

**UNIVERSIDAD
PANAMERICANA**

Facultad de Gobierno y Economía

Posgrado

**Mecanismos económicos que propician la viabilidad del mercado
de bioenergéticos en México. Casos bioetanol y biogás**

Adrián Bautista Herrera

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
Doctor en Economía y Regulación Energéticas**

Director de la tesis: Dr. Francisco Ortiz Arango

Ciudad de México, a 04 de marzo de 2024

ÍNDICE.

I. OBJETIVOS.....	5
II. PROBLEMA O SITUACIÓN PARA ANALIZAR CON ENFOQUE A MEJORAR.	5
III. HIPÓTESIS	5
IV. ÍNDICE DE CAPÍTULOS.	5
V. INTRODUCCIÓN.	6
Capítulo 1. Marco teórico y estado del arte de los bioenergéticos.....	15
1.1. Visión general de la investigación en torno a los bioenergéticos.	16
1.2. Producción de Bioenergía y Biomasa.	19
1.3. Problemas ambientales relacionados con la producción de bioenergía.....	21
1.4. Biogás.	26
1.5. Bioetanol o etanol de origen fermentativo.	32
1.6. Bioenergía y Bioeconomía.....	34
Capítulo 2. El marco legal, normativo y de planeación estratégica nacional en materia de bioenergéticos en México.....	37
Capítulo 3. El Mercado de bioetanol y biogás en México.....	49
3.1. Viabilidad en la producción de Biocombustibles.	50
3.1.1. Producción de Bioetanol.....	50
3.1.2. Producción de Biogás.	55
3.2. Oferta y Demanda Potenciales.	59
3.2.1. Estimación de la oferta y demanda de bioetanol.....	59
3.2.2 Estimación de la oferta y demanda de biogás.....	66
3.3. Parámetros Económicos.	70
3.3.1. Parámetros para Etanol.....	70
3.3.2 Estimación de Costos Etanol.....	71
3.3.3. Estimación de Precio para Etanol.	74
3.3.4. Parámetros para Biogás.....	76
3.4. Evaluación Financiera.....	80
3.4.1. Evaluación para Etanol.....	80
3.4.2. Evaluación para Biogás.....	81
Capítulo 4. Mecanismos económicos frecuentemente utilizados como estímulos para el mercado de bioenergéticos.....	82
4.1. Instrumentos de Política Pública utilizados en el mundo para el fomento y fortalecimiento del uso de bioenergéticos.....	82

4.1.1. El caso de los Estados Unidos de América.....	83
4.1.2. El caso de la Unión Europea.....	91
4.1.3 El caso de Brasil.....	98
4.1.4 El caso de Pakistán.....	102
4.1.5 Resumen comparativo de los casos de instrumentos de Política Pública.	104
Capítulo 5. Propuestas para la estimulación del mercado de biocombustibles en México y su impacto en economías locales y nacional.....	131
5.1 Propuestas.....	131
CONCLUSIONES.....	134
BIBLIOGRAFÍA.....	139
APÉNDICE. GLOSARIO DE DIMENSIONES Y UNIDADES UTILIZADAS.....	155

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Principales países emisores de CO2 en el mundo, proveniente de energía, emisiones de procesos, metano y quema de gas.....	43
Tabla 2. Iniciativas para impulsar el mercado de etanol anhidro como oxigenante de gasolinas en México.....	53
Tabla 3. Estadísticos y estimación del Rendimiento Promedio Ponderado Nacional de Maíz grano en el periodo acumulado 2009 - 2019.....	61
Tabla 4. Generación estimada potencial promedio anual de residuos a partir de maíz y su composición química.....	64
Tabla 5. Potencial de producción de etanol a partir de rastrojo de maíz.....	65
Tabla 6. Ciudades seleccionadas para el caso de estudio de producción de biogás, con su población total.....	67
Tabla 7. Potencial de Producción de Biogás en la Región de Michoacán, Jalisco y Guanajuato, así como insumos y subproductos.....	69
Tabla 8. Demanda de GLP por sector en México.....	70
Tabla 9. Costo y parámetros ambientales para la tecnología de Sacarificación y Fermentación Simultánea de biomasa lignocelulósica de cultivos de maíz (Aldana, 2014).	71

Tabla 10. Municipios con el potencial de producción de bioetanol y máxima distancia de las fuentes de insumo (biomasa lignocelulósica) (Aldana, 2014).	72
Tabla 11. Distribución de costos para producción de etanol a partir de rastrojo de maíz.....	73
Tabla 12. Precios promedio y proyección de precios para etanol anhidro en la región Costa del Golfo en los Estados Unidos de América.....	75
Tabla 13. Parámetros económicos y ambientales generales de biogás.	79
Tabla 14. Parámetros específicos para el caso de estudio del presente trabajo ...	79
Tabla 15. Consideraciones financieras y resultados del análisis de rentabilidad para etanol.....	80
Tabla 16. Consideraciones financieras y resultados del análisis de rentabilidad para biogás.....	81
Tabla 17. Estándares de volumen establecidos para el RFS en la EISA [BG]	85
Tabla 18. Precio unitario estimado que las biorrefinerías están dispuestas a pagar (DAP) por biomasa para etanol, así como precio unitario estimado que los productores están dispuestos a aceptar (DAA) en los Estados Unidos de América bajo las condiciones del estudio*	89
Tabla 19. Parámetros para el análisis de políticas públicas en materia energética que involucran el fomento de energías renovables.....	105
Tabla 20. Parámetros para la evaluación de políticas públicas en materia energética que involucran el fomento de energías renovables.....	109
Tabla 21. Comparación de la política energética de fomento a los biocombustibles en distintos países.....	112
Tabla 22. Acciones en tecnologías vehiculares eficientes.	120
Tabla 23. Principales Tecnologías eficientes en el sector transporte	121
Tabla 24. Acciones en bioenergía	122
Tabla 25. Principales Tecnologías eficientes para el aprovechamiento de la Bioenergía.	124
Tabla 26. Acciones de desarrollo e impacto social.	125

I. OBJETIVOS

GENERAL.

Analizar el contexto y proponer mecanismos económicos que propicien la existencia de un mercado competitivo de bioenergéticos en México, en relación con el mercado de petrolíferos.

ESPECÍFICOS.

