y tardío.

En cuanto a los requisitos para el Desarrollo de un Proyecto de Producción de **Bioenergéticos**, la LPDB dice, "...los proyectos para la producción de bioenergéticos deberán contar con un estudio de viabilidad que contendrá entre otros los siguientes aspectos (Trejo, 2007):

- I. Requerimientos del sitio, que incluya la disponibilidad de insumos y la infraestructura de transporte.
- II. La proximidad a los mercados del producto y productos derivados a los servicios públicos.



- III. Los permisos, concesiones y asignaciones en materia de agua y el tratamiento de las aguas residuales, así como las autorizaciones en materia de impacto ambiental y de cambio de utilización de suelo forestal, de conformidad con las disposiciones que señalan las leyes en la materia.
- IV. Los servicios básicos para la comunidad.
- V. La evaluación de disponibilidad y precio de insumos.
- VI. La revisión de los mercados de biocombustibles, en el ámbito nacional, local y regional; 24 Iniciativa de Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos. Centro de Documentación, Información y Análisis Dirección de Servicios de Investigación y Análisis Subdirección de Política Exterior 24.
- VII. Revisión de los productos derivados, sus mercados y factibilidad de atenderlos, incluyendo: Bióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), granos de destilería desecados y solubles (DDGS), y granos húmedos de destilería (DWG, siglas en inglés).
- VIII. Descripción de las estadísticas del proyecto propuesto, incluyendo los insumos de planta, productos de planta, transporte, demandas de energía, requerimientos de personal; y
- IX. El desarrollo de un modelo financiero, incluyendo un presupuesto de construcción, calendario de financiamiento interino y un pronóstico de **operación a diez años.**"

## 4. Sustentabilidad de los biocombustibles

### 4.1. Definición de sustentabilidad

El tema del Desarrollo Sustentable y de la Sustentabilidad ha cobrado una importancia fundamental para lograr en los países un mejor cuidado del medio ambiente y mejorar las condiciones de la vida de las poblaciones a la par de llevar un desarrollo económico.

La definición más común de Desarrollo Sustentable es la que aparece en el **Informe de Brundtland**: *"Es aquel que satisface las necesidades de las*

*generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades”.*

Por su parte, Astier ha reconocido que el concepto de sustentabilidad no tiene una definición única, ya que existe una multiplicidad de perspectivas válidas para su definición y análisis. Entre estas perspectivas se identifican principalmente tres:

1. Sustentabilidad del sistema humano (Sustentabilidad débil)
2. Sustentabilidad del sistema ecológico (Sustentabilidad fuerte)
3. Sustentabilidad del sistema socioecológico, la cual reconoce las interrelaciones entre sociedad y naturaleza

Lo que implica que el concepto de sustentabilidad tiene un carácter multidimensional, entre aspectos ambientales, económicos y sociales, ver siguiente figura.

**Figura 10.** Aspecto Sustentabilidad



El concepto de sustentabilidad además es dinámico, y se ha definido como una característica de los sistemas dinámicos para mantenerse a sí mismos a través

del tiempo, sin un punto final fijo que pueda ser definido. De acuerdo con esta definición se podrá entender que la sustentabilidad de los sistemas<sup>5</sup> (en este caso para el sistema energético con una aplicación para el sector de transporte aéreo) contribuye a lograr el desarrollo sustentable.

Por otra parte, con el propósito de poner en práctica el concepto de sustentabilidad (lo que se conoce como hacer operativo el concepto), se han establecido una serie de atributos generales que deben guardar los sistemas para ser sustentables, entre los que se encuentran: resiliencia, confiabilidad, productividad, adaptabilidad y equidad.

Reconociendo que la energía es esencial para el desarrollo social y económico, los cuales son componentes claves del desarrollo sustentable para satisfacer las necesidades las necesidades materiales de la humanidad y reducir las desigualdades socio-económicas, el logro de la sustentabilidad energética se ha reconocido como un aspecto crítico para lograr el desarrollo sustentable. La sustentabilidad energética se ha definido como el conjunto de prácticas, políticas y tecnologías que permiten el suministro de la energía que las sociedades demandan, a los menores costos sociales, ambientales y financieros. Por tal motivo, existe la necesidad de evaluar la sustentabilidad de los sistemas energéticos.

Se han definido algunos sistemas de sustentabilidad que debe cumplir el sistema energético para ser sustentable. Entre estos se encuentran:

- Seguridad energética y el uso de energías renovables
- Incremento del ahorro y el uso eficiente de la energía
- Reducir los impactos ambientales (entre ellos la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI))
- Viabilidad económica, generación de empleo y mejoramiento del nivel de vida de la población.

---

<sup>5</sup> Un sistema es un conjunto de elementos que interaccionan para lograr un objetivo común.



Dada la actual problemática ambiental y social del sistema energético, que lo hace insustentable, se hace necesario modificarlo de manera que, además de garantizar el suministro energético, contribuya a la mitigación de emisiones de GEI y otros gases contaminantes a la atmósfera, ayude a preservar los ecosistemas y la salud humana, contribuya a la satisfacción de las necesidades del ser humano y al mismo tiempo las fuentes de energía sean competitivas con los combustibles fósiles en términos de precios relativos. Para este fin ha sido reconocida la importancia de involucrar a las energías renovables como parte de un portafolio heterogéneo de fuentes de energía primaria.

#### 4.2. Sustentabilidad en la producción de biocombustibles

En años recientes han surgido una gran cantidad de críticas a la producción de biocombustibles. Numerosas organizaciones no gubernamentales e investigadores han alertado sobre los efectos negativos que los biocombustibles pueden tener sobre el clima, los relacionados a la pérdida de biodiversidad debido al incremento de la deforestación; y los impactos debidos al uso de monocultivos que puedan amenazar la seguridad alimentaria al competir por tierras para la producción de alimentos, y que además, pueden ser causantes de erosión y de agotamiento de recursos acuíferos.

Algunos de los efectos de los biocombustibles líquidos sobre la sustentabilidad se presentan a continuación:

- Balance energético y emisiones de gases efecto invernadero (GEI)
- Impactos sobre la seguridad alimentaria
- Impactos sobre la disponibilidad de agua
- Factibilidad económica
- Efectos sociales

#### 4.3. Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB)

Con la finalidad de que la era de los biocombustibles, al menos para la aviación, no sea el inicio de una etapa de mayores problemas para el planeta y para los seres humanos, que no utilice terrenos aptos para la producción de alimentos y

compita con ellos, que no genere ni de lejos tantas emisiones como las actuales, que promueva el uso de terrenos actualmente en desuso y que apoye con ello el desarrollo rural y social de los campesinos, se estableció la Mesa Redonda para los Biomateriales Sustentables (*Roundtable on Sustainable Biomaterials, RSB*) (Sepúlveda, 2012). La *RSB* es una iniciativa internacional que reúne a agricultores, empresas, gobiernos, organizaciones no gubernamentales y científicos que están interesados en la sustentabilidad de la producción y distribución de biocombustibles.

La RSB es el estándar de certificación global y multiactor para biocombustibles sustentables que quieran acceder a mercados regulados, aplicable a todo tipo de biocombustible y de materias primas. Tiene cobertura sobre toda la cadena de suministro. La sede de RSB está en la *École Polytechnique Federale de Lausanne*, Suiza. En 2008, la RSB dio a conocer su estándar para los biocombustibles sustentables. Esto incluye 12 principios (ver Tabla 3) y cada principio incluye criterios desglosados según el principio al que estén asociados.

**Tabla 3.** Principios de sustentabilidad, definidos por la RSB

<p><b>Principio 1. Marco legal</b></p>	<p>Las operaciones para la producción de biocombustibles cumplirán con todas las leyes y reglamentos aplicables del país en el que se desarrollen las operaciones y todas las leyes y acuerdos internacionales.</p>
<p><b>Principio 2. Planificación, monitoreo y mejora continua</b></p>	<p>Las operaciones de producción para la producción sustentable de biocombustible se planificarán, implementarán y mejorarán continuamente mediante un proceso de evaluación y manejo del impacto que sea abierto, transparente y de consulta, y un análisis de viabilidad económica.</p>
<p><b>Principio 3. Gases de efecto invernadero</b></p>	<p>Los biocombustibles contribuirán a la mitigación del cambio climático reduciendo significativamente el ciclo de vida de las emisiones de GEI en comparación con los combustibles fósiles.</p>
<p><b>Principio 4. Derechos humanos y laborales</b></p>	<p>Las operaciones para la producción de biocombustibles no violarán los derechos humanos ni los derechos laborales y promoverán el trabajo digno y bienestar a los trabajadores.</p>



<b>Principio 5. Desarrollo rural y local</b>	En regiones pobres, las operaciones para la producción de biocombustible contribuirán al desarrollo social y económico de los pueblos, comunidades locales, rurales e indígenas.
<b>Principio 6. Seguridad alimentaria</b>	Las operaciones para la producción de biocombustibles garantizarán el derecho humano de recibir alimentos adecuados y mejorar la seguridad alimentaria en regiones de inseguridad alimentaria.
<b>Principio 7. Conservación</b>	Las operaciones para la producción de biocombustibles evitarán los impactos negativos sobre la diversidad biológica, los ecosistemas y otros valores para la conservación.
<b>Principio 8. Suelo</b>	Las operaciones para la producción de biocombustibles implementarán prácticas tendientes a revertir la degradación del suelo o a mantener la salud del suelo.
<b>Principio 9. Agua</b>	Las operaciones para la producción de biocombustibles mantendrán o mejorarán la calidad y cantidad de recursos hídricos superficiales y subterráneos, y respetarán los derechos del agua formales o consuetudinarios existentes.
<b>Principio 10. Aire</b>	La contaminación del aire debida a operaciones de biocombustibles se reducirá al mínimo a lo largo de la cadena de suministro.
<b>Principio 11. Uso de la tecnología, insumos y manejo de residuos</b>	El uso de tecnologías en las operaciones para la producción de biocombustible buscará maximizar la eficiencia productiva y el desempeño social y ambiental, y minimizar el riesgo de causar daños al medio ambiente y a las personas.
<b>Principio 12. Derechos de la tierra</b>	Las operaciones para la producción de biocombustibles respetarán los derechos a la tierra y los derechos al uso de la tierra.

FUENTE: (RSB, s.f.)

## 5. Biorrefinería

### 5.1. Definición

El origen de la palabra biorrefinería proviene del concepto *Chemurgy*, el cual es una rama de la química que se ocupa de la preparación de productos para la industria a partir de las materias primas agrícolas con fines distintos a los alimentarios; este término fue acuñado por



el químico William J. Hale en 1934. Las tecnologías desarrolladas bajo este concepto se enfocaron en transformar productos y residuos agrícolas en productos químicos. Las investigaciones alrededor de este concepto cesaron casi en su totalidad después de la Segunda Guerra Mundial debido a que los productos obtenidos con estas tecnologías no eran competitivos con los producidos por la industria petroquímica.

En los años 1990 se acuña el término “biorrefinería”, el cual amplía el concepto de *Chemurgy* al considerar el uso de todo tipo de biomasa como materia prima para producir una amplia gama de productos que incluya combustibles, químicos, derivados y energía utilizable.

La definición de biorrefinería no es un concepto sencillo de describir, por ejemplo:

- El *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), dependiente del DOE (siglas en inglés del Departamento de Energía del gobierno de Estados Unidos), define a una biorrefinería como un “centro que integra procesos y equipos de conversión de biomasa para producir combustibles, energía y productos químicos a partir de biomasa” (NREL, 2009)
- El *Bioeconomy Institute* (BEI) de la Universidad de Iowa, define las biorrefinerías como “instalaciones integradas en las que se emplea la biomasa como materia prima para la producción de una amplia gama de productos” (Mills, 2014)
- *The Bioeconomy Consultants* (NNFCC) define a las biorrefinerías como “aquellas que llevan un procesamiento sostenible de la biomasa en un espectro de productos comercializables (alimentos, piensos [forrajes], combustibles, productos químicos, calor y electricidad), además que proporcionan un medio por el cual los materiales renovables pueden ser integrados y producidos en masa, lo que permite la sustitución a gran escala de combustibles y materiales fósiles” (NNFCC, s.f.).

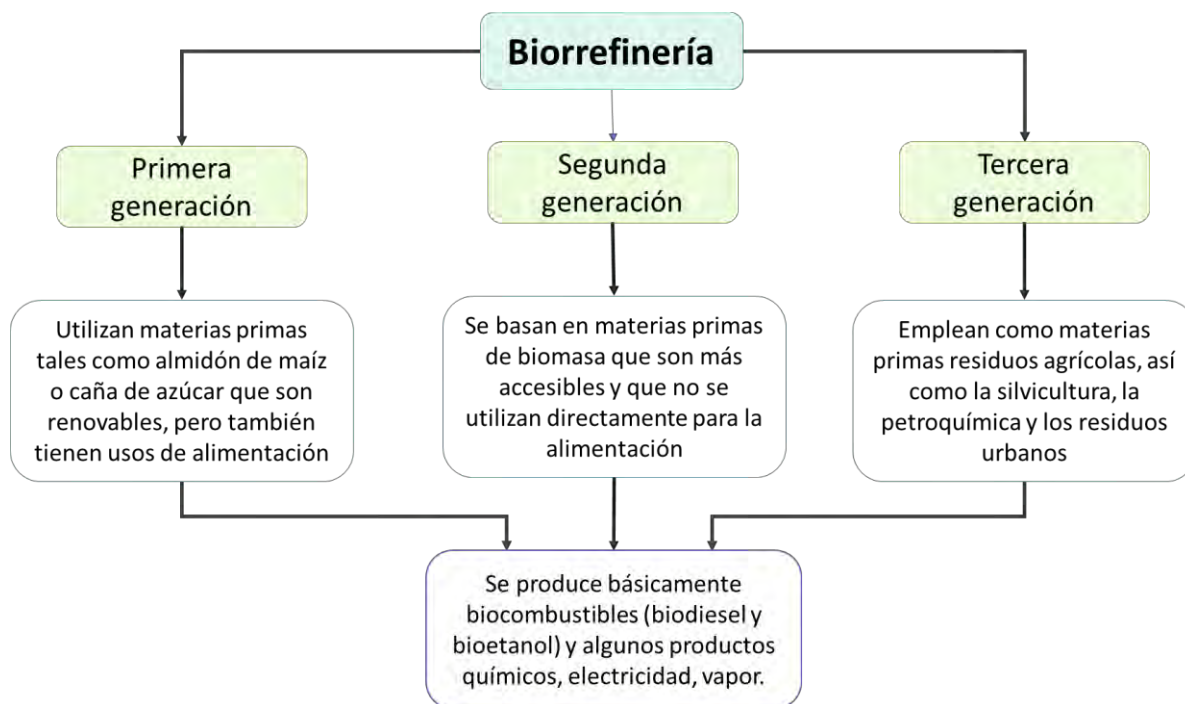
Pero de una forma general se podría definir a una biorrefinería como:

*Una planta de procesamiento que integra procesos de transformación de biomasa y equipos adecuados para producir combustibles, energía, químicos y productos finales* (GIL, 2009).

Las biorrefinerías están compuestas por diferentes tecnologías de transformación de la biomasa integradas en una plataforma que varía dependiendo del tipo de tecnología empleada.



**Figura 11.** Clasificación de biorrefinerías según su generación













FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE (MARTÍN, 2009)

**Tabla 4.** Clasificación de biorrefinerías según su tipo de biomasa

Descripción	Productos obtenidos	Tecnologías utilizadas
<b>BIORREFINERÍA VERDE</b>		
<p>Es aquella que se basa en sistemas tecnológicos totalmente integrados y sustentables, ambientalmente amigables para la utilización y explotación de los materiales biológicos ya sean de origen residual o proveniente de tierras dedicadas a la producción sustentable de estos. Entre las ventajas más destacables de las biorrefinerías verdes están:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>La materia de alimentación es abundante y barata</li> <li>La lignocelulosa de la torta de filtro puede ser fraccionada más fácilmente que la presente en materiales leñosos</li> <li>Se pueden producir proteínas y azúcares como productos secundarios</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☘ Combustibles</li> <li>☘ Productos químicos</li> <li>☘ Materiales</li> <li>☘ Polímeros</li> </ul>	<p>Pretratamiento, prensado, fraccionado, separación y digestión</p>



Descripción	Productos obtenidos	Tecnologías utilizadas
<b>DE CULTIVO COMPLETO</b>		
<p>Se procesa y consume todo el material obtenido en cultivos agrícolas para obtener productos útiles desde el punto de vista energético y/o químico. Materias primas como el trigo, el centeno, el maíz pueden ser utilizados en una biorrefinería de este tipo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li> Combustibles</li> <li> Productos químicos</li> <li> Materiales</li> <li> Polímeros</li> </ul>	<p>Molienda seca o húmeda, conversión bioquímica</p>
<b>BIORREFINERÍA LIGNOCELULÓSICA</b>		
<p>Este tipo de biorrefinería emplea madera, residuos agrícolas, cultivos energéticos y residuos municipales. Estos recursos son ideales en términos de costos reducidos y flexibilidad del recurso. Los sacáridos pentosa y hexosa presentes en esta materia prima, son separados para producir bioetanol y productos químicos de mayor valor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li> Combustibles</li> <li> Productos químicos</li> <li> Materiales</li> <li> Polímeros</li> </ul>	<p>Pretratamiento, hidrólisis química y enzimática, fermentación, separación.</p>
<b>BIORREFINERÍA DE DOS PLATAFORMAS</b>		
<p>Este tipo de biorrefinería integra dos plataformas de transformación de la biomasa: la plataforma de azúcar y la plataforma termoquímica. La combinación de estas dos plataformas en una refinería integrada provee una gran flexibilidad en cuanto al tipo de biomasa que puede ser alimentada y la cantidad de productos posibles. Esta plataforma incrementa la posibilidad de producción combinada de bioetanol y diesel sintético.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li> Combustibles</li> <li> Productos químicos</li> <li> Materiales</li> <li> Polímeros</li> </ul>	<p>Combinación de la plataforma azúcar y plataforma de gas de síntesis</p>



Descripción	Productos obtenidos	Tecnologías utilizadas
<b>BIORREFINERÍA MARINA</b>		
Este tipo de producción es de origen acuático, por lo que la biomasa marina ofrece un gran potencial para su utilización energética. Dependiendo del tipo de alga que se va a procesar, se pueden generar diferentes productos. Así, por ejemplo, las diatomeas <sup>6</sup> acumulan aceites; las algas verdes, almidón y aceites, y las algas doradas, aceites y carbohidratos.	<ul style="list-style-type: none"><li>💧 Combustibles</li><li>💧 Productos químicos</li><li>💧 Materiales</li><li>💧 Polímeros</li></ul>	Extracción y separación
<b>BIORREFINERÍA TERMOQUÍMICA</b>		
Son instalaciones basadas en la descomposición por procesos termoquímicos de la biomasa. Constan de las siguientes etapas, pretratamiento (secado, triturado, etc), alimentación, conversión (gasificación, pirólisis), limpieza y acondicionamiento del producto final.	<ul style="list-style-type: none"><li>💧 Combustibles</li><li>💧 Productos químicos</li><li>💧 Materiales</li><li>💧 Polímeros</li></ul>	Conversión termoquímica, torrefacción, pirólisis, gasificación, separación de productos, síntesis catalítica.

<sup>6</sup> Las diatomeas son una clase de algas unicelulares. Conocidas también como *Bacillariophyceae*, son uno de los más comunes tipos de fitoplancton.



## 5.2. Análisis FODA (Fortalezas-Oportunidades-Debilidades-Amenazas) ante la construcción de una biorrefinería en México

Para saber si México se encuentra a la altura para implementar biorrefinerías como bloques básicos de la industria, se realizó un análisis Fortalezas-Oportunidades-Debilidades-Amenazas (FODA). La realización de un análisis FODA para una biorrefinería en México, será una herramienta base para explorar los factores internos y externos que podrían influir en su funcionamiento. Además, este análisis permitirá exponer las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas para desarrollar una biorrefinería en México. Es necesario aprovechar las fortalezas y oportunidades para impulsar el desarrollo de biorrefinerías. Para las amenazas se debe crear un plan de acción para su mitigación y para sus debilidades crear un plan de acción para convertirlas en fortalezas.



**Tabla 5.** Análisis FODA (Fortalezas-Oportunidades-Debilidades-Amenazas) ante la construcción de una biorrefinería en México

## DEBILIDADES

- Ausencia de incentivos legales, financieros gubernamentales y privados para apoyar la introducción de tecnologías bioenergéticas en México.
- Falta de concientización sobre el gran potencial de la agroindustria, como generadora de un mercado de bioenergéticos.
- Falta de propiedades de patentes/tecnologías nacionales para la producción de biocombustibles en México.
- Incertidumbre en cuanto al costo real que implica la construcción de una biorrefinería en función de su capacidad.
- Personal inexperimentado para operar la planta.
- Exceso de investigación y desarrollo de conceptos teóricos en cuanto al tema de biorrefinación, en lugar de llevar a cabo una ejecución real y consecuentemente incentivar un nuevo mercado.
- Reparación tardía de futuras fallas en el equipamiento de la biorrefinería debido al uso de tecnología extranjera.
- No se cuenta con una estrategia nacional que contemple el desarrollo de biorrefinerías, y las existentes (plantas a escala piloto) para otros bioenergéticos (etanol y biodiesel) no son del todo útiles para dicho desarrollo.

## AMENAZAS

- Desconocimiento para un desarrollo sólido en cuanto al fomento de la biorrefinación en México.
- Monopolio en cuanto a la provisión de materia prima.
- Inexistencia en el marco jurídico mexicano respecto al tema de biorrefinación.
- Ideas negativas por parte de la población con respecto a que una biorrefinería puede significar algo perjudicial para su entorno.
- Centrarse en un solo producto (biocombustible) y no en el potencial de los subproductos que se podría aprovechar.
- Cuestionamiento con respecto al tipo de insumos a usar y la sustentabilidad de la producción de la biomasa.
- Desconocimiento en cuanto a la selección de una tecnología específica apta para la primera biorrefinería en el país.
- Que el proyecto quede en el olvido debido a los altos costos de inversión inicial que se tendría que realizar.
- Falta de materia prima.
- Inexistencia de estudios de mercado de los posibles subproductos a obtener.

- Alta demanda (a partir de ella se realizará la actividad de refinación, entre más crezca el mercado, la biorrefinería tendrá una alta producción).
- Generación de una diversa gama de productos de origen renovable: alimentos, piensos, materiales, productos químicos y bioenergía (combustible, electricidad y/o calor).
- Se puede obtener un mejoramiento económico de la rentabilidad en las instalaciones mediante el aprovechamiento de todos los subproductos generados.
- Optimización de uso de los recursos y disminución de los residuos, maximizando de esta manera su rentabilidad.
- Intereses por parte de inversionistas (intereses particulares ya sea para que se realice u obtenga el proceso o bien en el producto final).
- Interés de la industria química en utilizar nuevas materias primas renovables.
- Contribución económica de mejora en la competitividad de diversos sectores industriales a través de la innovación: industria química, farmacéutica, etc.

- Aprovechamiento del gran potencial energético de los recursos renovables biomásicos del país.
- Fortalecimiento económico en diversos sectores del mercado mexicano, por ejemplo agricultura y energía.
- Posicionamiento de México en el mercado de bioenergéticos.
- Generación de empleos asociados tanto a los procesos de transformación, como a los procesos de generación, recolección, pretratamiento y transporte de biomasa, productos y subproductos.
- Desarrollo de tecnología propia para la construcción de nuevas biorrefinerías a mediano plazo.
- Mejoramiento de la competitividad de diversos sectores industriales a través de la innovación.
- Posibilidad de creación de nuevas carreras a nivel técnico y profesional.
- Fortalecimiento de actividades nacionales de investigación, desarrollo tecnológico e innovación relacionadas con las transformación de biomasa.
- Formación de recursos humanos especializados.

## FORTALEZAS

## OPORTUNIDADES



### 5.2.1. Desarrollo de estrategias

En general, existen muchos cuestionamientos respecto al tema de biorrefinación, pero en México, al ser un país en desarrollo, este concepto resulta ser mucho más errado ante la sociedad en comparación con países como Estados Unidos, Brasil, España, Australia, por mencionar algunos. Además hay que mencionar que dentro del tema de la producción de biocombustibles podrían surgir inquietudes con respecto al tema alimentario debido al aumento del precio de la tierra, a los efectos en los precios (mercado) y en la disponibilidad de productos para consumo humano, en el reemplazo de actividades de ganadería y agricultura; e incluso también el tema de inocuidad de alimentos genéticamente modificados, y la situación de diversos cultivos y variedades. Por lo que para cambiar o bien combatir el surgimiento de esas ideas en la población se necesita el apoyo por parte del gobierno mexicano a través de políticas gubernamentales alineadas y coordinadas, así como del sector académico para responder a las preguntas que resultarán en un industria que beneficiará a nuestro país económica, social y ambientalmente.

México tiene una gran cartera de investigación (I) en cuanto al tema de biocombustibles, pero también debe de apostar al tema de investigación y desarrollo (I+D) para la producción de bioenergéticos. De tal manera que se pueda llevar a cabo una correcta coordinación para demostrar que se está ampliamente comprometido con el tema de producción de biocombustibles a través del fomento de la investigación aplicada, para que así como en otros países ya ha sucedido, en México se pueda desarrollar una tecnología óptima para la producción de biocombustible de aviación, para que posteriormente sea permitida para su uso en la aviación comercial.

El aun inexistente desarrollo de tecnología de biorrefinación e infraestructura, representa una gran oportunidad y reto para el sector académico nacional. Así también, la investigación, desarrollo tecnológico e innovación necesarios para el establecimiento de la industria de los biocombustibles sustentables de aviación en México, no sólo desde el punto de vista económico, sino como lección aprendida





para trabajar de manera coordinada interinstitucionalmente y como ejemplo de una correcta vinculación entre los sectores académico, empresarial gubernamental y social.

El uso comercial de los biocombustibles alternativos en la aviación y con la cifra de importantes vuelos comerciales, puede aumentar la confianza en el uso del combustible renovable, aunque se debe recalcar que gran parte de esta producción se encuentra a nivel piloto.

Los monopolios generan como consecuencia altos costos económicos y sociales y el enriquecimiento de ciertos sectores privilegiados, por llamarlo de alguna forma. En México los grandes monopolios están vinculados al poder político y, sin justificación, encarecen bienes y servicios, dañando la economía de la población, productores, empresarios y comerciantes. Los monopolios a pesar de estar prohibidos, por el artículo 28 de la Constitución de los Estados Unidos Mexicanos, imponen su ley ante el mercado. Consecuentemente el gobierno mismo debe de desproteger a los monopolios, ya que estos frenan cualquier intento de entrada de nuevos competidores; además con una regulación efectiva contra prácticas monopólicas, la economía nacional podría crecer más.

Es necesaria la concertación de políticas e instrumentos para evitar impactos sociales y ambientales: certificación + controles + gestión. De la misma manera debe ser promovido el diálogo entre los actores y fortalecida la implementación de sistemas de monitoreo y estándares para el control ambiental, económico y social.

La producción no controlada y desmedida de los biocombustibles pudiese tener efectos negativos sobre la diversidad biológica y uso de recursos naturales: fragmentación y la degradación de los hábitats, contaminación y eutrofización del agua, y la sobreexplotación de suelos, entre otras. La biodiversidad se podría ver especialmente afectada por la expansión de la frontera agrícola y la erosión. Mencionado esto, durante la producción hay varios factores que se deben de tomar en cuenta: el uso controlado del recurso agua, manejo de aguas residuales

que contienen carga orgánica y sólidos suspendidos; contaminación del aire en procesos industriales, producción de vinazas, por mencionar algunos.

La racionalidad económica de la producción y exportación de los biocombustibles se relaciona con los precios del petróleo, precios de las materias primas y sustitutos, y el consumo de combustibles fósiles con fuertes subsidios. A esto se suman las necesidades de infraestructura. Adicionalmente, en los procesos de certificación a los cuales serán expuestos los biocombustibles tendrán sus costos y es necesario analizar quiénes serán los actores que asumirán estos costos; a esto se suman la falta de tecnología nacional para la generación de biocombustible; por lo que es necesario desarrollar instrumentos de financiamiento y de inversión, para así lograr niveles de eficiencia en la producción de biocombustibles a través de avances tecnológicos desarrollados nacionalmente.

Se requiere consolidar la credibilidad de los diferentes sectores, incluyendo gobierno y emprendedores. Se requiere una locomotora que promueva las acciones para la consolidación de una cadena de valor apoyada por la demanda de mercado, que garantice el suceso de la misma. Las señales claras del gobierno son importantes para el sector empresarial en el proceso de liderar el fomento del cultivo. La I + D aplicada es otro acelerador importante para este proceso.

## 6. Combustible de aviación (Turbosina, Jet A o Jet A-1)

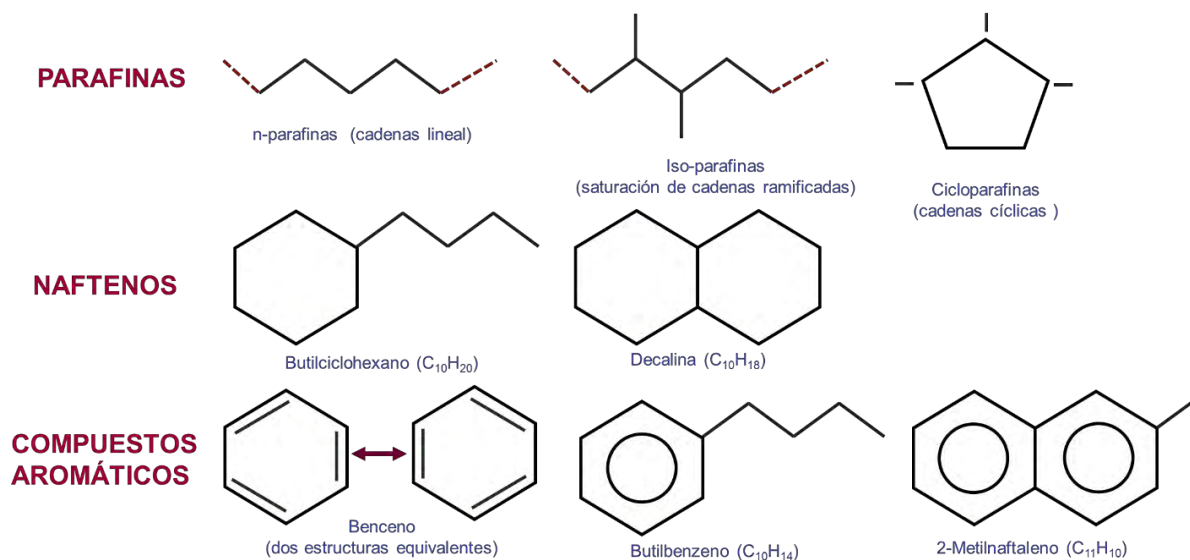
El Jet A-1, también conocido como turbo combustible, turbosina o JP-1A, es un destilado medio proveniente de la destilación atmosférica del petróleo, el cual tiene características especiales de calidad, y es tratado químicamente para eliminar compuestos azufrados tales como sulfuros y ácidos nafténicos<sup>7</sup>, que pueden tener un comportamiento corrosivo.

---

<sup>7</sup> Los ácidos nafténicos son de origen orgánico y de tipo carboxílico. Estos ácidos están presentes en los crudos y han sido usados ampliamente como materia prima de varios productos; sin embargo, al momento de procesar crudos con altas concentraciones de estos, se convierten en un problema debido a la alta corrosividad que presentan a temperaturas elevadas.



**Figura 12.** Estructura química de los compuestos que contiene la Turbosina (Jet A o Jet A-1)



FUENTE: ( Gürbüz & Dumesic, s.f.)

El combustible de especificación Jet A se ha utilizado en los Estados Unidos desde la década de 1950, por lo general este tipo de combustible de aviación sólo está disponible en Estados Unidos y algunos aeropuertos canadienses como el de Toronto y Vancouver; mientras que Jet A-1 es el combustible de serie utilizado en el resto del mundo. La principal diferencia entre ambos combustibles es el punto de congelación, el Jet A-1 presenta un punto de congelación más bajo respecto al Jet A.

**Tabla 6.** Propiedades físicas del JET A / JET A-1

	Jet A-1	Jet A
<b>Punto de inflamación</b>		38°C (100°F)
<b>Temperatura de autoignición</b>		210°C (410°F)
<b>Punto de congelación</b>	-47°C (-53°F)	-40°C (-40°F)
<b>Combustión al aire libre</b>		260-315°C (500-599°F)
<b>Densidad a 15°C (59°F)</b>	0.804kg/L (6.71 lb/gal USA)	0.820g/L (6.84lb/gal USA)
<b>Energía específica</b>	43.15 MJ/kg	43.02 MJ/kg
<b>Densidad energética (PCI)<sup>8</sup></b>	34.7 MJ/L	35.3 MJ/L

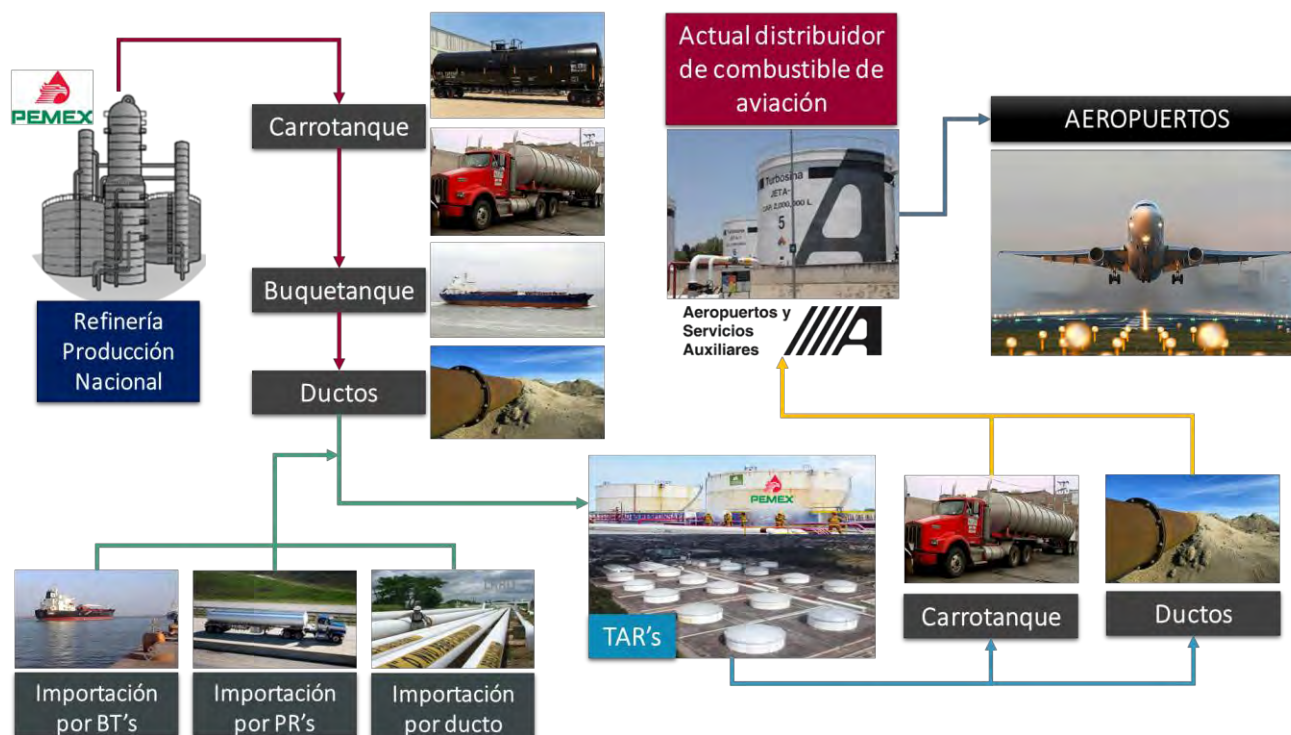
FUENTE: (MMM, s.f.)

<sup>8</sup> Poder Calorífico Inferior, es la energía liberada por la combustión de una mezcla de hidrocarburos.

### 6.1. Suministro y demanda de Turbosina en México

La turbosina, es el combustible más utilizado en los aviones con motores de turbina o a reacción (PEMEX, s.f.). Por lo que el sector aeronáutico es prácticamente el único sector donde se comercializa turbosina.

**Figura 13.** Cadena de suministro de Turbosina

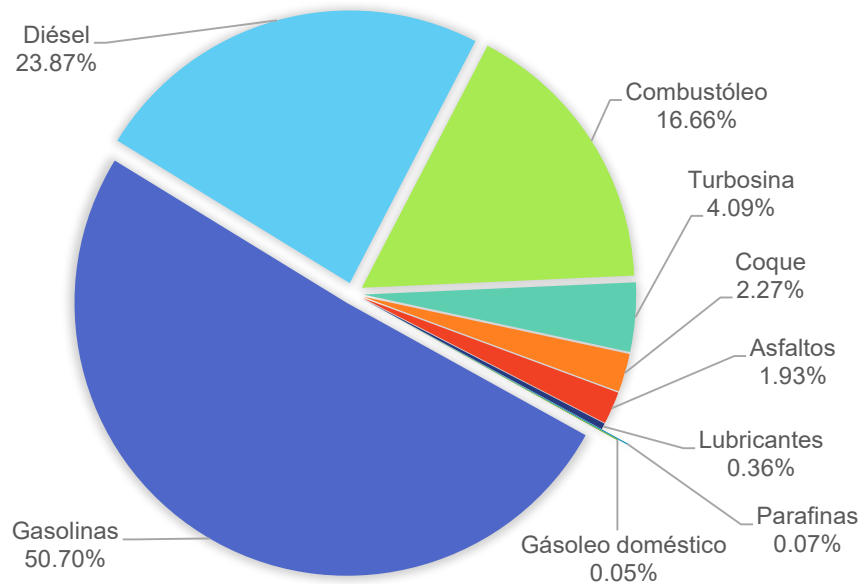


FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE PEMEX

La turbosina que es utilizada en los aeropuertos nacionales es producida en su mayoría por Petróleos Mexicanos (PEMEX), mientras que un tanto es importada. Esta empresa paraestatal es la que se encarga de proveer el combustible en toda la república mexicana. De este modo, PEMEX se encarga tanto de la producción como de la importación y exportación de combustibles dentro del territorio nacional.

Para el mercado de petrolíferos en México, la turbosina tiene una participación del 4.09%, lo que representa un promedio diario de 60.7 mil barriles diarios en el periodo de 2005 a 2014.