- a) Elaborar un diagnóstico de los factores que definen el mercado de bioetanol y biogás como bioenergéticos en México.
- b) Proponer los mecanismos identificados que incrementen la competitividad del mercado de bioetanol y biogás para su uso como combustibles en México, en relación con los combustibles derivados del petróleo.
- c) Definir las condiciones dentro del marco normativo mexicano vigente, bajo las cuales se podría desarrollar un mercado competitivo de bioetanol y biogás para su uso como combustibles en México.

II. PROBLEMA O SITUACIÓN PARA ANALIZAR CON ENFOQUE A MEJORAR.

- Analizar posibles causas de los costos elevados de producción de bioetanol y biogás a partir de métodos fermentativos.
- Identificar las principales externalidades del mercado agro energético sobre el mercado agroalimentario.
- Analizar el marco legal y normativo, así como los posibles obstáculos de los instrumentos de política pública dirigidos al incremento de la competitividad del mercado de los bioenergéticos en México.
- Analizar factores tecnológicos, financieros, normativos y de política pública que incidan en la consolidación de mercados específicos de bioetanol y biogás al ser utilizados como combustibles.

III. HIPÓTESIS

El mercado de bioenergéticos en México es competitivo en relación con el de combustibles derivados del petróleo, si se emplean las consideraciones, así como los mecanismos de estímulo y compensación adecuados.

IV. ÍNDICE DE CAPÍTULOS.

Capítulo 1. Marco teórico y estado del arte de los bioenergéticos: biogás y bioetanol.

Capítulo 2. El marco legal en materia de bioenergéticos México.

Capítulo 3. El mercado de bioetanol y biogás en México.

Capítulo 4. Mecanismos económicos frecuentemente utilizados como estímulos para el mercado de bioenergéticos.

Capítulo 5. Propuestas para la estimulación del mercado de bioenergéticos en México y su impacto en economías locales y nacional.

Conclusiones.

V. INTRODUCCIÓN.

La energía es la columna vertebral de una economía y es esencial para el desarrollo a niveles nacional e internacional. El desarrollo depende de la industrialización y la urbanización en el frente global. Éste tiene la posibilidad de aumentar la demanda de energía de dos a tres veces (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020). El desarrollo socioeconómico, así como el incremento de la demanda del consumo de energía son los factores responsables de las crisis de energía. Se trata de un problema en aumento que afecta el bienestar de los recursos vivos y del medio ambiente (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020).

Durante milenios, el uso de biomasa¹ ha ayudado a la sociedad a satisfacer sus necesidades fundamentales de energía y materiales, incluyendo combustibles para cocinar, iluminación, transporte y materiales para construcción, vestido y mobiliario. El surgimiento de combustibles fósiles desplazó muchos de estos usos, pero en décadas recientes ha habido un renovado énfasis en la biomasa, particularmente para su uso como biocombustibles. El problema de la productividad agrícola y la eficiencia de los recursos se está volviendo crítico, bajo la presión de alimentar una creciente población mundial, pero también a la par de que los biocombustibles reafirman su papel en la producción de biomasa. La integración de la producción de biocombustibles con la producción agrícola existente es en sí un problema altamente significativo. Mientras que el enfoque general a esta cuestión sitúa a los biocombustibles como un estrés añadido, el enfoque particular en las tensiones de recursos potencialmente situadas por biocombustibles y emisiones de gases de efecto invernadero (*Greenhouse gas*, en adelante GHG por sus siglas en inglés) afectan los cambios indirectos de uso de suelo, esta perspectiva toma un punto de vista distinto si se examina el problema de la expansión de biocombustibles como una oportunidad para mejorar y modernizar las actividades agrícolas alrededor del mundo, incrementando con ello los rendimientos globales y facilitando la alimentación de una creciente población de manera sustentable (Mathews, 2009).

Energía en el sector rural.

¹ Como biomasa se hace referencia a la energía derivada de organismos, en su estado natural o después de procesos de acondicionamiento, como reserva para generar energía.

En el sector rural muchas personas están enroladas en la agricultura como profesión. A pesar de esto, la población rural enfrenta cambios como la inadecuada cantidad de energía disponible derivada del acceso limitado a fuentes de energía, así como a un pobre sistema de distribución en condiciones locales. El sistema de energía rural comúnmente enfrenta problemas como la insuficiente infraestructura de soporte, la falta de mano de obra técnica capacitada y una pobre condición financiera de la población local. La disponibilidad de energía en el sector rural podría ser amenazada por la escasez de recursos en los sectores marginales de la sociedad (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020).

De manera general, en los países en vías de desarrollo, es poco común que sus habitantes cuenten con un criterio que les lleve a buscar tener acceso a las formas modernas de energía convencional y no convencional. Esta falta de enfoque los lleva a una condición precaria de incremento de la demanda para energía en áreas rurales. La contaminación ambiental está íntimamente ligada con este escenario de demanda de energía en el sector rural. Bajo estas condiciones es imperativo que se reduzca la brecha entre la demanda y la oferta de energía en sectores rurales para lograr un sistema de auto suficiencia. Una posible opción en este contexto es la de aprovechar la energía presente en la biomasa de los cultivos agrícolas. La energía es esencial para la transformación social y el desarrollo tecnológico. Para lograr un sistema energético rural autosuficiente, es preferible mejorar la generación de energía proveniente de fuentes no convencionales. El uso de biomasa de cultivos energéticos como fuente para la generación de bioenergía es tan ventajoso como endógeno, disponible en condiciones locales, barato y asequible por la sección marginal de la sociedad (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020).

Biomasa y bioenergéticos.

La biomasa es energía derivada de organismos vivos o que recientemente estuvieron vivos. Los materiales biogénicos derivados de cultivos agrícolas, residuos, productos forestales, plantas acuáticas, abonos y desechos orgánicos pueden ser transformados tanto directa como indirectamente (procesos de conversión como licuefacción, gasificación, etc.) para producir calor, energía mecánica o electricidad (bioenergía). El uso incremental de bioenergía es promovido por muchos países como medio para reducir la dependencia en importaciones, el uso de energías no renovables (combustibles fósiles) y la producción de GHG (Helmut H., Beringer T., Sribas C. B., Karl-Heinz E., Hoogwijk M., 2010)

El proceso primario mediante el cual la biomasa se convierte en materia disponible en la tierra es la fotosíntesis: el uso de la energía solar proveniente de las plantas para producir materia orgánica rica en energía a partir de insumos inorgánicos (CO₂,

agua y nutrientes). La cantidad de biomasa producida por el crecimiento de las plantas (por ejemplo, la respiración neta de las plantas) es denotada como Producción Primaria de Energía (NPP por sus siglas en inglés). En la actualidad, la NPP total de la superficie continental del planeta es de aproximadamente 2,200 Exa Joules/año ($2,200 \times 10^{18}$ Joules/año; también representados como EJ/año), de los cuales 1,240 EJ/año están localizados en los componentes de las plantas sobre el suelo (Helmut H., Beringer T., Sribas C. B., Karl-Heinz E., Hoogwijk M., 2010). La actividad humana actualmente recolecta, quema o destruye durante la cosecha aproximadamente 370 EJ/año. Una importante fracción de esta biomasa es utilizada en sistemas de alimentación. La información sobre el uso global de la bioenergía es incierta. Varios investigadores coinciden dentro del rango de los 40 – 60 EJ/año, la vasta mayoría de ellos son leña, abono o carbón quemados para cocinar o calentar estufas, frecuentemente creando contaminación al interior de las viviendas (Helmut H., Beringer T., Sribas C. B., Karl-Heinz E., Hoogwijk M., 2010).

El término bioenergéticos es utilizado indistintamente para referirse al aprovechamiento de la biomasa como posible fuente de energía tanto en forma directa como a partir de procesos fisicoquímicos y biológicos para la fabricación de combustibles más sofisticados (biocombustibles). En términos legales, para el caso de México, el artículo 2 de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LPDB) publicada en el Diario Oficial de la Federación en 2008, define como bioenergéticos a los “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 por la autoridad competente...” (sic). Es dentro de este contexto que el presente trabajo pretende enfocarse en forma particular en la utilización de bioetanol y biogás como fuentes de energía (bioenergéticos) y de manera más específica para su uso como combustibles (biocombustibles).

Los numerosos beneficios ambientales del reemplazo de combustibles derivados del petróleo por biocombustibles ha atraído la atención global. Por ejemplo, los biocombustibles son considerados ambientalmente sustentables al reducir la emisión de GHG y de contaminación del aire, comparados con los combustibles fósiles. La producción de biocombustibles podría también apoyar al desarrollo económico regional, especialmente en áreas rurales. Además, los biocombustibles podrían mejorar la seguridad energética a través de la diversificación de los recursos energéticos. Por estas razones los biocombustibles se han vuelto incrementalmente populares alrededor del mundo, especialmente en el sector del transporte.

Existen varios métodos de producción de bioenergía, los cuales se comentan a continuación (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020):

- Combustión directa para calentamiento. Se trata de la utilización más antigua de la biomasa convirtiéndola en energía calorífica considerando algunas variantes:
 - Combustión Independiente para la alimentación de generadores eléctricos a partir de biomasa.
 - Co-combustión. Utilización combinada de biomasa con otros combustibles para su uso en generadores eléctricos. Las combinaciones pueden incluir carbón, residuos de madera, aceites, esquilmos y otros, mejorando en la mezcla el poder calorífico en comparación con los insumos individuales. Una de las ventajas de la co-combustión es la reducción en la emisión de GHG en comparación con las plantas generadoras de electricidad a base de carbón, al incrementar la eficiencia térmica de la combustión.
 - Sistemas variantes de la combustión. Las elevadas temperaturas son obtenidas de la conversión de la energía química contenida en la biomasa a través de numerosas reacciones químicas durante la combustión. El oxígeno presente durante la combustión incide positivamente en la eficiencia, mientras que el dióxido de carbono (CO₂) y el vapor de agua junto con la producción secundaria de humo, alquitrán, partículas de ceniza alcalina, entre otras, generan ineficiencias en la combustión. La clasificación de los distintos sistemas de combustión depende del tipo de arreglo, siendo los sistemas de cama fija, lecho fluidizado y quemadores de suspensión los sistemas más comúnmente utilizados en plantas de generación eléctrica basadas en biomasa. Los sistemas de cama fija consisten en superficies planas estáticas en donde la biomasa previamente reducida a pequeñas piezas (o pellets) es quemada. Este tipo de sistemas alcanza temperaturas dentro del rango de 900 a 1,400 Celsius. Los sistemas de lecho fluidizado cuentan con una rejilla móvil en arreglo tipo banda que permite mover el combustible y dejar atrás las cenizas. La biomasa se quema en distintos niveles a través de la cámara de combustión. Los quemadores de suspensión se utilizan cuando la biomasa tiene niveles de humedad menores al 15% y es llevada a partículas muy finas que alimentan de manera constante y directa a la cámara de combustión generando una gran emisión de cenizas hacia el ambiente.

-
- Métodos termoquímicos de producción de biomasa.
 - Pirólisis. Consiste en el quemado a altas temperaturas de la biomasa en ausencia de oxígeno. Estas condiciones evitan la oxidación y los procesos de halogenación, generando biocombustibles de alta densidad (carbón vegetal) que pueden ser utilizados para combustión, co-combustión o incluso gasificación. La pirólisis lenta ocurre a 400 Celsius, mientras que el proceso acelerado requiere de temperaturas entre 450 a 600 Celsius y genera diversos vapores orgánicos, gases y carbón. Los vapores pueden ser condensados para generar bioaceite, que tiene propiedades de densidad mayor a la madera, pero similar contenido energético, con la ventaja que se puede transportar, quemar y almacenar más fácilmente.
 - Gasificación de biomasa. Consiste en la transformación de un combustible sólido (biomasa) en uno gaseoso a partir de reacciones termoquímicas sin la emisión de residuos sólidos de carbón. Este proceso involucra combustión parcial que produce principalmente dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno, monóxido de carbono e hidrógeno, que se hacen pasar a través de un abrillantador de carbón para provocar una reducción posterior a la oxidación, en la que se asegura la producción de dióxido de carbono, vapor de agua, monóxido de carbono, hidrógeno y metano. Para llevarse a cabo requiere temperaturas dentro del rango de 800 a 1,300 Celsius. El gas de síntesis (*syngas* por su abreviatura en inglés) producido por gasificación es el producto final de este proceso.
 - Licuefacción de biomasa. En este método, las macromoléculas de la biomasa son hidrolizadas o degradadas con agua a alta presión y temperatura. El proceso ocurre a temperaturas de 250 a 450 Celsius y presiones de 150 a 270 atmósferas, asegurando la conversión de biomasa en metanol a partir del Hidrógeno y monóxido de carbono que se producen como intermediarios.
 - Métodos biológicos.
 - Fermentación. Este proceso consiste en la transformación de la biomasa en sustancias que pueden ser utilizadas como combustibles a partir de la acción de microorganismos. Dependiendo del tipo de microorganismo empleado, así como el control de las condiciones de humedad, temperatura, presión, acidez, entre otras, se pueden obtener una amplia gama de productos, entre los cuales se destacan etanol, butanol, biogás e hidrógeno. En algunos casos es necesario considerar pretratamientos de la biomasa, para asegurar, a partir de