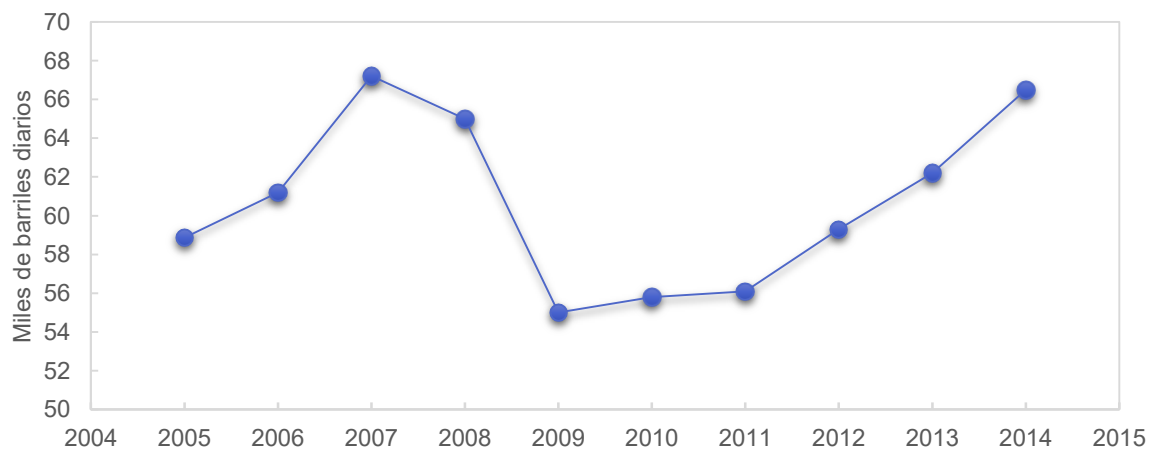
**Figura 14.** Participación en la venta de petrolíferos en México 2005-2014



FUENTE: (SENER, 2015)

Sin embargo a pesar de eso, no es posible decir que el consumo de combustibles, en particular de turbosina, se comporte constante a lo largo del tiempo. Su consumo ha variado a lo largo de los años, por ejemplo, entre 2008 y 2011 sufrió una estrepitosa caída por la crisis económica mundial, la cual afectó sensiblemente al número de vuelos efectuados en dicho periodo; por otro lado actualmente se observa una tendencia de crecimiento.

**Figura 15.** Demanda de turbosina en México, 2005-2014

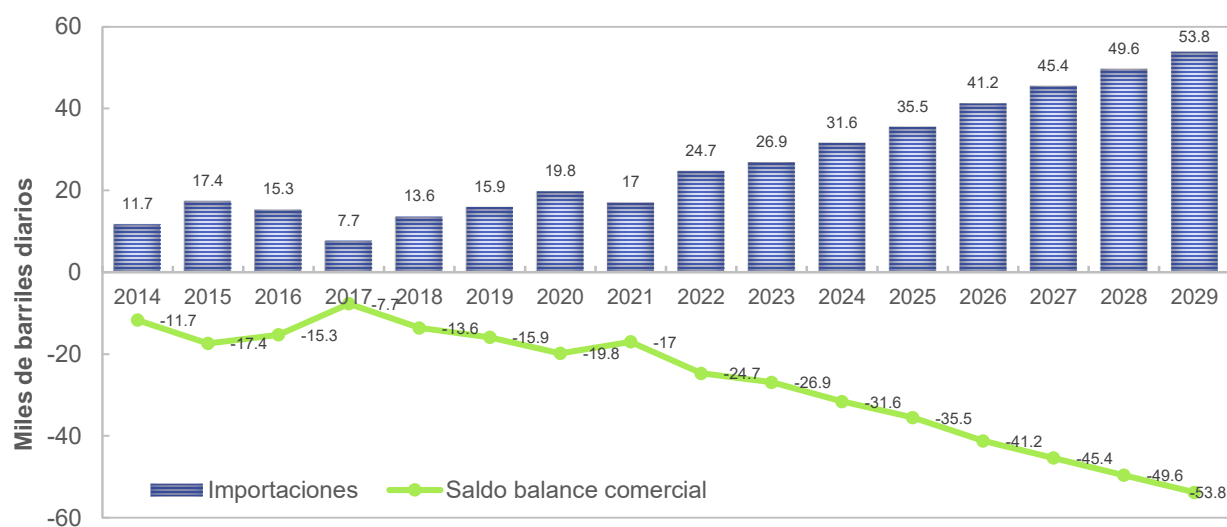


FUENTE: (SENER, 2015)

El abastecimiento de combustible es un problema de carácter mundial que lleva a los países a considerar diferentes alternativas para satisfacerla. En el caso de México, se cuenta con dos formas de abastecer a la demanda nacional; la primera de ellas es a partir de la producción realizada en las refinerías de PEMEX y por otro lado en caso de no contar con la capacidad necesaria para satisfacer la demanda, se recurrirá con mayor intensidad a las importaciones (Ruiz, 2015).

El transporte aéreo ha sido el sector con mayor crecimiento de la economía mexicana, impulsado por el tráfico de pasajeros aéreos internacionales, de los cuales México ha sido el punto de origen o bien de destino final. El desarrollo del sector aéreo mexicano a nivel internacional, está relacionado con el crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB).

**Figura 16.** Comercio Exterior de Turbosina, 2014-2029



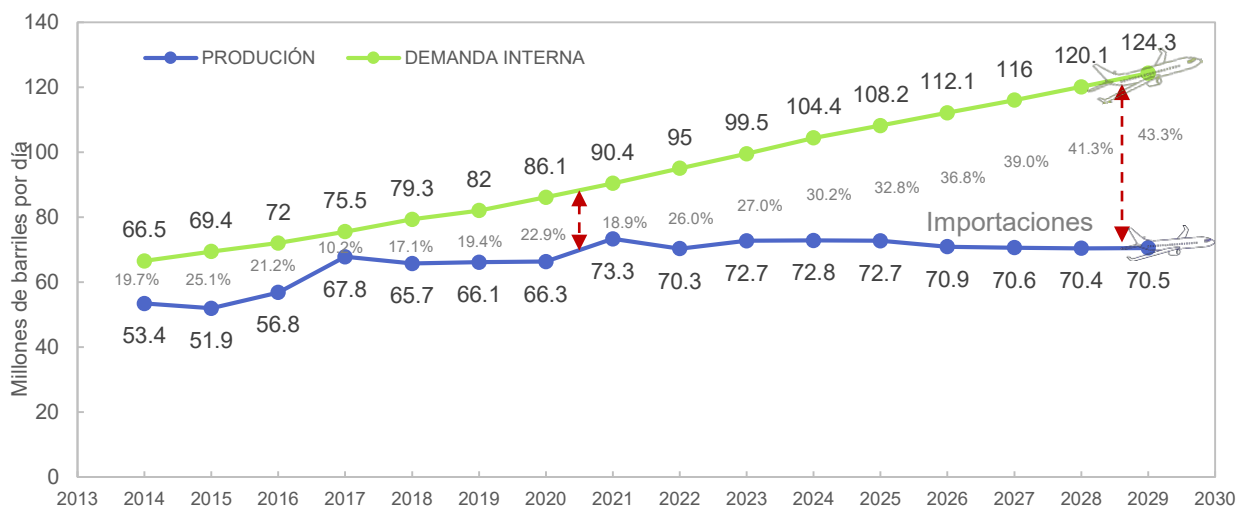
FUENTE: (SENER, 2015)

En un futuro, siguiendo con la tendencia actual, se estima que la producción de turbosina tendrá una tasa de crecimiento media anual de 1.9% para el periodo 2014-2029, mientras que la tasa de crecimiento promedio de la demanda interna de turbosina será de 4.3%, asociada a la recuperación de la actividad económica y su impacto en el tráfico de pasajeros y de carga, así como de la ejecución de proyectos. Lo anterior traerá como consecuencia recurrir a importaciones para satisfacer la demanda interna, las cuales se estiman que serán de 53.9 mbd (miles

de barriles al día), lo cual representa un aumento de 42.1 mbd en relación al 2014 (ver figura 16).

Estimaciones, pronostican que en 2015 se pudo haber registrado el nivel más bajo de producción con 51.9 mbd, mientras que el máximo podría ocurrir en 2021 con 73.3 mbd. En el último año del periodo se presentará la brecha más amplia entre la producción de este combustible en comparación con la demanda del mismo, lo que se reflejará en un incremento en las importaciones. La reducción en la producción de turbosina se asociará al incremento en la producción de destilados intermedios (gasolinas y diesel de Ultra Bajo Azufre (UBA)) por parte de PEMEX.

**Figura 17. Balance de turbosina, 2014-2029**



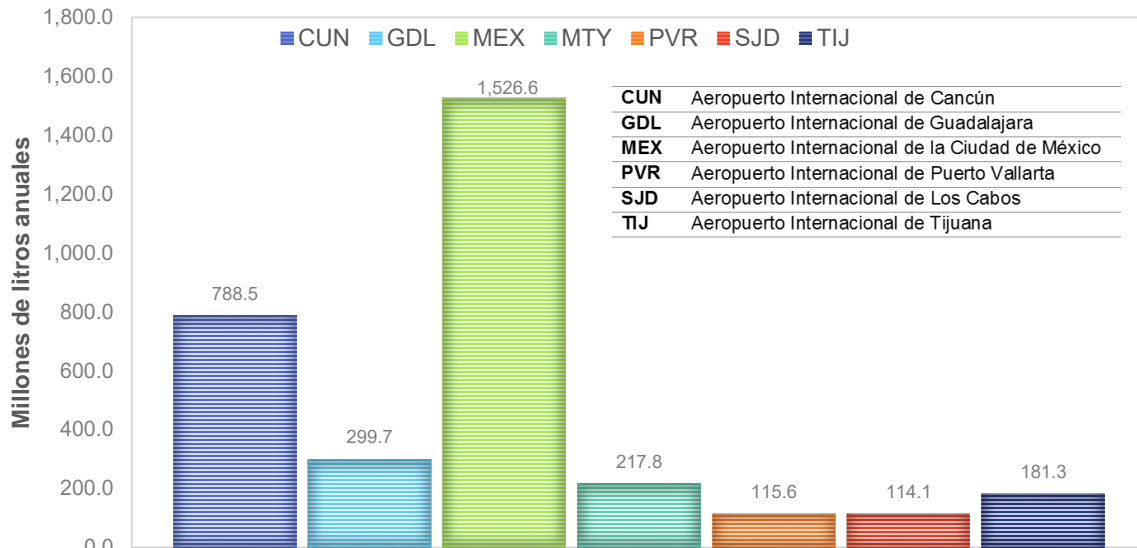
FUENTE: (SENER, 2015)

México se caracteriza por ser un país petrolero, sin embargo eso no lo exenta de recurrir a la importación de combustibles para satisfacer la demanda nacional. La principal vía para la obtención de turbosina es la producción nacional.

La turbosina representa uno de los costos principales de las aerolíneas y podría representar hasta una tercera parte de sus gastos de operación. Algunas aerolíneas pueden cubrirlo, pero por la misma naturaleza de la variación de la turbosina, debido a la volatilidad del precio del petróleo, muchas lo dejan como cobertura normal para que se vea representado en el mercado y no como un precio fijo (Cantera, 2014).

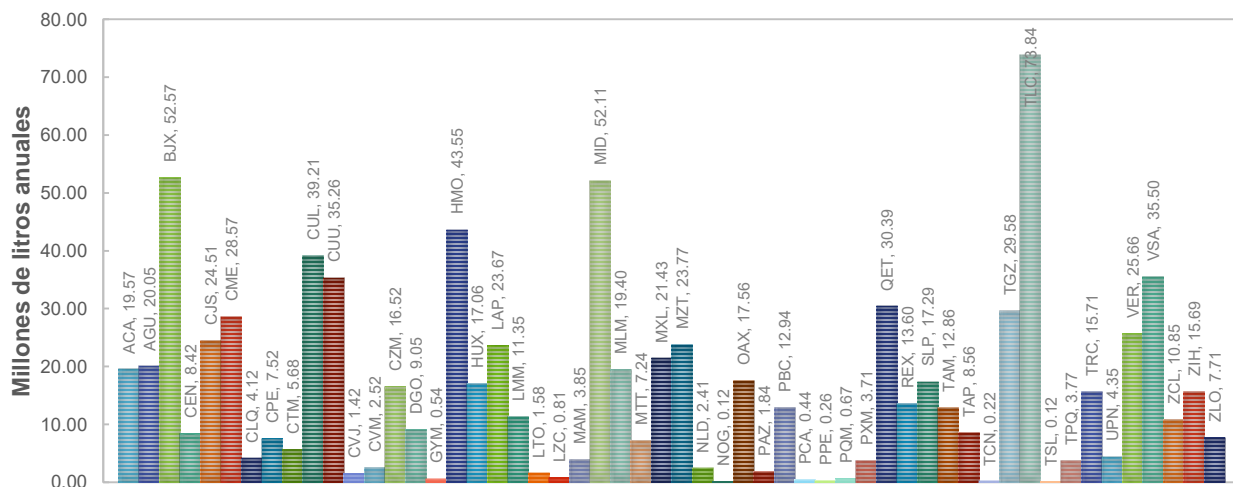


**Figura 19.** Aeropuertos de México con mayor demanda de Turbosina (mayor a los 100 millones de litros anuales, 2015)



FUENTE: ASA, 2015

**Figura 20.** Demanda de turbosina de la Red Aeroportuaria en México (menor a los 80 millones de litros anuales, 2015)



FUENTE: ASA, 2015. Ver nombres completos de Red Mexicana Aeroportuaria en [Anexo A](#)

El control del suministro de combustible que tiene ASA en la red aeroportuaria de México, se espera que termine en los próximos años con la llegada de compañías extranjeras y la creación de empresas nacionales que participen en la producción y distribución de combustibles.



Con lo anterior se da la oportunidad de apertura a nuevos competidores que bien podrán permitir un mercado más competitivo ofreciendo mejores tarifas y calidad a sus clientes. El generar competencia es uno de los mecanismos naturales para incentivar a la economía nacional y dar a los usuarios menores precios en los transportes o viajes realizados.

## 7. Biocombustibles para la aviación

Los medios de transporte aéreos como los helicópteros, avionetas y aviones no utilizan gasolina o gasóleo diésel, utilizan un combustible llamado turbosina (JET A-1) o gasavión, según sea el caso.

El JET A-1 se obtiene por destilación del petróleo y tiene un color transparente con un ligero tono amarillento, además, posee una densidad intermedia entre la gasolina y el gasóleo. Es un tipo de queroseno que procede de la destilación del crudo del petróleo que sólo se utiliza en aeronaves propulsadas por motores de turbina. Su función principal es suministrar potencia al avión, por eso la importancia de su alto contenido energético y su calidad de combustión debe ser alta y cumplir con las expectativas (Codisoil, s.f.).

La industria de la aviación se ha marcado como objetivo para 2050 reducir a la mitad sus emisiones de CO<sub>2</sub>, que hoy suponen corresponden al 2% del total de las emisiones globales. Para alcanzar dicho objetivo, los biocombustibles van a jugar un papel importante.

El uso de combustibles renovables en la industria de la aviación generará beneficios para el medio ambiente, ya que su ciclo de vida muestra que los combustibles elaborados por ejemplo con camelina, jatropha y algas pueden ofrecer una reducción de casi el 80% en las emisiones netas de carbono en comparación con los combustibles de petróleo (ASA, Aeropuertos y Servicios Auxiliares, 2015).

Los biocombustibles utilizados actualmente por la aviación civil, también conocidos como biojet, se producen a partir de materias primas renovables; y al igual que los combustibles fósiles deben cumplir con los estándares de calidad de



la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) (ASA, Aeropuertos y Servicios Auxiliares, Bioturbosina, 2015).

### 7.1. Tecnologías para la producción de biocombustible de aviación

Se denomina bioturbosina o biojet, de acuerdo a la normatividad vigente, a una mezcla de bio keroseno parafínico sintetizado (bio-SPK por sus siglas en inglés) y turbosina de origen fósil. El bio kps es un combustible de origen renovable. Actualmente, existen diferentes procesos para producirlo (Ver Figura 21) a través de diversas materias primas, pero hasta el momento sólo cinco de ellos están certificados bajo la norma ASTM D7566, "*Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons*", para su uso en la aviación civil, por lo que diversas aerolíneas alrededor del mundo ya los están utilizando en vuelos comerciales en mezclas máximas de hasta un 50% en volumen, es decir 50% del combustible renovable y 50% combustible fósil, debido a que en la norma, mencionada anteriormente, no existe una especificación que permita el uso de este combustible puro, sólo en mezclas. Las cinco vías de producción se encuentran descritas en los anexos de dicha norma (ASTM International, s.f.):

- a. *Fischer-Tropsch Hydroprocessed Synthesized Paraffinic Kerosine*, el proceso consiste en la gasificación de biomasa, madera y residuos sólidos, convirtiéndola en un combustible líquido (Biomass-To-Liquids, BTL), el keroseno resultante se conoce como FT-kps (SPK, por sus siglas en inglés).
- b. *Fischer-Tropsch Synthetic Kerosine with Aromatics*, el proceso es el mismo al empleado en FT-SPK, pero lo que lo hace diferente es que se le añade una mezcla de aromáticos, principalmente bencenos alquilados, derivados del procesamiento del alquitrán de hulla<sup>9</sup>.
- c. *Synthesized Paraffinic Kerosine from Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA)*, utiliza como materia prima aceites vegetales de plantas como la

---

<sup>9</sup> Se obtiene de un proceso de calentamiento de carbón bituminoso, obtenido de dicho proceso CO<sub>2</sub>, amoníaco, GLP y alquitrán de hulla, el alquitrán de hulla es una mezcla de hidrocarburos aromáticos, bases nitrogenadas y fenoles.



jatropha, camelina, algunas halófitas y algas, así como grasas animales (ASA A. , Bioturbosina, 2015), el keroseno resultante se denomina bio keroseno parafínico sintetizado, bio kps (bio-SPK por sus siglas en inglés).

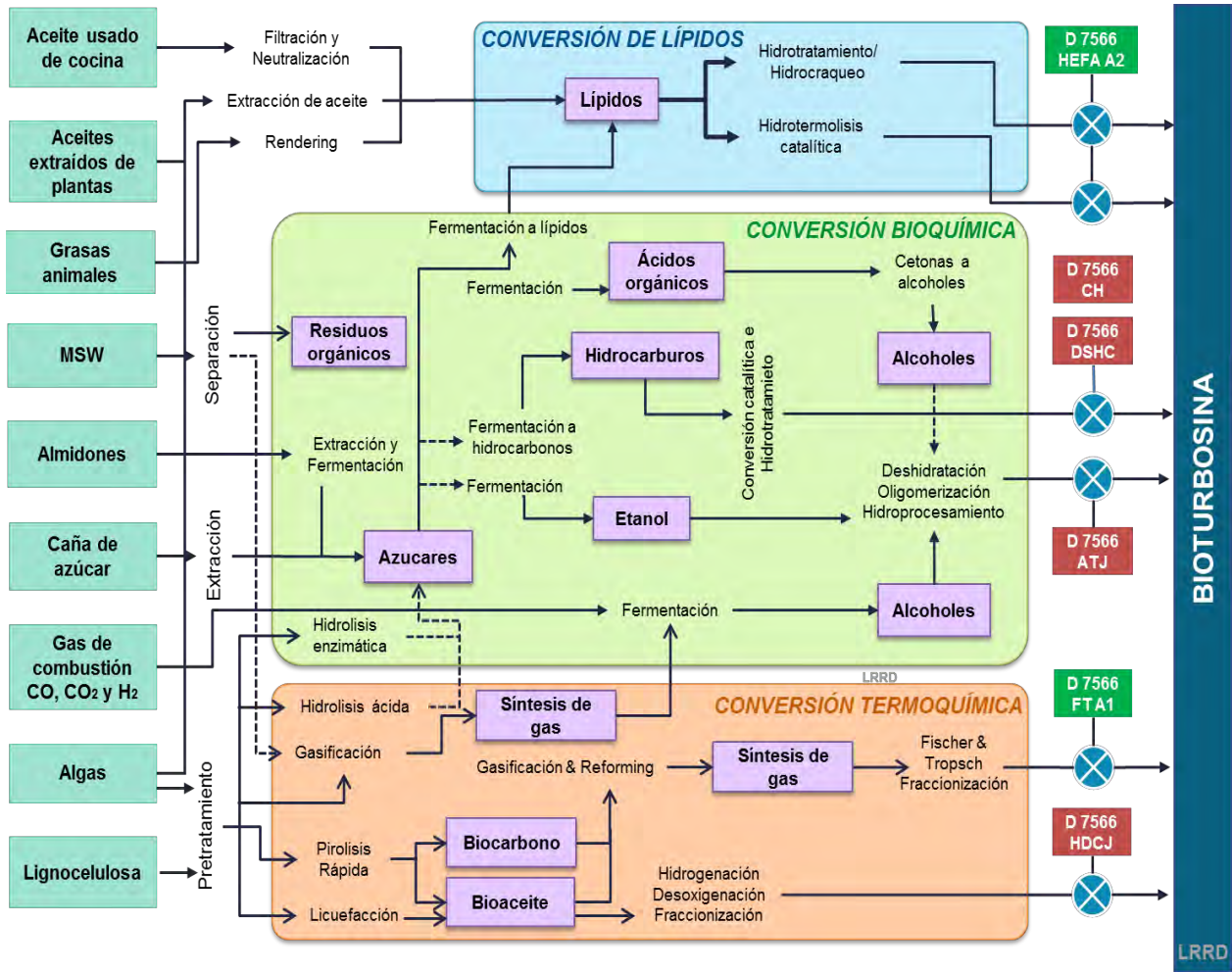
**d. *Synthesized Iso-Paraffins from Hydroprocessed Fermented Sugars***, se lleva a cabo mediante la conversión directa de azúcares fermentados hidroprocesados a combustibles sintéticos, el resultado del combustible se denomina como SIP (siglas en inglés de Iso-Parafinas Sintéticas).

**e. *Alcohol to Jet Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK)***, dicho combustible es generado a partir de isobutanol, un alcohol obtenido a partir de fuentes renovables como el azúcar de caña, maíz o desechos forestales; el keroseno resultante se denomina ATJ-SPK.

Se espera que en los próximos años haya más anexos en la ASTM D7566 para nuevos tipos de turbosina renovable e incluso exista la posibilidad de uso de estos biocombustibles sin necesidad de mezclarlos con combustibles fósiles, es decir, utilizarlos puros.

La norma ASTM D7566 establece los límites de mezclado para cada uno de los combustibles sintéticos obtenidos de los procesos anteriormente mencionados, esto debido a su naturaleza, por lo que el límite de mezcla del 50% sólo es aplicable para HEFA-SPK y FT-SPK; y para SIP y ATJ el límite máximo de mezcla es del 10% y 30% en volumen respectivamente.

Figura 21. Procesos de producción sustentable de bioturbosina



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE (IATA, 2013)

### 7.1.1. Tecnologías comerciales actuales para la producción de biocombustible de aviación por hidroprocesamiento de aceites

Las aerolíneas están buscando maneras de poder independizarse del uso de la turbosina convencional y el uso de biocombustible para la aviación se está considerado como la mejor opción alternativa. Uno de los candidatos más prometedores de combustible alternativo para la aviación es el biokeroseno parafínico sintetizado (bio-SPK por sus siglas en inglés), pues permitiría que esta industria se desarrolle sustentablemente. El presente trabajo de tesis es una investigación sobre el bio kps producido utilizando materias primas de segunda generación.



Este combustible alternativo se produce a partir de un hidropocesamiento y se conoce como *Hydroprocessed Renewable Jet-fuel* (HRJ) (EQ<sup>2</sup>insight, 2010), o bien, como la ASTM lo ha descrito en la norma ASTM D7566, *Synthesized Paraffinic Kerosine from Hidroprocessed Esters and Fatty Acids* (HEFA-SPK). Actualmente este bioenergético es el más usado por la industria aeronáutica ya que ha mostrado niveles de rendimiento muy similares a los de la turbosina convencional (EBTP, s.f.).

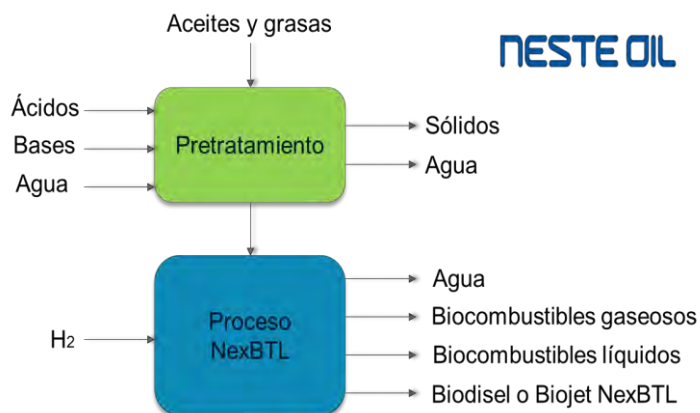
Actualmente sólo dos empresas en el mundo cuentan con una tecnología apta para la producción de biocombustible de aviación por el proceso HEFA-SPK, dichas empresas son *UOP-Honeywell* con su proceso *Green Jet Fuel™*; la otra empresa es Neste Oil, que aunque su planta está diseñada originalmente para la producción biodiesel puede también usarse para la producción de combustible renovable para la aviación.

### **UOP Honeywell**

UOP Honeywell, (*Universal Oil Products Company*) con sus 90 años de experiencia en tecnología de refinación ofrece un proceso alternativo para producir combustibles alternativos para la aviación. El proceso *UOP/ENI Ecofining* ha sido diseñado para convertir aceites naturales no comestibles de segunda generación a diesel y queroseno verde, que puedan ser utilizados en cualquier porcentaje en los tanques de combustible existentes. El proceso *UOP/Eni Ecofining* se basa en el hidrotreatmento de los triglicéridos junto con los ácidos grasos libres, lo que resulta en la desoxigenación a través de hidrodeshoxigenación y descarboxilación (ver Figura 22). Después de la etapa de hidrotreatmento, se realiza un procedimiento de isomerización para producir un combustible diesel y queroseno verdes para obtener un combustible con buenas propiedades de flujo en frío.



**Figura 23.** Producción de biocombustibles con tecnología de Neste Oil



FUENTE: (Bezergianni S. , 2013)

## 7.2. Técnicas de certificación de biocombustible de aviación

### 7.2.1. ASTM International

La *ASTM International* es una organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios (ASTM International, s.f.).

Para la certificación del combustible destinado a la aviación es común que se recurra a la especificación ASTM D1655 en primera instancia. Esta especificación, se titula "*Standard Specification for Aviation Turbine Fuel*", la cual define los tipos de combustible para turbinas de aviación de uso civil, Jet A y Jet A-1. Esta especificación puede ser utilizada como un estándar en la descripción de la calidad de los combustibles para turbina de avión desde su producción hasta el suministro en la aeronave.

En 2009, *ASTM International* aprobó una especificación que contempla y describe el combustible para aviones derivado del carbón, gas y celulosa. La especificación, *ASTM D7566*, que se titula "*Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons*", y se utiliza el nombre de keroseno parafínico sintetizado para describir al combustible obtenido a partir de materias primas renovables. Cabe destacar que esta norma está estrechamente vinculada a la especificación mencionada anteriormente, ASTM D1655 (Ver [Anexo B](#)).



En 2011, la especificación ASTM D7566 se amplió para incluir componentes de combustible jet derivados de aceites vegetales y grasas hidroprocesadas. Las mezclas descritas en la ASTM D7566 también han sido aprobadas en DefStan 91-91<sup>10</sup>, aunque únicamente para los procesos HEFA-SPK y FT-SPK. En la norma ASTM D7566 no existe una restricción que permita el uso de bio kps /iso-kps puro, pero sí el que su uso se realice en mezcla de hasta un 50% para HEFA-SPK y FT-SPK; y de un 10% y 30% para SIP y ATJ respectivamente, en volumen con combustible de aviación de origen fósil. Cabe señalar que la norma ASTM D1655 menciona que la empresa SASOL (en Sudáfrica) produce turbosina totalmente sintética mediante el proceso de Fischer-Tropsch, utilizando carbón mineral como su materia prima (IATA, 2012).

#### 7.2.2. UKM of Defence (MoD) Defence Standard (DefStan) 91-91

**Defence Standard 91-91** es el estándar del combustible para turbinas de aviación en la Unión Europea, en donde la Autoridad de Aviación Civil del Reino Unido (CAA) ha acordado estar bajo la autoridad técnica de **Fuels and Gases Safety Regulator (Scientist)** (Ministry of Defence, 2011).

Esta norma establece los requisitos del combustible para la turbinas de aviación, tipo queroseno (Jet A-1). La cual ha sido elaborada en nombre del **Ministry of Defence** (MoD) por el Comité de Combustibles de Aviación del Reino Unido (AFC por sus siglas en inglés), bajo el gobierno de **Military Aviation Authority (MAA) Fuels, Lubricants and Gases Airworthiness Advisory Group (FLAAG)**.

De acuerdo a la especificación de DefStan 91-91, el Jet A-1 es muy similar al definido por la norma ASTM D1655 a excepción de dos pequeñas variaciones en los límites de la prueba, respecto al nivel de acidez y al parámetro relacionado con el contenido de naftaleno, pero fuera de eso son esencialmente idénticas.

DefStan 91-91 permite que los combustibles de aviación se puedan mezclar con componentes sintéticos derivados de fuentes no obtenidas del petróleo, dependiendo del proceso inicial de la materia prima y del proceso de producción

---

<sup>10</sup> *Ministry of Defence; Defence Standard 91-91*





de este mismo. DefStan 91-91 cita específicamente la norma ASTM D7566 como la referencia para la turbosina sintética.

Lo que hace diferente a esta norma de la ASTM D7566, es que DefStan 91-91 tiene los requisitos de trazabilidad del biocombustible que la ASTM D7566 no contiene. Estos requisitos se hacen mencionar en el Anexo J "*Certificación del Producto y Trazabilidad*" de esta norma, en la cual se define la trazabilidad y la documentación requerida que es una parte esencial del proceso (Refinería Certificado de Calidad (RCQ), Certificados de Análisis (CoA), Certificado de exención (RC) y Prueba de Recertificación (RTC)). Este anexo tiene la función de asegurar la calidad del combustible basándose en la certificación desde el proceso de fabricación así como de los procedimientos para verificar que la calidad del combustible de aviación se mantenga dentro de los límites especificados y además no debe de presentar cambios significativos durante la distribución y la entrega a las aeronaves (IATA, 2012).

### 7.2.3. Joint Inspection Group (JIG) fuel quality requirements

*Joint Inspection Group* (JIG) es el principal foro de reconocimiento internacional donde expertos en todos los aspectos de la industria de suministro de combustible de aviación se concentran para establecer y mejorar las normas para el manejo y control de calidad de combustibles de aviación a nivel mundial, y que esas normas sean reconocidas y aprobadas por todas las partes con intereses en esta industria.

JIG publicó "*Aviation Fuel Quality Requirements for Jointly Operated Systems (AFQRJOS, or "joint checklist" – international)*", que además tiene acuerdos con: BP, Chevron, ENI, ExxonMobil, Kuwait Petroleum, Shell, Statoil y Total.

En esta norma, al igual que con DefStan 91-91, los componentes sintéticos son permitidos, pero estos se comunicarán en forma de porcentaje en volumen del total de combustible por lote. En la lista de verificación se encarnan los requerimientos más exigentes de DefStan 91-91 así como los de la norma ASTM D1655.





### 7.3. Potencial de mercado de biocombustible de aviación

Actualmente no existe una significativa participación de los biocombustibles de aviación en un mercado consolidado. El desarrollo de este mercado está en una etapa temprana, aunque con una gran gama de proveedores tratando de intensificarlo desde nivel laboratorio hasta demostraciones a escala piloto, hasta lograr llevarlo a la producción a nivel comercial (Sustainable Aviation, 2013).

Pocos son los proveedores que están empezando a producir y vender biocombustibles a las líneas aéreas, pero hasta ahora sólo para proyectos principalmente de demostración. La diferencia con los precios del combustible convencional para la aviación y la falta de mecanismos de incentivos adecuados, son unos de los factores limitantes con mayor impacto para consolidar una demanda de biocombustibles sustentables para la aviación. Al no existir una importante demanda de biocombustible sustentable para la aviación alrededor del mundo, debido a la baja producción y además sumándole sus altos costos de inversión lo hacen aún menos viable para el uso comercial, y como consecuencia la introducción al mercado es limitada. El mercado de este tipo de biocombustible es aún subdesarrollado y poco atractivo (Köhler, Lead Markets in Aviation Biofuels, 2013).

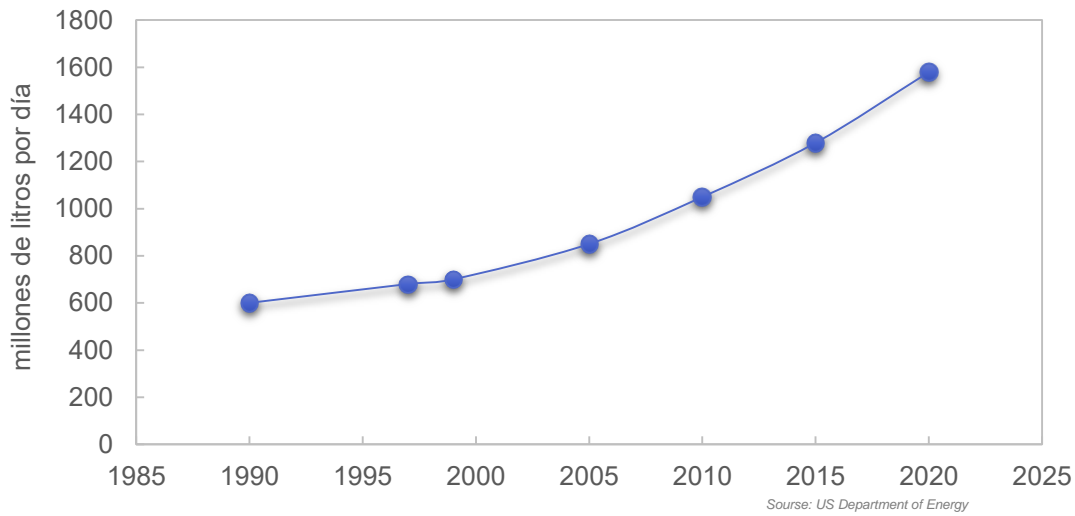
La posibilidad de ampliar nuevas tecnologías (las restricciones tecnológicas en combustibles de aviación) y la disponibilidad del suministro de combustible siguen siendo uno de los factores más desafiantes, así como la necesidad de una inversión significativa, representan una de las barreras principales para el progreso y el establecimiento de un mercado de combustible alternativo para la aviación (Sustainable Aviation, 2013).

#### 7.3.1. Estructura de Mercado y Cadena de suministro

Con la globalización y una economía mundial siempre creciendo a pesar de las crisis que han afectado a varias partes del mundo, el consumo de combustible de aviación está creciendo cada vez más (ver Figuras 24 y 25). El sector de la aviación transporta al año 2,200 millones de pasajeros en todo el planeta y es un

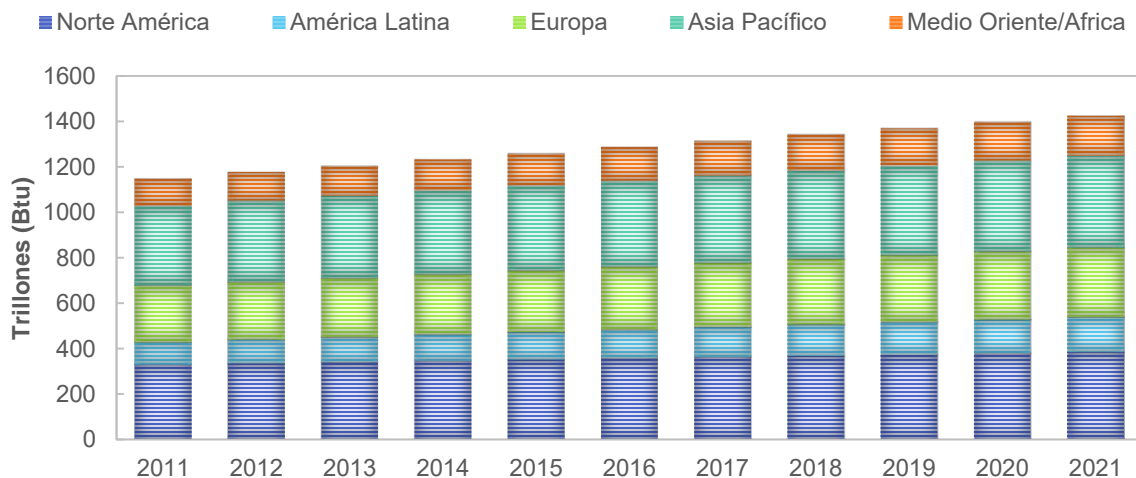
elemento esencial en una sociedad globalizada. Según las estimaciones de *la International Air Transport Association* (IATA), en 2050 los pasajeros serán ya 16,000 millones. El crecimiento constante del tráfico plantea a la industria de la aviación comercial el reto simultáneo de atender esta demanda y reducir las emisiones que generará (Ascher, 2012).

**Figura 24.** Consumo mundial de combustible en la aeronáutica en los años 1990-2020



FUENTE: (Ascher, 2012)

**Figura 25.** Demanda mundial de combustible en la aeronáutica, Mercado mundial: 2011-2021



FUENTE: (Lawrence, 2011)

Por esta razón, el uso de biocombustibles en el sector de la aviación tiene un gran potencial para reducir sus emisiones de gases contaminantes sin embargo sus

actuales precios son relativamente altos en comparación con el combustible convencional a base de petróleo, provocando que las compañías aéreas no puedan considerar comprar grandes cantidades de este biocombustible (SQ Consulte, s.f.).

El sector de aviación apuesta a que el precio del biocombustible para la aviación podrá ser competitivo gracias al aumento de la producción y comercialización de los biocombustibles y a futuros incentivos económicos similares al de otros biocombustibles. El continuo crecimiento del tráfico aéreo, con el consecuente incremento de emisiones de gases de efecto invernadero, ha llevado al sector de la aviación a definir los objetivos de sustitución en 1% del total del combustible empleado por las compañías aéreas en todo el mundo en 2015, pasando por el 10% en 2017 llegando al 15 % en 2020 (Ascher, 2012)

En la aviación, cuando se trata de alternativas a los combustibles de origen fósil, han estado apuntando fuertemente hacia los biocombustibles avanzados sustentables, es decir, un combustible derivado de diversas materias primas como las algas, semillas oleaginosas no alimenticias, y de residuos urbanos. Los biocombustibles de aviación mantienen una promesa significativa, pero aún no se producen comercialmente en un volumen significativo y además con un precio competitivo para compensar el uso de combustible para aviones a base de petróleo. Hasta la fecha, su uso se ha limitado a vuelos de prueba y comerciales utilizando mezclas entre biocombustible sustentable y combustible convencional (Lawrence, 2011).

Con el fin de describir la estructura del mercado, la individuación de los mecanismos socioeconómicos, tecnológicos y financieros pueden apoyar u obstaculizar la aplicación de estos combustibles para la aviación fundamentalmente. En particular, la Figura 26 proporciona una visión general de los actores involucrados en la cadena de combustible renovable para la aviación y su influencia en el desarrollo de un mercado. Según el modelo de Porter, las diferentes fuerzas pueden desempeñar un papel importante: proveedores, usuarios finales (demanda), políticas/marco reglamentario, los competidores, la

actividad de investigación y desarrollo, los proveedores de servicios financieros y de productos sustitutos.

**Figura 26.** Estructura del mercado de biocombustible para la aviación



FUENTE: (ITAKA, 2014)

Por el momento, el mercado es relativamente nuevo y el principal competidor actualmente está representado por la turbosina convencional (Jet A-1). En el futuro los nuevos competidores podrían entrar en el mercado desafiando una nueva fijación de precios, tecnología, nivel de innovación y calidad, aumentando la capacidad del mercado. Así mismo, el futuro de los biocombustibles para la aviación aún no es muy claro. La principal barrera está representada por el costo de introducción al mercado, a causa de las altas inversiones tecnológicas necesarias. Sin embargo, la posibilidad de entrar en el mercado con una escala relativamente pequeña podría representar una gran oportunidad (Osseweijer, 2013).

La estructura del mercado y la cadena de suministro se describen como actores que deben interactuar entre sí. Sin embargo, en la mayoría de los casos ya existen diferentes partes de la cadena de suministro, pero aún no está conectada entre sí con una estructura sólida de mercado (Osseweijer, 2013).

**Figura 27.** Desarrollo de mercado a lo largo de la cadena de suministro del biocombustible para la aviación

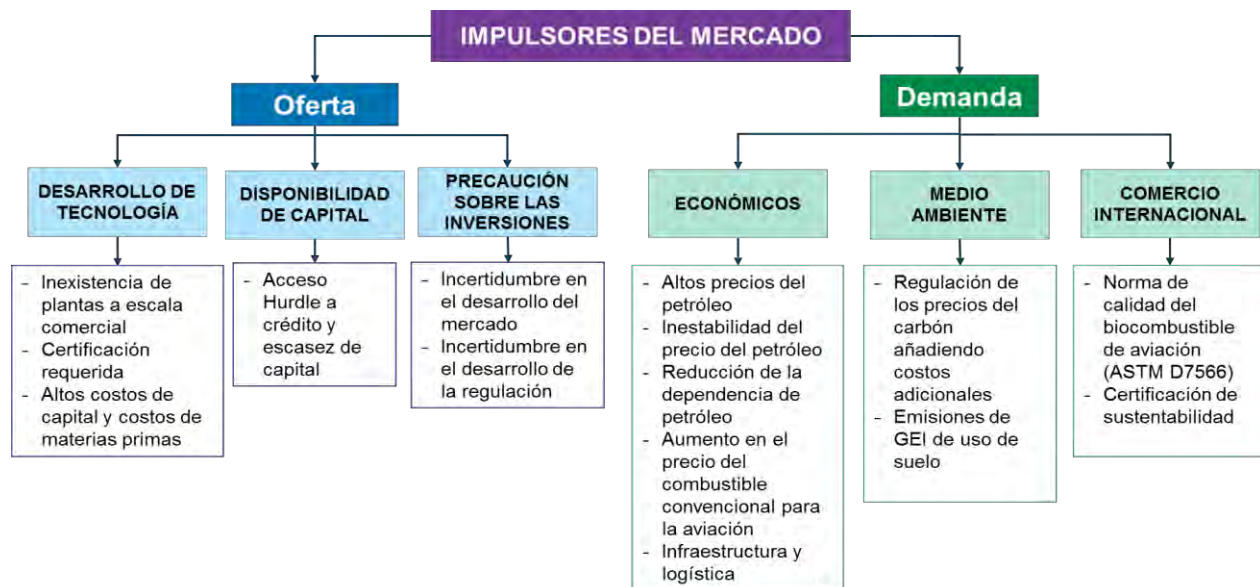


FUENTE: (Sustainable Aviation, 2013)

### 7.3.2. Impulsores del Mercado

La velocidad a la que los combustibles de aviación sustentables se introducen en un mercado amplio y consolidado dependerán de una serie de factores, tales como la oferta y la demanda, ambos conceptos son los dos principales actores y consolidadores de un mercado, así también como las diferentes ponderaciones de cada país.

**Figura 28.** Impulsores del mercado de biocombustibles de la aviación



FUENTE: (Qantas, 2013)

La introducción en el mercado de los biocombustibles para la aviación dependerá en gran medida de su desempeño técnico y ambiental, así como de la provisión



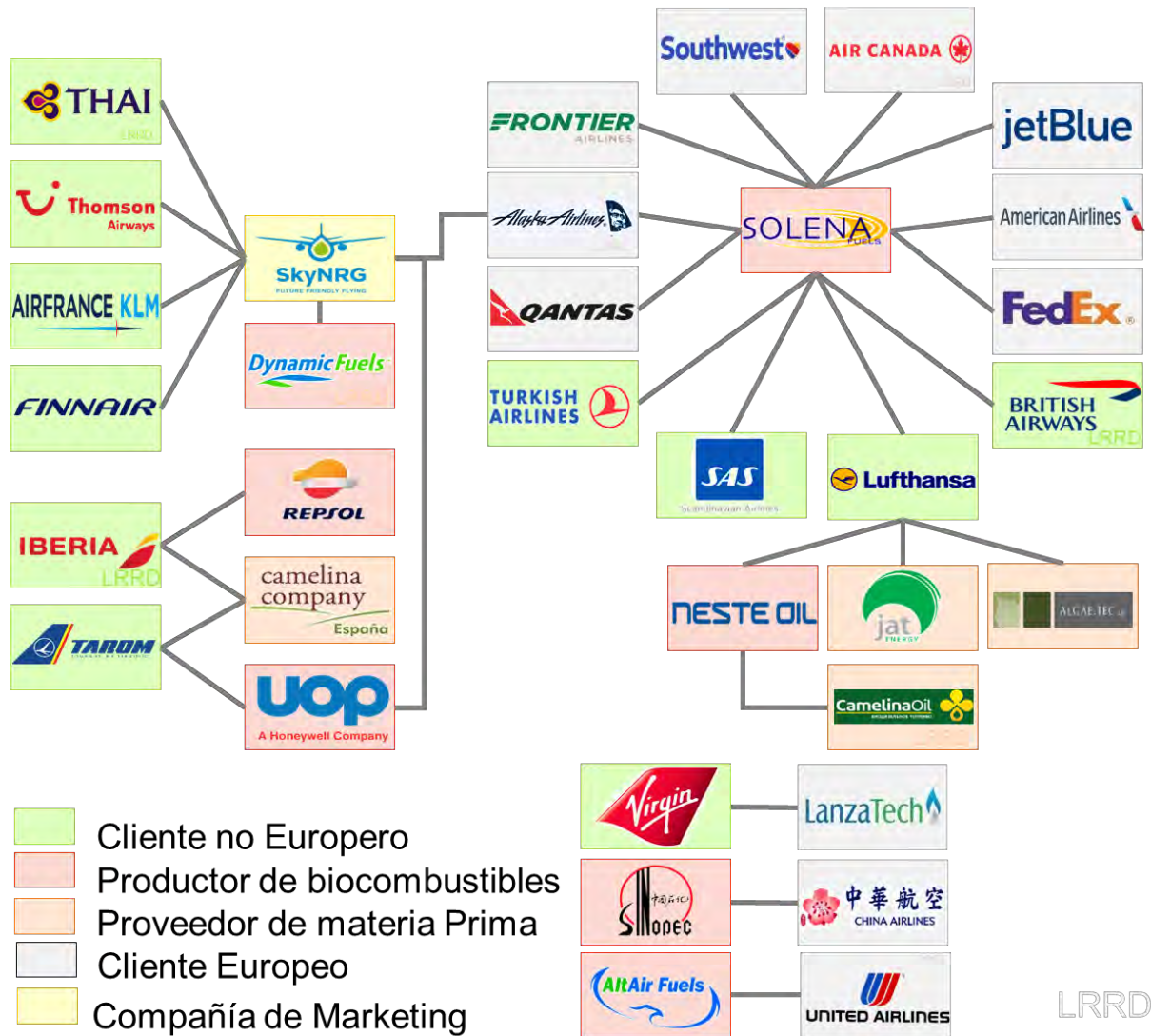
de las condiciones del mercado, confianza digna a largo plazo, coherente y estable (ITAKA, 2014).

Por el lado de la oferta, no hay hasta ahora ningún mercado. Las plantas piloto e investigaciones tecnológicas están siendo desarrolladas por una variedad de actores. Las compañías petroleras están activamente involucradas en el desarrollo de la tecnología y al no tener una posición dominante en cuanto a patentes, dan oportunidad a nuevas empresas especializadas para que desarrollen un papel importante en el desarrollo de biocombustibles. La Figura 29 muestra que hay algunos principales productores de biocombustible para aviación, como son **Honeywell UOP** (USA), **LanzaTech** (Nueva Zelanda), **Sinopec** (China), **Neste Oil** (Finlandia), **Dynamic Fuels** (EE.UU.), **Repsol / Algaenergy** (España), **Altair** (USA), **Fuels Solena** (USA); **SkyNRG** (Países Bajos) es la compañía de marketing que ha comprado los combustibles de **Dynamic Fuels** y **UOP**; **Airbus y Boeing** son los principales fabricantes de aviones (ITAKA, 2014).

El costo de entrada en el mercado no puede considerarse directamente, hay un costo relativamente alto de la participación en un mercado futuro, porque la tecnología está en fase de demostración a pequeña escala y requerirá grandes inversiones para ampliarla. Thedieck informa que la estimación de las inversiones para las instalaciones e infraestructura necesarias para producir biocombustibles va desde aproximadamente 160 hasta 700 millones de euros. La participación de la aviación en estos costos varía entre 30 y 180 millones de euros. Dado que el proceso de producción y el producto es nuevo, y no hay un **lock-in** respecto a las tecnologías actuales por el lado de la oferta (Köhler, 2013).

Por el lado de la demanda, hay una fuerte concentración en las aerolíneas. Los aeropuertos pueden tener un monopolio regional, pero existe competencia entre los importantes centros internacionales, al menos en la Unión Europea. Pero este no es el caso para Brasil y China, quienes no tienen una fuerte competencia entre los centros internacionales (Köhler, 2013).

**Figura 29.** Acuerdos más relevantes entre las principales compañías-constructores-clientes involucrados en sector de biocombustibles para la aviación



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE (Köhler, 2013)



## Capítulo 3 . Propuesta conceptual de Proyecto para la construcción de una Biorrefinería en México

### I. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

#### 1. Materia prima

Debido a la importancia del volumen de producción, el potencial de expansión de los cultivos, y a la disponibilidad de tecnologías probadas comercialmente en otros países, las materias primas que se identifican aptas para la producción de biocombustible de aviación mediante la tecnología HEFA son:



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

#### **Jatropha o piñón mexicano (*Jatropha curcas* L.)**

Si bien la planta de *Jatropha* es originaria de México y Centroamérica, es una oleaginosa no comestible que crece en climas cálidos. Se caracteriza por





adaptarse a suelos áridos y/o degradados por actividades agrícolas e industriales, y vive entre 40 y 50 años.

En la República Mexicana se encuentra distribuida en los estados de Chiapas, Durango, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luis Potosí, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz, Yucatán, Zacatecas y el estado de México (Sánchez, 2008).

*Jatropha curcas*, posee potencial considerable para el establecimiento de energía alternativa y contrarrestar la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Estas características, y su versatilidad imprimen importancia a esta especie para el desarrollo del país (Espinoza V. M., 2010). La planta *Jatropha* no es un árbol milagroso para la producción de bioenergéticos, sin embargo, el cultivo de ella puede ser una opción muy viable en la producción de biodiesel y/o bio kps al no interferir con la producción de productos básicos. Por consiguiente no afecta al banco mundial de alimentos.

Para la producción de semilla de *Jatropha*, es conveniente que se lleve a cabo por cooperativas dentro de las comunidades ejidales. Esto les generará beneficios económicos, principalmente a aquellas que se encuentran rezagadas por falta de tierras fértiles para productos alimenticios.

### **Higuerilla**

La higuerilla (*Ricinus comunis*) es una planta oleaginosa cuyo aceite se utiliza para la producción de biocombustible. Esta planta es típica de regiones semiáridas y además cuenta con una gran capacidad de adaptación (Anónimo, 2013).

Esta planta tiene una gran adaptación en casi todo el territorio mexicano, pero hasta ahora nunca se había cultivado en grandes extensiones. Se trata de una planta anual, que tiene un ciclo vegetativo de 4 a 5 meses, pero que puede llegar

a producir por dos o tres años, como un cultivo semiperenne<sup>11</sup>. De la higuera, se extrae el aceite de ricino o aceite castor (Sepúlveda, 2012).

Su producción en el país es muy reciente, por lo que no se conoce con exactitud el rendimiento promedio por hectárea, por ejemplo en la India, éstos varían de 1.3 a 3.6 toneladas por hectárea y en Brasil de 1 a 4 toneladas por hectárea de semilla (Cárdenas, 2010). Sus rendimientos en aceite varían de 45 a 50% (Sepúlveda, 2012).

En México el potencial productivo de la Higuera es alto ya que se pueden utilizar tierras ociosas por falta de agua o en tierra semiárida que no es utilizada para producir productos alimenticios.

### **Salicornia**

Salicornia es un género botánico de plantas suculentas, halófitas que crecen en saladares, en playas, en manglares. Las especies de Salicornia son nativas de Estados Unidos y de Europa. (Falasca, 2013)

Entre las especies de salicornia destaca una en específico, *Salicornia bigelovii* la cual se ha propuesto como un sistema modelo para suelos salinos, donde la agricultura convencional no se puede desarrollar adecuadamente, por lo que es de interés estudiarla y desarrollarla como cultivo con perspectivas de explotación comercial. En estados como Baja California y Sonora tiene una amplia distribución a lo largo de sus costas, presentándose mediante una gama de ecotipos con variación fenotípica y un clima adecuado para su desarrollo (Falasca, 2013).

El aceite que se obtiene de la salicornia puede ser usado para producir combustible, por ejemplo sirve para generar combustible similar a la turbosina usada en los aviones; sin embargo es 80% más limpio por lo que es una fuente de energía renovable importante para minimizar las emisiones de dióxido de carbono en la industria aeronáutica. El aceite de salicornia es uno de los casos de energía sustentable ya que utiliza los espacios desérticos y agua de mar para su

---

<sup>11</sup> Dicho de un vegetal, que pierde parcialmente el follaje. Se aplica también a la hoja. Viene a ser equivalente a semicaduco.



cultivo por lo que no causa impacto en la agricultura alimentaria al no quitar el factor de producción tierra a insumos destinados a la alimentación (Sepúlveda, 2012). Entre los beneficios adicionales que representa la salicornia en México está el uso del agua residual de las granjas camaroneras en la irrigación de los plantíos de esta halófito, así como la recuperación de áreas abandonadas por la agricultura tradicional como consecuencia de la salinidad de origen antrópico, principalmente en las zonas costeras (Falasca, 2013).

### 💧 **Camelina (Camelina sativa)**

Es una especie de planta herbácea nativa de Europa del Norte y Asia Central, pero se ha introducido en América del Norte. Es una planta anual con gran resistencia a sequía y heladas.

La camelina es un cultivo alternativo prometedor sustentable de energía. Esta planta tiene varias características agronómicas favorables lo cual le da un alto potencial para mejorar significativamente la producción de biocombustibles domésticos. Por su alto contenido de aceite en sus semillas, así como su alto rendimiento de aceite por hectárea, la camelina se puede procesar de manera eficiente para la obtención de combustibles renovables de alta calidad como el biodiesel y eventualmente en bioqueroseno (Moser, s.f.).

### 💧 **Grasas y sebos animales; aceite usado de cocina (AUC)**

Las grasas de animales y aceites comestibles usados, son una fuente importante para la producción de biodiesel, y eventualmente bioturbosina, tal es el caso de algunos países europeos como en España y en América Latina, Brasil. Las grasas son colectadas de los rastros y el aceite usado de las grandes empresas productoras de alimentos (Sepúlveda, 2012).

En México existen instituciones que se dedican de manera formal a la recolección y reciclado de aceite comestible usado para la producción de Biodiesel, tal es el caso de Reoil México<sup>12</sup>, o bien de BioFuels México<sup>13</sup> ya que cumplen con todas las

---

<sup>12</sup> Reoil México, Recolección de RAUC y Producción de Biodiesel: <http://www.reoil.net/rauc.html>

<sup>13</sup> Biofuels de México S.A de C.V: <http://www.recoleccionaceite.com/>



disposiciones legales mexicanas para el manejo adecuado de los residuos de aceite usado de cocina (RAUC). Aunque el objetivo principal de dichas instituciones es la recolección de este aceite para la producción de biodiesel, se puede pensar en también usarlo como una fuente de materia prima para la producción de bioturbosina.

Las fuentes de obtención de AUC pueden provenir de la industria de alimentos, banquetes, comedores industriales, hoteles, restaurantes y en general a toda actividad comercial o productiva que genere residuos de aceite vegetal usado en sus procesos.

### **Microalgas**

Las microalgas son vegetales acuáticos sin raíz, tallos, hojas o flores. Poseen pigmentos fotosintéticos adicionales a la clorofila. Además de que son una fuente alternativa de energía que pueden ser cultivadas en agua salada o en aguas residuales cargadas con nutrientes. Su metabolismo fotosintético es similar al de las plantas, pero lo que las hace aún más interesantes para la generación de biocombustibles, es que tienen un alto contenido de glucolípidos<sup>14</sup>.

Las microalgas son consideradas como los primeros microorganismos fotosintéticos y responsables en gran medida de la atmósfera terrestre. Sin bien existen muchas especies distintas, las de interés, adsorben dióxido de carbono del aire y nutrientes del agua, acumulando en su interior una importante cantidad de aceite y liberando oxígeno a la atmósfera. Su cultivo puede realizarse en **“piletones” o fotobiorreactores en zonas geográficas con escasos recursos naturales**. Una superficie de una hectárea, puede producir el equivalente a 136,900 litros de aceite con microalgas cuya biomasa seca contenga un 70% de aceite (D’Andrea, 2010).

En la siguiente tabla se comparan los diferentes insumos, dichos valores reportados muestran que la jatropha y la higuera presentan ventajas con

---

<sup>14</sup> Los glucolípidos son biomoléculas compuestas por un lípido y un grupo glucídico o hidrato de carbono.



respecto a la salicornia y microalgas, la salicornia a pesar de haber sido utilizada ya como materia prima para la producción de bio kps en Estados Unidos, Australia y en algunos países de Europa, desafortunadamente este insumo no se podría utilizar para la generación de bio kps en México, debido a que es una planta de clima frío.

Por otra parte la generación de aceite utilizando microalgas es muy prometedor sigue en fase experimental, aunque ya se han hecho pruebas a escala piloto, sin embargo con las circunstancias que acongojan actualmente al país no es económicamente viable hacer uso de este insumo.

Con respecto al uso de aceite usado de cocina y grasas animales, pueden ser recolectadas de los rastros y el aceite usado de las grandes empresas productoras de alimentos; por lo que también sería viable utilizar ese insumo para la generación de bio kps.

El cultivo de los insumo de jatropha e higuierilla, reactivará el campo mexicano, haciendo que se reutilicen tierras en desuso que ya no son fértiles para cultivar alimento humano, creando oportunidades de empleo.

Como las materias primas a utilizar es material oleaginoso, la única tecnología certificada por la ASTM Internatinal para la producción de biocombustible de aviación utilizando aceites y/o grasas es ***Synthesized Paraffinic Kerosine from Hidroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA)***. Por tal motivo se ha decidido utilizar esta tecnología para producir combustible alternativo para la aviación en el país; además de que el producto obtenido (bio SPK) ha sido utilizado por diversas Aerolíneas en el mundo, tales como Interjet, Aeroméxico, KML, United Airlines, Air France, Alaska Airlines, Thai Airways, Virgin Atlantic, Air New Zealand, entre otras, realizado diversos vuelos comerciales, pero también en el caso de Estados Unidos, dicho combustible también lo ha utilizado en vuelos militares.

**Tabla 7.** Comparación de insumos para la producción de biocombustible de aviación sustentable en México

Materia prima	Jatropha	Higuerilla	Salicornia	Camelina	Grasas	Microalgas
<b>Experiencia de uso en México</b>	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No
<b>Disponibilidad de materia prima</b>	3.14 millones de ha en México (potencial de producción) (Zamarripa, 2008)	8 millones de ha en México (potencial de producción) (Sepúlveda, 2012)	400ha en Tostiota, Sonora	No existen cultivos en México, pero presenta una gran resistencia a sequías y heladas	Recolección y reciclado de aceite comestible usado (RAUC).	Sigue en fase experimental, pero ya se han hecho pruebas piloto
<b>Rendimiento %o/w/w (contenido de aceite)</b>	35 – 50%	45 - 50%	33 – 42%	25 - 36%	- - - -	40% <i>Chorella</i> 75% <i>Dunaliella</i>
<b>Productividad agrícola</b>	2.2t/ha	2.4 t/ha India: 1.03 t/ha China: 960 kg/ha Brazil: 671 kg/ha	19 t/ha de materia vegetal de los cuales se obtienen 2 t/ha de semillas 1,893 litros de aceite/hectárea	Estados Unidos y Europa 2.7 t/ha 250 litros de aceite/ha	- - - -	136,900 litros/ha
<b>Tecnología para la producción de bio kps</b>	Muy conocida y aplicada	Conocida y poco aplicada	Muy conocida y aplicada	Muy conocida y aplicada	Muy conocida y aplicada	Conocida y poco aplicada

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON FUENTES CONSULTADAS ANTERIORMENTE

**Tabla 8.** Comparación de tecnologías para la producción de biocombustible de aviación sustentable en México

	<b>Tipo de Insumos</b>	<b>Estado actual de tecnología</b>	<b>Costos de insumos</b>	<b>Potencial de Escala</b>
<i>Fischer-Tropsch Hydroprocessed Synthesized Paraffinic Kerosine</i>	Biomasa, residuos de madera y agrícolas residuos sólidos	Probado pero no aplicado comercialmente	Bajo	Muy largo plazo
<i>Fischer-Tropsch Synthesized Kerosine with Aromatics</i>	Biomasa, madera y residuos sólidos + alquitrán de hulla	Probado pero no aplicado comercialmente	Bajo	Muy largo plazo
<i>Synthesized Paraffinic Kerosine from Hydroprocessed Esters and Fatty Acids</i>	<b>Aceites vegetales</b> de plantas como la jatropha, camelina, algunas halófitas y algas, así como grasas animales	Probado y aplicado comercialmente (excepto para el aceite de algas)	Alto para aceites comestibles (1G) Medio para aceites no comestibles (2G) y grasas animales.	Mediano plazo
<i>Synthesized Iso-Paraffins from Hydroprocessed Fermented Sugars</i>	Azúcares, material celulósico	Probado pero no aplicado comercialmente	Mediano	Largo plazo
<i>Alcohol to Jet Synthetic Paraffinic Kerosene</i>	Azúcares y Almidones	Probado y aplicado comercialmente	Mediano	Mediano plazo

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DIVERSAS FUENTES CONSULTADAS ANTERIORMENTE



## 2. Descripción de proceso de producción de biocombustible de aviación

### 2.1. Proceso Químico

La tecnología para producir combustibles verdes o renovables a partir de triglicéridos se ha utilizado en las refinerías de petróleo durante unos 60 años, por ejemplo en el hidrotratamiento de gasóleo, el tipo de catalizador, reactor y equipo de destilación de vacío puede utilizarse eficazmente para el hidrotratamiento de las grasas y aceites vegetales. Como una materia prima renovable alternativa, los triglicéridos presentes en las grasas y los aceites vegetales se pueden hidroprocesar industrialmente en las refinerías de petróleo.

El hidroprocesamiento es una clase importante de procesos catalíticos en un esquema de refinería, el cual es comprendido por un conjunto de reacciones en las que se hace pasar hidrógeno a través de un catalizador bifuncional (metal/ácido). El hidroprocesamiento se utiliza para convertir una variedad de destilados de petróleo en combustible limpio para el transporte y el combustible de calefacción. Las reacciones que se producen en el hidroprocesamiento se pueden clasificar en dos grupos: hidrocraqueo e hidrotratamiento.

El hidroprocesamiento de los triglicéridos implica la hidrogenación de los dobles enlaces de las cadenas laterales y la eliminación de oxígeno en los sitios de metal de los catalizadores. El hidrotratamiento de la mayoría de los aceites vegetales conduce a la producción de hidrocarburos de  $C_{12}$ - $C_{18}$ , es decir, una mezcla líquida dentro de la gama punto de ebullición del keroseno que comúnmente se denomina "keroseno renovable", ya que tiene la misma naturaleza química que el keroseno derivado del petróleo.

#### 2.1.1. Hidroconversión de triglicéridos y ácidos grasos en combustibles líquidos

Muchos países y las grandes compañías petroleras están considerando en la actualidad el uso de aceites y grasas vegetales como materia prima para la producción de combustibles verdes hidrogenados. Los principales inconvenientes parecen ser la disponibilidad de materia prima y el gran consumo de hidrógeno

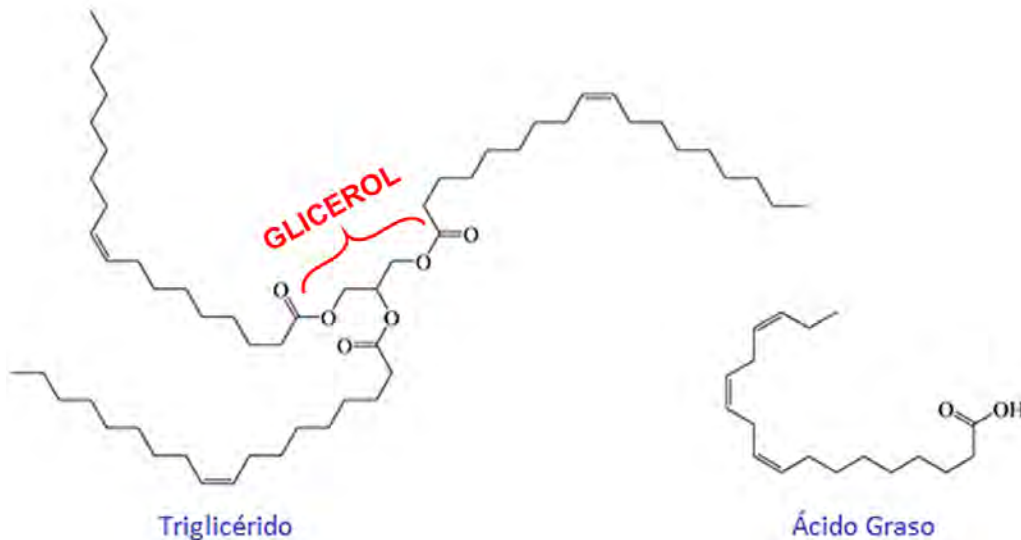


durante el proceso, lo que aumenta el costo de producción. Sin embargo, hay aspectos positivos de esta tecnología que superan estas dificultades técnicas.

a. Química de los aceites

Los triglicéridos constituyen la estructura principal de todos los aceites vegetales y grasas que se encuentran en la naturaleza. Estos se componen principalmente de cadenas largas de ésteres de ácidos grasos con glicerol, como se muestra en la Figura 30. Las cadenas laterales de los triglicéridos son saturados, monoinsaturados o poliinsaturados.

**Figura 30.** Estructura básica de un triglicérido y un ácido graso comúnmente presentes en las grasas y aceites vegetales



FUENTE: (Ali, , El Ali, & Speight, 2005)

Las propiedades de los triglicéridos dependen de la composición de ácidos grasos y de la ubicación relativa de los ácidos grasos en el glicerol. Tanto las grasas como los aceites se componen de triglicéridos, pero la diferencia entre ambos es como sigue (Ali, , El Ali, & Speight, 2005):

- ◆ Punto de fusión: las grasas son sólidas a temperatura ambiente (20°C), mientras que los aceites son líquidos.
- ◆ Las grasas y aceites naturales están compuestos por diferentes tipos de triglicéridos, los cuales se van a diferenciar por el tipo de saturación



(enlaces sencillos C-C), insaturación (dobles enlaces C=C) e isomerización (cis-trans en los dobles enlaces). Los aceites generalmente poseen una mayor cantidad de ácidos grasos insaturados.

La composición de un aceite vegetal se describe comúnmente por su contenido en ácidos grasos y triglicéridos, tal y como se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Composición típica de varios aceites vegetales

Fuente	Estructura <sup>15</sup>	Peso molecular (MW)		Composición típica, en peso %				
		Ácido graso	Triglicéridos	Jatropha	Palma	Canola	Soya	Girasol
Cáprico	C <sub>10</sub> : 0	172.3	554.8	-	-	0.6	-	-
Láurico	C <sub>12</sub> : 0	200.3	639.0	-	-	-	-	-
Mirístico	C <sub>14</sub> : 0	228.4	723.2	-	2.5	0.1	-	-
Palmítico	C <sub>16</sub> : 0	256.4	807.3	15.9	40.8	5.1	11.5	6.5
Palmitoleico	C <sub>16</sub> : 1	254.4	801.3	0.9	-	-	-	0.2
Estearico	C <sub>18</sub> : 0	284.5	891.5	6.9	3.6	2.1	4.0	5.8
Oleico	C <sub>18</sub> : 1	282.5	885.4	41.1	45.2	57.9	24.5	27.0
Linoleico	C <sub>18</sub> : 2	280.4	879.4	34.7	7.9	24.7	53.0	60.0
Linolénico	C <sub>18</sub> : 3	278.4	873.3	0.3	-	7.9	7.0	0.2
Araquídico	C <sub>20</sub> : 0	312.5	975.6	-	-	0.2	-	0.3
Eicosenoico	C <sub>20</sub> : 1	310.5	969.6	0.2	-	1.0	-	-
Behénico	C <sub>22</sub> : 0	340.6	1059.8	-	-	0.2	-	-
Erúcico	C <sub>22</sub> : 1	338.6	1053.8	-	-	0.2	-	-
MW estimado:				869.7	847.0	876.9	871.9	876.7

FUENTE: (Sotelo, Trejo, & Hernández, 2012)

#### b. Hidroprocesamiento de ácidos grasos y triglicéridos

El hidroprocesamiento es un proceso catalítico que comprende un conjunto de reacciones en las que se hace reaccionar un aceite con hidrógeno a través de un catalizador bifuncional (metal/ácido).

<sup>15</sup> C<sub>n</sub>:M describe un ácido graso cuya cadena larga posee n átomos de carbono y M número de dobles enlaces.



La producción de combustibles hidroprocesados se lleva a cabo en dos pasos o etapas:

- La primera etapa, utiliza gas hidrógeno y un catalizador para saturar los dobles enlaces, eliminando así las moléculas de oxígeno presentes en el triglicérido y en el ácido graso.
- La segunda etapa, conocido como isomerización y craqueo, reorganiza y reduce las longitudes de las cadenas moleculares para mejorar su actuación en clima frío, para el caso del combustible de aviación.

#### Hidroconversión de triglicéridos a hidrocarburos

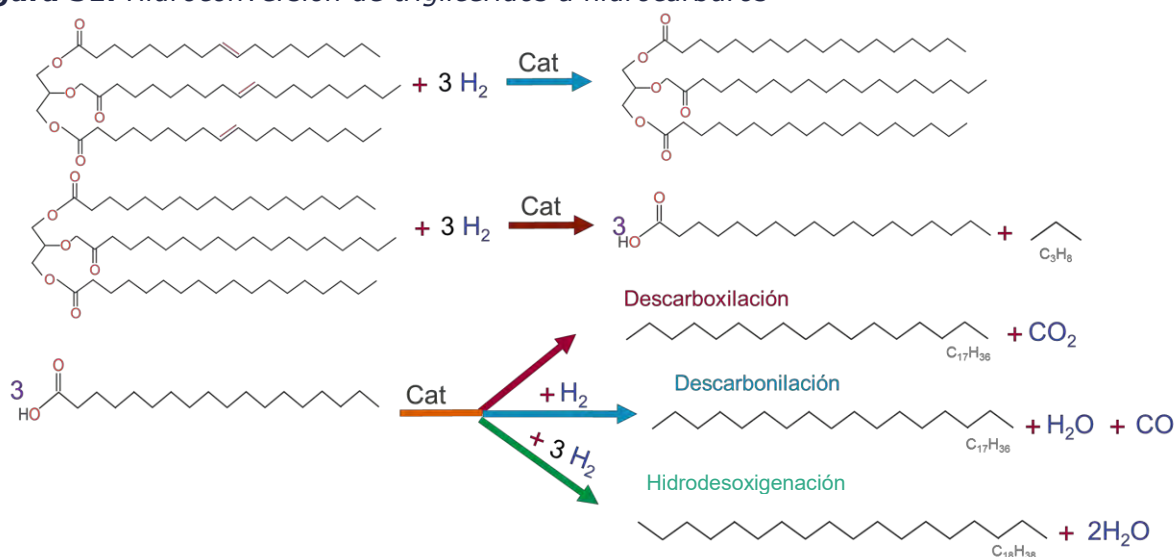
Los triglicéridos se convierten en hidrocarburos, principalmente a n-parafinas a temperaturas entre los 300 y 450°C, y mediante presiones parciales de hidrógeno por encima de 3 MPa, con lo cual se generan CO, CO<sub>2</sub>, vapor de agua y propano como principales subproductos.

El mecanismo de la reacción es complejo y consiste en una serie de pasos consecutivos. Primero, la eliminación de oxígeno a partir de triglicéridos se produce a través de diferentes reacciones tales como hidrodesoxigenación, descarboxilación, y descarbonilación y las influencias sobre la distribución de productos de hidrocarburos. Los productos obtenidos son principalmente n-heptadecano y n-octadecano, pero también se obtienen CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O como subproductos. Debido a la función ácida del catalizador, la isomerización puede llevar a la formación de isoparafinas.

Una segunda reacción ocurre isomerizando y craqueando una gama de parafinas diesel, a parafinas con el mismo número de carbonos que el combustible convencional de aviación. El producto de la reacción de isomerización es un hidrocarburo adecuado para uso como un aditivo de combustible biodiesel o jet. Hay que tener en cuenta que el combustible para aviones requiere significativamente mejores propiedades a bajas temperaturas que el biodiesel (Kinder & Rahmes, 2010).

La producción de 2 moles de n-heptadecano, 1 mol de n-octadecano y 1 mol de propano requiere 10 moles de hidrógeno por cada mol de triglicérido (trioleína, por ejemplo). Los triglicéridos con una mayor insaturación (más dobles enlaces) requerirán una mayor cantidad de hidrógeno para producir hidrocarburos de cadenas más largas, hasta obtener moléculas como la del n-heptadecano y la del n-octadecano.

**Figura 31.** Hidroconversión de triglicéridos a hidrocarburos



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

🌀 [Proceso de generación de \*Synthetic Paraffinic Kerosene\* \(HEFA-SPK\) desarrollado por UOP](#)

El proceso de hidrotratamiento para la producción de queroseno para jet HRJ (siglas en inglés de *Hydroprocessed Renewable Jet-fuel*) a partir de aceites renovables se basa en el proceso de hidrodesoxigenación de UOP (*UOP hydrodeoxygenation* en inglés; ver patentes US7982075 y US7982076), el cual produce principalmente "diesel verde" o diesel HRD (siglas en inglés de *Hydroprocessed Renewable Diesel*) y es descrito mediante la siguiente reacción química:



Donde  $n$  es la longitud de cadena de carbono de los ácidos grasos dentro de las moléculas de triglicéridos utilizadas como materia prima para el proceso.

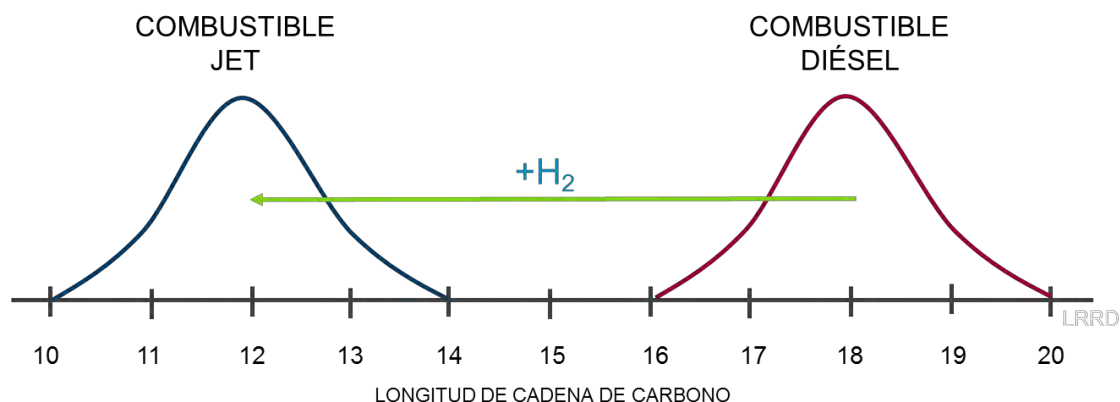
Para este análisis se supone que todos los aceites renovables, independientemente de su tipo (soya, palma, colza, jatropha, algas o salicornia) son idénticos y sólo contienen ácidos grasos con una longitud de cadena con 18 carbonos.

La reacción anterior puede ser reescrita en una forma de balance de materia para facilitar la comparación con datos experimentales obtenidos, ver datos completos en (Stratton, 2010):



El tipo de materia, productos y la energía necesaria son elementos clave para la producción de una libra de HRD; sin embargo, se requiere de un mayor refinamiento de HRD para la generación de HRJ. Para este análisis, HRJ y HRD se supone que son las distribuciones simétricas de las cadenas de hidrocarburos lineales centradas en  $C_{12}$  y  $C_{18}$  respectivamente. Como se muestra esquemáticamente a continuación, la formación de un agrietamiento o craqueo en el combustible diesel renovable, el combustible de aviación se produce a través de la adición de hidrógeno gaseoso.

**Figura 32.** Esquema que muestra el cambio en la composición de HRD a HRJ como resultado de un hidroprocesamiento adicional

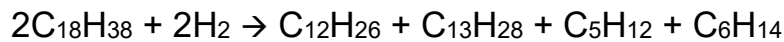
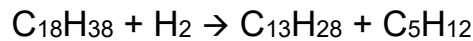
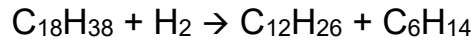


FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE (Stratton, 2010)

El mecanismo por el cual las cadenas de hidrocarburos al ser craqueadas se forman moléculas más pequeñas (por ejemplo, pentano ( $C_5H_{12}$ ) y hexano ( $C_6H_{14}$ )). El efecto dominante que tiene lugar a la reducción por craqueo de  $C_{18}$  a  $C_{13}$  es la formación de pentano, y a la reducción de  $C_{12}$  se forma hexano.

Otras reacciones también se producen en las moléculas de distribución sobre el craqueo de C<sub>18</sub> para la formación de una distribución de C<sub>12</sub>.