procesos de hidrólisis, la biodisponibilidad de carbohidratos fermentables para el microorganismo utilizado. Es posible reclasificar esta metodología con base en el requerimiento de oxígeno durante la fermentación en dos tipos esenciales: aeróbica y anaeróbica (en presencia o ausencia de oxígeno, respectivamente). El proceso más comúnmente utilizado para la generación de biocombustibles es la fermentación anaeróbica, dentro de la cual particularmente a la que genera metano se le conoce como digestión anaeróbica. La digestión anaeróbica produce metano a partir de biomasa o residuos orgánicos en altas condiciones de humedad (90% a 95%). Parte del carbono presente en la biomasa es reducido para formar dióxido de carbono y metano. Los subproductos de este tipo de fermentación usualmente son sustancias ricas en nitrógeno que pueden ser utilizadas para fertilizar suelos. La eficiencia de conversión energética de este proceso se encuentra dentro del rango de 60% a 90%, la temperatura requerida para llevarse a cabo ronda los 25 Celsius y la duración, dependiendo de si se realiza en proceso continuo o por lotes, puede tomar de 40 a 60 días.

Biocombustibles.

Actualmente el bioetanol y el biodiesel (incluso en algunos casos el biogás) son algunos de los principales tipos de biocombustibles utilizados (generalmente en el transporte). El bioetanol es normalmente mezclado con gasolina, mientras que el biodiésel es utilizado como sustituto de diésel. El hecho de que estos biocombustibles (por ejemplo, bioetanol producido a partir de almidón de plantas y biodiesel producido a partir de aceite vegetal) son producidos como *commodities*² que también pueden ser utilizados como fuentes de alimento, limita la capacidad de sustitución de combustibles derivados del petróleo. La producción de estos biocombustibles tradicionales, dependiendo del tipo de biomasa utilizada, puede competir con la industria de alimentos y su nivel de producción incremental ha provocado debates sobre su impacto en el mercado agroalimentario.

El biogás al igual que el bioetanol, también está considerado dentro de los bioenergéticos. Su uso principalmente es para la generación de electricidad, calefacción o combustión doméstica, y en algunos casos como combustible para el transporte. Este tipo de gas proviene de la descomposición (controlada o a intemperie) de materia orgánica y está formado principalmente por metano³. El

² Se utiliza el término *commodities* como elementos productivos básicos que en los mercados se consideran activos de fácil y rápida comercialización y monetización.

³ El metano es un gas con alto potencial de calentamiento global, 34 veces más poderoso que el dióxido de carbono para atrapar el calor refractado por la corteza terrestre en un periodo de 100 años (Myhre G, Shindell D, Bréon F-M, Collins W, Fuglestvedt J, Huang J, Koch D, Lamarque J-F, Lee D,

biogás es la mezcla de gases producidos por descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno (fermentación anaeróbica). Su composición es variante dependiendo de las condiciones controladas de producción, así como del sustrato a partir del cual es producido, aproximándose a un contenido entre 50% y 75% metano, de 25% a 50% dióxido de carbono y trazas de otros gases (Union of Concerned Scientists, 2017). Para su utilización como combustible, requiere de un proceso de purificación que concentre su contenido de metano dentro del rango de pureza de 95% a 98%, grado en el cual puede ser utilizado como sustituto de gas natural como combustible.

En enfoque de la bioeconomía.

La economía basada en el uso de bioproductos (también llamada bioeconomía) es dependiente de la sustentabilidad de la biomasa. Algunos estudios revelan que el uso de biomasa ayuda a disminuir la emisión de GHG en comparación con el uso de combustibles fósiles siempre que se prevenga el cambio de uso de suelo (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020). Desde un enfoque positivo, parte de las oportunidades que tiene la producción de biomasa incluyen utilidades económicas, sociales y ambientales, además de que su utilización brinda soporte a los mercados agropecuarios y es una fuente de desarrollo para las comunidades rurales. Los bioenergéticos combinados con la producción de alimentos, el cuidado de los ecosistemas, agua, salud y bienestar pueden proveer numerosos beneficios en economías rurales (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020).

Uno de los temas controversiales en el mercado agroalimentario se relaciona con el uso de cultivos que forman parte de las cadenas agroalimentarias para la producción de bioenergéticos, estableciendo con ello una competencia entre la producción de energía y la de alimentos, dependiente del uso que lleve mayores beneficios económicos a la cadena de transformación. En este caso específico se puede encontrar el maíz amarillo, el sorgo dulce y la caña de azúcar que son susceptibles de ser utilizados como insumos en la producción de biocombustibles pudiendo generar afectaciones a los mercados agroalimentarios (dada su participación en cadenas agroalimentarias). En años recientes, se ha logrado un mayor enfoque hacia técnicas que devuelvan el potencial de producción de biocombustibles avanzados provenientes de biomasa no elegible como fuente de alimentación (Yihua L, Chung-Li T, Guiping H., 2015).

El enfoque ambiental.

Mendoza B, Nakajima T, Robock A, Stephens G, Takemura T, Zhang H., 2013). El metano derivado de materia orgánica se conoce como biometano y es el principal componente del biogás. Tanto el gas natural como el biometano pueden ser utilizados indistintamente como combustibles gaseosos (Union of Concerned Scientists, 2017).