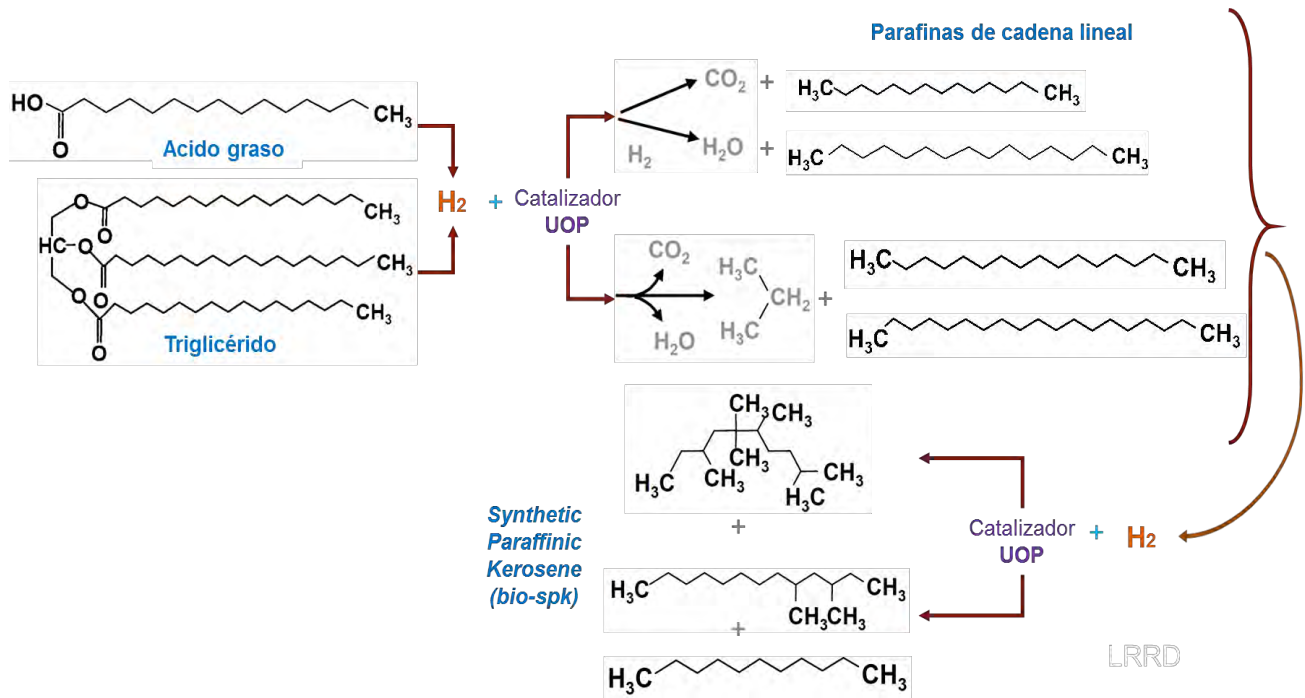
Haciendo uso de los argumentos anteriores se simplifica el análisis de dos reacciones químicas que convierten el combustible diesel a combustible de aviación:



Lo anterior puede ser reescrito en forma de balance de materia para facilitar la comparación con datos experimentales; por lo que la formación de HRJ a partir de aceite renovable se puede expresar como:



**Figura 33.** Bio-SPK proceso de producción de combustible por Honeywell / UOP

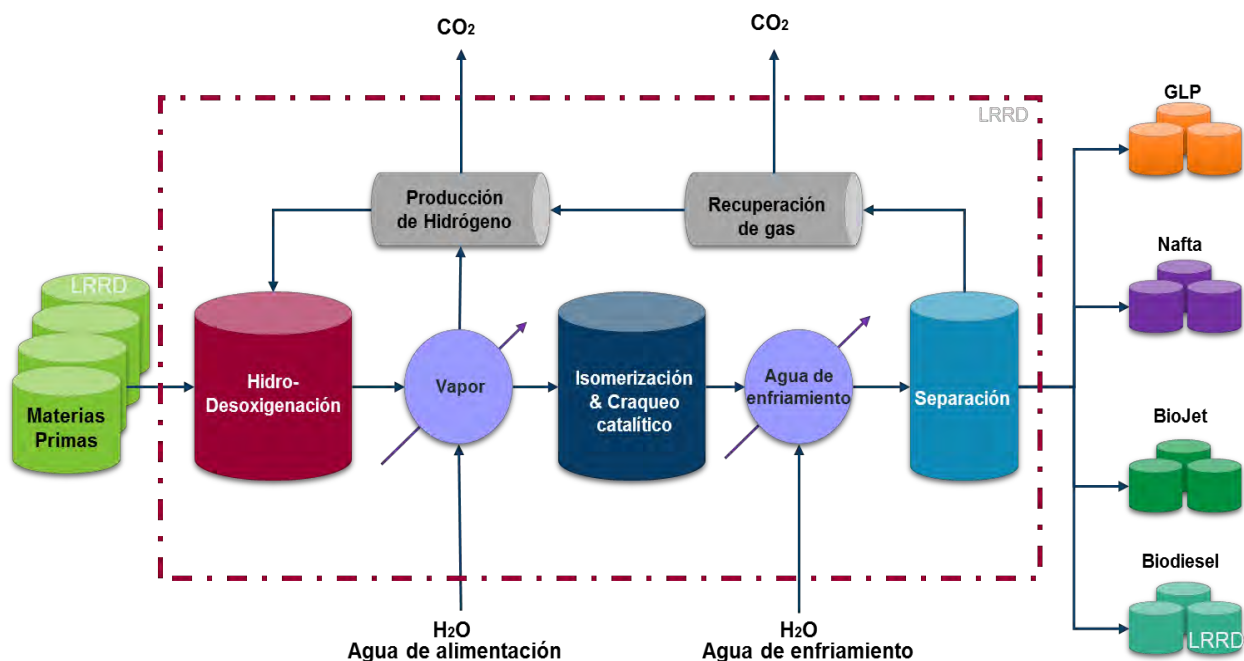


FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE (UOP, 2010)

## 2.2. Proceso industrial

Una visión general del proceso que se llevará a cabo para la producción de biocombustible de aviación en una biorrefinería se presenta en la Figura 34. El aceite vegetal de alimentación es introducido a un reactor (hidrorreactor) y es tratado con hidrógeno. La corriente resultante se enfría y por consiguiente genera vapor, y es enviado a una unidad de isomerización. El producto isomerizado después se enfría con agua de refrigeración antes de ser enviado a una torre de separación, donde los gases, incluyendo gases mezclados de parafina, dióxido de carbono, y el exceso de hidrógeno, se separan a partir de los productos líquidos. Los gases de parafina y el hidrógeno se separan del dióxido de carbono y se recicla en el hidrorreactor. Los productos líquidos se separan en gas natural licuado, nafta, jet, y diesel los cuales son enviados a tanques de almacenamiento. Las aguas residuales se separan de la corriente del producto y se envían a unidades de tratamiento (Pearlson, 2011).

**Figura 34.** Diseño esquemático de una planta de Hidroprocesamiento de aceites



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE (Pearlson, 2011)



### 2.2.1. Descripción

Haciendo referencia al diagrama de proceso de la figura anterior, el modelo de planta cuenta con ocho procesos unitarios (Pearlson, 2011):

#### i. Materia prima y Almacenamiento

Se supone que los aceites extraídos antes de ser usados, deben de pasar por un proceso de desodorización y blanqueo; actualmente muchos de los proveedores de estos aceites ya los venden tratados y es una de las formas más comunes de comprar aceites y grasas. Por lo tanto, el pretratamiento de alimentación no está incluido para este análisis.

El almacenamiento de mezclas entre aceites y grasas no es un problema, sin embargo, dependiendo de la acidez y la naturaleza de los alimentos, las consideraciones metalúrgicas para su almacenamiento deben tenerse en cuenta.

#### ii. Hidrodesoxigenación

El hidrotreatmento de los aceites elimina el oxígeno, mediante una saturación de los dobles enlaces, y como resultado genera propano de los triglicéridos por la reacción con hidrógeno en presencia de catalizador. Las proporciones de aceite vegetal y de alimentación de hidrógeno se tomaron de la bibliografía.

Entre los productos de la reacción de desoxigenación están el agua, dióxido de carbono y propano, y una gama de alcanos de cadena lineal. Se producen de agua y dióxido de carbono cuando el hidrógeno reacciona con los átomos de oxígenos presentes en los triglicéridos. El propano se produce cuando la cadena principal de glicerina del triglicérido es eliminado; y como principal producto una gama de alcanos de cadena lineal que cubren longitudes de  $C_9$  hasta  $C_{20}$  (Hong & Wang, 2009).

#### iii. Isomerización selectiva y Craqueo Catalítico

En el hidrocraqueo (*hydrocracking*), se pone en contacto el aceite vegetal con un catalizador de acción específica a una temperatura y presión elevadas en presencia de hidrógeno, generando un efluente de reacción que comprende agua,



óxidos de carbono, gases de hidrocarburos ligeros, hidrógeno en exceso e hidrocarburos parafínicos.

En el proceso de hidrocraqueo se lleva a cabo una selectividad en la producción de diversos productos obtenidos por el uso de un catalizador. Los catalizadores empleados en el hidrocraqueo varían en composición, pero en general contienen un componente de craqueo y un agente de hidrogenación que constituyen a dicho material. El componente de hidrogenación con frecuencia es un metal del Grupo VII-VIII B, por ejemplo, un metal como platino, paladio, rodio, rutenio, o renio y mezclas de los mismos.

#### iv. Integración de calor para la generación de vapor y agua de enfriamiento

El hidrotratamiento e isomerización son procesos exotérmicos y deben ser controlados mediante la eliminación de calor entre etapas. El modelado de la integración de calor es importante por el uso del agua así como las emisiones de gases de efecto invernadero relacionados con la electricidad utilizada para el funcionamiento de bombas y ventiladores para la refrigeración (Hong & Wang, 2009).

Es importante saber cuáles serán las cantidades exactas de agua y vapor que se requerirán en todo el proceso, ya que es otro de los factores sumamente importantes para llevar a cabo una buena estimación financiera de toda la biorrefinería.

#### v. Purificación y reciclaje de gas combustible

Después que la corriente de producto sale de los reactores de hidrotratamiento e isomerización, los productos de gas se separan de los productos líquidos y se purifican. El hidrógeno se separa por adsorción continua de ciclo alternante o adsorción a presión oscilante PSA (siglas en inglés de *pressure swing adsorption*<sup>16</sup>) y se recicla de nuevo al reactor de desoxigenación.

---

<sup>16</sup> La adsorción PSA es un proceso continuo que consta de dos etapas: la primera es la adsorción, la cual se lleva a cabo a alta presión, y la segunda es la desorción a baja presión, donde se regenera al material adsorbente.

Otros gases ligeros tales como metano, etano y propano se usan como combustible de proceso.

El lavado con aminas y el procesamiento de gas ácido se usan para la limpieza del gas. Las corrientes puras de CO<sub>2</sub> se recuperan de la unidad de PSA y se almacenan para su posterior uso (Hong & Wang, 2009).

#### vi. Producción de hidrógeno

Se necesita una planta de hidrógeno para producir los volúmenes de gas requeridos, por lo que no se debe de considerar una entrega de hidrógeno a granel.

De todos los procesos actuales para la producción de hidrógeno, el reformado de gas natural es el método más usado para la obtención de hidrógeno, ya que ha sido un proceso utilizado a lo largo de varias décadas para producir H<sub>2</sub> por tratarse de una tecnología económica (Partnership, 2009). La mayor desventaja de este proceso es el empleo de gas natural, el cual es un combustible fósil, pero afortunadamente esta tecnología es versátil y puede emplear algún otro gas combustible como el biogás.

#### vii. Separación de productos

En esta sección se separarán los productos de la reacción que comprende los hidrocarburos parafínicos, por diferencia del punto de ebullición en una torre de destilación a presión atmosférica, obteniéndose así naftas, biodiesel, biojet y una mezcla de gases combustibles (C<sub>4</sub>-C<sub>5</sub>).

#### viii. Almacenamiento de productos y mezcla

Después de la separación, los productos renovables diesel, jet, nafta y gas natural líquido (GNL) serán enviados a almacenamiento. Se debe de considerar 25 días de almacenamiento de los productos en el patio de tanques, esto con objeto de cubrir un posible paro de la planta u otras anomalías que puedan surgir durante la producción de la planta (Gary & Handwerk, 2007).

### 2.2.2. Parámetros de Operación

Los parámetros de operación afectan a las reacciones que tienen lugar dentro del reactor de hidroprocesamiento. Entre los parámetros operativos clave del hidroprocesamiento se incluyen la temperatura del reactor, la presión parcial de hidrógeno, el espacio-velocidad horaria del líquido (LHSV por sus siglas en inglés) y la velocidad de alimentación de hidrógeno.

#### i. Temperatura

La mayoría de los reactores catalíticos de hidrotratamiento e hidrocrackeo operan entre 290-450°C. El rango de temperatura se selecciona según el tipo de catalizador y el tipo de materia prima a ser procesada. En las primeras etapas de la vida del catalizador (después de su carga en el reactor), las temperaturas se mantienen normalmente por debajo de la actividad del catalizador que es muy alta. Sin embargo, cuando el tiempo avanza, el catalizador se va desactivando y se van formando pequeñas cantidades de coque, la temperatura aumenta gradualmente hasta superar la pérdida de la actividad del catalizador y así mantener el rendimiento del producto deseado y la calidad.

#### ii. Presión parcial de hidrógeno

La presión parcial del hidrógeno afecta significativamente a las reacciones del hidrotratamiento, así como a la desactivación del catalizador. La tasa de desactivación del catalizador es inversamente proporcional a la presión parcial y velocidad de alimentación del hidrogeno. Sin embargo, las altas presiones parciales corresponden a un alto costo operacional, que se elevan mucho más cuando se usan materias primas olefinicas que presentan un mayor consumo de hidrógeno debido a las reacciones de saturación. Por lo tanto, la presión parcial del hidrógeno debe ser equilibrada con la actividad del catalizador y el tiempo de vida del catalizador, con el fin de optimizar el proceso global.



### iii. Espacio-velocidad horaria del líquido

El espacio-velocidad horaria del líquido (LHSV) se define como la relación de la velocidad de alimentación de masa líquida (g/hr) y la masa de catalizador (g) y como resultado se expresa en  $\text{hr}^{-1}$ . De hecho la inversa de LHSV es proporcional al tiempo de residencia de la alimentación líquida en el reactor. Por lo que, a mayor espacio-velocidad horaria del líquido, menor tiempo disponible de contacto de las moléculas de la mezcla de alimentación con el catalizador y por lo tanto habrá una menor conversión. Sin embargo, al mantener grandes cantidades de LHSV se impone una degradación más rápida del catalizador, por lo que en aplicaciones industriales se mantienen valores altos del LHSV en la práctica.

### iv. Velocidad de alimentación de hidrógeno

La velocidad de alimentación del hidrógeno es otro parámetro importante, ya que define la presión parcial del hidrógeno en función del consumo de hidrógeno de cada aplicación. La velocidad de alimentación del hidrogeno favorece la velocidad de reacción de eliminación y saturación de los heteroátomos. Sin embargo, como el costo de hidrógeno define el costo unitario del funcionamiento general, la velocidad de alimentación de hidrógeno normalmente se optimiza en función de los requisitos del sistema. Además, el uso de fuentes de energía renovables para la producción de hidrógeno también se concibe como una opción potencial de mejora de los costos.

## 2.2.3. Producción de hidrógeno

### i. Suministro de hidrógeno

El hidrógeno juega un papel crítico en la producción de combustibles, y su uso aumentó con la introducción de los combustibles tipo gasolina y diesel bajos en azufre. La disponibilidad de hidrógeno es uno de los principales requisitos para la producción de combustibles limpios, y actualmente la demanda de hidrógeno se encuentra en su punto más alto de todos los tiempos (Long, Picioccio, & Zagoria, 2011).

Actualmente se sabe que la capacidad de un refinador para producir combustibles limpios depende de contar con la cantidad de hidrógeno suficiente, por lo que en muchas refinerías se reconoce que el uso óptimo y adecuado de hidrógeno puede maximizar las ganancias de una biorrefinería (Partnership, 2009).

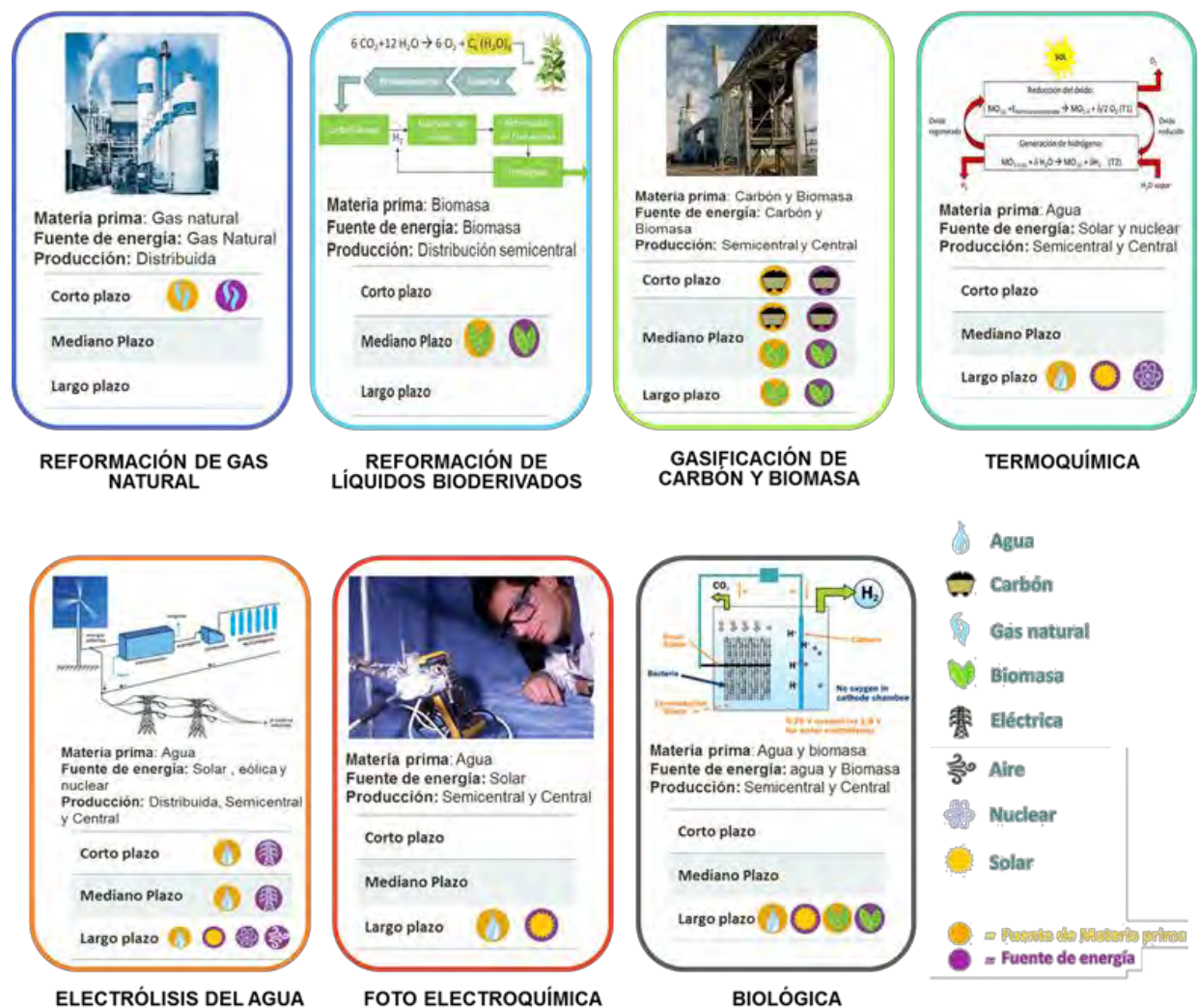
La producción de hidrógeno ha sido un asunto de gran importancia en las últimas décadas, pero recientemente ha aumentado el interés en los procesos de producción del mismo, motivado por los avances obtenidos en la tecnología relacionada con las celdas de combustible.

En este apartado se revisa el estado del arte de las tecnologías de producción de hidrógeno. Sólo mediante el desarrollo y la implementación de una serie de tecnologías a medida que avanzan las investigaciones en la preparación comercial finalmente se va a llegar a la solución de energía sustentable que se está buscando. La siguiente figura proporciona una visión general de las tecnologías actuales de producción de hidrógeno, mediante diversas fuentes de materia prima y las fuentes de energía para su generación, ver Figura 35, (Partnership, 2009).

De todos los procesos, el reformado de gas natural es el método más comúnmente usado para la obtención de hidrógeno, es un proceso utilizado a lo largo de varias décadas para producir  $H_2$ . Por tratarse de la tecnología más económica, este proceso es el que se utiliza en la actualidad en la producción industrial del hidrógeno, tal es el caso de UOP Honeywell.



**Figura 35.** Tecnologías existentes para la producción de hidrógeno a partir de diferentes fuentes de materia prima y energía



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS DE (Partnership, 2009)

a. Producción de hidrógeno a partir de una reformación de gas

El reformado con vapor es un método para la obtención de hidrógeno a partir de hidrocarburos, en particular gas natural. Este proceso requiere de una gran cantidad de energía para realizar el reformado además de que se necesita un tratamiento previo, comúnmente una remoción de contenidos de azufre y otras impurezas.

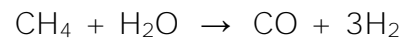
Este proceso consiste en exponer al gas natural de origen fósil, de alto contenido en metano, con vapor de agua a alta temperatura (700-1000 °C) y una presión

moderada (3-25 bar). Como resultado de la reacción química se obtiene hidrógeno (H<sub>2</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), y dependiendo la mezcla reformada, también monóxido de carbono; este proceso tiene un rendimiento del 65%, y en el caso de que el gas natural contenga azufre, éste debe ser eliminado mediante una desulfuración (Partnership, 2009).

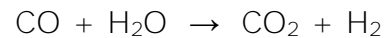
El metano reformado con vapor de agua es un proceso bien establecido como se muestra en la Figura 36, el vapor y el hidrocarburo como materia prima entran en presencia de un catalizador a un reactor, generando al final del proceso hidrógeno y dióxido de carbono. El proceso se rige por las siguientes reacciones (I-Tso Chen, 2010):

1. Reacción de Reformado o Producción de Gas de Síntesis:

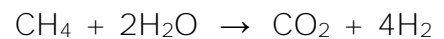
**Gas de síntesis**



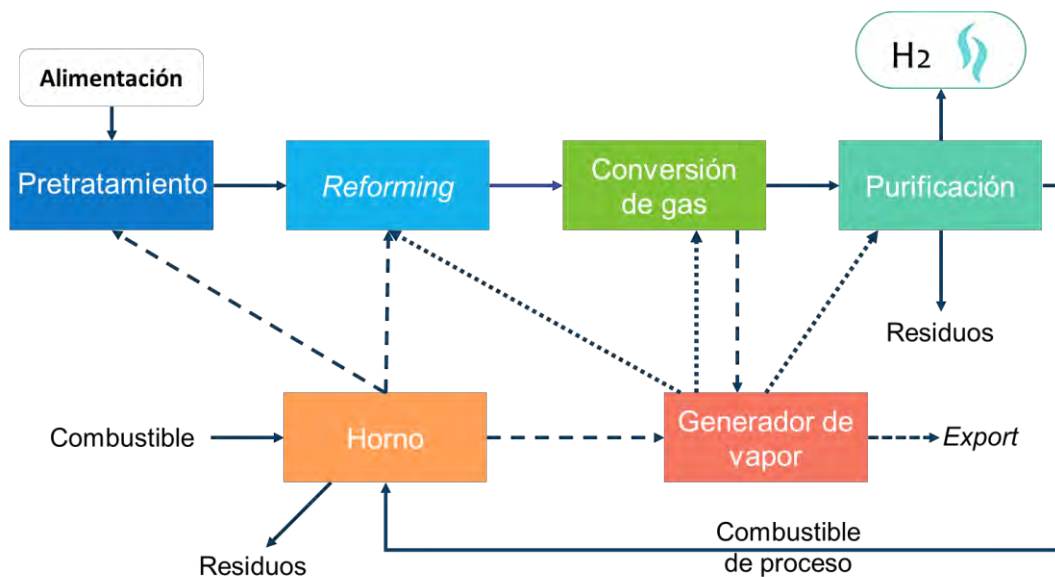
2. Reacción de Desplazamiento Gas-Agua o Reacción WGS (siglas en inglés de **Water-Gas Shift**):



Reacción global:



**Figura 36.** Representación esquemática de la reformación de metano con vapor de agua



FUENTE: (I-Tso Chen, 2010)





En la primera etapa de formación, el metano reacciona con vapor de agua para producir monóxido de carbono e hidrógeno, es un proceso endotérmico. El proceso por lo general se mantiene aproximadamente a 850°C para obtener una conversión deseable, para que la reacción que transcurre sea endotérmica.

Posteriormente, en lo que se llama "reacción de desplazamiento gas-agua (*Reacción WGS*)", el monóxido de carbono y vapor de agua se hacen reaccionar utilizando un catalizador para producir dióxido de carbono y más hidrógeno. En una etapa final, en el proceso llamado "adsorción a presión oscilante (*Pressure Swing Adsorption, PSA*)", dióxido de carbono y otras impurezas se eliminan de la corriente de gas, dejando al hidrógeno (H<sub>2</sub>) esencialmente puro. El reformado con vapor también se puede utilizar para producir hidrógeno a partir de otros combustibles, tales como etanol, propano, biogás e incluso la gasolina (Appressi, 2014).

#### 2.2.4. Servicios Auxiliares

Las áreas de proceso principales requieren de algunos servicios auxiliares, como:

- Calderas que generan vapor de agua de media presión. Esto es esencial para la puesta en marcha de la planta, y es útil como controlador de presión durante el funcionamiento a régimen permanente.
- Una planta de pulido de agua. Es un proceso de tratamiento de aguas convencional para desmineralizar el agua de servicio, y tiene el fin de evitar incrustaciones en los equipos que necesitan flujos de agua de proceso.
- Un sistema de enfriamiento de agua. Produce agua fría a partir del agua caliente proveniente de los enfriadores del proceso.
- Un compresor de aire de instrumentos y sistema de distribución. Instrumentación neumática (con aire) para hacer funcionar la mayoría de las válvulas de control en la planta. También sirve como una fuente de aire que se utiliza para el mantenimiento de la planta (línea de servicio).
- Un generador de electricidad para mantener las principales áreas de proceso operativas en el caso de que falle la alimentación principal a la planta.



- La energía eléctrica se utiliza para el funcionamiento de las bombas, compresores, así como para el funcionamiento de otros equipos de la biorrefinería.
- El gas natural se utiliza como fuente de combustible de proceso para la calefacción, así como gas de alimentación para ciertas reacciones (producción de hidrógeno).
- El proceso completo está diseñado para hacer eficiente el uso de los recursos, de manera que ninguno de los flujos de residuos se desechen siempre que sea posible. Esto tiene el beneficio añadido de reducir al mínimo el volumen de residuos que se descargará de la planta.
- Laboratorios, talleres de mantenimiento, oficinas administrativas, área de almacenamiento tanto de materia prima como de productos terminados, y área de amortiguamiento.

Los requisitos de los servicios se normalizaron por cada 100 libras de aceite vegetal; la siguiente tabla resume estos requisitos para cada unidad de proceso y del sistema.

**Tabla 10.** Requisitos de los servicios públicos de proceso por cada 100 libras de aceite vegetal

Unidad de proceso	BFW <sup>17</sup> (lb/hr)	Agua fría (lb/hr)	Vapor (lb/hr)	Electricidad (kW)	Gas Natural (lb/hr)
<b>Hidrotratamiento</b>	25	-	-25	10	2.0
<b>Isomerización</b>	-	255	-	0.0	3.0
<b>Unidad de gas de proceso</b>	-	526	-	1.0	0.0
<b>Subtotal</b>	25	533	-25	2.0	6.0
<b>Hidrógeno SMR<sup>21</sup></b>	50	25	-	0.0	6.0
<b>Adición máx. Jet</b>	-	-	-	-	6.0

FUENTE: (Pearlson, 2011)

<sup>17</sup> BFW = Boiler Feed Water (agua para calderas) / SMR = Steam Methane Reforming (H<sub>2</sub> del reformado de metano)

Así mismo, los requerimientos de energía para la generación de HRJ, también se normalizaron en una base por cada 100 libras de aceite vegetal.

**Tabla 11.** Requerimientos de energía para la generación de HRJ

<b>MATERIA PRIMA</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Base</b>	<b>Máximo</b>
Aceite (lb)	100	100	100
H <sub>2</sub> (51,586 BTU/lb)	2.15	3.38	4.48
<b>PRODUCTOS (lb)</b>			
HRJ (18,950 BTU/lb)	57.8	58.7	59.9
Nafta (19,215 BTU/lb)	25.8	26.2	26.8
Mezcla de gas propano (18,568 BTU/lb)	2.0	4.8	5.0
<b>ENERGÍA DE PROCESO</b>			
Electricidad	6,364	8,330	10,529
Gas Natural	9,845	10,740	11,635

FUENTE: (RWS10)

### 2.2.5. DFP del proceso para la obtención de biocombustible de aviación mediante la tecnología HEFA

La materia prima renovable se presuriza mediante la bomba (P-001) y se calienta en una primera ocasión en un intercambiador de calor con vapor de media presión (E-001), para luego pasar a un reactor catalítico de hidrotratamiento (R-001) con hidrógeno a una presión aproximadamente de 1000 a 2000 psig (las presiones del intervalo de operación van de 250 psig a 3000 psig). El líquido de materia prima renovable entra en contacto con el hidrógeno a una velocidad aproximadamente entre 0.5 – 5 h<sup>-1</sup>. El catalizador<sup>18</sup> empleado es de tipo bimetálico sulfurado como NiW (Níquel-Tungsteno), NiMo (Níquel-Molibdeno), y CoMo (Cobalto-Molibdeno), en un soporte de alúmina. El catalizador más adecuado es NiMo sobre alúmina. Sin embargo, se debe entender que cualquier catalizador puede ser utilizado siempre y cuando las funciones del catalizador sean

<sup>18</sup> Se pueden utilizar otros catalizadores, pero estas van a depender de la fuente de materia prima, del tipo de reactor y de las condiciones de operación, ver [Anexo C](#).

las más adecuadas al proceso. El catalizador puede estar en forma de óxido o sulfurado o presulfurado, durante el inicio y éste se activa cuando se carga el hidrotratador (R-001) con hidrógeno.

El material de alimentación líquido se termina de calentar a través de un intercambiador (E-002) donde el fluido caliente es el efluente del reactor R-001. La materia prima renovable a una temperatura mayor respecto a la de alimentación, se combina entonces con el hidrógeno antes de entrar al hidrotratador. Debido al alto contenido de oxígeno y al nivel de insaturación de la materia prima renovable, la reacción de tipo exotérmica de hidrodeshidrogenación y la reacción de hidrogenación de olefinas pueden fomentar un incremento adiabático de temperatura mayor a la deseada. Una saturación de hidrógeno puede ser una de las mejores opciones para mantener la temperatura del hidrotratamiento en un intervalo óptimo de 260°C y 370°C, pero también con una temperatura mínima y máxima de 150°C a 455°C respectivamente, para llevar a cabo eficientemente el proceso.

La relación entre el gas y el líquido (con relación respecto al aceite renovable de alimentación) para la reacción de hidrotratamiento es de aproximadamente un intervalo de 2,000 a 14,000 scf<sup>19</sup>/bbi<sup>20</sup>.

El efluente de hidrotratamiento posteriormente se enfría una primera vez en el intercambiador (E-002) y una segunda vez en el intercambiador (E-003), posteriormente esta corriente es separada en dos fases mediante un separador bifásico (líquido/vapor) (F-001); la fase vapor incluye hidrógeno, propano, óxidos de carbono y agua; y la fase líquida es predominantemente una mezcla de líquidos parafínicos.

La fase vapor se hace pasar por un enfriador de aire (V-001) para disminuir su temperatura y así condensar el agua. Previamente esta corriente se lava con agua para así evitar la formación de incrustaciones en el enfriador, donde la corriente

---

<sup>19</sup> Pies cúbicos estándar (*Standard cubic feet*, nombre en inglés), están referidos a 0°C y 1 atm

<sup>20</sup> Barril (*Barrel*, nombre en inglés), equivalente a 42 gal o a 159 L



de salida de este equipo es una mezcla de hidrógeno, propano e hidrocarburos condensados (principalmente parafinas  $C_3$ - $C_9$ ), y agua líquida. Estas tres fases se separan en un separador trifásico líquido/líquido/vapor (separador de bota) (F-002); los vapores ricos en hidrógeno se purifican en una unidad de PSA para incorporarlo nuevamente al reactor R-001, la corriente de hidrocarburos condensados se envía a la unidad de recuperación de producto, y la corriente de agua se envía fuera del sitio para su tratamiento antes de su eliminación o uso como agua de proceso.

El producto parafínico líquido se mezcla con la corriente de hidrocarburos condensados obtenidos del separador líquido/líquido/vapor (F-002) para formar una nueva alimentación a ser fraccionada. El tren de fraccionamiento incluye una torre desbutanizadora (T-001), un agotador de nafta (T-002), y una torre para reciclaje de parafina pesada (T-003). La alimentación del tren de fraccionamiento primero es precalentada con vapor de agua en un intercambiador (E-004). La torre de eliminación de butano se utiliza para recuperar la corriente de propano y LPG. El agotador de nafta se utiliza para separar la nafta en una nueva corriente. La torre de reciclaje se utiliza para separar el combustible de aviación (bio kps) de la corriente de parafinas más pesadas, es decir, de diesel renovable. El combustible de aviación está compuesto principalmente de isoparafinas  $C_9$ - $C_{15}$ , mientras que el flujo de materiales pesados está constituido por n-parafinas  $>C_{16}$ , es decir, es diesel renovable.

Las columnas de destilación (torre desbutanizadora e incluso la torre de reciclaje de parafinas pesadas) operan a una presión de 200 psig de vacío. Las temperaturas de operación correspondientes son de  $150^{\circ}\text{C}$  a aproximadamente  $345^{\circ}\text{C}$ . Todas las torres de destilación están equipadas con condensadores y rehervidores. Los condensadores pueden funcionar con agua fría o con una corriente de aire. Para la torre de temperatura más alta (T-003), la inyección de vapor sobrecalentado puede ser una mejor opción en vez de usar un rehervidor.

Las parafinas pesadas se separan en dos corrientes, una como flujo de producto obtenido (diesel renovable), mientras que la otra es bombeada a una presión



entre 1000 y 2000 psig y combinada con hidrógeno, esta nueva corriente es sometida a un previo calentamiento (H-001) a una temperatura de 305°C a 360°C, temperatura la cual se estima es la óptima antes de entrar al reactor de hidroisomerización/hidro craqueo.

Los catalizadores adecuados para el reactor de hidroisomerización son aquellos catalizadores con reactividad bifuncional, es decir, con hidrogenación y con funcionalidades ácidas. Tales catalizadores incluyen elementos del Grupo VIII B, con soportes amorfos (por ejemplo, sílice-alúmina) o cristalinos (por ejemplo, zeolita). Un catalizador preferido para una hidroisomerización es el platino, paladio o combinaciones de los mismos sobre un soporte amorfo de sílice-alúmina.

La relación entre el gas y el líquido (con relación respecto a la alimentación de las parafinas pesadas) para la reacción de hidroisomerización/hidro craqueo va aproximadamente de 1,000 a 10,000 scf/bbl, y con una LHSV de aproximadamente 0.2 a 5h<sup>-1</sup>. El producto de la alimentación de C<sub>15</sub>-C<sub>18</sub>, es una mezcla isoparafínica C<sub>3</sub>-C<sub>18</sub>.

Del segundo separador (F-002), se obtiene una corriente de gas rica en hidrógeno, la cual en algunas ocasiones se hace pasar a través de un separador de membrana para recuperar propano. Posteriormente esta corriente es procesada a través de una unidad de purificación, en donde se elimina amoníaco, sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono, subproductos del hidrot ratamiento. El hidrógeno obtenido se combina con una nueva corriente de hidrógeno, a través de un compresor (C-002), para formar la nueva corriente de hidrógeno del proceso.

El combustible de aviación resultante cumple con las mismas propiedades físicas y químicas que el combustible de aviación fósil, tal y como se encuentra descrito en la norma ASTM D7566.

A pesar de que el combustible resultante cumple con las especificaciones del combustible convencional, para su uso en la aviación civil se recomienda que sea mezclado en una proporción máxima de 50/50 en volumen con combustible de

aviación convencional tal y como lo especifica la norma, en caso de que el combustible haya sido generado a partir de aceite vegetal.

**Tabla 12.** Lista de equipamiento del DFP

<b>Texto mostrado</b>	<b>Descripción</b>
C-001	Compresor de alimentación de hidrógeno
C-002	Compresor de hidrógeno
C-003	Compresor de hidrógeno recuperado
E-001	Primer calentamiento de aceite vegetal
E-002	Segundo calentamiento de aceite vegetal
E-003	Enfriamiento de aceite hidroprocesado
E-004	Calentamiento de aceite hidroprocesado
E-005	Intercambiador de calor con vapor
E-006	Enfriamiento de producto isomerizado
F-001	Separador de dos fases (L/V)
F-002	Separador de bota trifásico (L/L/V)
H-001	Horno de calentamiento
P-001	Bomba centrífuga
P-002	Bomba centrífuga
R-001	Reactor de hidroprocesamiento
R-002	Reactor de isomerización/hidrocraqueo
R-003	Separador PSA
T-001	Torre de destilación (propano/C <sub>4</sub> -C <sub>6</sub> )
T-002	Torre de destilación (Naftas)
T-003	Torre de destilación (Biojet/Diesel Renovable)
V-001	Aeroenfriador





### 2.2.6. Perfil del producto deseado

Los aceites más apropiados para la producción de bio kps son aquellos de cadena corta, como se muestra en la Tabla 13, más sin embargo dado que en estas materias primas predominan las cadenas de C<sub>18</sub>, el producto obtenido principalmente será biodiesel. Pero en cambio el productor puede optar por producir más biocombustible de aviación, craqueando el diesel que se vaya generando hasta llegar al rango del biojet. Ambos perfiles ya fueron modelados: máxima producción de destilados y máxima producción de biojet.

**Tabla 13.** Perfil de longitud de diferentes aceites renovables para la producción de biocombustibles

<b>C</b>	<b>Soya</b>	<b>Palma</b>	<b>Palmiste<sup>21</sup></b>	<b>Canola</b>	<b>Jatropha</b>	<b>Camelina</b>	<b>Sebos</b>
<b>8</b>	-	-	2	-	-	-	-
<b>10</b>	-	-	7	-	-	27-55	-
<b>12</b>	-	-	47	-	-	-	-
<b>14</b>	-	-	14	-	-	7	4
<b>16</b>	11	44	9	4	12	15-24	28
<b>18</b>	87.6	56	21	62	87	6-17	67
<b>20</b>	1.4	-	-	34	1	-	1

FUENTE: (Pearlson, 2011)

El perfil de la máxima capacidad de producción de destilados, cumple con las especificaciones del diesel convencional, así mismo se minimiza las cantidades de GNL, nafta y otros subproductos, quedando la opción disponible de separar la fracción del combustible de aviación generado durante el hidrotreatmento. UOP Honeywell informa que la fracción generada de combustible de aviación corresponde aproximadamente a un 15% del volumen total de lo obtenido en el hidrotreatmento (UOP, 2010).

<sup>21</sup> El palmiste es la almendra del fruto de la palma de aceite (mencionada en la tabla como palma).





En cambio, para el perfil de la máxima producción de combustible de aviación, en teoría, el rango de combustible jet y nafta se podría crear mediante la reacción:



sin la formación de subproductos. Sin embargo, la selectividad de la reacción de craqueo es difícil de controlar y la formación de productos varía en tamaño de  $C_3$  a  $C_6$ . Puesto que los productos de mayor peso molecular tienen un mayor valor económico, no todo el combustible diesel está craqueado en este escenario a pesar de que es técnicamente posible. Las cantidades de producto se reportan a partir de los valores reportados en la literatura (Bailis & Baka, 2010).