Actualmente existe una preocupación amplia sobre la seguridad energética, el incremento y volatilidad en los precios del petróleo. Estas preocupaciones podrían ser atribuidas a temas de geopolítica, al aumento en la demanda de combustibles y la disminución de fuentes no renovables de energía. Adicional a ello, el problema ha sido resaltado por aspectos de costos y emisiones de GHG. Uno de los mayores GHG es el dióxido de carbono (CO₂) (Rutz, D., Janssen, R., 2007).

La atmósfera de la Tierra está recibiendo alrededor de 15 mil millones de toneladas de CO₂ por año. Lo anterior como consecuencia directa de la combustión de grandes cantidades de combustibles fósiles (Kamm, B., Gruber, P. R., Kamm, M., 2010). La emisión de gases derivados de la quema de combustibles fósiles está relacionada con el calentamiento global y el cambio climático, cuyo origen puede provenir de la industria, el transporte y su uso doméstico.

Las energías alternativas como la solar, el viento, geotérmica e hidroeléctrica pueden actuar como alternativas a los combustibles fósiles para la generación de calor y potencia. Desafortunadamente, existen pocas alternativas para ser utilizadas como combustibles para el transporte. El aumento en la demanda de vehículos automotores ha llevado al incremento en combustibles líquidos para el transporte. Esto podría ser un factor que provoque la escasez para los combustibles no renovables y un incremento en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020).

Ventajas del uso de cultivos energéticos como fuentes de energía.

La biomasa proveniente de cultivos energéticos tiende a ser una menor fuente de emisión de dióxido de carbono. Incluso podría ser una opción de energía de bajo costo para satisfacer las necesidades de energía rurales. La biomasa lignocelulósica⁴ está ampliamente disponible, es económica, amigable con el ambiente y adecuada como insumo para la generación de bioenergía (Demirbas, 2009). Este tipo de biomasa que es utilizado como fuente de energía renovable, generalmente se conoce como “cultivos energéticos”. Se trata de opciones viables para los agricultores que proveen estabilidad a sus ingresos, e indirectamente apoyan en el cuidado del ambiente. De esta manera los cultivos energéticos podrían ser adecuados para alcanzar la sustentabilidad energética junto con la sociedad (Zhao YL, Dolat A, Steinberger Y, Wang X, Osman A, Xie GH., 2009).

El potencial de los bioenergéticos.

⁴ Se utiliza el término “biomasa lignocelulósica” para referirse al desarrollo de fuentes alternativas al almidón para la obtención de biocombustibles por métodos fermentativos, proveniente principalmente de esquilmos de cosechas, coproductos forestales, residuos de cultivos, pastos perennes y otras formas de biomasa de plantas (Ohlrogge J, Allen D, Berguson B, DellaPena D, Shachar-Hill Y, Stymne S., 2009).

La producción de biocombustibles tiene el potencial de conducir a la agricultura hacia una revolución de recursos productivos que permita contar con los insumos necesarios para que los bioenergéticos sean considerados como la principal alternativa a los combustibles derivados del petróleo (Mathews, 2009). Algunos de los aspectos de la producción de biocombustibles deben ser considerados bajo criterios de sustentabilidad, los cuales deben enfocarse en sus efectos directos o indirectos, como el cambio de uso de suelo (forestal – agrícola u otros) que generen deforestación y pérdida de las especies endémicas.

La producción de biocombustibles aún tiene un peso menor en la matriz energética internacional, sin embargo, es posible que las nuevas tendencias agrícolas generen un impacto positivo en la agricultura en general, incrementando rendimientos y mejorando la eficiencia de producción, así como la conservación del suelo. De esta manera los biocombustibles (y de manera general los bioenergéticos) podrían tener un impacto catalítico y beneficioso mientras ayudan a cambiar el mundo de la dependencia de la petroeconomía al rango de posibilidades asociadas con la bioeconomía (Mathews, 2009).

El presente trabajo se centra en el análisis de los casos de bioetanol y biogás como casos emblemáticos para el mercado de los bioenergéticos, y pretende establecer las condiciones requeridas de viabilidad económica para la existencia de un mercado competitivo de estos biocombustibles comparados con los derivados del petróleo. La definición de los mecanismos económicos que otorguen la viabilidad económica mencionada pasa por el análisis del estado del arte en las diversas metodologías de producción, buscando las mejores alternativas con las mayores eficiencias posibles, y toma como base el marco legal vigente en México, citando algunos ejemplos de otros países a manera de mejores prácticas.

El documento está organizado por capítulos, considerando en primera instancia el marco teórico en torno al tema en el Capítulo 1. Para luego, en el Capítulo 2 realizar un análisis del impacto de los bioenergéticos en las cadenas agroalimentarias, así como su repercusión positiva y negativa en la bioeconomía local o regional de las mismas. Posterior a ello, en el Capítulo 3 se abordan los conceptos de petroeconomía y bioeconomía resaltando sus principales características, ventajas y desventajas, así como efectos y repercusiones en una economía nacional como la mexicana. Enseguida, en el Capítulo 4 se revisa el marco legal y normativo de México en materia de bioenergéticos, estableciendo los factores determinantes, así como las limitantes para el desarrollo de este mercado y en este contexto se define el mercado actual en México para bioetanol y biogás. En el Capítulo 5 se presentan propuestas viables de mecanismos económicos y estímulos que permitan fomentar el mercado de bioenergéticos, así como las fórmulas para calcular el precio para

ambos productos. Finalmente se plantean las conclusiones, limitaciones y aportaciones de este trabajo, así como futuras líneas de investigación al respecto.

Capítulo 1. Marco teórico y estado del arte de los bioenergéticos.

La bioenergía como fuente renovable juega un papel transcendental en los sistemas modernos de energía. Independientemente de las dificultades implícitas, la mayoría de las aproximaciones indican que es probable que la biomasa tenga un rol preponderante en el sistema de suministro de energía. El uso intensivo de carbón y energías fósiles genera como consecuencia diversos impactos ambientales que han provocado que varios países comiencen a hacer planes a corto, mediano y largo plazo sobre el empleo de fuentes eficientes de energía renovable. En este contexto, la bioenergía podría ser considerada como una fuente enorme de energía renovable que incluso llegaría a contribuir con la mitad del consumo total de energías renovables en el mundo, tanto como hidráulica, solar, eólica y el resto de las renovables combinadas ((IEA) I. E., World Energy Outlook 2018, 2018).