Las distribuciones del producto y el consumo de hidrógeno dependen de la materia prima que se utiliza para el proceso, y los perfiles de los productos y el consumo de hidrógeno van a cambiar durante la vida útil del proceso (tiempo de vida del catalizador de hidroprocesamiento) (Pearlson, 2011).

**Tabla 14.** Resumen de los perfiles de producción para ambos escenarios

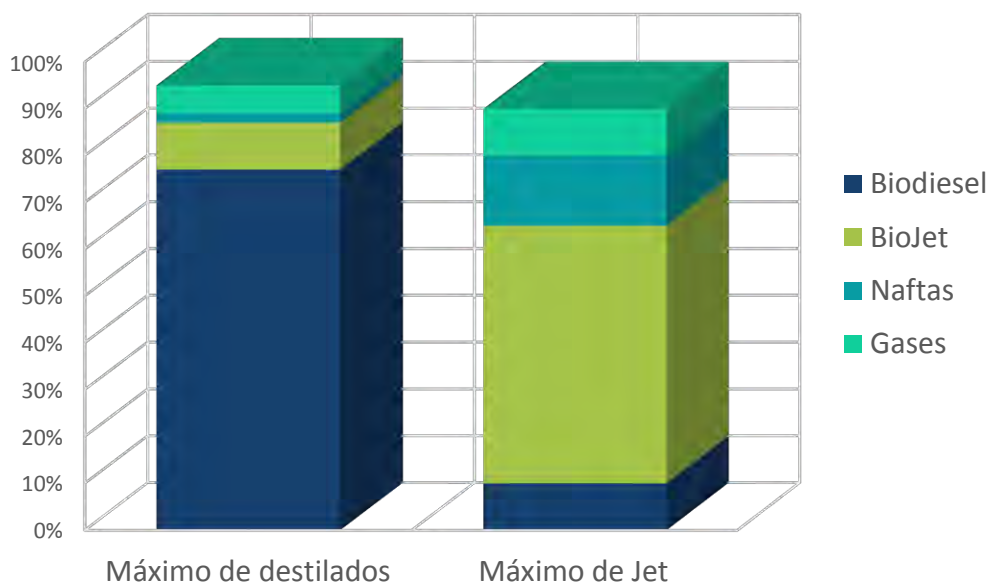
Perfil del productos [wt <sup>22</sup> %]	Máximo de destilados	Máximo de Jet
Aceite vegetal	100	100
Hidrógeno	2.7	4
[wt%]	Productos	
Agua	8.7	8.7
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	5.5	5.4
Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	4.2	4.2
GLP	1.6	6
Naftas	1.8	7
BioJet	12.8	49.4
Biodiesel	68.1	23.3
<b>Total</b>	<b>102.7</b>	<b>104</b>

FUENTE: (Pearlson, 2011)

<sup>22</sup> Producción de productos a base de masa según el perfil del producto. Los rendimientos del producto para cada perfil de producto se basan en 100 libras de alimentación de aceite vegetal de soja. Las cantidades se basan en los balances de materiales proporcionados en la literatura para una reacción de descarboxilación, tal como el proceso UOP.

Los rendimientos del producto para cada perfil del producto, representados en la tabla anterior, se basan en 100 libras de alimentación de aceite vegetal (para estos datos aceite de soya). Dichas cantidades se basan en los balances de materia proporcionados en la literatura para una reacción de descarboxilación, tal como el proceso UOP (Pearlson, 2011).

**Figura 38.** Eficiencia del producto (%wt) proceso HEFA



FUENTE: (MASBI, 2013)

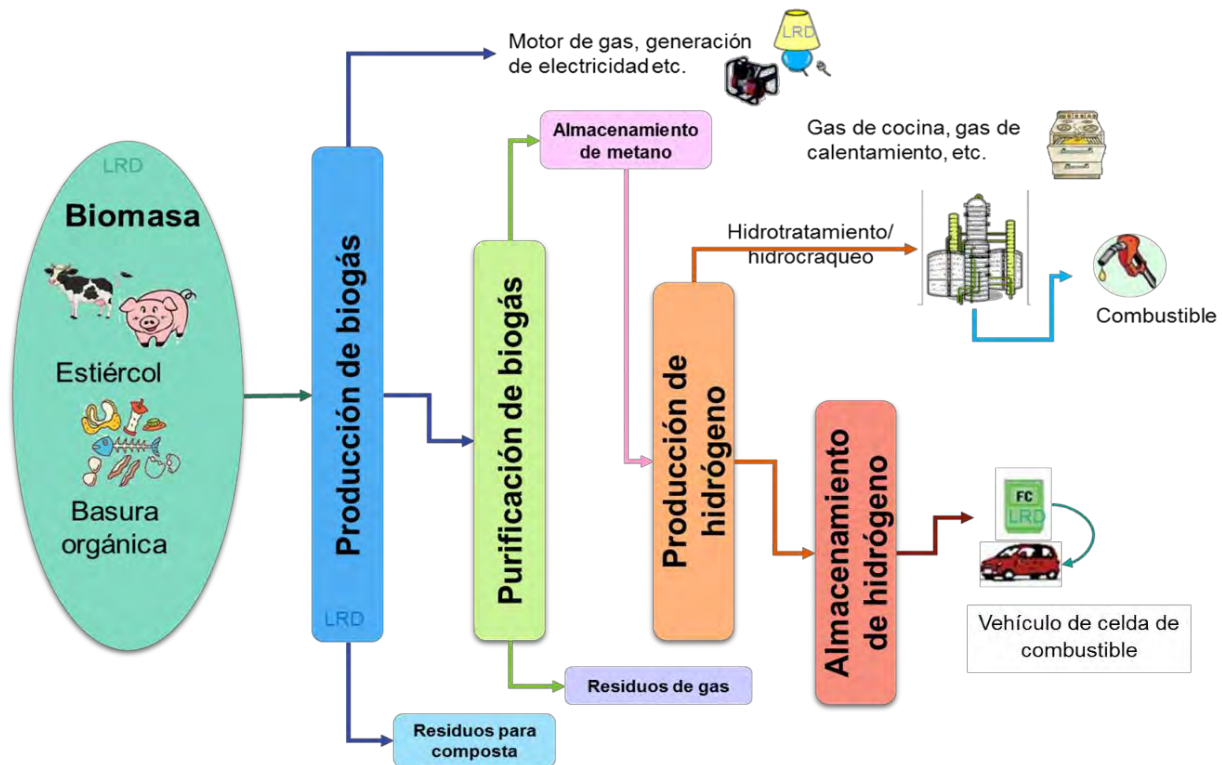
### 2.2.7. Propuestas de mejora

Al tratar de implementar la construcción de una biorrefinería de manera sustentable, se pretende de esta misma manera obtener uno de los principales servicios para la producción de bio kps, la producción de hidrógeno.

#### **Generación de hidrógeno usando biogás como materia prima, mediante el proceso de reformación de gas "Gas Reforming"**

En principio, el biogás puede ser utilizado en cualquier equipo comercial diseñado para uso con gas natural. En la Figura 39 se resumen las principales y/o posibles aplicaciones. Las plantas de biogás producen este combustible de manera eficiente a partir de materiales que incluyen excrementos de ganado y desechos orgánicos.

**Figura 39.** Diagrama general de la producción y usos del hidrógeno a partir de biogás



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE (CERI, 2008)

Entre los usos más comunes del biogás son la generación de electricidad con motores que funcionan quemándolo directamente, así como la utilización del calor generado por las calderas de gas. Sin embargo, si el biogás se purifica se puede obtener como principal producto metano, el cual puede ser utilizado en los calentadores de agua domésticos, cocinas de gas, equipo de calefacción, y otros dispositivos. Por otra parte, el metano purificado se puede utilizar para producir hidrógeno, que puede resultar útil para las industrias química y del petróleo; por ejemplo, el consumo principal de hidrógeno en una planta petroquímica es para los procesos de hidrodeshidratación, hidrodeshidrosulfuración, e hidrocrackeo; además de que se puede usar en sistemas con celdas de combustible para vehículos (CERI, 2008).

El biogás, al estar conformado entre un 50 y 70% por metano, y al ser generado a partir de desechos orgánicos por un proceso biológico de biodigestión anaerobia,



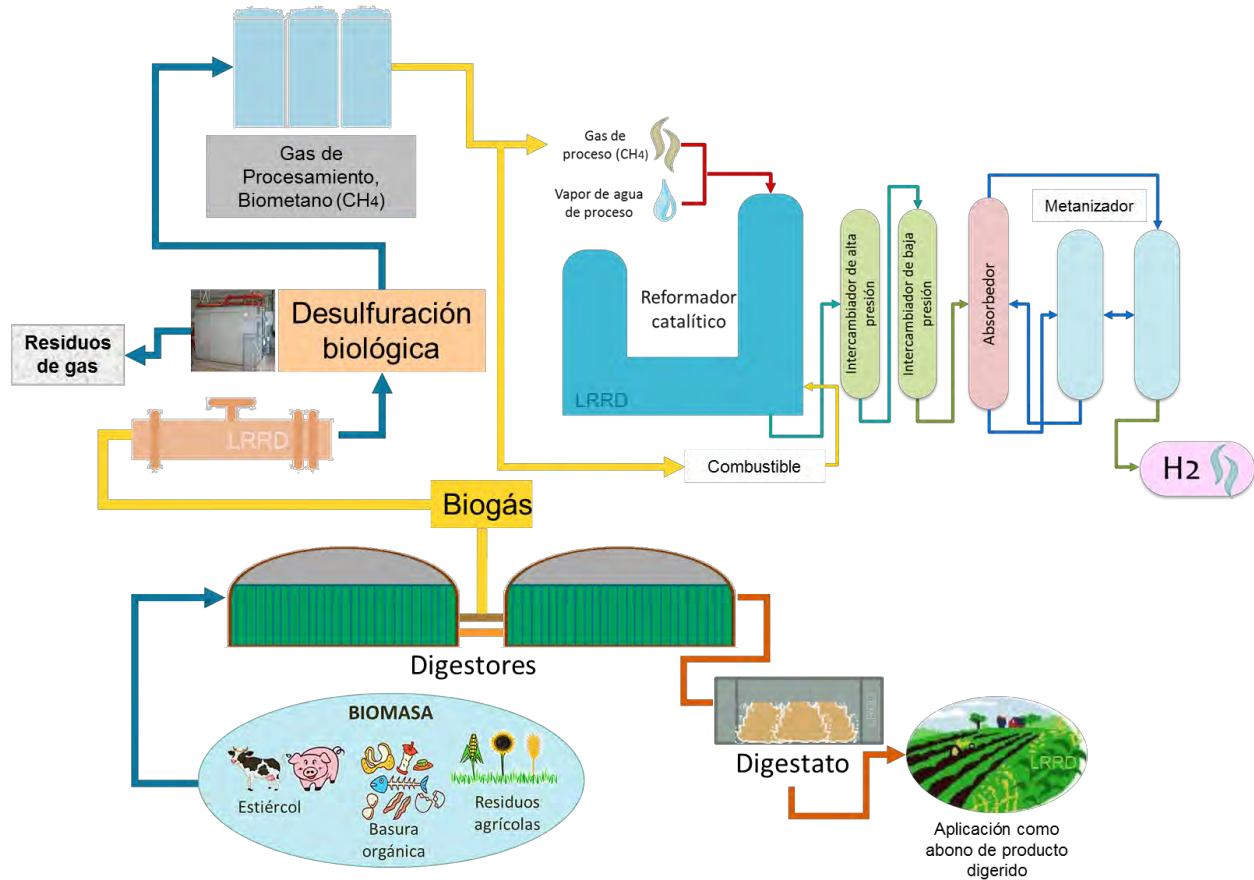
lo hace una excelente fuente alternativa para la producción de hidrógeno **mediante la tecnología de "Reformación de gas natural (*Gas Reforming*)"**, pues no se le tendría que hacer modificación alguna al proceso o bien a una planta ya existente para así poder obtener hidrógeno de una manera sustentable.

El proceso de producción de hidrógeno por la tecnología de reformación de gas natural sería completamente el mismo, lo único diferente sería el origen de la fuente de gas, que en vez de ser de origen fósil, sería de origen biológico.

El proceso sería el mismo, tal y como se muestra en la Figura 40; el pretratamiento consistiría en una desulfuración biológica, puesto que el biogás generado por la digestión anaerobia de sólidos orgánicos, contiene pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), en concentraciones cerca de 500 hasta 3,000 ppm o más, cantidad suficiente como para corroer los metales y dañar al equipo. Por esta razón, para una mejor obtención de hidrógeno debe de haber una etapa de tratamiento para la eliminación de este compuesto sulfurado, además para evitar el deterioro de la actividad catalítica en el proceso de reformado del gas. Y puesto que el metano se encuentra en una mezcla con dióxido de carbono mayoritariamente y en una minoría con otros compuestos ( $N_2$ ,  $NH_3$ ,  $CO$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ , hidrocarburos aromáticos y cíclicos, y algunos compuestos orgánicos volátiles) (Kiss Köfalusi & Encarnación Aguilar , 2006), éste se debe de purificar, antes de que pueda ser usado en el reformado de gas.

La corriente de metano ya limpia se hace reaccionar después en un reactor el cual tiene incorporado un catalizador de níquel, generando un gas de salida rico en hidrógeno pero que contiene una cierta proporción de monóxido de carbono, que a su vez es separado en otro reactor, o incluso en dos. El gas residual resultante tiene un contenido elevado de hidrógeno, así como cantidades considerables de dióxido de carbono y cantidades mucho más bajas de metano no convertido y monóxido de carbono remanente, usualmente en 1% en volumen. En las plantas modernas de producción de  $H_2$  se incorporan unidades de purificación mediante compresión/adsorción/desorción que permiten obtener como resultado hidrógeno muy puro (99.9% volumen).

**Figura 40.** Esquema general de la producción de hidrógeno a partir de biogás



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

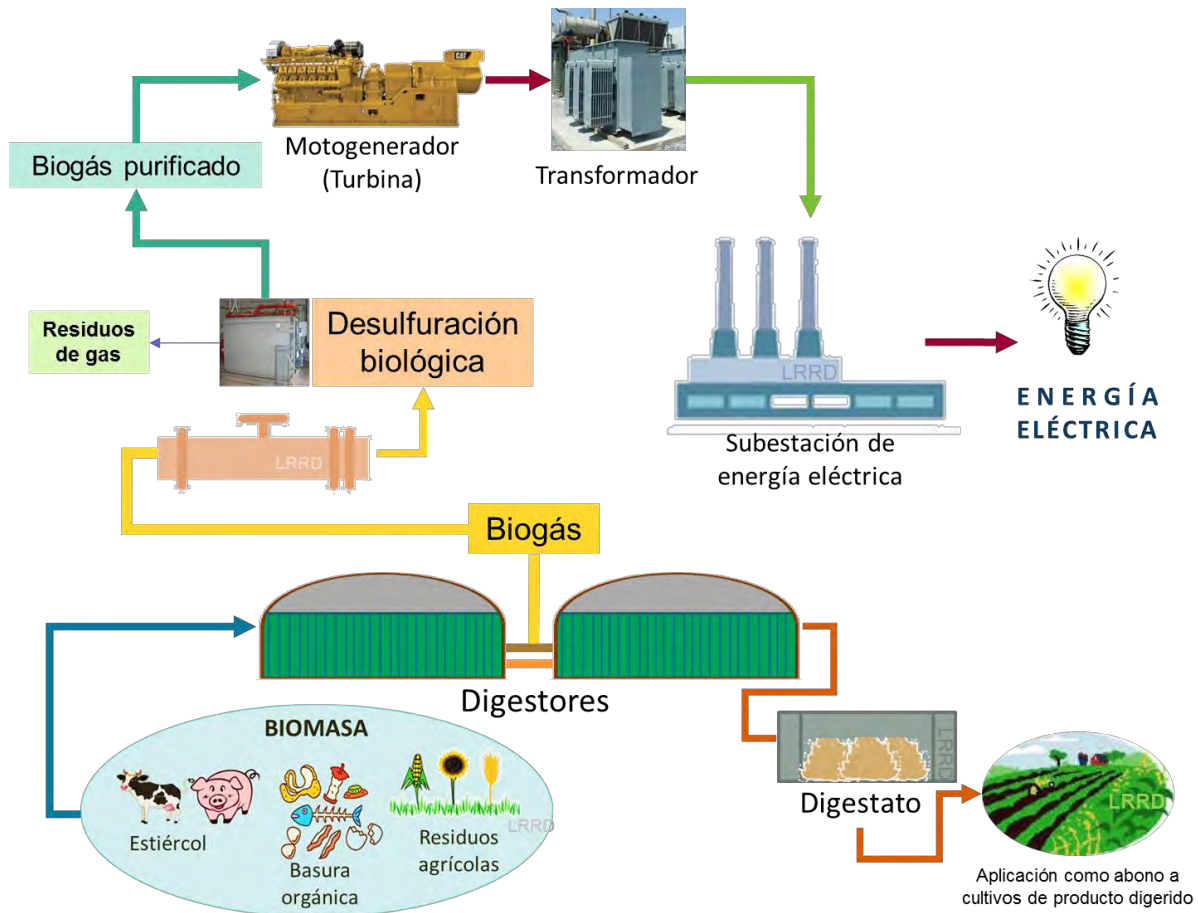
### 🌱 Generación de electricidad usando biogás como materia prima

Para construir una planta de generación de energía eléctrica a partir de biogás es necesario tener en cuenta la calidad y cantidad de biogás obtenido, los cuales dependen del tipo y las características de los residuos. Esta situación hace necesario determinar el tipo de residuos que se pretenden utilizar en la generación de biogás, que en esencia pueden ser desperdicios agrícolas de la región, flujos de letrinas caseras, estiércol animal, residuos domiciliarios, etc. También es necesario evaluar la ubicación geográfica de la zona y el clima, ya que de ello depende la eficiencia y rapidez de producción de biogás.

La construcción de plantas de generación de biogás tienen un impacto socioeconómico favorable, ya que al utilizar desechos orgánicos disminuye la cantidad de basura y factores contaminantes que afectan a la atmósfera, la

población y saturan el suelo con desechos agrícolas; al mismo tiempo que se genera un beneficio económico por utilizar un combustible que sustituye el uso de GLP.

**Figura 41.** Proceso de Generación de Energía Eléctrica a partir de biogás



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Durante el proceso de biogeneración de electricidad, los residuos sólidos son captados en un biodigestor, en donde los residuos son sometidos a ausencia de oxígeno. Sin la presencia de oxígeno, las bacterias que degradan los residuos orgánicos producen principalmente metano; cuando el ambiente del biodigestor contiene oxígeno, dichas bacterias generan mayoritariamente CO<sub>2</sub>, el cual es anticomburente.

Posteriormente, se obtiene biogás el cual es el combustible que será capaz de generar la energía eléctrica. Según su composición, el biogás debe ser desulfurado



mediante trampas sencillas de sulfuros o bien con equipos más sofisticados tales como un desulfurizador externo. De esta forma se puede aprovechar eficazmente las características del metano como combustible. Enseguida, el biogás es introducido a una turbina de generación de energía para llevar a cabo un proceso de combustión a lo cual se le denomina alimentación de turbina y, finalmente, se transforma en energía eléctrica para posteriormente llevarla al usuario final.

### 3. Ubicación de la biorrefinería

El lugar en que se decidió va a residir la biorrefinería es el Estado de Chiapas, pues no cuenta con muchas industrias, comparándolo con el norte del país, y por ende lo hace una buena opción para albergar a la primera biorrefinería en el país.

**Figura 42.** Localización geográfica del Estado de Chiapas, México



Pero este Estado no sólo se le eligió al azar, la ubicación de la planta fue determinada teniendo en cuenta múltiples factores, como la cercanía de empresas, para este caso las aerolíneas, que puedan comprar el producto o de las que se pueda abastecer la materia prima, la dificultad de transporte de dichas sustancias,



disponibilidad de mano de obra, poblaciones cercanas, disposición de los residuos industriales, impactos ambientales, economía de la región, clima, entre otros.

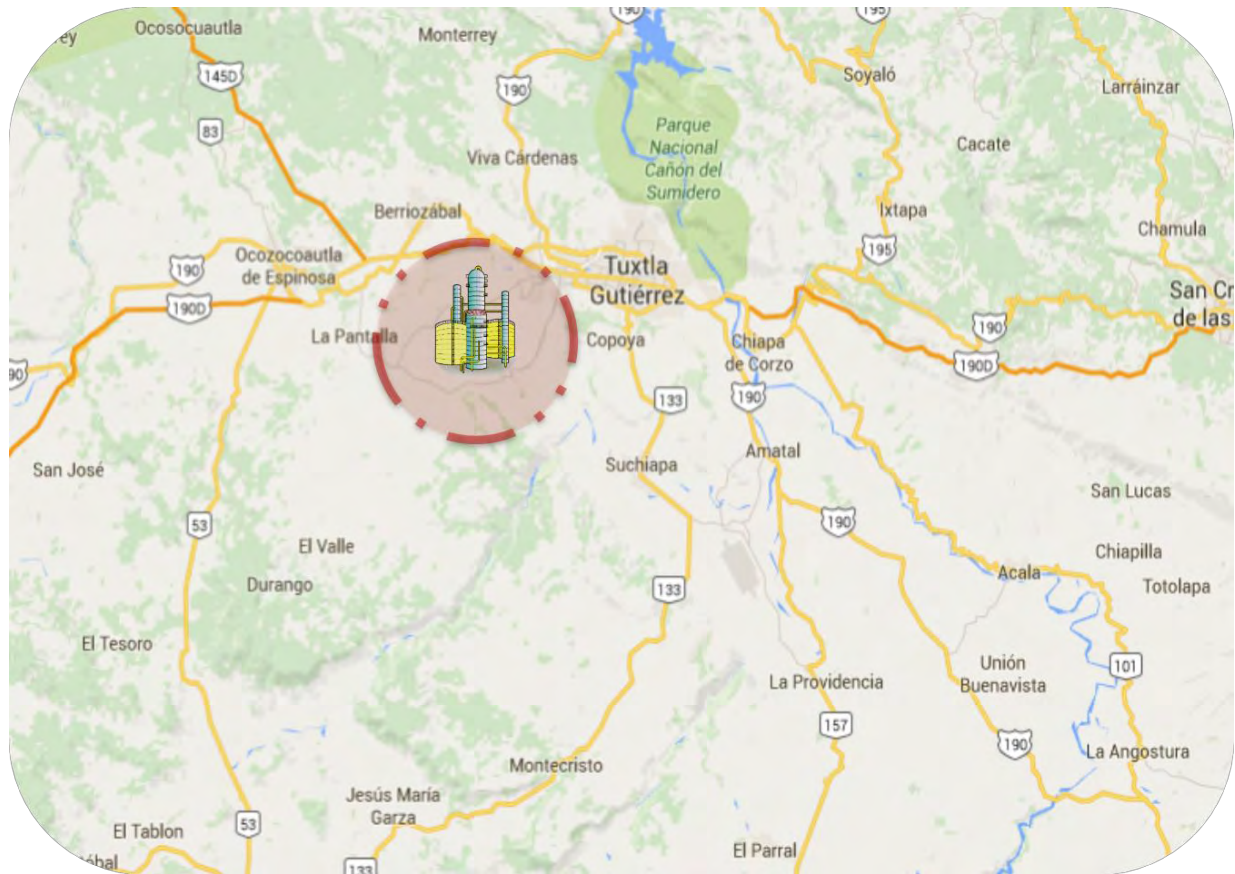
Dos de los factores que más influyeron en esta decisión fueron la disponibilidad de agua, ya que todo el proceso necesita de grandes cantidades de agua para enfriamiento y calentamiento en forma de vapor, y el abastecimiento suficiente de materia prima para cubrir la demanda de combustible en los aeropuertos cercanos.

Para la selección de la localización de la biorrefinería también se utilizaron factores de exclusión para eliminar áreas inviables. Los detalles del sitio con respecto a los factores fueron mapeados y superpuestos sobre un mapa de la región. **Estos factores se combinaron con otros para identificar ciertas ubicaciones como "áreas delicadas" como son las zonas costeras, planicies de inundación, vías de comunicación, asentamientos irregulares, etc.** Así mismo se identificaron otros factores de exclusión, entre los que destacan las zonas de alto riesgo sísmico, parques nacionales o zonas protegidas, zonas de minería superficial o subterránea, zonas de alto riesgo por inundación marítima, manglares, acuíferos y zonas altamente productivas.

La zona en donde se decidió poner la biorrefinería en base al mapeo realizado y al factor de riesgos naturales, clima, zonas colindantes para el abastecimiento de agua y de materia prima a la biorrefinería, se optó por ubicarla entre el sur del municipio de Ocozacoautla de Espinoza, el municipio de Berriozábal y la capital, Tuxtla Gutiérrez.



**Figura 43.** Posible localización de la primera biorrefinería en el Estado de Chiapas, México



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE GOOGLE MAPS

Unos de los motivos por los que se decidió poner la biorrefinería en esta zona son:

- ◆ Gran cercanía que hay tanto de los plantíos de las materias primas de segunda generación a los alrededores, así como de plantas extractoras de aceites.
- ◆ Extensa área no agrícola, no destinada para ganadería y sin población cercana en una circunferencia de 15 km.
- ◆ Su grado de sismicidad es B y C, es decir, los sismos no ocurren tan frecuentemente o bien son zonas que no se ven afectadas por altas aceleraciones que no superan el 70% de la aceleración del suelo.
- ◆ Nula interferencia con las zonas de conservación del medio ambiente, tanto en las Áreas Naturales Protegidas (ANP), en zonas con vegetación densa, zonas de conservación de la biodiversidad, así como de manglares.



- Ubicación cercana a dos plantas hidroeléctricas, para el suministro de energía eléctrica a la biorrefinería, en caso de falla o falta de suministro de energía eléctrica por sistema de biodigestión, a la planta y una represa en operación.
- No hay interferencia con los yacimientos de hidrocarburos y con los municipios que poseen pozos petroleros activos, y geográficamente si no estuvieran dichas zonas serían una excelente opción para la ubicación de la biorrefinería ya que en esas zonas la actividad sísmica es nula.
- La localización está cerca de las carreteras principales, haciendo que la planta sea accesible con facilidad (la planta se encuentra a menos de 2 km de una carretera principal). No es conveniente que una planta química esté demasiado cercana a una carretera principal pues, en caso de accidente grave, puede que los efectos adversos (fuego, fuga de compuesto tóxico, etc.) se dirijan a la carretera principal, por donde circula gran cantidad de vehículos, provocando riesgos a una gran cantidad de población. La planta poseerá una carretera propia que se conectará a la red principal de carreteras.
- La zona escogida está alejada lo suficiente de los núcleos de población. Esta causa es una de las más importantes en cuanto a la elección de la localización. El municipio de Tuxtla Gutiérrez es una región densamente poblada, además existen otros núcleos urbanos cercanos unos de otros. La distancia al núcleo de población más cercano es no mayor a 2.5 km (distancia sugerida para prevenir riesgos).
- Ubicación dentro de una zona donde los sismos no ocurren tan frecuentemente, pero no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo, con respecto a la zona costera, que es en donde ocurren con mayor frecuencia los sismos. No se eligió una zona donde la sismicidad fuera nula, debido a que en esa zona del estado se encuentran zonas naturales protegidas, no hay vías de fácil acceso, y además hay una alta actividad minera y petrolífera.
- Ubicación fuera de zonas geológicas con estructuras y actividad volcánica que puedan constituir un riesgo para las instalaciones de la biorrefinería; así como



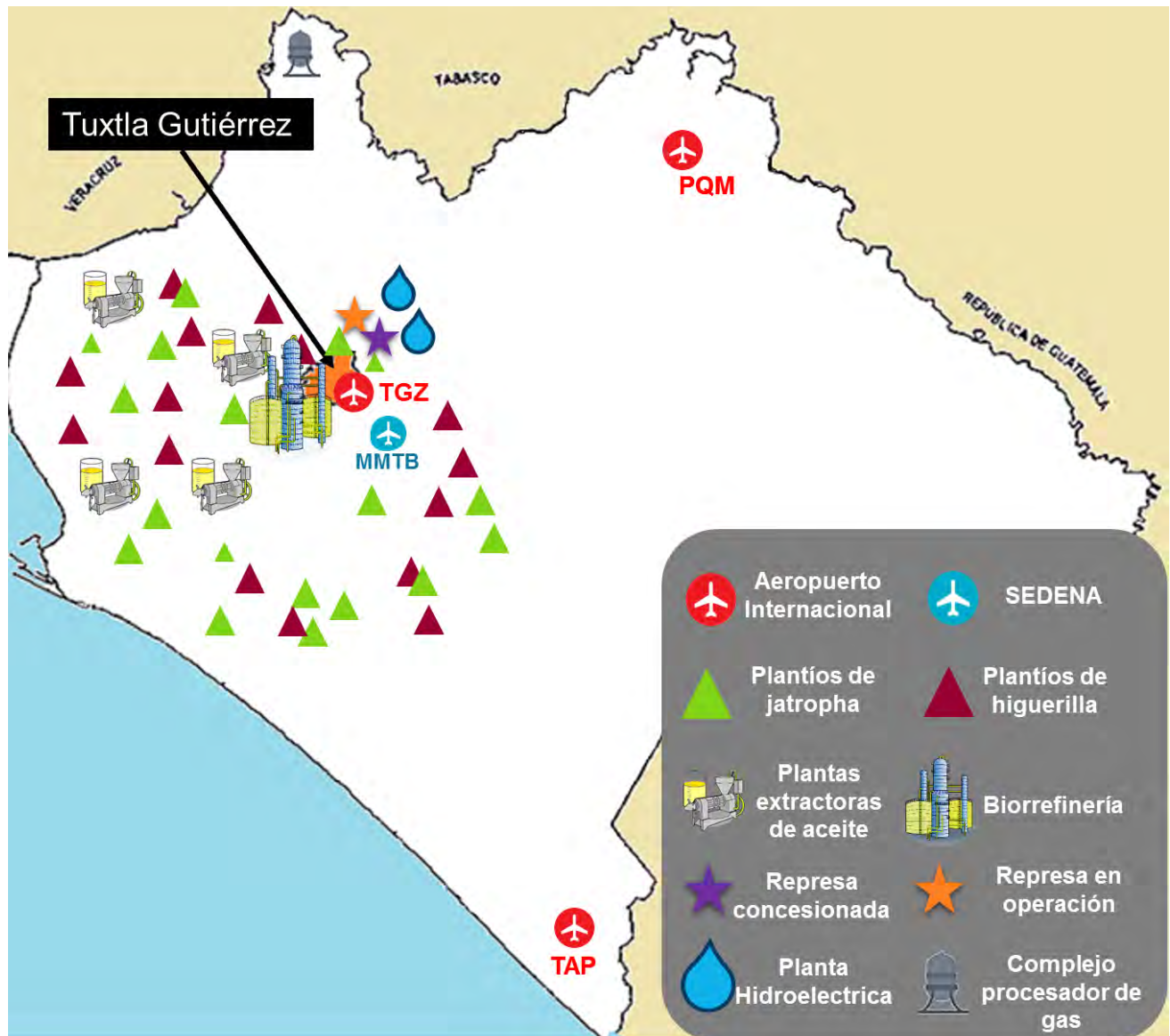
de zonas de fallamiento activo, el cual se refiere a un desplazamiento o ruptura superficial del terreno debido a un movimiento a lo largo de una falla durante un terremoto. La mayor zona vulnerable a este tipo de fallas es la zona noroeste del Estado.

- ◆ Cercanía de dos aeropuertos dentro del mismo Estado: el ***Aeropuerto Internacional de Tuxtla Gutiérrez*** (Aeropuerto Internacional Ángel Albino Corzo), localizado en el municipio de Chiapa de Corzo, el cual maneja el tráfico aéreo nacional e internacional de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez y del centro del Estado; la ***Base Aérea Militar No. 6 Gral. de Div. P.A. Ángel H. Corzo Molina (Aeropuerto Nacional Gral. de Div. P.A. Ángel H. Corzo Molina)*** más conocida como ***Antiguo Aeropuerto Francisco Sarabia o Aeropuerto de Terán***, está localizado al sur-poniente de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, actualmente se encuentra cerrado a la aviación comercial civil y funciona únicamente como Base Aérea de la Secretaría de la Defensa Nacional. Pero la biorrefinería también puede suministrar combustible a los otros aeropuertos, el Aeropuerto Internacional de Tapachula, cerca de la Frontera entre Guatemala y México, y es el aeropuerto más meridional de México, se ocupa del tráfico aéreo nacional e internacional de la ciudad de Tapachula y Puerto Chiapas; y el Aeropuerto Internacional de Palenque, es un aeropuerto localizado a 5 kilómetros de la ciudad de Palenque, y es operado por el Grupo Aeroportuario de Chiapas, una corporación estatal. Y en un futuro incluso también podría suministrar biocombustible al Aeropuerto Internacional Carlos Rovirosa Pérez (Villahermosa, Tabasco), al Aeropuerto Internacional de Ciudad del Carmen (Campeche), al Aeropuerto Internacional de Bahías de Huatulco (Oaxaca), el Aeropuerto Internacional de Oaxaca y el Aeropuerto Internacional de Minatitlán (Cosoleacaque, Veracruz).
- ◆ Ubicación de una estación de almacenamiento de gas natural y diesel (PEMEX): el servicio de gas servirá para la producción de hidrógeno por el método de reformación de gas natural, ya que si se transporta el hidrógeno directamente

a la planta será un poco más caro y peligroso de transportarlo por largas distancias hasta la biorrefinería.

Haciendo una compilación de todos los aspectos considerados para definir la ubicación de la biorrefinería en México, la localización quedaría de la siguiente manera:

**Figura 44.** Localización de la primera biorrefinería en México, insumos, plantas extractoras de aceites y servicios



FUENTE. ELABORACIÓN PROPIA



La localización de la planta en la región anteriormente citada tiene una serie de ventajas adicionales que se comentarán a continuación.

- 💧 **Terreno.** El terreno del que dispone la planta a su alrededor es extenso, y ante necesidades de la planta, esto posibilita el realizar ampliaciones de ésta en terrenos anexos mediante su compra previa.
- 💧 **Clima.** El clima imperante en la zona es bastante benévolo, denominándose a este ambiente clima cálido subhúmedo. Este clima está caracterizado por inviernos templados y veranos calurosos, y precipitaciones no muy elevadas y sólo en verano. Por ello, no existen grandes inconvenientes climáticos en la ubicación de la planta.
- 💧 **Industrias anexas.** En toda la comarca casi no existen múltiples industrias, pero sí las hay (*Coca-Cola FEMSA* y *Nestlé Company*). Chiapas es una comarca no muy industrializada, pero con las existentes pueden surgir una serie de ventajas como son la colaboración entre plantas en materia de seguridad, o bien con personal familiarizado en el tema industrial.
- 💧 **Servicios auxiliares.** Existiendo una oferta de servicios muy alta y bien comunicados, existe una extraordinaria red de agua, una red eléctrica bien organizada (nótese que en la comarca, concretamente en el municipio de Osumacinta, existe una Central Hidroeléctrica), gasoductos, oleoductos, etc. Todo ello facilita enormemente el transporte de agua, electricidad y materias primas a la planta.

- **CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA**

En el presente apartado se expondrán, de manera concisa, las características más importantes de la región.

- 💧 **Temperatura.** La temperatura media anual de la zona es de 25.4°C, la cual es idónea para la actividad industrial. Existen muchas horas de sol al día, lo que posibilita la instalación de paneles solares para autoabastecer energéticamente a la planta.
- 💧 **Precipitaciones.** Las precipitaciones en la región son ligeramente elevadas. El valor promedio es de 990 milímetros (INEGI, 2015).





- 🌿 **Vientos.** Los vientos predominantes en la comarca son el viento de levante (viento cálido del este, algo húmedo y que actúa de forma inconstante). La velocidad máxima alcanzada por el viento en la región es de 180 km/h, pero no suele superar habitualmente velocidades mayores a 50 km/h.
- 🌿 **Suelo.** El tipo de suelo de la región se caracteriza por ser duro, ya que está formado principalmente de piedra, es decir, es un suelo del tipo litosol. Este tipo de suelo se caracteriza por encontrarse a una profundidad menor a 1 m, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido. Esto lo hace una excelente opción para ubicar la planta en esta zona, ya que al ser un tipo de suelo duro, la construcción de la cimentación de la planta será de una excelente resistencia.

**Figura 45.** Zona de localización geográfica para la primera biorrefinería en México, Estado de Chiapas



FUENTE. ELABORACIÓN PROPIA HACIENDO USO DE LA HERRAMIENTA GOOGLE MAPS



## II. REQUERIMIENTOS ECONÓMICOS

El propósito para determinar la economía de la producción del biocombustible de aviación, es demostrar los requisitos de proceso necesarios para alcanzar los objetivos específicos y demostrar cómo el camino de la tecnología descrito aquí es capaz de alcanzar tales metas por sus propios méritos y, si no se puede, dar a los interesados una idea de la magnitud del incentivo necesario para hacerlo así (NREL, 2014).

### 1. Estimación de costos de inversión

Para estimar los costes de inversión de capital, conviene hacer primero la división **“onsite / offsite<sup>23</sup>”**, es decir, una separación delimitada por los **“límites de batería”** o BL. La primera división se refiere estrictamente al equipamiento requerido para fabricar el producto deseado y la segunda, a aquellos otros que pueden **considerarse “fuera” del proceso. Por ejemplo**, Redes de vapor y condensados, Parque eléctrico y transfos, Gas Natural y otros combustibles, Aire comprimido (soplado, instrumentación y limpieza), Almacenes y pañoles, Otros servicios (administrativos, cantinas, talleres, laboratorios, parkings, etc.), Protección contra incendios, Vías, carreteras, muelles y puertos, Muelles de carga y de expedición de productos, Pretratamientos de primeras materias, Off-gas y antorchas, Segregación y Tratamiento de aguas residuales, Tratamiento ó vertido de residuos.

El Costo de Inversión en Capital Fijo (FCI) está compuesto de los siguientes costos: Inversión en el Interior del Límites de la Batería situados (ISBL<sup>24</sup>) que constituye el costo de inversión de la propia planta; Inversión Fuera del Límite de Batería (OSBL<sup>25</sup>), que constituye el costo de inversión en infraestructura del sitio y facilidades; costos de la Ingeniería y Construcción; y Gastos de contingencia.

---

<sup>23</sup> Offsites designa a todo equipo e instalaciones fuera del límite de baterías, no incluye los servicios (*utilities*).

<sup>24</sup> ISBL son las siglas en inglés de Inside Battery Limits.

<sup>25</sup> OSBL son las siglas en inglés de Outside Battery Limits.



### 🌿 **Adaptación de la referencia a la capacidad Actual**

La metodología general para el cálculo de costos de las unidades ha consistido en la búsqueda de costos de equipos semejantes ya implantados en otros campos industriales, o bien el uso de estudios que han servido para estimar los costos a partir de modelos o extrapolaciones.

En general, el procedimiento seguido para hacer el cambio de escala de tamaño cuando los datos disponibles han estado referidos a equipos de distinta magnitud **a la manejada en este proyecto, ha sido el empleo de la regla "Rule of six-tenth"**<sup>26</sup>. Dicha regla consiste en el empleo de la **Ecuación 1** para la aproximación de costos, es decir, el costo de inversión puede obtenerse si se cuenta con el costo real de un equipo similar de diferente capacidad o tamaño conocido (volumen, superficie, potencia calorífica, etc., según sea el caso) (Randall W. Whitesides, 2012).

**Rule of six-tenth**, ha sido denominada como la Regla de Oro, ya que se muestran resultados muy satisfactorios cuando sólo se requiere saber un costo aproximado de más o menos 20% (Wright, 2003):

$$C_2 = C_1 \times \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^f \dots\dots\dots \text{Ecuación 1}$$

donde:

$C_1$  = Costo del equipo o recurso de capacidad 1

$C_2$  = Costo del equipo o recurso de capacidad 2

$Q_1$  = Capacidad del equipo o recurso 1

$Q_2$  = Capacidad del equipo o recurso 2

**$f$  = Exponente o factor** de correlación. Cuando no se dispone de mejor información, se puede usar un exponente  **$f = 0.6$** , de aquí el nombre de la regla:

$$6/10 = 0.6$$

Por lo que la Ecuación 1 quedaría de la siguiente forma:

---

<sup>26</sup> Índice de Williams. Regla de los seis décimos (**Six tenth factor rule**) (Márquez & López, s.f.)





$$Costo_{nuevo} = Costo_{referencia} \times \left( \frac{Tamaño_{nuevo}}{Tamaño_{referencia}} \right)^{0.6} \dots \dots \dots Ecuación 1.1.$$

### 🔹 Efecto del tiempo en la estimación de los costos de los equipos

Los datos obtenidos de la bibliografía están referidos al precio de la moneda en un año determinado. Es necesario tener en cuenta el incremento generalizado que los bienes y servicios sufren con el paso del tiempo. Este fenómeno queda recogido bajo la incorporación de la inflación en el estudio.

Los índices que se han tenido en cuenta para estimar la inflación han sido los Costos de Plantas de Ingeniería Química, mejor conocido como CEPCI (*Chemical Engineering Plant Cost Index*). Estos valores (véase la Tabla 16) serán aplicados al costo de inversión de capital para obtener el costo actual de los equipos.

**Tabla 15.** Chemical Engineering Plant Cost Index 2011 a 2016

Año	Índice CEPCI
2011	585.7
2012	584.6
2013	567.3
2014	576.1
2015	556.8
2016	555.9 <sup>27</sup>

FUENTE: (CEPCI, 2016)

Con los valores de la tabla anterior, es necesario actualizar los costos obtenidos de años anteriores. La siguiente ecuación indica la forma de llevarlo a cabo, siendo el **Año Y** el año de partida o bien de referencia, y el Año X el año en el que deseamos conocer el valor, para este caso, el año 2016.

$$Costo_{AñoX} = Costo_{AñoY} \times \left( \frac{CEPCI_{AñoX}}{CEPCI_{AñoY}} \right) \dots \dots \dots Ecuación 2$$

<sup>27</sup> Valor extrapolado con respecto a los valores anteriores



Una vez que el costo total del equipo se ha determinado en el año de interés, se deben de agregar otros costos directos e indirectos para determinar la Inversión de Capital Total (TCI). Los costos de desarrollo del sitio y de almacén se basan en los costos de los equipos dentro de la batería (ISBL) y se consideran parte del Costo Directo Total (CDT).

La contingencia del proyecto, los gastos de campo, las actividades de ingeniería y construcción y otros costos relacionados con la construcción se calculan en relación con el CDT y se suma la Inversión de Capital Fijo (FCI).

Los factores de costo aplicados en la estimación de FCI se basan en el incremento de la economía internacional, particularmente para elementos menos prescriptivos como el factor de contingencia del proyecto. La suma de FCI y el capital de trabajo para el proyecto es la TCI. La siguiente tabla resume estas categorías y factores adicionales (NREL, 2014).

**Tabla 16.** Costos Adicionales para Determinar la Inversión Total de Capital (TCI)

Ítem	Descripción	Cantidad
<b>Costos Directos Adicionales</b>		
Almacenes	Almacenamiento <i>On-site</i> de equipos y suministros.	4% del costo instalado de los equipos ISBL
Desarrollo del sitio	Incluye esgrima, frenado, estacionamiento, carreteras, drenaje de pozos, sistema ferroviario, perforaciones de suelo y pavimentación en general. Este factor permite un desarrollo mínimo del sitio asumiendo un sitio claro sin problemas inusuales como el <i>right-of-way</i> , la limpieza de tierras difíciles o problemas ambientales inusuales.	9% de ISBL
Tubería adicional	Para conectar el equipo ISBL al almacenamiento y las utilidades fuera de los límites de la batería	4.5% de ISBL



<b>Costos Indirectos</b>		
<i>Prorateable costs</i>	Esto incluye los beneficios adicionales, las cargas y los seguros del contratista de la construcción.	10% del costo total directo (TDC)
<i>Field expenses</i>	Consumibles, alquiler de herramientas y equipos pequeños, servicios de campo, instalaciones de construcción temporal y supervisión de construcción de campo.	10% de TDC
<i>Home office and construction</i>	Ingeniería, más gastos adicionales, compras y construcción.	20% de TDC
Contingencia del proyecto	Dinero adicional disponible para problemas imprevistos durante la construcción	10% de TDC
Otros costos	Costos de arranque y puesta en marcha; Tierras, derechos de paso, permisos, encuestas y tarifas; Pilotes, compactación / deshidratación del suelo y fundaciones inusuales; Ventas, uso y otros impuestos; Flete, seguro en tránsito y derechos de importación sobre equipos, tuberías, aceros e instrumentación; Pago de horas extras durante la construcción; Seguro de campo; equipo de proyecto; Equipos de transporte, contenedores de carga a granel y vehículos de plantas.	10% d TDC

FUENTE: (NREL, 2014)

### 1.1. Costos de Capital

En esta etapa de definición, el estimado de costo de inversión para la primera biorrefinería se considera de Clase V, es decir, un estimado de inversión correspondiente a una etapa conceptual, en donde la información disponible está limitada al tipo de planta, capacidad, configuración del lugar, localización y requerimientos especiales. Su propósito fundamental es evaluar una o varias alternativas para determinar si el proyecto es técnica y económicamente atractivo y, de ser así, continuar con su fase de desarrollo. Por su parte, la **American**



**Association of Cost Estimators** (AACE, siglas de la Asociación Estadounidense de Estimadores de Costos) define que este tipo de estimado tiene una precisión de entre -30% y +50%. Para incrementar la precisión del estimado, se deberán realizar estudios de preinversión e ingeniería básica.

Para obtener el costo actual de inversión, se obtuvieron costos reales de plantas similares de diferente capacidad y/o tamaño conocido, se utilizó la ecuación 1.1 y 2, así mismo se utilizaron los índices CEPCI para estimar la inflación de los equipos.

La cantidad de procesamiento de aceite para la nueva biorrefinería se determinó que sería de 3000 BPD<sup>28</sup>, ya que haciendo un análisis, sería la cantidad óptima y necesaria para poder cubrir casi un 10% anual (en una mezcla del 10/90 en volumen, es decir, 10% de bio kps y el 90% de combustible fósil) de la demanda de combustible de aviación de los 20 aeropuertos ubicados en la zona suroeste del país<sup>29</sup> (aproximadamente 1,094,669,890 litros de turbosina). Esta cantidad pareciese muy pequeña respecto a la demanda anual total de combustible fósil de aviación en esta zona del país, pero para la industria de la aviación, se estima que para tener un mercado viable de combustible de fuentes biológicas, es necesario cubrir el 1% de la demanda (ASA, 2010).

Bajo estas consideraciones, el costo total del proyecto considerando ambas propuestas de mejora, la generación de electricidad y producción de hidrógeno, utilizando como materia prima biogás generado a partir de biomasa; la inversión de Capital Total Productiva (TCI) sería de \$ 477,256,373 USD -30%/+50% aproximadamente.

---

<sup>28</sup> BPD = barriles por día. Un barril equivale a 42 gal o a 159 L.

<sup>29</sup> Zona conformada por los estados de Puebla, Oaxaca, Veracruz, Guerrero, Chiapas, Tabasco, Yucatán, Campeche y Quintana Roo (INIFAP, 2013)

**Tabla 17.** Estimación de costos para una biorrefinería sustentable en México

	CAPACIDAD	INVERSIÓN	
Planta de Hidroprocesamiento	3000 BPD	\$108,917,977	USD
Planta de Biogás	5,000,000 m <sup>3</sup> /día	\$ 1,427,748	USD
Planta de Hidrógeno	20 mbd	\$ 46,473,679	USD
<b>TOTAL ISBL</b>		<b>\$ 156,819,404</b>	<b>USD</b>
Planta generadora de Electricidad con Biogás	5,000 MW/día	\$ 95,595	USD
Tratamiento de agua	5,000,000 m <sup>3</sup> /día	\$ 754,204	USD
TeleCom (plantas)		\$ 2,852,822	USD
Servicios Auxiliares (14% ISBL)		\$ 21,954,717	USD
Integración OSBL (20% (ISBL + Servicios Aux.))		\$ 35,754,824	USD
Acondicionamiento de sitio (7% ISBL)		\$ 10,977,358	USD
Infraestructura		\$ 11,416,453	USD
<b>SUBTOTAL OSBL</b>		<b>\$ 83,805,973</b>	<b>USD</b>
<b>TOTAL ISBL+OSBL</b>		<b>\$ 240,625,377</b>	<b>USD</b>
Almacenes		\$ 9,625,015	USD
Desarrollo del sitio		\$ 21,656,284	USD
Tubería adicional		\$ 10,828,142	USD
<b>Total Costos Directos (TCD)</b>		<b>\$ 282,734,818</b>	<b>USD</b>
<i>Prorateable expenses</i>		\$ 28,273,482	USD
<i>Field expenses</i>		\$ 28,273,482	USD
Oficina-cuota de Construcción		\$ 56,546,964	USD
Contingencia		\$ 28,273,482	USD
Otros costos		\$ 28,273,482	USD
<b>Total Costos Indirectos (TCI)</b>		<b>\$ 169,640,891</b>	<b>USD</b>
<b>Inversión de capital fijo (FCI)</b>		<b>\$ 452,375,709</b>	<b>USD</b>
Land (terreno)		\$ 2,261,879	USD
Working capital (5% of FCI)		\$ 22,618,785	USD
<b>INVERSIÓN DE CAPITAL TOTAL (TCI)</b>		<b>\$ 477,256,373</b>	<b>USD</b>



## 1.2. Costos operativos

El cálculo de costos operativos se realizó siguiendo la metodología expuesta por Turton, la cual se fundamenta en la relación que existe entre la inversión de capital fija (FCI), el costo de materias primas, el costo de servicios industriales y el costo de mano de obra.

El precio de las materias primas se calculó como un valor promedio de los reportados en medios electrónicos y artículos citados en la bibliografía.

**Tabla 18.** Costos Operativos anuales

EGRESOS		
Aceite Vegetal (\$17MNX / litro de aceite)	\$	144,368,151 USD
Personal (Mano de obra)	\$	496,921 USD
Supervisión	\$	74,538 USD
Servicios Generales (agua y vapor de calentamiento)	\$	59,536,049 USD
Mantenimiento y reparación	\$	40,713,814 USD
Suministro de operación	\$	6,107,072 USD
Gasto de Laboratorio	\$	4,538 USD
Seguros	\$	4,523,757 USD
Impuestos Locales	\$	6,903,870 USD
Gastos Generales de la Planta	\$	2,477,116 USD
<b>Total</b>	<b>\$</b>	<b>190,907,676 USD</b>

## 1.3. Flujo de caja

Tomando como ejemplo las evaluaciones financieras desarrolladas por la IATA para la construcción de una biorrefinería, de manera simple se muestra que la construcción de un modelo financiero va a depender de si su Valor Presente Neto (VPN) es siempre positivo, y además éste se ve afectado por pequeños cambios en los supuestos de entrada. Así mismo, se pone en relieve el cómo puede influir de manera positiva en un proyecto la política para que éste pueda ser viable financieramente (IATA, 2014).

Dicho modelo fue desarrollado para:



- ◆ Un flujo de alimentación de aceite de 3000 BPD, flujo con el cual es posible suministrar cerca del 10% en mezcla de todo el consumo total anual de los 20 aeropuertos que se encuentran en el sureste de México.
- ◆ Tiempo de vida del proyecto de 20 años.
- ◆ Una tasa de inflación del 3%; en México la tasa de inflación se encuentra oscilante entre el 2-3%, de acuerdo al Banco de México.
- ◆ Una Tasa Social de Descuento del 10% (Anteriormente la tasa era del 12%, pero debido a la caída de las tasas de interés de ahorro interno y externo en México y con el fin de contribuir de manera significativa con el propósito del Gobierno Federal para fomentar la inversión pública en México, se consideró recalcular dicha tasa (SHCP, 2014)).
- ◆ Una inversión de \$477, 256,373 USD.
- ◆ Costos Operativos anuales de \$190, 907,676 USD.

**Tabla 19.** Análisis de rentabilidad para una biorrefinería en México para la obtención de biocombustible sustentable de aviación

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Capital fijo de Inversión	-477,256,373										
Capital de trabajo	-22,618,785										
<b>Total de Ventas (Ingresos)</b>	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492
<b>Costos Anuales de Operación</b>											
Costos Variable	\$ 144,368,151	\$ 148,699,196	\$ 153,160,172	\$ 157,754,977	\$ 162,487,626	\$ 167,362,255	\$ 172,383,123	\$ 177,554,616	\$ 182,881,255	\$ 188,367,692	\$ 193,959,339
Costos Variables Fijo	\$ 190,907,676	\$ 196,634,907	\$ 202,533,954	\$ 208,609,972	\$ 214,868,272	\$ 221,314,320	\$ 227,953,749	\$ 234,792,362	\$ 241,836,133	\$ 249,091,217	\$ 256,448,304
<b>Total Egreso</b>	\$ 335,275,828	\$ 345,334,102	\$ 355,694,125	\$ 366,364,949	\$ 377,355,898	\$ 388,676,575	\$ 400,336,872	\$ 412,346,978	\$ 424,717,387	\$ 437,458,909	\$ 450,407,643
<b>Utilidad antes del Impuesto</b>	<b>-230,259,336</b>	<b>-240,317,610</b>	<b>-250,677,633</b>	<b>-261,348,457</b>	<b>-272,339,406</b>	<b>-283,660,083</b>	<b>-295,320,380</b>	<b>-307,330,486</b>	<b>-319,700,895</b>	<b>-332,442,417</b>	<b>-345,493,946</b>
Participación de trabajadores 15%	-34,538,900	-36,047,642	-37,601,645	-39,202,269	-40,850,911	-42,549,012	-44,298,057	-46,099,573	-47,955,134	-49,866,363	-51,827,592
Impuestos sobre la renta (ISR)	-57,564,834	-60,079,403	-62,669,408	-65,337,114	-68,084,851	-70,915,021	-73,830,095	-76,832,622	-79,925,224	-83,110,604	-86,387,984
Utilidad después del Impuesto	-138,155,601	-144,190,566	-150,406,580	-156,809,074	-163,403,643	-170,196,050	-177,192,228	-184,398,292	-191,820,537	-199,465,450	-207,326,360
Depreciación	\$16,052,203	\$16,052,203	\$16,052,203	\$16,052,203	\$16,052,203	\$16,052,203	\$16,052,203	\$16,052,203	\$16,052,203	\$16,052,203	\$16,052,203
<b>Flujo Neto de Efectivo</b>	<b>-499,875,158</b>	<b>-122,103,399</b>	<b>-128,138,364</b>	<b>-134,354,378</b>	<b>-140,756,872</b>	<b>-147,351,441</b>	<b>-154,143,847</b>	<b>-161,140,025</b>	<b>-168,346,089</b>	<b>-175,768,335</b>	<b>-183,413,248</b>

Año	0	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Capital fijo de Inversión	-477,256,373										
Capital de trabajo	-22,618,785										
<b>Total de Ventas (Ingresos)</b>	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492	\$ 105,016,492
<b>Costos Anuales de Operación</b>											
Costos Variable	\$ 194,018,723	\$ 199,839,285	\$ 205,834,463	\$ 212,009,497	\$ 218,369,782	\$ 224,920,876	\$ 231,668,502	\$ 238,618,557	\$ 245,777,114	\$ 253,150,427	\$ 260,748,790
Costos Variables Fijo	\$ 256,563,953	\$ 264,260,872	\$ 272,188,698	\$ 280,354,359	\$ 288,764,990	\$ 297,427,939	\$ 306,350,777	\$ 315,541,301	\$ 325,007,540	\$ 334,757,766	\$ 344,777,092
<b>Total Egreso</b>	\$ 450,582,676	\$ 464,100,157	\$ 478,023,161	\$ 492,363,856	\$ 507,134,772	\$ 522,348,815	\$ 538,019,279	\$ 554,159,858	\$ 570,784,653	\$ 587,908,193	\$ 605,525,882
<b>Utilidad antes del Impuesto</b>	<b>-345,566,184</b>	<b>-359,083,665</b>	<b>-373,006,669</b>	<b>-387,347,364</b>	<b>-402,118,280</b>	<b>-417,332,323</b>	<b>-433,002,787</b>	<b>-449,143,366</b>	<b>-465,768,162</b>	<b>-482,891,701</b>	<b>-500,624,390</b>
Participación de trabajadores 15%	-51,834,928	-53,862,550	-55,951,000	-58,102,105	-60,317,742	-62,599,848	-64,950,418	-67,371,505	-69,865,224	-72,433,755	-75,068,986
Impuestos sobre la renta (ISR)	-86,391,546	-89,770,916	-93,251,667	-96,836,841	-100,529,570	-104,333,081	-108,250,697	-112,285,841	-116,442,040	-120,722,925	-125,147,800
Utilidad después del Impuesto	-207,339,711	-215,450,199	-223,804,002	-232,408,418	-241,270,968	-250,399,394	-259,801,672	-269,486,019	-279,460,897	-289,735,021	-299,997,190
Depreciación	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
<b>Flujo Neto de Efectivo</b>	<b>-499,875,158</b>	<b>-207,339,711</b>	<b>-215,450,199</b>	<b>-223,804,002</b>	<b>-232,408,418</b>	<b>-241,270,968</b>	<b>-250,399,394</b>	<b>-259,801,672</b>	<b>-269,486,019</b>	<b>-279,460,897</b>	<b>-289,735,021</b>
<b>Tasa Social de descuento</b>	<b>10.00%</b>										
<b>VPN</b>	<b>-1,967,077,049.80</b>										
<b>TIR, Tasa Interna de Retorno</b>	<b>----</b>										
<b>Inflación</b>	<b>3%</b>										

\* Valores Reportados en dólares americanos (USD)

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Como se muestra en la tabla anterior, la rentabilidad de los procesos de producción de bio keroseno parafínico sintetizado de acuerdo a los valores presentados, se determina que la producción de este bioenergético no resulta factible puesto que el costo de producción es muy alto en comparación al precio de venta estipulado para cada uno los productos y por tanto no es una alternativa económicamente viable como sustituto parcial del combustible de aviación de origen fósil.





## 💧 ANÁLISIS DE RENTABILIDAD

Para determinar la rentabilidad o factibilidad del proyecto, éste se evaluó mediante su Valor Presente Neto (VPN), ya que es el método más conocido a la hora de evaluar proyectos de inversión a largo plazo. El VPN nos permitió determinar si una inversión cumple con el objetivo básico financiero: Maximizar la inversión.

Con respecto al flujo de caja mostrado en la tabla 19, se observa que el Flujo Neto de Efectivo al final de cada año es negativo, por lo que además se ha obtenido un Valor Presente Neto (VPN) de  $-\$1,967,077,049$  USD, lo que nos indica que la inversión inicial no se alcanza a recuperar durante el tiempo de vida estipulado para el proyecto. Por otra parte al no presentar utilidades al final de cada año, la Tasa interna de Retorno (TIR) no puede ser determinada.

Analizando los datos utilizados para llegar a la conclusión anterior, se determinó que los factores que juegan un papel clave en dicho análisis financiero son el Capital Fijo de Inversión, el costo de la materia prima, el costo de venta de los productos y los costos anuales de operación, estos últimos no pueden ser modificados ya que estos representan los gastos desde la fabricación hasta la colocación en el mercado del producto en cuestión.

El costo de venta para cada uno de los productos obtenidos (ver tabla 14), se determinó que sería el mismo respecto a los de origen fósil, esto con el fin de que el producto en cuestión, es decir, el bio kps sea accesible para las aerolíneas, aunque lo ideal es que su costo sea menor en comparación a los obtenidos a base de petróleo.

Mencionado lo anterior, y tomando como referencia los casos evaluados por la IATA para la instalación de una biorrefinería para la generación de biocombustible de aviación y que esta al final sea rentable (IATA, 2014), se tomó el caso de una



subvención<sup>30</sup>, esto con el fin de disminuir el impacto económico que genera el Capital Fijo de Inversión en el cálculo del Valor Presente Neto.

Para el monto de inversión inicial estimado (ver Tabla 17), se propone que la subvención para este proyecto sea del 50% del estimado inicial, es decir, un apoyo cerca de \$239 millones de USD. Recalculando el flujo de caja del proyecto con este monto, solo se ve afectado el valor VPN y la TIR nuevamente no puede ser determinada. El nuevo valor de VPN obtenido con esta subvención es de -\$1, 728, 448,863 USD. Comparando ambos valores de VPN del caso original, por llamarlo de alguna forma, y este hay una diferencia de \$238, 628,186USD dicha cantidad es considerable, pero no lo suficiente como para obtener un VPN positivo y considerar que el proyecto es rentable.

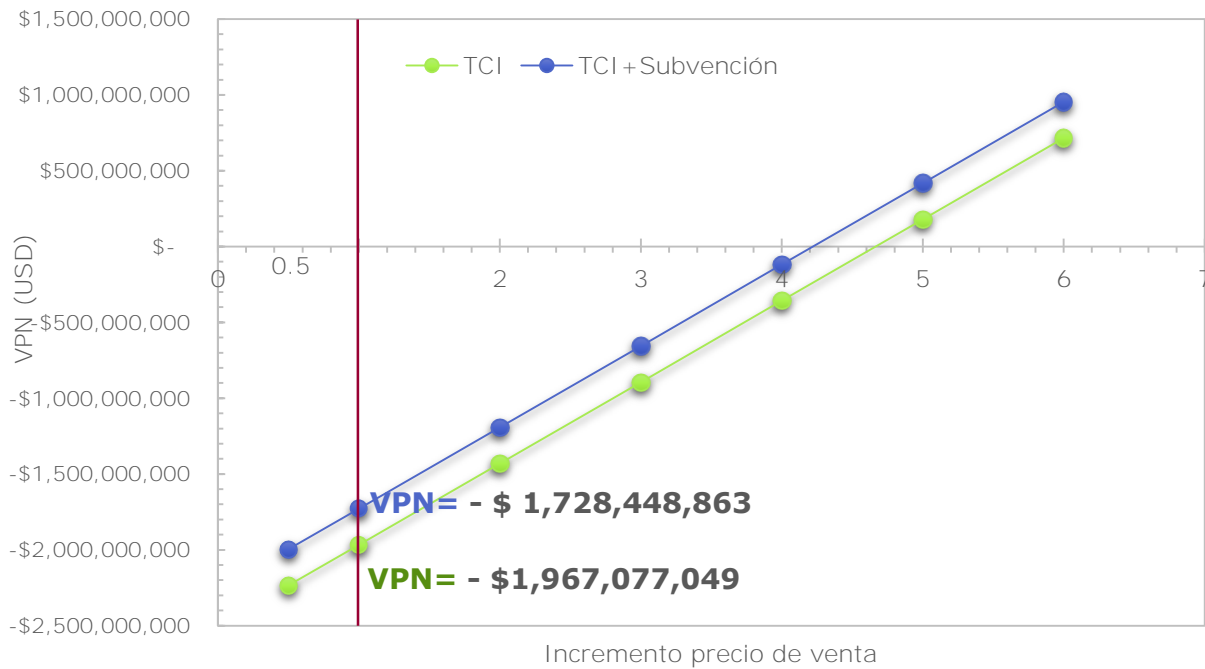
Una alternativa posible para lograr que el VPN sea mayor a cero, es incrementando el precio de venta de los productos, pero esta alternativa no es nada recomendable, ya que si el costo del bio kps es mayor al del combustible convencional de origen fósil, su adentramiento y posicionamiento en el mercado energético será más lento y complicado.

Para que el proyecto de una biorrefinería en México para la obtención de biocombustible de aviación sustentable, sea completamente rentable por ambas rutas (Caso original y caso con subvención) el precio de venta final del bio keroseno parafínico sintetizado tendría que ser entre 5 y 6 veces mayor al precio del combustible fósil para la aviación (\$10.13/litro de turbosina, (PEMEX, 2016)), y esto no es nada ventajoso para las aerolíneas que deseen utilizar este combustible renovable, ya que la compra del combustible representa entre un 30 y 35% del costo de sus operaciones.

---

<sup>30</sup> Cuando hay una contribución financiera de un gobierno o de cualquier organismo público en el territorio de un Miembro (Gobierno de la Republica, s.f).

**Figura 46.** Efecto del precio de venta de los productos con una subvención



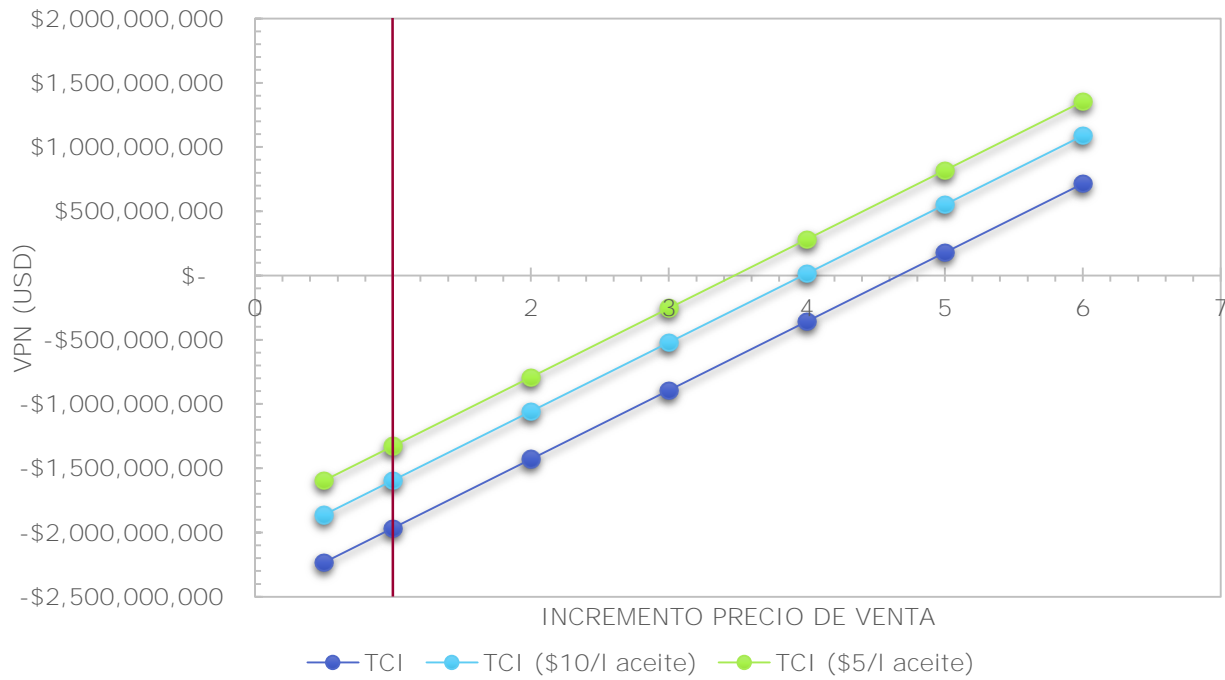
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Otro de los factores que afectan significativamente a los valores de VPN, fueron los costos de materia prima, aceite vegetal (jatropha), ya que su costo es relativamente elevado (\$17 MNX por litro) a pesar de que es un aceite de 2G, es decir, un aceite no destinado para consumo humano y lo que se espera con este aceite de 2G es que sea más barato en comparación con los aceites vegetales de 1G.

Pero aunque el precio del aceite vegetal disminuya, el precio de venta final del bio keroseno parafínico sintetizado seguirá siendo mayor en comparación al precio de la turbosina, de 4 a 5 veces mayor (ver Figura 47), y de igual forma se presentará la misma tendencia si el proyecto presenta una subvención (ver Figura 48).

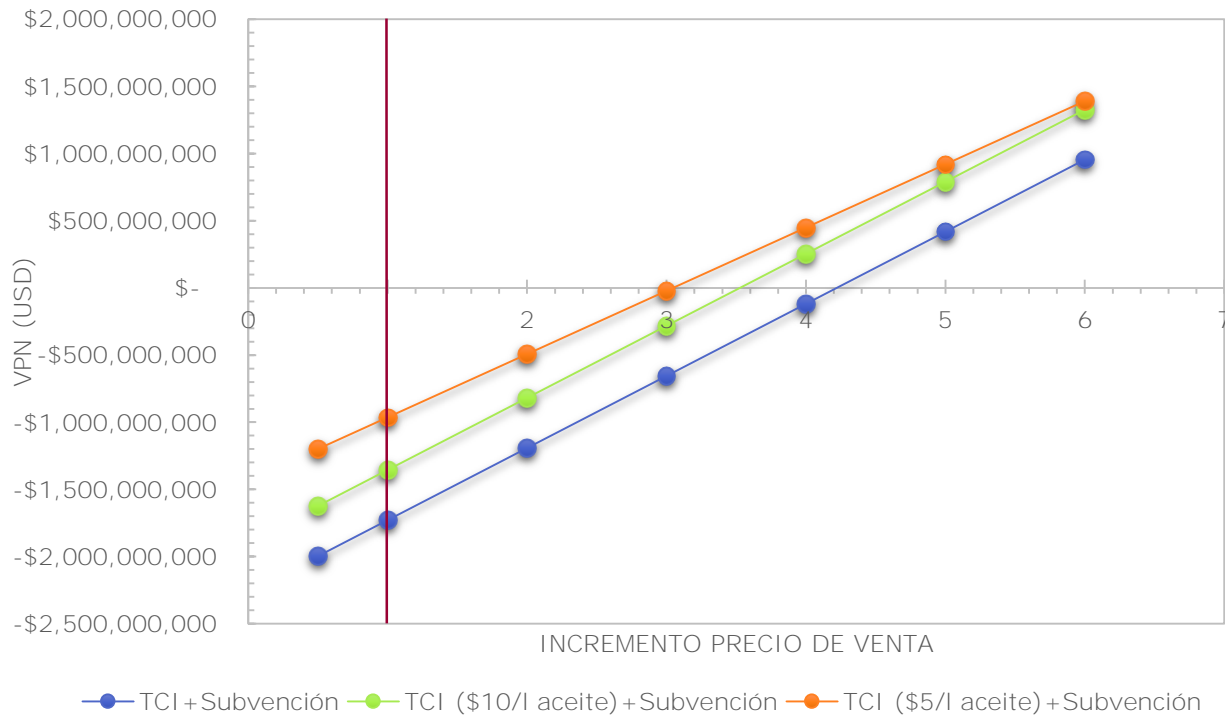


**Figura 47.** Efecto del precio de venta de los productos y costo de aceite vegetal



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

**Figura 48.** Efecto del precio de venta y costo de aceite vegetal (proyecto con subvención)



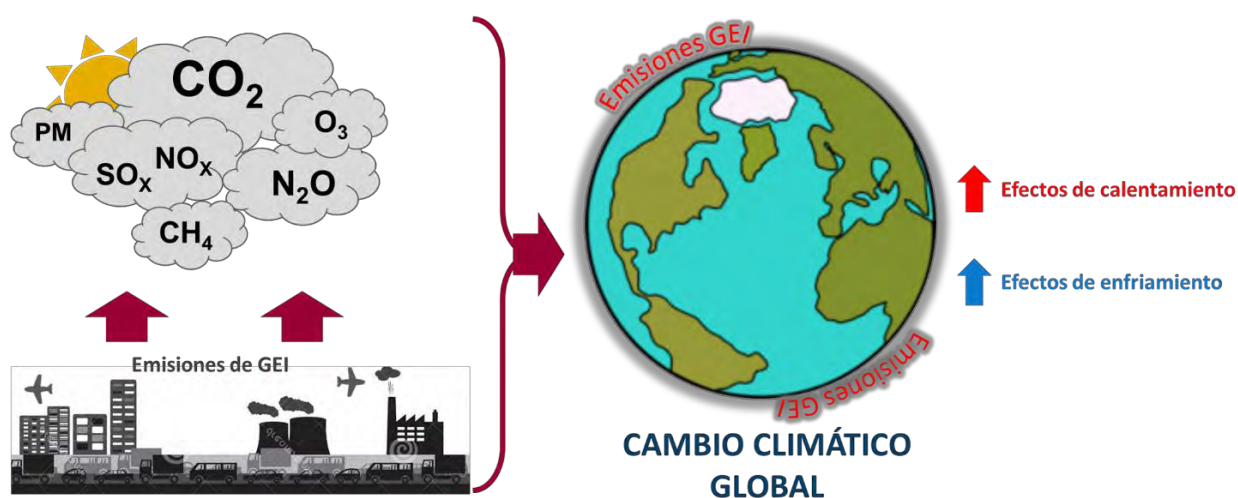
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

### III. REQUERIMIENTOS AMBIENTALES

#### 1. Impacto ambiental en la producción de biocombustibles

En general, la obtención de combustibles fósiles tiene un importante y complejo impacto ambiental. Este impacto se debe a que la combustión de estos compuestos genera gases como el  $\text{CO}_2$  e hidrocarburos residuales, que pueden ir a la atmósfera en estado gaseoso, impactando muy negativamente al medio ambiente generando una especie de bóveda opaca sobre la superficie terrestre, que opera produciendo lo que se conoce como efecto invernadero. Si continúa el incremento de estos gases de efecto invernadero en la atmósfera, se estima que la temperatura del planeta continuará aumentando con consecuencias climáticas negativas.

**Figura 49.** Impactos del Cambio Climático



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Desde hace algunos años se ha estudiado que los biocombustibles pueden contribuir a la reducción de emisiones contaminantes generadas por el transporte y por ende, a combatir el efecto invernadero y cambio climático.



## 2. Sustentabilidad en el proceso de generación de combustibles de aviación

La sustentabilidad económica y ambiental son factores necesarios para que cualquier tipo de combustible para el transporte sea viable a largo plazo. Si hubiera una expansión en el portafolio energético de México para incluir a los combustibles alternativos, se tendría como consecuencia favorable una diversificación energética. Dentro de los aspectos de sustentabilidad ambiental, el factor que acusa una mayor controversia son los gases de efecto invernadero que se generan durante toda la producción de biocombustibles de aviación.

Se sabe que los biocombustibles alternativos generados a partir de recursos renovables ofrecen el potencial de reducir las emisiones de GEI procedentes de la aviación. Esto es debido a un cambio en las emisiones de GEI que resultan de la extracción, la producción, y la combustión del combustible alternativo con respecto al combustible de aviación convencional, y no debido a que un cambio en la composición del combustible cambia la eficiencia del motor. Para enfatizar la importancia del análisis del ciclo de vida en la comparación precisa de los gases de efecto invernadero, se debe tener en cuenta que la combustión de los combustibles sintéticos presenta resultados de aproximadamente 4% menos de emisiones de CO<sub>2</sub> (por unidad de masa de combustible) en comparación con el combustible de aviación convencional. Sin embargo se debe considerar que las emisiones de GEI varían de acuerdo a dos factores muy importantes: la materia prima y el proceso de producción.

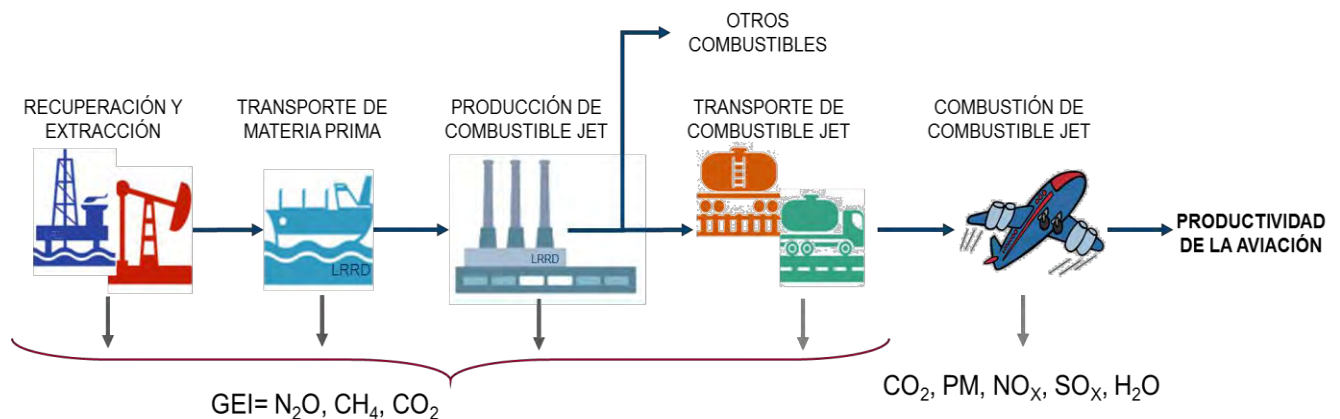
Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que resultan de la producción y uso del hidrogenación de aceites para la obtención de bio kps, se puede calcular utilizando un análisis *well-to-wheel* (WTW) para calcular su ciclo de vida (ACV). Este análisis busca dar cuenta de todas las emisiones de GEI relacionadas con la producción y transporte de materias primas, así como la producción, transporte, distribución y combustión del combustible resultante. Esto incluye el crecimiento de la materia prima y la recolección, el uso de fertilizantes (si es

aplicable), los cambios directos en el uso de la tierra (cambios en la tierra utilizada para la producción de materia prima de 2G) entre otros factores. La etapa de combustión del ACV es una parte importante de las reducciones de GEI asociadas al uso de biocombustibles porque típicamente, el CO<sub>2</sub> no fósil (por llamar de alguna forma al CO<sub>2</sub> emitido por los combustibles renovables) emitido durante la combustión se considera nulo, ya que se considera que este carbón ha sido **“recientemente” secuestrado del medio ambiente durante el crecimiento de los cultivos bioenergéticos**. Por el contrario, el CO<sub>2</sub> emitido durante la combustión de combustibles a base de fuentes fósiles, se considera recién creado y por lo tanto se contabiliza en el ACV. Por esta razón, puede haber reducción de las emisiones de GEI relacionadas con el uso de ciertos biocombustibles en relación con el diésel fósil, incluso si las emisiones durante la producción de materias primas y **combustible, y durante el transporte (“well-to-tank” o WTT)** son para el combustible de origen fósil.

### 2.1. Emisiones de GEI del combustible de aviación convencional

En el ciclo de vida, las emisiones de gases de efecto invernadero durante la producción de combustible de aviación toman en cuenta la generación de emisiones desde la extracción del crudo o recuperación, transporte, producción del combustible, transporte del combustible hasta la quema de éste; todo esto forma un ciclo de vida completo para llevar a cabo un inventario de GEI.