El crecimiento de la bioenergía depende directamente de la capacidad de acumulación de grandes cantidades de biomasa, que hace referencia a un amplio rango de insumos, como biomasa lignocelulósica, biomasa de agro alimentos y desechos de biomasa que implica diversos procesos de conversión (bioquímica, química, termoquímica, etc.). Estos procesos de conversión generalmente se basan en la naturaleza de accesibilidad de la biomasa, así como las necesidades energéticas. De esta forma, la eficiencia resultante de la energía no sólo depende de los recursos de biomasa, sino también de los recursos tecnológicos para llevar a cabo la conversión (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020).

La producción de biomasa, utilizando insumos de baja energía o corrientes de residuos de alta eficiencia de conversión, o energía renovable, emite menor cantidad de GHG y se acerca a la neutralidad de carbono. El mayor beneficio que tiene la producción de biomasa incluye ganancias sociales, ambientales y económicas, además de cumplir con metas ambientales y de energía. De igual forma apoya los mercados agrícolas y el desarrollo estable de las comunidades rurales. La bioenergía combinada con la producción de alimentos, el cuidado del ecosistema, del agua, de la salud y el bienestar, podría proveer numerosos beneficios en la planeación y administración de los recursos energéticos.

El futuro papel de la bioenergía ha sido puesto a prueba en países europeos, donde el uso de energía limpia es un objetivo comúnmente planteado. La composición de biocombustibles avanzados debe ser similar a la de los derivados del petróleo con la finalidad de prevenir posibles costos de infraestructura en el tren de potencia. Las investigaciones sobre el futuro de los biocombustibles deben considerar el

mejoramiento de la eficiencia neta de conversión de biomasa y de igual forma, deben desarrollar tecnologías de eficiencia de costos para la producción de nuevos biocombustibles (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020).

1.1. Visión general de la investigación en torno a los bioenergéticos.

Para el mejoramiento de la sociedad en el mundo se requiere energía como condición básica para el desarrollo, lo cual es también vital para la existencia de ecosistemas junto con la vida y las civilizaciones humanas (Jiang D, Zhuang D, Fu J, Huang Y, Wen K., 2012); (Ozturk M, Saba N, Altay V, Iqbal R, Hakeem KR, Jawaid M, Ibrahim FH., 2017). Sin embargo, la utilización de fuentes convencionales de energía podría incrementar diversos problemas, por ejemplo, los recursos convencionales no renovables de energía como los combustibles fósiles y su sobreutilización podría llevar a una catástrofe energética, lo que representaría una importante preocupación para el mundo. Otro problema se encuentra en la contaminación ambiental porque la utilización de fuentes fósiles convencionales acelera el calentamiento global al incrementar la producción de dióxido de carbono y otros gases GHG (Mallick D, Mahanta P, Moholkar VS., 2017); (Mallick D, Mahanta P, Moholkar VS., 2018). Es posible notar que los óxidos de nitrógeno liberados de la combustión de combustibles fósiles comprometen la calidad del aire y dañan la salud de los seres humanos (Hoekman SK, Broch A, Liu X., 2018). Estudios publicados para Asia (Sang, T., Zhu, W., 2011); (Wu Y, Liu S, Young CJ, Dahal D, Sohl TL, Davis B., 2015) revelan el hecho de la utilización de distintas fuentes de alimentación para la producción de biocombustibles. Entonces, la bioenergía lleva la atención a un extenso estado activo en el consumo de energía de la tierra, que será referencia del cambio climático. (Jiang D, Zhuang D, Fu J, Huang Y, Wen K., 2012). De acuerdo con el Consejo Mundial de Energía (*World Energy Council*) y el reporte (Souza GM, Ballester MVR, de-Brito-Cruz CH, Chum H, Dale B, Dale VH, Fernandes ECM, Foust T, Karp A, Lynd L, MacielFilho R, Milanez A, Nigro F, Osseweijer P, Verdade LM, Victoria RL, Van der Wielen L., 2017), 14% del consumo global de energía es aportado por bioenergía. En cualquier caso, se espera que en el futuro pueda existir un potencial importante de bioenergía. En los países desarrollados, la producción sustentable de bioenergía podría ayudar a disminuir efectivamente el peligro del desabasto energético y subsidiar el crecimiento económico (Schroder P, Beckers B, Daniels S, Gnadinger F, Maestri E, Marmiroli N, Mench M, Millan R, Obermeier MM, Oustriere N, Persson T, Poschenrieder C, Rineau F, Rutkowska B, Schmid T, Szulc W, Witters N, Saebo A., 2018) (Wicke B, Smeets E, Watson H, Faaij A., 2011).

Bajo las circunstancias expuestas anteriormente, un gobierno considerado como responsable debe buscar promover la producción de bioenergía, así como las políticas adecuadas o bien, la regulación para su desarrollo en un marco que evite

que el uso de bioenergéticos ponga en riesgo las cadenas agroalimentarias. Por ejemplo, el acto regulatorio de los Estados Unidos de América EISA (Energy Independence Security Act, por sus siglas en inglés) (110th United States of America's Congress, 2007) fue instaurado por el gobierno de los Estados Unidos para aumentar la accesibilidad de las energías renovables a través de la producción de biocombustibles. De manera similar, el octavo plan de Malasia 2001 - 2005 (Economic Planning Unit, Prime Minister's Department, 2001)) fue emitido para promover la producción de bioenergía ((Tock JY, Lai CL, Lee KT, Tan KT, Bhatia S., 2010).

En años recientes, China ha mostrado una demanda genuina por la producción de bioenergía a la par del rápido crecimiento de su economía emergente, que prevé el desastre energético, y busca lograr la meta de reducir las emisiones de GHG. En la realidad, China tiene la posibilidad de producir cultivos bioenergéticos debido a su elevada rentabilidad, así como a sus beneficios ecológicos. Se podría notar que la extensión de materias primas para bioenergía podría potencialmente causar modificaciones ecológicas adversas y a pesar de ello, es considerada para convertirse en una fuente potencial de seguridad energética (Guo T, Cibir R, Chaubey I, Gitau M, Arnold JG, Srinivasan R, Kiniry JR, Engel BA., 2018).