**Figura 50.** Etapas consideradas durante el ciclo de vida de los GEI del combustible Jet



FUENTE: (Stratton, 2010)



Una comparación con los resultados obtenidos de un estudio de Massachusetts con los resultados promedio presentados por Skone y Gerdes (2008) para la determinación de la cantidad de emisiones de GEI, se presentan en la Tabla 20. Estos resultados suponen propiedades promedio de crudo en tres escenarios (mínimo, base y máximo), utilizando como referencia el estudio de NETL (*bottom-up approach*), de los cuales se obtienen resultados similares. En general, las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida del combustible para aviones a partir de crudo obtenidos por NETL (88.0 gCO<sub>2</sub>e<sup>31</sup> /MJ) son aproximadamente 0.7% más altos que los resultados obtenidos en dicho estudio (87.5 gCO<sub>2</sub>e/MJ) (Stratton, 2010).

**Tabla 20.** Emisiones de GEI durante el ciclo de vida del Combustible Jet

	MIT Combustible Jet			
	Mínimo	Base	Máximo	NTLE
<b>Suposiciones clave</b>				
<b>Origen de petróleo</b>	US	Promedio	Nigeria	n/a
<b>Técnica de procesamiento</b>	Destilación directa	Promedio	Hidro-procesamiento	n/a
<b>Eficiencia de Refinación (LHV)</b>	98.0 %	93.5 %	88.0 %	n/a
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> por cada etapa</b>				
<b>Recuperación de Materia Prima (gCO<sub>2</sub>/MJ)</b>	3.7	4.2	9.4	4.3
<b>Transporte de materia prima (gCO<sub>2</sub>/MJ)</b>	0.8	1.5	1.8	1.3
<b>Procesamiento de materia prima (gCO<sub>2</sub>/MJ)</b>	1.6	5.5	11.0	5.5
<b>Transporte de combustible Jet (gCO<sub>2</sub>/MJ)</b>	0.8	0.8	0.8	0.9
<b>Combustión CO<sub>2</sub> (gCO<sub>2</sub>/MJ)</b>	73.2	73.2	73.2	73.7
<b>WTT<sup>32</sup> Emisiones de GEI por especies</b>				
<b>WTT emisiones de CO<sub>2</sub> (gCO<sub>2</sub>e/MJ)</b>	7.0	11.9	22.9	12.0

<sup>31</sup> Gramos de CO<sub>2</sub> equivalente = masa total de GEI con el mismo potencial de calentamiento global que el CO<sub>2</sub>.

<sup>32</sup> Siglas de Well-to-Tank (del pozo al tanque), en gCO<sub>2</sub>e/MJ de combustible. Corresponde a las emisiones indirectas de GEI, es decir, sólo contabiliza los gases emitidos desde la extracción hasta el procesamiento del combustible, incluyendo su transportación hasta el punto de venta.





	<b>MIT Combustible Jet</b>			
	<b>Mínimo</b>	<b>Base</b>	<b>Máximo</b>	<b>NTLE</b>
<b>WTT emisiones de CH<sub>4</sub> (gCO<sub>2e</sub>/MJ)</b>	0.5	2.3	13.0	2.3
<b>WTT emisiones de N<sub>2</sub>O (gCO<sub>2e</sub>/MJ)</b>	0.1	0.1	0.1	0.1
<b>Total WTW<sup>33</sup> emisiones de GEI (gCO<sub>2e</sub>/MJ)</b>	80.7	87.5	109.3	88.0
<b>Ciclo de vida de las emisiones de GEI del Combustible Jet</b>	0.92	1.00	1.25	1.01

FUENTE: (Stratton, 2010)

## 2.2. Emisiones de GEI del combustible biojet por hidropesamiento de aceites vegetales

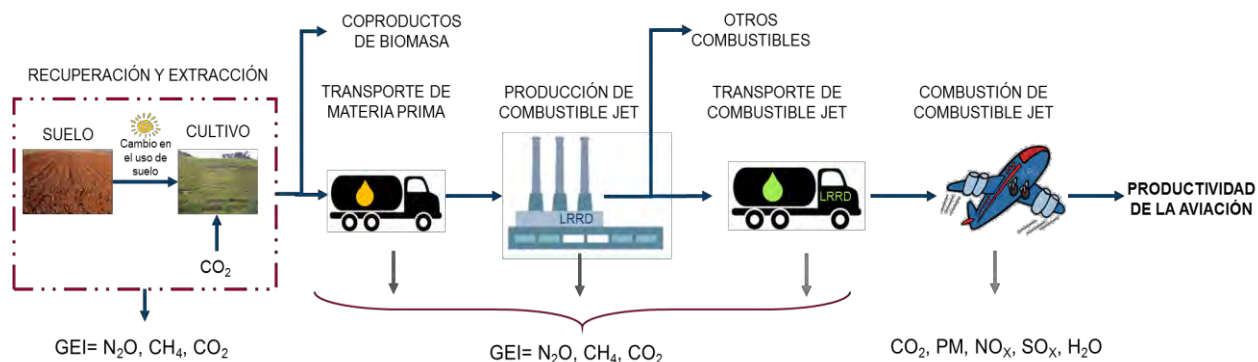
Los aceites vegetales sometidos a un proceso se pueden convertir y usar como combustible. Como ya se estuvo comentando, el proceso de producción de combustible Jet a partir de aceites vegetales consiste en someter al aceite vegetal a un hidrotamiento para desoxigenarlo y, posteriormente, hidrocrackearlo para generar hidrocarburos cuya longitud está dentro del intervalo del combustible Jet. Wong (2008) desarrolló inventarios de emisiones de GEI durante todo el ciclo de vida del hidropesamiento de combustible Jet renovable (HRJ) a partir de aceite de soya y de aceite de palma, con la diferencia que usaba el hidropesamiento de diesel renovable (HRD) como sustituto de HRJ.

En el estudio que se llevó a cabo en Massachusetts, estos resultados fueron actualizados, y posteriormente se examinaron las emisiones GEI durante el ciclo de vida de la producción y uso de HRJ a partir de aceite de microalgas, aceite de jatropha y aceite de salicornia.

---

<sup>33</sup> Siglas de Well-to-Wheels (del pozo a las ruedas), en gCO<sub>2e</sub>/MJ de combustible. Corresponde al inventario total de emisiones de GEI, desde la extracción, pasando por el procesamiento, hasta el uso final del combustible.

**Figura 51.** Etapas consideradas durante el ciclo de vida de los GEI del combustible biojet a partir de biomasa oleaginosa



FUENTE: (Stratton, 2010)

**Tabla 21.** Emisiones de GEI durante el ciclo de vida del Combustible BioJet mediante el Hidroprocesamiento de diferentes aceites vegetales

	ACEITES			
	Colza	Jatropha	Salicornia <sup>34</sup>	Microalgas
<b>Suposiciones clave</b>				
<b>Rendimiento de biomasa (Mg/ha/año)</b>	3.35	-	-	-
<b>Rendimiento de semilla (kg/ha/año)</b>	-	2,500	1,977	-
<b>Rendimiento de microalgas (g/m<sup>2</sup>/día)</b>	-	-	-	25
<b>Fracción de aceite obtenido</b>	44%	35%	28.2%	25%
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> por cada etapa</b>				
<b>Biomasa (gCO<sub>2</sub>/MJ)</b>	-70.5	-70.5	-105.3	-70.5
<b>Recuperación y extracción de aceites (gCO<sub>2</sub>/MJ)</b>	17.2	16.7	36.8	29.6
<b>Transporte de aceites (gCO<sub>2</sub>/MJ)</b>	3.1	1.5	1.1	0.3
<b>Procesamiento de aceites<sup>35</sup> (gCO<sub>2</sub>/MJ)</b>	10.3	10.3	38.3	10.3
<b>Transporte de combustible BioJet</b>	0.6	0.6	0.5	0.6
<b>Combustión CO<sub>2</sub> (gCO<sub>2</sub>/MJ)</b>	70.4	70.4	70.4	70.4
<b>WTT Emisiones de GEI por especies</b>				
<b>WTT emisiones de CO<sub>2</sub> (gCO<sub>2</sub>e/MJ)</b>	-39.2	- 41.3	-28.6	-29.7

<sup>34</sup> Emisiones de GEI del ciclo de vida resultantes de la producción y uso de los procesos HRJ y *Fischer-Tropsch* (F-T) para la producción de combustible BioJet a partir de las semillas de salicornia y la gran cantidad de biomasa resultante de la salicornia, la cual fue sometida a un tratamiento F-T.

<sup>35</sup> Procesamiento de aceites por *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids* (HEFA).

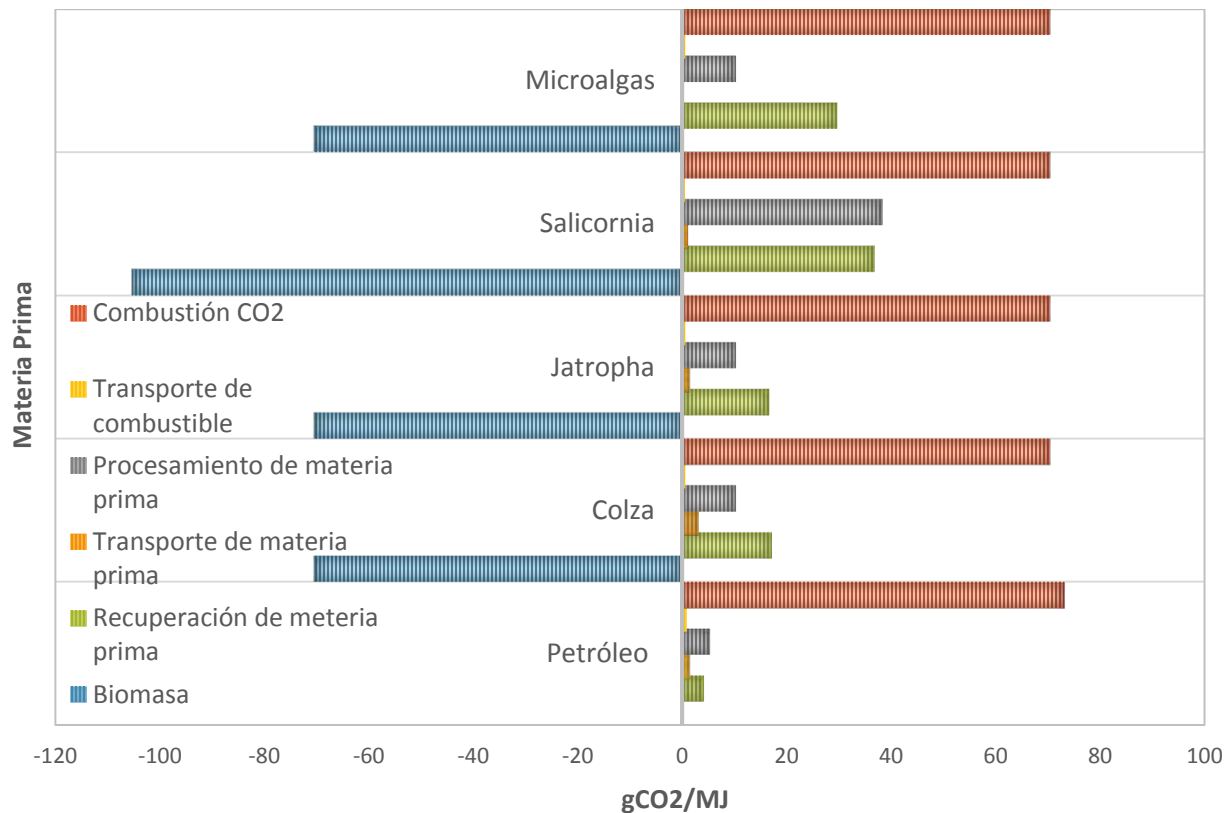


	ACEITES			
	Colza	Jatropha	Salicornia <sup>34</sup>	Microalgas
<b>WTT emisiones de CH<sub>4</sub> (gCO<sub>2</sub>e/MJ)</b>	1.3	1.2	1.3	1.8
<b>WTT emisiones de N<sub>2</sub>O (gCO<sub>2</sub>e/MJ)</b>	22.4	9.1	4.6	8.1
<b>Total WTW emisiones de GEI (gCO<sub>2</sub>e/MJ)</b>	54.9	39.4	47.7	50.7
<b>Ciclo de vida de las emisiones de GEI del Combustible BioJet</b>	0.63	0.45	0.55	0.58

FUENTE: (Stratton, 2010)

En la siguiente figura se comparan las emisiones de GEI emitidos durante todo el ciclo de vida del combustible de aviación en función del tipo de materia prima. El combustible generado a partir de aceite de jatropha y colza presentan casi la misma cantidad de emisiones de GEI a lo largo de su ciclo de vida, con excepción de las emisiones generadas durante el transporte de la materia prima.

**Figura 52.** Análisis de Ciclo de Vida de Turbosina y bio kps (Emisiones de CO<sub>2</sub>)



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE (Stratton, 2010)

El bio kps generado a partir de salicornia presenta la menor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> en la etapa de generación de biomasa, pero también es la que más gases



emite en las etapas de procesamiento de materia prima y, recuperación y extracción de aceites en comparación con las otras materias primas.

El total de las emisiones de gases de efecto invernadero para los biocombustible de aviación, según los datos reportados por un estudio de Massachusetts, la materia prima que emite la menor cantidad de gases contaminantes durante todo su ciclo de vida para la generación de este combustible es la jatropha, ya que esta emite un total de 39.4 gCO<sub>2</sub>e/MJ casi un 55% menos de emisiones en comparación con la turbosina obtenida del petróleo.

Además de las emisiones de gases de efecto invernadero, existen otros impactos de los biocombustibles, como los que se producen sobre el agua y la biodiversidad, que normalmente no se tienen en cuenta en los ACV actuales. Asimismo, también deben considerarse impactos como la eutrofización y la acidificación que son muy importantes y ya han contribuido a un empeoramiento considerable de la calidad medioambiental de algunas regiones.

En los estudios de análisis de ciclos de vida de biocombustibles, menos de un tercio presentaban resultados de acidificación y eutrofización, solo unos pocos sobre el potencial de toxicidad (toxicidad humana, ecotoxicidad o ambas), smog estival, disminución de ozono o disminución de recursos abióticos, y ninguno sobre la biodiversidad.

No obstante, hay que recordar que el conocimiento disponible de los análisis de ciclos de vida de los biocombustibles de aviación es aún muy limitado, por lo que se recomienda que para la producción de biocombustible de aviación en México se corroboren y elaboren estudios propios de análisis de ciclos de vida de dicho combustible en el cual se describen y cuantifican los impactos ambientales, considerando todas las etapas desde la producción agrícola hasta el consumo en los aviones. Así también se deben revisar estudios de valoración de las externalidades ambientales, como las derivadas de los beneficios en salud por la reducción de la contaminación o la contribución a la reducción de emisiones de



GEI. La valoración de estos efectos externos puede ser la base para la introducción de tratamientos fiscales diferentes a los de los combustibles convencionales.

Por último, las políticas públicas sobre biocombustibles involucran distintas áreas de gobierno: entre las más importantes la agrícola, energética, ambiental, comercial y fiscal. Por ello deberían existir aproximaciones institucionales que consideren todas las aristas sectoriales y aseguren la necesaria coordinación y coherencia entre todas las áreas de política. Además hay que recordar que los aspectos institucionales son cruciales para la definición de políticas que integren las consideraciones ambientales para la producción y uso de biocombustibles de aviación.



## Capítulo 4 . Conclusiones

A pesar de que existen tecnologías comerciales para la producción de combustible de aviación, su producción a escala comercial es casi nula. Esto representa una gran oportunidad para México, ya que por su gran biodiversidad, condiciones climáticas y geográficas, tiene herramientas suficientes para implementar la primera infraestructura de biorrefinación a escala comercial para la producción de combustible de aviación renovable en México.

Para determinar la viabilidad de la construcción de una biorrefinería en México se definieron conceptualmente los requerimientos técnicos, económicos y ambientales principales que se verían implicados para la obtención de biocombustible de aviación como principal producto.

### **ASPECTO TÉCNICO**

Técnicamente el proyecto resulta ser viable debido a que la tecnología evaluada forma parte de las que ya han sido aprobadas por la ASTM para su uso en la aviación comercial (hidroprocesamiento de aceites, de la que se pueden obtener combustibles verdes o renovables a partir de aceites vegetales de segunda generación). La materia prima necesaria tiene un significativo potencial de producción en México, por ejemplo la jatropha e higuierilla (especies bioenergéticas de 2G), cultivos que no interfieren con el banco de alimentos.

El estado de Chiapas presenta un alto potencial de cultivo de jatropha (344,030 ha) e higuierilla (332,783ha) (INIFAP, 2013), por tal motivo se decidió residir la biorrefinería en este estado ya que además es un estado que no cuenta con muchas industrias, comparándolo con el norte del país.

Y lo que lo hace aún más viable técnicamente, es que en el área de investigación México es muy productivo, puesto que tiene experiencia y conocimiento técnico para implementar una biorrefinería en México.



## **ASPECTO ECONÓMICO**

El análisis económico permitió analizar la viabilidad de residir la primera biorrefinería en México, y se concluye que la para la generación de biocombustible de aviación en el país no es rentable puesto que los costos de inversión, de materia prima (aceite de jatropha), y de operación afectan desfavorablemente la rentabilidad del proyecto (VPN negativo), y la manera en la que se puede lograr que el proyecto sea viable es incrementando el costo de venta del producto de interés (biocombustible de aviación) de cinco a seis veces más con respecto al precio de venta del combustible de aviación convencional actual, y consecuentemente esto no es ventajoso desde este punto de vista para las aerolíneas que deseen utilizar este combustible renovable, ya que la compra del combustible representa entre un 30 y 35% del costo de sus operaciones.

La evaluación financiera de un proyecto siempre se va a ver afectada por una serie de pequeños cambios en los supuestos de entrada, pero la combinación financiera de algunos mecanismos políticos, como por ejemplo una subvención, es decir, una contribución por parte del gobierno o cualquier organismo público, puede hacer que un proyecto nuevo e innovador sea exitoso. En este caso, se supuso que la subvención para este proyecto sea del 50% del estimado inicial o inversión de capital total (TCI), con este estímulo se ven afectados los valores de VPN, pero no lo conveniente para hacer rentable el proyecto puesto que el VPN sigue presentando nuevamente valores negativos; por lo que el proyecto aún con una subvención no es económicamente viable.

## **ASPECTO AMBIENTAL**

La evaluación ambiental permitió analizar la viabilidad ambiental para residir la primera biorrefinería en México, mediante una cuantificación teórica de las emisiones de GEI emitidas durante la producción del combustible de aviación, y se determinó que es viable, aunque a primera instancia los resultados generados en el estudio de Stratton muestran todo lo contrario puesto que la cantidad de emisiones generadas durante la producción del biocombustible es casi un 50%



mayor con respecto a las emitidas durante la generación del combustible de origen **fósil. Sin embargo, se considera que estas emisiones han sido “secuestradas”** del medio ambiente durante el crecimiento de los cultivos, y por lo tanto al final del ciclo de vida de este biocombustible el impacto ambiental es menor en comparación con el combustible convencional.

Además de las emisiones de gases de efecto invernadero, existen otros impactos ambientales importantes, tales como el uso del agua, la acidificación, la eutrofización, por lo que para obtener un análisis completo sobre los efectos que se podrían generar en el medio ambiente durante la producción de biocombustibles de aviación, se recomienda que estos estudios y/o pruebas estén incluidos en un análisis más amplio sobre los impactos ambientales de los biocombustibles de aviación.

Otro aspecto importante a mencionar es que desde el punto de vista ambiental, una conclusión de carácter general es que los beneficios ambientales asociados al uso de los biocombustibles pueden ser significativos, siempre que el principal riesgo ambiental (la ocupación de espacios naturales) pueda ser controlado.

Respecto a la contribución de los biocombustibles a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, los estudios de ciclo de vida muestran en general reducciones de menor cuantía en comparación con los combustibles fósiles (Stratton, 2010).

Para que los biocombustibles de aviación en México sean una realidad, es necesario entender claramente la cadena de suministro, desde la etapa de cultivo, transformación, hasta el abastecimiento a las aeronaves.

Desde el punto de vista financiero, es fundamental que los biocombustibles de aviación sean viables. Conforme se avance en la escala de producción y en la tecnología, estos podrán competir en precio con los combustibles fósiles, considerando además la tendencia en el alza del precio de estos últimos. Asimismo, a través de la producción de estos combustibles, se crean oportunidades de





desarrollo para las comunidades locales, las cuales podrán obtener grandes beneficios socioeconómicos.

Los biocombustibles de aviación son una fuente de oferta diversificada que puede ayudar a romper con el esquema actual del mercado mundial de combustibles, el cual ha sido dominado por un número reducido de compañías petroleras.

Existe un largo camino antes de que emerja una nueva industria de los biocombustibles de aviación, y sobre todo que alcance una penetración significativa en el mercado mexicano y mundial. El sector aeronáutico ha alcanzado metas exitosas al lograr que los combustibles alternativos de la aviación hayan sido usados en diferentes vuelos comerciales (más de 2,500), demostrando así que dichos combustibles pueden ser usados con seguridad.

Las partes interesadas de todo el mundo en el sector aeronáutico colaboran mutuamente para dar el siguiente paso, y así consecuentemente poder incrementar el número de iniciativas para establecer la producción y al mismo tiempo, evaluar la viabilidad de la producción de combustibles alternativos de aviación.

En países de Europa y así como en Estados Unidos, la primera experiencia de producción comercial para estos combustibles ha comenzado en 2016, aunque a una escala limitada comparada con la que existe para la producción del combustible de aviación a base de petróleo.

Con la implementación de combustibles alternativos de aviación, se debe de contar con perspectivas del desarrollo de la industria a largo plazo, así como de escalas de tiempo a corto y mediano plazo con expectativas de dependencia menor del combustible de origen fósil.

México debe de aprovechar al máximo todo el potencial bioenergético con el que cuenta, y mediante la generación de este tipo de combustible alternativo puede prolongar el abastecimiento energético que consume en el sector aeronáutico; y al mismo tiempo puede diversificar su matriz energética, para así obtener



energías renovables que le permitan favorecer su desarrollo tecnológico y económico.

Los costos de inversión y operación parecen ser la principal barrera importante a superar para la producción a escala comercial de los combustibles alternativos de aviación, sin embargo, en 2014 se anunció la construcción de una nueva refinería en Hidalgo, “Tula Bicentenario”, con un valor presupuestal cerca de 10,000 millones de USD, pero debido a diversos factores económicos y políticos el proyecto fue cancelado (Economista, 2013). Este valor nos puede dar un panorama un poco más amplio de que en México se podría financiar un proyecto como éste, ya que comparando el costo Clase V determinado (+50%/-30%), sin dejar de considerar que si se desea tener un estimado exacto se deberán realizar más estudios de preinversión e ingenierías básicas y de detalle; este solo representa el 5% del valor presupuestal que se dio para la nueva refinería de Tula Bicentenario.

Otra barrera importante considerada para la producción de biocombustible de aviación es la inexistencia de disposiciones específicas para la extracción y refinación, ya que en México el aspecto de construcción e infraestructura de refinación única y exclusivamente le corresponde a PEMEX, por lo cual este proceso es complicado; y de poderse realizar conllevaría mucha planeación; además de un análisis de los aspectos jurídicos de los subproductos derivados de la producción de bioturbosina (considerando la transición que tiene lugar a partir de la Reforma Energética).

En el aspecto jurídico, podemos señalar como ventaja, que para el desarrollo de los bioenergéticos no existe algún tipo de reglamento o norma constitucional alguna que impida la participación del sector privado en su producción, lo cual resulta ventajoso para los inversionistas que decidan participar en proyectos para la producción de este bioenergético.

Si en México se desea ser más competitivo y reconocido en el ámbito bioenergético, el gobierno mexicano debe inclinarse por la necesidad de adecuar



leyes y/o reglamentos en los que exista una obligatoriedad para el uso de biocombustibles en México; ya que PEMEX al ser hasta el momento el único proveedor de combustible en el país no cuenta con obligación alguna para realizar algún tipo de mezcla de los combustibles que producen con algún tipo de bioenergético, tal y como sucede en otros países del mundo como Brasil que por decreto estipula el uso obligatorio a nivel nacional de 25% de etanol mezclado con gasolina convencional (gasohol E25) para los vehículos de motor a gasolina, por ejemplo.

Con la Reforma Energética, una iniciativa ejercida por el Ejecutivo Federal, regido bajo los artículos 27 y contemplando al artículo 28 de la Constitución, para dar pie a una modernización en la industria petrolera bajo la rectoría del Estado, se permite a PEMEX y/o particulares puedan llevar a cabo actividades de refinación, petroquímica, transporte y almacenamiento de hidrocarburos, todas estas actividades bajo la tutela del Estado.

Bajo estos términos, en los que el aspecto de construcción e infraestructura de refinación única y exclusivamente le correspondían a PEMEX quedan excluidos, por lo que si se quiere llevar a cabo la producción hidrocarburos en México, como lo es el biocombustible de aviación, de manera independiente esta actividad se puede llevar a cabo, claro está que bajo la custodia del Estado.

Derivado de esto, la producción de biocombustible de aviación en México se verá sólidamente apoyada, ya que con base en esta iniciativa por la cual se reformaron y adicionaron diversas disposiciones a la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en materia de energía, en el artículo séptimo transitorio se hace mención de que la Ley para promover la participación de cadenas productivas nacionales y locales, establecerá bases y porcentajes mínimos del contenido nacional en la proveeduría para la ejecución de las asignaciones y contratos, así como el establecimiento de mecanismos para fomentar la industria nacional. De igual forma, en el artículo transitorio décimo cuarto, del Fondo Mexicano del Petróleo para la Estabilización y el Desarrollo, indica que se destinarán recursos del ahorro a largo plazo incluyendo inversión en activos



financieros, únicamente cuando el saldo de inversión sea igual o mayor al tres por ciento del Producto Interno Bruto (PIB) del año previo, de hasta un monto del 10 por ciento para financiar proyectos de inversión en ciencia, tecnología e innovación, y en energías renovables.

Dentro del artículo décimo séptimo transitorio, menciona que el Estado debe de procurar la protección y cuidado del medio ambiente, mediante la incorporación de criterios y mejores prácticas en los temas de eficiencia en el uso de energía, disminución en la generación de gases y compuestos de efecto invernadero, eficiencia en el uso de los recursos naturales, baja generación de residuos y emisiones, así como la disminución de la huella de carbono.

Una de las posibles formas de contribuir a la protección y cuidado del medio ambiente, es mediante el uso biocombustibles sustentables. Aunque todavía no existe la obligatoriedad del uso de biocombustibles en México, con el artículo transitorio décimo octavo de la reforma en materia de energía, se hace mención que por conducto de la Secretaría de Energía se ha incluido en el Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de Energía una estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles limpios; lo cual representa una oportunidad más para promover la producción y uso de biocombustible de aviación en México.

Actualmente derivado de los incrementos en el costo petróleo y su prematura escasez, la biomasa resulta ser una materia muy versátil ya que de esta se pueden generar una gran variedad de productos, sin embargo, a diferencia del petróleo, actualmente los costes del procesado son muy elevados.

No obstante, se augura un futuro prometedor, ya que una vez superadas las dificultades técnicas y comerciales, a partir de la biomasa se podrán generar biocombustibles, biomateriales y otros productos químicos y farmacéuticos. De ahí, que se intente promocionar el concepto de biorrefinería, ya que las instalaciones industriales donde se generen estos compuestos así como el sector



agrícola, como sector productor de la materia prima, se verán beneficiados de una manera significativa.

La construcción de una biorrefinería en México, no solo traería beneficios medioambientales, sino también económicos y sociales; tales como la contribución en la mejora de la competitividad de diversos sectores industriales a través de la innovación en la industria química, fortalecimiento del medio rural a través de la creación de actividades económicas que generarán empleos y sistemas productivos.

A largo plazo se podría disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y por ende las emisiones de gases de efecto invernadero y otros gases contaminantes a la atmósfera asociados al transporte aéreo.



## BIBLIOGRAFÍA

- Gürbüz, E., & Dumesic, J. (s.f.). *Catalytic Strategies and Chemistries Involved in the Conversion of Sugars to Liquid Transportation Fuels*. Recuperado el 14 de septiembre de 2016, de Edition Open Sources: <http://www.edition-open-sources.org/proceedings/2/11/index.html>
- Ali, M., El Ali, B., & Speight, J. (2005). *Handbook of Industrial Chemistry*. McGraw-Hill.
- Álvarez, C. (julio-agosto de 2009). Biocombustibles: desarrollo histórico y tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*(359), 63-89.
- ANES, A. N. (s.f.). *Red de Marco Legal en Energía Renovable*. Recuperado el 03 de noviembre de 2015, de [http://www.anes.org/anes/index.php?option=com\\_wrapper&Itemid=73](http://www.anes.org/anes/index.php?option=com_wrapper&Itemid=73)
- Anónimo. (2013). *Semillas para la producción de Biodiesel*. Recuperado el 27 de Julio de 2015, de Higuierilla: <http://semillasparabiodiesel.blogspot.mx/2009/11/higuierilla.html>
- Appressi, L. (2014). *Biogas and bio-hydrogen: production and uses. A review*. Recuperado el 30 de octubre de 2015, de [http://amslaurea.unibo.it/9071/1/Research\\_B\\_-\\_Appressi.pdf](http://amslaurea.unibo.it/9071/1/Research_B_-_Appressi.pdf)
- ASA. (2010). *EL CASO PARA LOS BIOCMBUSTIBLES DE AVIACIÓN EN MÉXICO*. México, D.F.
- ASA, A. (11 de junio de 2015). *Bioturbosina*. Recuperado el 01 de julio de 2015, de ¿Qué es?: [http://bioturbosina.asa.gob.mx/es\\_mx/BIOturbosina/Que\\_es](http://bioturbosina.asa.gob.mx/es_mx/BIOturbosina/Que_es)
- ASA, Aeropuertos y Servicios Auxiliares . (11 de junio de 2015). *Bioturbosina*. Recuperado el 01 de febrero de 2016, de ¿Qué es?: [http://bioturbosina.asa.gob.mx/es\\_mx/BIOturbosina/Que\\_es](http://bioturbosina.asa.gob.mx/es_mx/BIOturbosina/Que_es)
- Ascher, M. (2012). *Cadena de Producción Sustentable de Bioqueroseno en la América Latina y el Caribe vinculada a los Territorios Rurales; Sección 3.3. Demanda y consideraciones económicas*. IICA, OLADE, FAO, BID.
- ASTM International. (s.f.). *ASTM International News Releases*. Recuperado el 7 de julio de 2015, de <http://www.astmnewsroom.org/>
- Bailis, R., & Baka, J. (octubre de 2010). Greenhouse Gas Emissions and Land Use Change from Jatropha Curcas-Based Jet Fuel in Brazil. *Environmental science & technology*, 44(22), 8684-8691.



- Becerra Pérez , L. A. (s.f.). La industria del Etanol en México . *Economía UNAM*, **6**(16), 82-98. Recuperado el 2015 de julio de 2015, de <http://www.economia.unam.mx/publicaciones/econunam/pdfs/16/06luisarmando.pdf>
- Bezergianni, S. (20 de Marzo de 2013). *Catalytic Hydroprocessing of Liquid Biomass for Biofuels Production*. Recuperado el 26 de abril de 2016, de <http://www.intechopen.com/books/liquid-gaseous-and-solid-biofuels-conversion-techniques/catalytic-hydroprocessing-of-liquid-biomass-for-biofuels-production>
- Bezergianni, S., Kalogianni, A., & Dimitriadis, A. (2010). Catalyst Evaluation for Waste Cooking Oil Hydroprocessing. *Fuel*, 638-347.
- Cantera, S. (22 de julio de 2014). *Aerolíneas padecen alza de combustible*. Recuperado el 08 de junio de 2016, de <http://expansion.mx/negocios/2014/07/21/turbosina-amenaza-aerolineas>
- CEDRSSA, C. d. (11 de jueves de 2015). *Bioturbosina, Aeropuertos y Servicios Auxiliares; Plan de Vuelo Nacional*. Recuperado el 04 de noviembre de 2015, de [http://bioturbosina.asa.gob.mx/work/models/BIOTurbosina/Docs\\_BIOTurbosina/50PresLegisla12.pdf](http://bioturbosina.asa.gob.mx/work/models/BIOTurbosina/Docs_BIOTurbosina/50PresLegisla12.pdf)
- CEPCI, C. E. (2016). *Economic Indicators*. Recuperado el 04 de julio de 2016, de [http://tekim.undip.ac.id/v1/wp-content/uploads/CEPCI\\_2008\\_2015.pdf](http://tekim.undip.ac.id/v1/wp-content/uploads/CEPCI_2008_2015.pdf)
- CERI, R. R. (2008). *Research outline*. Recuperado el 03 de noviembre de 2015, de Creating Hydrogen Energy from Biogas: <http://www.pwri.go.jp/eng/about/pr/webmag/wm005/kenkyu.html>
- Codisoil. (s.f.). *CODISOIL- Gasóleo*. Recuperado el 07 de julio de 2015, de <http://gasoleoscodisoil.es/sabes-que-combustible-utilizan-los-aviones/>
- D'Andrea, A. L. (2010). *Biodiesel a partir de aceite de microalgas*. Recuperado el 20 de agosto de 2015, de <http://biodiesel.com.ar/305/biodiesel-a-partir-de-aceite-de-microalgas>
- EBTP, E. B. (s.f.). *Biofuels Research, Demonstration & Deployment*. Recuperado el 26 de Agosto de 2015, de HVO/HEFA: <http://www.biofuelstp.eu/hvo.html>
- ECO, R. C. (2012). *Study of Hydrogenation Derived Renewable Diesel as a Renewable Fuel Option in North America*. Ottawa, Ontario. Recuperado el 30 de septiembre de 2016, de



- [http://www.nrcan.gc.ca/sites/oeec.nrcan.gc.ca/files/files/pdf/transportation/alternative-fuels/resources/pdf/HDRD\\_Final\\_Report\\_eng.pdf](http://www.nrcan.gc.ca/sites/oeec.nrcan.gc.ca/files/files/pdf/transportation/alternative-fuels/resources/pdf/HDRD_Final_Report_eng.pdf)
- Economista, E. (2 de noviembre de 2013). Pemex saca refinería de Tula de plan de negocios. *El Economista*. Recuperado el 30 de octubre de 2016, de <http://eleconomista.com.mx/industrias/2013/11/02/pemex-saca-refineria-tula-plan-negocios>
- Elías, X. (2009). *Reciclaje de Residuos sólidos - residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora*. Madrid, España: Díaz de Santos, S.A.
- EQ²insight. (febrero de 2010). *Sustainable Flying: Biofuels as an Economic and Environmental Salve for the Airline Industry*. Recuperado el 20 de agosto de 2015, de [http://issuu.com/eqinformation/docs/eq2\\_report\\_aviation\\_biofuel/1](http://issuu.com/eqinformation/docs/eq2_report_aviation_biofuel/1)
- Espinoza, V. M. (2010). *Caracterización de plagas y enfermedades relacionadas con el cultivo de *Jatropha curcas* (L.) en Sinaloa*. Recuperado el 27 de Julio de 2015, de Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional. Unidad Sinaloa. México: <http://www.dcb.rsip.ipn.mx/encuentro/resumenes/doctorado/quinto/Espinoza%20Verduzco%20Ma%20de%20los%20Angeles.pdf>
- Espinoza, W., Goddard, M., Gutiérrez, C., & Bonfil, C. (s.f). *Los biocombustibles*. Recuperado el 01 de julio de 2015, de ¿cómo ves? UNAM: <http://www.comoves.unam.mx/assets/revista/123/los-biocombustibles.pdf>
- Falasca, S. (21 de Septiembre de 2013). *Salicornia, una especie promisoría para bioenergía en suelos salinos*. Recuperado el 28 de julio de 2015, de Latinoamérica Renovable: <http://latinoamericarenovable.com/2013/09/21/salicornia-una-especie-promisoría-para-bioenergía-en-suelos-salinos/>
- Fernández, A. (5 de mayo de 2014). *EROSKI CONSUMER*. Recuperado el 06 de julio de 2015, de Biocombustibles de tercera generación: [http://www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/energía\\_y\\_ciencia/2014/05/05/219836.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energía_y_ciencia/2014/05/05/219836.php)
- Gary, G., & Handwerk, J. (2007). *Petroleum Refining Technology and Economics*. Boca Raton: CRC Press.
- GIL, J. M. (2009). *EL FUTURO DE LOS BIOCOMBUSTIBLES: BIORREFINERÍAS INTEGRADAS*. CAMPUS UNIVERSITARIO DE PALENCIA: UNIVERSIDAD DE





- VALLADOLID. Recuperado el 13 de agosto de 2016, de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/2017/1/Disc.Apert.UVA2009.pdf>
- Gobierno de la Republica. (s.f). **ACUERDO SOBRE SUBVENCIONES Y MEDIDAS COMPENSATORIAS.** Recuperado el 1 de julio de 2016, de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/31688/24-scm.pdf>
- Gómez Flores, L. (20 de marzo de 2015). Primera planta de biogás estará lista en 2016. *La Jornada*, pág. 37. Recuperado el 10 de enero de 2016, de <http://www.jornada.unam.mx/2015/03/20/capital/037n2cap>
- González, A., & Castañeda, Y. (s.f.). Biocombustibles, Biotecnología y Alimentos - Impactos sociales para México. (UAM-MX, Ed.) Ciudad de México, México. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/argu/v21n57/v21n57a4.pdf>
- Gracida , J., & Pérez, B. (mayo de 2014). Factores previos involucrados en la producción de bioetanol, aspectos a considerar. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Recuperado el 16 de agosto de 2016, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992014000200008](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000200008)
- Hong, H., & Wang, M. (febrero de 2009). Life-Cycle Assessment of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Soybean- Derived Biodiesel and Renewable Fuels. *Environmental Science & Technology*, **43**(3), 750-756.
- IATA. (Noviembre de 2012). *IATA Guidance Material for Biojet Fuel Management*. Recuperado el 24 de junio de 2015, de <https://www.iata.org/publications/Documents/guidance-biojet-management.pdf>
- IATA. (Diciembre de 2013). *iata.org*. Recuperado el 19 de junio de 2015, de IATA 2013 Report on Alternative Fuels: <http://www.iata.org/publications/documents/2013-report-alternative-fuels.pdf>
- IATA. (2014). *IATA 2014 Report on Alternative Fuels*. Montreal—Geneva: International Air Transport Association. Recuperado el 16 de agosto de 2015, de <https://www.iata.org/publications/Documents/2014-report-alternative-fuels.pdf>
- Informador, E. (10 de Diciembre de 2012). México incursionará en producción de etanol. *INFORMADOR.MX*. Recuperado el 02 de julio de 2015, de <http://www.informador.com.mx/economia/2013/474544/6/mexico-incursionara-en-produccion-de-etanol.htm>



- INIFAP. (2013). *Potencial productivo de cuatro especies bioenergéticas en la región Sur-sureste de México bajo condiciones de temporal Ciclo primavera-verano*. Veracruz, México.
- ITAKA. (2014). *Initiative Towards sustainable Kerosene for Aviation*.
- I-Tso Chen, S. U. (24 de octubre de 2010). *Steam Reforming of Methane*. Recuperado el 04 de noviembre de 2015, de <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/chen1/>
- Kinder, J., & Rahmes, T. (junio de 2010). *Evaluation of Bio-Derived Synthetic Paraffinic Kerosenes (Bio-SPK)*. Recuperado el 30 de julio de 2015, de The Boeing Company, Sustainable Biofuels Research & Technology Program: <http://www.safug.org/assets/docs/biofuel-testing-summary.pdf>
- Kiss Köfalusi, G., & Encarnación Aguilar, G. (2006). *Instituto Nacional de Ecología*. Recuperado el 28 de octubre de 2015, de Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetas/497/kiss.html>
- Köhler, J. (March de 2013). Recuperado el 21 de agosto de 2015, de [http://kooperationen.zew.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Lead\\_Markets/Werkstattberichte/WB\\_10\\_Lead\\_Markets\\_in\\_Aviation\\_Biofuels.pdf](http://kooperationen.zew.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Lead_Markets/Werkstattberichte/WB_10_Lead_Markets_in_Aviation_Biofuels.pdf)
- Köhler, J. (marzo de 2013). *Lead Markets in Aviation Biofuels*. Recuperado el 20 de septiembre de 2015, de [http://kooperationen.zew.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Lead\\_Markets/Werkstattberichte/WB\\_10\\_Lead\\_Markets\\_in\\_Aviation\\_Biofuels.pdf](http://kooperationen.zew.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Lead_Markets/Werkstattberichte/WB_10_Lead_Markets_in_Aviation_Biofuels.pdf)
- Lawrence, M. (11 de Octubre de 2011). Recuperado el 19 de Agosto de 2015, de <https://www.navigantresearch.com/blog/in-europe-aviation-biofuels-reach-the-runway>
- Long, R., Picioccio, K., & Zagoria, A. (2011). *UOP LLC, A Honeywell Company*. Recuperado el octubre de 29 de 2015, de <http://www.uop.com/?document=ptq-optimising-h2-production-and-use&download=1>
- López, A. (10 de Diciembre de 2012). *EL NORTE -Empresas*. Recuperado el 02 de Julio de 2015, de <http://www.elnorte.com/aplicacioneslibre/articulo/default.aspx?id=99667&md5=9e5da5ce810a977afe9109e543bbd80c&ta=0dfdbac11765226904c16cb9ad1b2efe&po=4>



- LPDB, C. d. (1° de febrero de 2008). **LEY DE PROMOCIÓN Y DESARROLLO DE LOS BIOENERGÉTICOS**. Recuperado el 2015 de noviembre de 3, de <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LPDB.pdf>
- Mantilla, G., & Servín, C. (2012). **Costos índice de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México**. Ciudad de México. Recuperado el 19 de junio de 2015, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/mantilla.pdf>
- MARTÍN, G. J. (2009). **EL FUTURO DE LOS BIOCOMBUSTIBLES: BIORREFINERÍAS INTEGRADAS**. Palencia, España: UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. Obtenido de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/2017/1/Disc.Apert.UVA2009.pdf>
- MASBI. (2013). **Fueling a Sustainable Future for Aviation**. Recuperado el 30 de octubre de 2015, de [http://www.masbi.org/content/assets/MASBI\\_Report.pdf](http://www.masbi.org/content/assets/MASBI_Report.pdf)
- Mills, R. (diciembre de 2014). **Iowa State University**. Recuperado el 14 de julio de 2015, de <http://www.biorenew.iastate.edu/?s=biorefinery>
- Ministry of Defence. (18 de Febrero de 2011). **Defence Standard 91-91**. Recuperado el 7 de julio de 2015, de Turbine Fuel, Kerosine Type, Jet A-1: [http://www.seta-analytics.com/documents/Defstan\\_91-91\\_R7.pdf](http://www.seta-analytics.com/documents/Defstan_91-91_R7.pdf)
- MMM, M. M. (s.f.). **JET A Y JET A-1**. Recuperado el 6 de junio de 2016, de <http://masminermetal.com/es/hidrocarburos/jet-a1>
- Moser, B. R. (s.f.). **Camelina (Camelina sativa L.) oil as a biofuels feedstock: Golden opportunity or false hope?** Recuperado el 21 de Agosto de 2015, de [http://www.readcube.com/articles/10.1002%2Ffite.201000068?r3\\_referer=wol&tracking\\_action=preview\\_click&show\\_checkout=1&purchase\\_referrer=onlinelibrary.wiley.com&purchase\\_site\\_license=LICENSE\\_DENIED\\_NO\\_CUSTOMER](http://www.readcube.com/articles/10.1002%2Ffite.201000068?r3_referer=wol&tracking_action=preview_click&show_checkout=1&purchase_referrer=onlinelibrary.wiley.com&purchase_site_license=LICENSE_DENIED_NO_CUSTOMER)
- National Geographic Society. (2013). **Biocombustibles**. Recuperado el 07 de julio de 2015, de National Geographic: <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/calentamiento-global/biofuel-profile>
- NNFCC, T. N.-F. (s.f.). **The Bioeconomy Consultants**. Recuperado el 14 de julio de 2015, de Biorrefinación : <http://www.nnfcc.co.uk/biorefinery/our-services>



- NREL, N. R. (28 de septiembre de 2009). *Biomass Research Home*. Recuperado el 14 de julio de 2015, de National Renewable Energy Laboratory: <http://www.nrel.gov/biomass/biorefinery.html>
- NREL, N. R. (2014). *Process Design and Economics for the Conversion of Algal Biomass to Biofuels: Algal Biomass Fractionation to Lipid and Carbohydrate-Derived Fuel Products*. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Recuperado el 16 de noviembre de 2016, de <http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/62368.pdf>
- OCDE. (2013). Análisis de los resultados medioambientales, Evaluaciones de la OCDE sobre el desempeño ambiental: México 2013. En *Capítulo 4. Cambio Climático* (págs. 105-140).
- Osseweijer, F. (15 de julio de 2013). *Aviation biofuels in Saskatchewan, Canada*. Recuperado el 13 de agosto de 2015, de Ag-West Bio: [http://www.agwest.sk.ca/ckfinder/userfiles/files/FinalThesisAWB\\_SBI-FloorOsseweijer.pdf](http://www.agwest.sk.ca/ckfinder/userfiles/files/FinalThesisAWB_SBI-FloorOsseweijer.pdf)
- Partnership, F. &. (junio de 2009). *Hydrogen Production Overview of Technology Options*. Recuperado el 22 de octubre de 2015, de [https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/h2\\_tech\\_roadmap.pdf](https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/h2_tech_roadmap.pdf)
- Pearlson, M. N. (septiembre de 2011). *A techno-economic and environmental assessment of hydroprocessed renewable distillate fuels*. Recuperado el 30 de noviembre de 2015, de [http://lae.mit.edu/uploads/LAE\\_report\\_series/2011/LAE-2011-002-T.pdf](http://lae.mit.edu/uploads/LAE_report_series/2011/LAE-2011-002-T.pdf)
- PEMEX. (23 de diciembre de 2016). *Indicadores petroleros Noviembre de 2016*. Obtenido de <http://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Paginas/IndicadoresPetroleros.aspx>
- PEMEX. (s.f.). Recuperado el 07 de junio de 2016, de <http://www.ref.pemex.com/index.cfm?action=content&sectionID=18&catID=1082>
- Pérez, P. (2010). *El tren híbrido conectará Galicia con Madrid en cinco horas en la primavera de 2012*. Recuperado el 06 de julio de 2015, de <http://www.farodevigo.es/galicia/2011/09/21/tren-hibrido-conectara-galicia-madrid-cinco-horas-primavera-2012/582065.html>



- Qantas. (junio de 2013). ***Australian feedstock and production capacity to produce sustainable aviation fuel.*** Recuperado el 23 de agosto de 2015, de <http://www.qantas.com.au/infodetail/about/environment/aviation-biofuel-report.pdf>
- Randall W. Whitesides, P. (2012). ***Process Equipment Cost Estimating by Ratio and Proportion.*** Recuperado el 04 de julio de 2016, de <http://www.pdhonline.com/courses/g127/g127content.pdf>
- RLPDB, C. d. (18 de junio de 2009). ***Reglamento de la Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos.*** Recuperado el 05 de noviembre de 2015, de [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg\\_LPDB.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LPDB.pdf)
- RMB. (s.f.). ***Red Mexicana de Bioenergía.*** Recuperado el 03 de Octubre de 2015, de Biogás: [http://rembio.org.mx/?page\\_id=643](http://rembio.org.mx/?page_id=643)
- RSB. (s.f.). ***The Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB).*** Recuperado el 30 de octubre de 2015, de <http://rsb.org/>
- Ruiz, S. R. (2015). ***MODELADO DE LA DEMANDA DE TURBOSINA EN MÉXICO.*** Tesis, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.
- Salinas, E., & Gasca, V. (2009). Los biocombustibles. ***El Cotidiano***, 75-82.
- San Martín, E. (4 de junio de 2009). ***Medio Ambiente - Ambientum.*** Recuperado el 03 de julio de 2015, de Los trenes españoles se preparan para convivir con una flota híbrida y movida por biocombustibles: <http://www.ambientum.com/boletino/noticias/Los-trenes-espanoles-se-preparan-para-convivir-con-una-flota-hibrida-y-movida-por-biocombustibles.asp>
- Sánchez, H. (2008). ***Obtención, análisis y germinación de semillas de Jatropha curcas L. (Euphorbiaceae Juss.) no tóxica de Veracruz, México.*** Recuperado el 28 de Julio de 2015, de Facultad de Biología. Universidad Veracruzana.: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/28698/1/SanchezHerrera.pdf>
- SciDev. (2015). Biocombustibles: beneficios y riesgos del tercer mundo. América Latina y el Caribe. Obtenido de <http://www.scidev.net/america-latina/desarrollo-de-capacidades/opinion/biocombustibles-beneficios-y-riesgos-del-tercer-m.html>
- SENER. (2009). ***Los Bioenergéticos en México.*** México.
- SENER. (31 de diciembre de 2015). ***Prospectiva de Petróleo Crudo y Petrolíferos 2015-2029.*** Recuperado el 6 de junio de 2016, de



[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44327/Prospectiva\\_Petroleo\\_Crudo\\_y\\_Petroliferos.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44327/Prospectiva_Petroleo_Crudo_y_Petroliferos.pdf)

Sepúlveda, I. (Mayo de 2012). Bioturbosina. Producción de cultivos energéticos para la aviación comercial. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(3), 579-594.

Sepúlveda, I. (Mayo-Junio de 2012). Bioturbosina. Producción de cultivos energéticos para la aviación comercial. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(3), 579-594.

SHCP. (2014). *Reaclculo de la Tasa Social de Descuento (TSD)*. México, Distrito Federal. Recuperado el 1 de julio de 2015, de [http://www.hacienda.gob.mx/EGRESOS/ppi/Sistemas\\_inversion/oficio\\_tasa\\_social\\_de\\_descuento.pdf](http://www.hacienda.gob.mx/EGRESOS/ppi/Sistemas_inversion/oficio_tasa_social_de_descuento.pdf)

Solís, J. L., & Zamarripa, A. (2013). La bioenergía en América Latina y El Caribe. En *ESTADO DEL ARTE Y NOVEDADES DE LA Bioenergía EN MÉXICO* (págs. 276-311). Santiago: FAO.

Solís, J. L., & Zamarripa, A. (2013). La bioenergía en América Latina y El Caribe. En J. L. Solís, & A. Zamarripa, *ESTADO DEL ARTE Y NOVEDADES DE LA Bioenergía EN MÉXICO* (págs. 276-311). Santiago: FAO.

Sotelo, R., Trejo, F., & Hernández, F. (10 de octubre de 2012). Hydroconversion of Triglycerides into Green Liquid Fuels. En I. Karamé, *Hydrogenation*. Recuperado el 26 de enero de 2016, de <http://www.intechopen.com/books/hydrogenation/hydroconversion-of-triglycerides-into-green-liquid-fuels>

SQ Consulte. (s.f.). *Bringing biojet fuels to the market*. Recuperado el 19 de Agosto de 2015, de Sustainable Quality Consulte: [http://www.sqconsult.com/content/newsletter\\_html/mrt\\_14\\_SQ\\_Consult\\_Bringing\\_biojet\\_fuels\\_to\\_the\\_market.html](http://www.sqconsult.com/content/newsletter_html/mrt_14_SQ_Consult_Bringing_biojet_fuels_to_the_market.html)

Stratton, W. R. (2010). *Life cycle assessment of greenhouse gas emissions and non-CO<sub>2</sub> combustion effects from alternative jet fuels*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology. Recuperado el 16 de junio de 2016, de <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/59694#files-area>

Sustainable Aviation, C. Q. (julio de 2013). Recuperado el 10 de octubre de 2015, de Sustainable Aviation Fuels Progress Paper: <http://www.sustainableaviation.co.uk/wp-content/uploads/2015/09/SA-Sustainable-Aviation-Fuels-Paper-%E2%80%93July-2013.pdf>



- Teorema Ambiental Revista Técnico Ambiental. (01 de agosto de 2005). ***Combustibles alternativos impulsan autos, trenes y aviones.*** Recuperado el 03 de julio de 2015, de <http://www.teorema.com.mx/desarrollourbano/combustibles-alternativos-impulsan-autos-trenes-y-aviones/>
- Trejo, E. d. (2007). ***Estudio de Derecho Comparado y Marco Jurídico Internacional sobre Biocombustibles/Bioenergéticos.*** Camara de Diputados, LX Legislatura , SERVICIO DE INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS, Subdirección de Política Exterior , Ciudad de México . Recuperado el 13 de julio de 2016, de <http://www.diputados.gob.mx/sedia/sia/spe/SPE-ISS-08-07.pdf>
- UOP Honeywell Company. (s.f.). ***Honeywell Green Jet Fuel™.*** Recuperado el 26 de Agosto de 2015, de Honeywell International Inc.: <http://www.uop.com/processing-solutions/renewables/green-jet-fuel/>
- UOP, A. H. (14,15 de octubre de 2010). ***Bioturbosina, ASA.*** Recuperado el 20 de septiembre de 2015, de Plan de Vuelo Nacional: [http://bioturbosina.asa.gob.mx/work/models/BIOTurbosina/Docs\\_BIOTurbosina/37UOP2.pdf](http://bioturbosina.asa.gob.mx/work/models/BIOTurbosina/Docs_BIOTurbosina/37UOP2.pdf)
- World Bank. (2009). Low-carbon development Mexico . ***International Bank for Reconstruction and Development.***
- Wright, N. (2003). ***OGP Project Services, Project Guide No. 3A: Principles of Capital Estimating.*** Shell Global Solutions.



# ANEXOS



**ANEXO A. RED MEXICANA AEROPORTUARIA**

<b>Código IATA</b>	<b>Nombre de Aeropuerto</b>	<b>Consumo promedio anual-2016 (litros)</b>	<b>Consumo total anual-2016 (litros)</b>
<b>ACA</b>	Aeropuerto Internacional General Juan N. Álvarez o Aeropuerto Internacional de Acapulco	1,651,561	19,570,431
<b>AGU</b>	Aeropuerto Internacional de Aguascalientes	1,678,219	20,047,216
<b>BJX</b>	Aeropuerto Internacional del Bajío	4,392,027	52,571,636
<b>CEN</b>	Aeropuerto Internacional de Ciudad Obregón	747,745	8,415,631
<b>CJS</b>	Aeropuerto Internacional de Ciudad Juárez	2,046,723	24,506,999
<b>CME</b>	Aeropuerto Internacional de Ciudad del Carmen	2,384,249	28,572,374
<b>CLQ</b>	Aeropuerto Licenciado Miguel de la Madrid o Aeropuerto Nacional de Colima	379,301	4,119,558
<b>CPE</b>	Aeropuerto Internacional Ingeniero Alberto Acuña Ongay o Aeropuerto Internacional de Campeche	629,986	7,518,094
<b>CTM</b>	Aeropuerto Internacional de Chetumal	481,840	5,683,435
<b>CUL</b>	Aeropuerto Internacional Federal de Culiacán o Aeropuerto Internacional de Bachigualato	3,400,546	39,207,631
<b>CUN</b>	Aeropuerto Internacional de Cancún	65,719,607	788,459,808
<b>CUU</b>	Aeropuerto Internacional General Roberto Fierro Villalobos o Aeropuerto Internacional de Chihuahua	3,041,858	35,259,339
<b>CVJ</b>	Aeropuerto Internacional General Mariano Matamoros o Aeropuerto Internacional de Cuernavaca	144,378	1,421,731
<b>CVM</b>	Aeropuerto Internacional General Pedro J. Méndez o Aeropuerto Internacional de Ciudad Victoria	221,119	2,524,418
<b>CZM</b>	Aeropuerto Internacional de Cozumel	1,389,573	16,517,752
<b>DGO</b>	Aeropuerto Internacional Guadalupe Victoria o Aeropuerto Internacional de Durango	791,216	9,048,060
<b>GDL</b>	Aeropuerto Internacional de Guadalajara Miguel Hidalgo y Costilla	25,048,424	299,698,695
<b>GYM</b>	Aeropuerto Internacional General José María Yáñez o Aeropuerto Internacional de Guaymas	65,109	538,724
<b>HMO</b>	Aeropuerto Internacional General Ignacio Pesqueira García o Aeropuerto Internacional de Hermosillo	3,688,419	43,550,853
<b>HUX</b>	Aeropuerto Internacional de Bahías de Huatulco	1,422,604	17,055,269
<b>LAP</b>	Aeropuerto Internacional Jorge Chávez	2,001,435	23,667,101
<b>LMM</b>	Aeropuerto Internacional Federal del Valle del Fuerte o Aeropuerto Internacional de Los Mochis	992,075	11,353,820



<b>Código IATA</b>	<b>Nombre de Aeropuerto</b>	<b>Consumo promedio anual-2016 (litros)</b>	<b>Consumo total anual-2016 (litros)</b>
<b>LTO</b>	Aeropuerto Internacional de Loreto	141,190	1,583,276
<b>LZC</b>	Aeropuerto Nacional de Lázaro Cárdenas	67,615	805,299
<b>MAM</b>	Aeropuerto Internacional General Servando Canales o Aeropuerto Internacional de Matamoros	322,123	3,852,214
<b>MEX</b>	Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México	127,248,390	1,526,611,144
<b>MID</b>	Aeropuerto Internacional Manuel Crescencio Rejón o Aeropuerto Internacional de Mérida	4,361,227	52,109,597
<b>MLM</b>	Aeropuerto Internacional General Francisco Mujica o Aeropuerto Internacional de Morelia	1,622,980	19,399,001
<b>MTT</b>	Aeropuerto Internacional de Minatitlán	605,673	7,242,928
<b>MTY</b>	Aeropuerto Internacional General Mariano Escobedo o Aeropuerto Internacional de Monterrey	18,225,858	217,771,597
<b>MXL</b>	Aeropuerto Internacional General Rodolfo Sánchez Taboada o Aeropuerto Internacional de Mexicali	1,810,913	21,430,489
<b>MZT</b>	Aeropuerto Internacional General Rafael Buelna o Aeropuerto Internacional de Mazatlán	2,073,662	23,766,410
<b>NLD</b>	Aeropuerto Internacional Quetzalcóatl o Aeropuerto Internacional de Nuevo Laredo	201,917	2,406,599
<b>NOG</b>	Aeropuerto Internacional de Nogales	24,131	115,876
<b>OAX</b>	Aeropuerto Internacional Xoxocotlán o Aeropuerto Internacional de Oaxaca	1,469,021	17,559,016
<b>PAZ</b>	Aeropuerto Internacional Manuel Márquez de León o Aeropuerto Internacional de La Paz	155,928	1,844,131
<b>PBC</b>	Aeropuerto Internacional de Puebla o Aeropuerto Internacional Hermanos Serdán	1,094,020	12,939,067
<b>PCA</b>	Aeropuerto Ingeniero Juan Guillermo Villasana o Aeropuerto Nacional de Pachuca	42,811	442,019
<b>PPE</b>	Aeropuerto Internacional de Mar de Cortés	34,988	264,355
<b>PQM</b>	Aeropuerto Internacional de Palenque	56,948	671,664
<b>PVR</b>	Aeropuerto Internacional Licenciado Gustavo Díaz Ordaz, Aeropuerto Internacional Vallarta-Nayarit o Aeropuerto Internacional de Puerto Vallarta	9,643,831	115,563,262
<b>PXM</b>	Aeropuerto Internacional de Puerto Escondido	313,133	3,711,051
<b>QET</b>	Aeropuerto Intercontinental de Querétaro	2,555,202	30,393,045
<b>REX</b>	Aeropuerto Internacional General Lucio Blanco o Aeropuerto Internacional de Reynosa	1,152,756	13,597,774
<b>SJD</b>	Aeropuerto Internacional de Los Cabos	9,515,147	114,106,774
<b>SLP</b>	Aeropuerto Internacional Ponciano Arriaga o Aeropuerto Internacional de San Luis Potosí	1,452,245	17,292,492



<b>Código IATA</b>	<b>Nombre de Aeropuerto</b>	<b>Consumo promedio anual-2016 (litros)</b>	<b>Consumo total anual-2016 (litros)</b>
<b>TAM</b>	Aeropuerto Internacional General Francisco Javier Mina o Aeropuerto Internacional de Tampico	1,089,188	12,858,283
<b>TAP</b>	Aeropuerto Internacional de Tapachula	805,789	8,564,772
<b>TCN</b>	Aeropuerto Nacional de Tehuacán	20,335	218,352
<b>TGZ</b>	Aeropuerto Internacional de Tuxtla Gutiérrez o Aeropuerto Internacional Ángel Albino Corzo	2,473,818	29,579,611
<b>TIJ</b>	Aeropuerto Internacional General Abelardo L. Rodríguez, Aeropuerto Internacional de Tijuana o Aeropuerto Binacional de Tijuana-San Diego	15,128,244	181,308,711
<b>TLC</b>	Aeropuerto Internacional Licenciado Adolfo López Mateos o Aeropuerto Internacional de Toluca	6,182,312	73,843,109
<b>TSL</b>	Aeropuerto Nacional de Tamuín	16,391	118,410
<b>TPQ</b>	Aeropuerto Internacional Amado Nervo o Aeropuerto Internacional de Tepic	323,276	3,774,229
<b>TRC</b>	Aeropuerto Internacional De Torreón Francisco Sarabia o Aeropuerto Internacional de Torreón	1,333,955	15,709,596
<b>UPN</b>	Aeropuerto Internacional de Uruapan o Aeropuerto Internacional General y Licenciado Ignacio López Rayón	375,856	4,349,325
<b>VER</b>	Aeropuerto Internacional General Heriberto Jara o Aeropuerto Internacional de Veracruz	2,163,390	25,664,307
<b>VSA</b>	Aeropuerto Internacional Carlos Rovirosa Pérez o Aeropuerto Internacional de Villahermosa	3,002,267	35,495,233
<b>ZCL</b>	Aeropuerto Internacional General Leobardo C. Ruiz o Aeropuerto Internacional de Zacatecas	908,187	10,845,525
<b>ZIH</b>	Aeropuerto Internacional de Ixtapa-Zihuatanejo	1,312,883	15,692,998
<b>ZLO</b>	Aeropuerto Internacional Playa de Oro o Aeropuerto Internacional de Manzanillo	676,136	7,705,202

**ANEXO B.** ESPECIFICACIONES PARA *Synthesized Paraffinic Kerosine* (Bio-SPK)

No.	Prueba	Unidad	Def Stan 91-91	ASTM D7566	JIG
			Límites		
1	<b>APARIENCIA</b>				
	Apariencia visual		Claro, brillante y visualmente libre de materia sólida y agua sin disolver a temperatura ambiente de combustible		Claro, brillante y visualmente libre de cuerpos sólidos y el agua no se disuelve a temperatura ambiente en el combustible
	Color		Report		Report
	Contaminación de partículas, al punto de fabricación	mg/l	Máx 1.0		Máx 1.0
	Partículas, en el punto de fabricación, recuento de partículas de acumulación	Cantidad de Canales individuales & Código ISO			
	≥ 4 µm (c)		Report		Report
	≥ 6 µm (c)		Report		Report
	≥ 14 µm (c)		Report		Report
2	<b>COMPOSICIÓN</b>				
	Total de acidez	mg KOH/g	<b>Máx 0.015</b>	<b>Máx 0.01</b>	<b>Máx 0.015</b>
	Tipo de hidrocarburos aromaticos	% v/v	Max 25.0	Máx 25.0	Máx 25.0
	Total de Aromaticos	% v/v	Max 26.5	Máx 26.5	Máx 26.5
	Total de Sulfuros	% m/m	Max 0.30	Máx 0.3	Máx 0.3
	Sulfuros, Mercaptanos	% m/m	Max 0.0030	Máx 0.003	Máx 0.0030
	Doctor Test		Negativo Doctor		Negativo
	Refinación de Componentes, al punto de fabricación				
	Componentes no hidroprocesados	% v/v	Report		Report (incl. "nulo" o "100%")
	Componentes Ligeramente hidroprocesados	% v/v	Report		Report (incl. "nulo" o "100%")
Componentes Severamente hidroprocesados	% v/v	Report		Report (incl. "nulo" o "100%")	
Componentes sintéticos	% v/v	Reporte de límites (Anexo D)		Report (incl. "nulo" o "50%")	
3	<b>VOLATILIDAD</b>				
	Destilación				
	Punto de ebullición inicial	°C	Report		Report
	10% de recuperación	°C	Max 205.0	Máx 205	Max 205.0
	50% de recuperación	°C	Report	Report	Report
	90% de recuperación	°C	Report	Report	Report
	Punto final	°C	Max 300.0	Max 300	Max 300.0
	Residuo	% v/v	Max 1.5	Max 1.5	Max 1.5
	Perdida	% v/v	Max 1.5	Max 1.5	Max 1.5
Punto de inflamabilidad	°C	Min 38.0	Min 38.0	Min 38.0	
Densidad a 15°C	kg/m3	Min 775.0; Máx 840.0	Min 775.0; Máx 840.0	Min 775.0; Máx 840.0	
4	<b>FLUIDEZ</b>				
	Punto de fusión	°C	<b>Máx -47°C</b>	<b>Jet A Máx -40°C / Jet A-1 Máx -47°C</b>	<b>Máx -47°C</b>
	Viscosidad a -20°C	mm2/s	Máx 8.000	Máx 8.0	Máx 8
5	<b>COMBUSTIÓN</b>				
	Punto de Humo	mm	Min 25.0	Min 25.0	Min 25.0
	Humo Point y Naftalenos	mm	<b>Min 19.0</b>	<b>Min 18</b>	<b>Min 19.0</b>
	Energía específica	% v/v	Máx 3.00	Máx 3	Máx 3.00
		MJ/kg	Min 42.80	Min 42.8	Min 42.80
6	<b>CORROSIÓN</b>				
Tira de cobre	Clase	Máx 1.0	Máx No. 1 @ t=2h y T=100°C	Máx No. 1 @ t=2h y T=100°C	
7	<b>ESTABILIDAD TÉRMICA, JFTOT</b>				
	Prueba de Temperatura	°C	Min 260		Min 260
	Tubo de Clasificación Visual		Menos de 3. No Peacock (P) o anormales (A)	3; No Peacock o depositos de color anormales	Menos de 3. No Peacock (P) o anormales (A)
	Diferencial de presión	mm Hg	Max 25.0	Max 25.0 @ 2hrs, T=260°C	Max 25.0
8	<b>CONTAMINANTES</b>				
	Existencia de Gum	mg/100 ml	Máx 7		Máx 7
	Microseparometro (MSEP), calificación del combustible con estática Disipador Aditivo OR Combustible sin estática Disipador Aditivo				<b>Min 70</b> <b>Min 85</b>



			Def Stan 91-91	ASTM D7566	JIG
No.	Prueba	Unidad	Límites		
9	<b>CARACTERÍSTICAS DE SEPARACIÓN DE AGUA</b> Microseparometro, en el punto de fabricación:				
	MSEP Sin SDA MSEP Con SDA	Clasificación Clasificación	Mín 85 Mín 70		
10	<b>CONDUCTIVIDAD</b> Conductividad electrica	pS/m	Mín 50; Máx 600	Mín 50; Máx 600	Mín 50; Máx 600
11	<b>LUBRICIDAD</b> Use Scar Diámetro	mm	Máx 0.85	Máx 0.85	Máx 0.85
12	<b>ADITIVOS</b>				
	<b>Antioxidante</b> En los combustibles hidroprocesados y sintéticos (Obligatorio)	mg/L			<b>Min 17; Máx 24.0</b>
	En combustibles no hidroprocesados (Opcional)	mg/L			<b>Máx 24</b>
	<b>Desactivador de metales (Opcional)</b> En primer lugar el Dopaje Concentración acumulada después del campo re-doping	mg/L mg/L		Máx 2.0 Máx 5.7	<b>Máx 2.0</b> <b>Máx 5.7</b>
	<b>Estática Disipador</b> First Doping Concentración acumulada después de campo re-doping	mg/L mg/L			<b>Máx 30.</b> <b>Máx 5.0</b>

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

**ANEXO C. CATALIZADORES DE HIDROPROCESAMIENTO DE ACEITES**

🌱 Influencia del tipo de catalizador en el hidrogenación de aceites vegetales

Fuente de aceite	Tipo de Reactor	Condiciones de reacción	Catalizador	Productos principales	Rendimiento
Jatropha	Lecho fijo	T = 350 °C P = 4 MPa LHSV = 7.6 h <sup>-1</sup> Relación de H <sub>2</sub> = 800 Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	- NiMo / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>  - NiMo / SiO <sub>2</sub>  - NiMo / γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - NiMo / HY - NiMo / H-ZSM-5	C <sub>15</sub> -C <sub>18</sub> n-parafinas GLP  C <sub>11</sub> -C <sub>20</sub>  C <sub>11</sub> -C <sub>20</sub> C <sub>11</sub> -C <sub>20</sub> C <sub>5</sub> -C <sub>10</sub>	Conversión: 100% Rendimiento: 83.5% en peso
	Batch	T = 270 °C P = 6.5 MPa t = 12 h Relación catalizador/peso de aceite = 1	- Pt/H-ZSM-5  - Pt/USY	C <sub>10</sub> -C <sub>20</sub> n-parafinas   C <sub>10</sub> -C <sub>20</sub> n-parafinas	Conversión: 83.8% Rendimiento: 67.7% en peso  Conversión: 100% Rendimiento: 90% en peso
Haba de soya	Batch	T = 400 °C P = 9.2MPa t = 1 h Catalizador/aceite peso relación = 0.044, 0.088	- NiMo / γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  - Pd / γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>15</sub> -C <sub>18</sub> n-parafinas  C <sub>15</sub> -C <sub>17</sub> n-parafinas	Conversión: 92.9% Rendimiento C <sub>15</sub> -C <sub>18</sub> : 64.45% peso  Conversión: 91.9% Rendimiento C <sub>15</sub> -C <sub>17</sub> : 79.22% peso
		T = 350 °C P = 0.7 MPa N <sup>2</sup> t = 4 h Velocidad de agitación = 1000 rpm	- CoMo/γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  - Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	C <sub>15</sub> -C <sub>17</sub> n-parafinas  C <sub>15</sub> -C <sub>17</sub> n-parafinas	Conversión: 78.9% Rendimiento C <sub>15</sub> -C <sub>17</sub> : 33.67% peso  Conversión: 60.8% Rendimiento C <sub>15</sub> -C <sub>17</sub> : 39.24% peso



Fuente de aceite	Tipo de Reactor	Condiciones de reacción	Catalizador	Productos principales	Rendimiento
Haba de soya	Batch	T = 350 °C P = 0.7 MPa N <sup>2</sup> t = 4 h Velocidad de agitación = 1000 rpm	- Pt/ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>15</sub> -C <sub>17</sub> n-parafinas	Conversión: 50.8% Rendimiento C <sub>15</sub> -C <sub>17</sub> : 37.71% peso
			- Ru/ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>15</sub> -C <sub>17</sub> n-parafinas	Conversión: 39.7% Rendimiento C <sub>15</sub> -C <sub>17</sub> : 32.00% peso
			- Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ C <sub>18</sub>	Conversión: 68% Rendimiento ≥ C <sub>18</sub> : 51.20% peso
			- NiAl/LDH	C <sub>8</sub> -C <sub>17</sub>	Conversión: 74% Rendimiento C <sub>8</sub> -C <sub>17</sub> : 52.90% peso
			- MgAl/LDH	C <sub>8</sub> -C <sub>17</sub>	Conversión: 72% Rendimiento C <sub>8</sub> -C <sub>17</sub> : 47.8% peso
Colza	Lecho Fijo	T = 340 °C P = 4.0 MPa LHSV = 1 h <sup>-1</sup> Relación H <sub>2</sub> /aceite = 500 a 1000 Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	- NiMo / $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>15</sub> -C <sub>17</sub> n-parafinas	Conversión: 93% Rendimiento C <sub>15</sub> -C <sub>17</sub> n parafinas: 54.52% peso
			- NiW/TiO <sub>2</sub> - NiMo/TiO <sub>2</sub> - NiW/ZrO <sub>2</sub> - NiW/NaY		
	Batch	T = 300-400 °C P = 5-11 MPa t = 3 h	- NiMo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>7</sub> -C <sub>18</sub> n-parafinas	Rendimiento: 70-80% peso
			- Pt/HY Pt/H-ZSM-5	C <sub>7</sub> -C <sub>22</sub> i-parafinas	Rendimiento: 20-40% peso
Aceite de cocina usado	Lecho Fijo	T = 350 °C p = 2 MPa LHSV = 15,2 h <sup>-1</sup> Relación H <sub>2</sub> /aceite = 400 Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	- Ru/Al <sub>13</sub> -montmorillonita	C <sub>15</sub> -C <sub>17</sub> n-parafinas	Conversión: 100% Rendimiento: 82.1-84%
	Batch	T = 380-430 °C P = 1.2 MPa relación catalizador / peso de aceite = 0,0028 t = 0.75 -1.5 h	- H-ZSM-5 zirconia sulfatada	Nafta, parafinas queroseno y diesel	Rendimiento: 79.17% en peso

FUENTE: (Sotelo, Trejo, &amp; Hernández, 2012)

## ANEXO D. ESTIMACIÓN DE COSTOS

Todas las estimaciones de costos se realizaron con la ecuación 1.1 del apartado

### Estimación de costos de inversión.

#### 🌱 Planta de Biogás

BIOMASA A ENERGÍA	
Capacidad	8 m <sup>3</sup> por día
Costo (año 2012)	\$ 500 USD
Costo (año 2016)	\$ 475 USD
Propuesta	
Capacidad	5,000,000 m <sup>3</sup>
Costo estimado	\$ 1,427,748 USD

#### 🌱 Planta generadora de electricidad

PROYECTO BORDO PONIENTE (Gómez Flores, 2015)	
Capacidad	2,667 MW por día
Costo (año 2012)	\$ 67,940 USD
Costo (año 2016)	\$ 65,560 USD
Propuesta	
Capacidad	5,000 MW por día
Costo estimado	\$ 95,595 USD

#### 🌱 Planta TeleCom

PEMEX	
Costo (año 2012)	\$ 3,000,000 USD
Costo (año 2016)	\$ 2,852,822 USD

#### 🌱 Planta de Hidroprocesamiento de Aceites

NESTE OIL Porvoo-Finlandia (ECO, 2012)	
Capacidad	215,000,000 litros/año
Costo (año 2012)	\$130,000,000.00
Costo (año 2016)	\$123,622,305.85
Propuesta	
Capacidad	3000 BPD (174,091,006 litros/año)
Costo estimado	\$ 31,673,277 USD

#### 🌱 Planta de Hidrógeno

PEMEX REFINACIÓN	
Capacidad	33,000 barriles diarios
Costo (año 2012)	\$ 66,000,000 USD
Costo (año 2016)	\$ 62,762,093 USD
Propuesta	
Capacidad	20,000 barriles diarios
Costo estimado	\$ 46,473,679 USD

#### 🌱 Planta de Tratamiento de agua

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA (Mantilla & Servín, 2012)	
Capacidad	1,000,000 m <sup>3</sup>
Costo (año 2012)	\$ 1,202,135 USD
Costo (año 2016)	\$ 1,143,160 USD
Propuesta	
Capacidad	500,000 m <sup>3</sup>
Costo estimado	\$ 754,204 USD



**Tabla D1.** Balance de materia para 3000BPD de aceite de 2G

<b>Perfiles de producción para 3000BPD de aceite de 2G</b>		
<b>Aceite</b>	100.0%	159,503,503 kg/año
<b>Hidrogeno</b>	4.0%	6,380,140 kg/año
<b>Total</b>	<b>104.0%</b>	<b>165,883,643 kg/año</b>
<b>Jet Fuel</b>	49.4%	105,199,907 L/año
<b>Diesel Fuel</b>	23.3%	47,646,559 L/año
<b>Naftas</b>	7.0%	11,630,464 L/año
<b>Propano</b>	4.2%	6,699,147 kg/año
<b>C4-C5</b>	6.0%	9,570,210 kg/año
<b>Agua</b>	8.7%	13,876,805 L/año
<b>CO<sub>2</sub></b>	5.4%	8,613,189 kg/año

**Tabla D2.** Costos de insumos y productos en pesos mexicanos y dólares

<b>Insumos (\$MXN)</b>		
Agua (m <sup>3</sup> )	\$ 24.54	por m <sup>3</sup>
Electricidad (kWhr_Sector Industrial-Clase U)	\$ 0.98	por kWh
Gas Natural (m <sup>3</sup> )	\$ 13.50	por metro cúbico
Aceite vegetal de Jatropha (lt)	\$ 17.00	por litro de aceite
Hidrogeno (m <sup>3</sup> )	\$ 37.72	por metro cúbico
<b>Insumos (\$USD)</b>		
Agua (m <sup>3</sup> )	\$ 1.20	por m <sup>3</sup>
Electricidad (kWhr_Sector Industrial-Clase U)	\$ 0.05	por kWh
Gas Natural (m <sup>3</sup> )	\$ 0.66	por metro cúbico
Aceite vegetal de Jatropha (lt)	\$ 0.83	por litro de aceite
Hidrogeno (m <sup>3</sup> )	\$ 1.84	por metro cúbico

<b>Productos (\$MEX)</b>		
Propano (m <sup>3</sup> )	\$13.39	kilogramo
C <sub>4</sub> -C <sub>5</sub> (m <sup>3</sup> )	\$13.39	kilogramo
Naftas (lt)	\$14.81	por litro (gasolina Premium)
BioJet Fuel (lt)	\$10.13	por litro
BioDiesel Fuel (lt)	\$14.63	por litro
<b>Productos (\$USD)</b>		
Propano (m <sup>3</sup> )	\$0.65	kilogramo
C <sub>4</sub> -C <sub>5</sub> (m <sup>3</sup> )	\$0.65	kilogramo
Naftas (lt)	\$0.72	por litro (gasolina Premium)
BioJet Fuel (lt)	\$0.49	por litro
BioDiesel Fuel (lt)	\$0.71	por litro

**1 USD (cambio en 2016) \$ 21 MEX**