En últimos años, investigadores de todo el mundo han puesto una enorme atención al balance entre la producción de bioenergía y la salvaguarda del medio ambiente. Esto puede ser logrado a través de múltiples enfoques, incluyendo las mejores prácticas de administración (BMPs por sus siglas en inglés) (Guo T, Cibir R, Chaubey I, Gitau M, Arnold JG, Srinivasan R, Kiniry JR, Engel BA., 2018); (McCalmont JP, Hastings A, McNarmara NP, Richter GM, Robson P, Donnison IS, Clifton-Brown J., 2017); (Wu Y, Liu S., 2012). Sin embargo, el involucramiento de la complejidad en el sistema de producción de bioenergía y el déficit de información hacen que el conocimiento general de sus efectos ambientales sea poco claro; por lo tanto, se requiere una visión general de la situación presente en lo que respecta a la producción de bioenergía y sus impactos ambientales.

Siguiendo la tendencia (Wu Y, Zhao F, Liu S, Wang L, Qiu L, Alexandrov G, Jothiprakash V., 2018) se observa que la producción de bioenergía y sus efectos ambientales han sido analizados dentro del periodo de referencia comenzando en el año 2000 hasta la actualidad. Los trabajos de investigación referentes a la bioenergía se han incrementado en forma continua desde el año 2000 (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020).

En América Latina, Brasil puede ser tomado como un buen ejemplo del enfoque en modelos de negocio de base amplia en materia de bioeconomía. Este país ha implementado una serie de políticas a lo largo de varias décadas que resultaron en el auge de industrias que producen una amplia gama de productos. Los complejos

de producción de etanol a partir de caña de azúcar entregan azúcar refinada, etanol y energía eléctrica dependiendo de las condiciones o necesidades del mercado (Solomon, B.D., Bailis, R., 2014). La clave del éxito es asegurar que las inversiones futuras para la producción de biocombustibles consideren flexibilidad de diseño de procesos técnicos y modelos de negocio de tal forma que sean capaces de aprovechar la salida de diversos productos y con ello ser capaces de resistir el ritmo y la tendencia de otras tecnologías que las harían prescindibles, por ejemplo, la electrificación de los vehículos automotores (Olsson, O., Bailis, R. , 2019).

En México, en el 2013 se realizó una prueba de concepto por parte del Gobierno Federal, con el objetivo de presentar un panorama general de la industria del etanol como combustible y la experiencia de México al respecto, así como proponer a la Comisión Intersecretarial para el Desarrollo de los Bioenergéticos un esquema que permita promover el uso de este biocombustible en las gasolinas que comercializa Petróleos Mexicanos a pequeña escala regional, y generar experiencia en su manejo (SENER S. d., Análisis y propuesta para la introducción de etanol anhidro en las gasolinas que comercializa PEMEX., 2013). El estudio concluyó que las condiciones legales que regían en ese momento tanto a productores agrícolas como a PEMEX, han obstaculizado el desarrollo de la industria del etanol como biocombustible en México, ya que en 2009 y 2012 se intentaron dos esquemas de compra por parte de la paraestatal sin que ninguno de los dos resultara en la adjudicación exitosa de contratos ni en la utilización de etanol.

Una componente clave para el desarrollo de nuevos mercados de energía consiste en contar con una demanda de combustibles suficiente, confiable y pronosticable. Los mercados en crecimiento con necesidades claras de demanda presentan menor riesgo y por tanto cuentan con mayor acceso a inversiones (Goldwyn, 2020). Existen algunos inconvenientes con los subsidios, particularmente aquellos enfocados a energías fósiles, que representan un dilema a lo largo de América Latina, región que es objeto del gran reto del desarrollo económico. En América, como en otras partes del mundo, los recientes esfuerzos para reformular precios de combustibles (especialmente los de uso final y consumo, por ejemplo, electricidad) han resultado en cargas económicas involuntarias que frecuentemente afectan al segmento de población de menores ingresos. Los precios de energía y los mecanismos compensatorios apropiados (para una amplia variedad de tipos de combustible y a través de sus cadenas de valor) pueden ser difíciles de entender, pero existe una creciente experiencia, especialmente entre las principales instituciones financieras que, en conjunto con los gobiernos, pueden alcanzar un balance mutuo de beneficios (Goldwyn, 2020).

En Europa las ciudades inteligentes han tenido éxito en el desplazamiento del uso de combustibles fósiles para el transporte público, generación eléctrica o

calefacción, hacia el uso de combustibles alternativos basados en biomasa. Esto contribuye por un lado al cumplimiento de los objetivos de la legislación de la Unión Europea en materia de uso de energía y, por otro lado, a proveer de servicios a la población que afecten en menor medida al ambiente en comparación con los servicios tradicionales. Lo anterior impacta directamente en el desarrollo de emprendimientos en materia de bioenergía, que permiten reunir a todos los actores (empresarios, inversionistas, promotores y distintos tipos de empresas y organizaciones), modelos de negocio y alternativas innovadoras y atractivas en costos, capaces de reemplazar los combustibles convencionales (Cicea, C., Marinescu, C. Pintilie, N., 2019).

1.2. Producción de Bioenergía y Biomasa.

La bioenergía puede ser considerada como la energía renovable que es obtenible a partir de material derivado de fuentes biológicas.

La biomasa es un tipo de material orgánico que es capaz de almacenar la energía solar en forma de energía química. Los recursos requeridos para la producción de bioenergía se denominan materia prima.

La producción de biomasa se basa en el incremento de la cantidad de materia orgánica dentro de un área específica. La biomasa es considerada como fuente de energía renovable porque se encuentra almacenada tanto en animales como en vegetales. Existen de manera general dos formas distintas de producción de biomasa: i) primaria, y ii) secundaria.

- i. La producción primaria (de biomasa) se refiere a la producción de energía por los organismos vegetales a partir de la fotosíntesis⁵. La mayor parte de la biomasa presente en el ambiente se incrementa al almacenar la energía extra generada. En este tipo de sistemas, se evalúa la producción a partir de la cobertura total del bosque en un año en particular. En la **Figura 1** se observa un diagrama esquemático del proceso de transformación de energía implicada en la fotosíntesis, mostrando las principales reacciones bioquímicas involucradas, así como los cofactores enzimáticos y moléculas transportadoras de energía que las propician (NADPH, NADP⁺, ADP y ATP respectivamente). De manera general, este proceso permite a los organismos que cuentan con este tipo de metabolismo, que con la incidencia de la luz solar en los cloroplastos, se produzcan carbohidratos a partir de dióxido de carbono, desechando moléculas de oxígeno como residuo, A este proceso se le conoce como el Ciclo de Calvin.

⁵ Definida como el conjunto de procesos bioquímicos realizados en el interior de los cloroplastos de los organismos vegetales, algas y cianobacterias, en los que la incidencia de fotones provenientes de la luz desencadena una serie de reacciones que capturan CO₂ presente en la atmósfera y a partir de éste y agua, producen carbohidratos y oxígeno como subproducto.

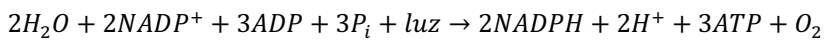
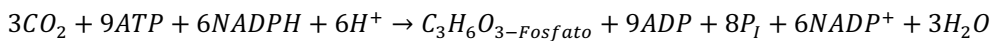
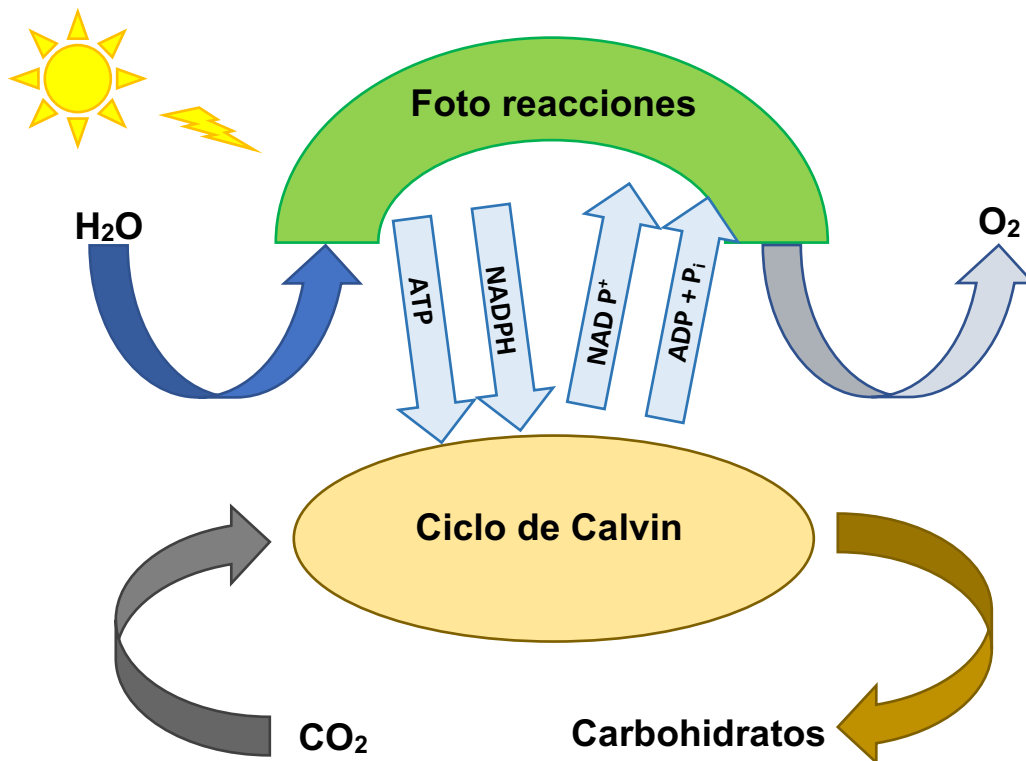


Figura 1. Representación esquemática de la Fotosíntesis con sus dos principales reacciones bioquímicas. Reproducción de: (Najafpour, M. M. , & Pashaei, B., 2012)

- ii. La producción de tipo secundario implica la asimilación de sustancias orgánicas como tejidos provenientes de distintos organismos. Este tipo de producción implica que organismos se alimenten a partir de otros organismos animales o vegetales (materia orgánica) a nivel microscópico. También puede ser estimado con base en la producción total de carne por año. A pesar de que la biomasa puede ser evaluada a partir de los organismos en ciertas circunstancias, es difícil estimar la producción (véase **Figura 2**) (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020).

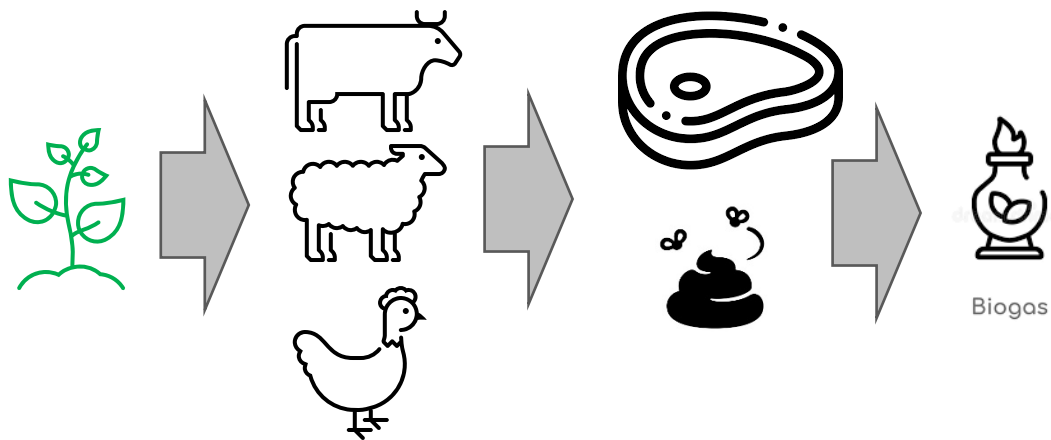


Figura 2. Representación esquemática de la producción secundaria de biomasa y su posible transformación a bioenergéticos.

En el caso de bioenergía, como se comentó en la sección de introducción, los principales métodos de producción son:

- Combustión directa para calentamiento
- Métodos termoquímicos de producción de biomasa
- Métodos biológicos o fermentativos.

1.3. Problemas ambientales relacionados con la producción de bioenergía.

Calidad y cantidad de agua.

Los sistemas de producción de biomasa pueden influir en la disponibilidad y calidad del agua. Distintos sistemas requieren diferentes cantidades de agua tanto superficial como proveniente de fuentes en el subsuelo, dependiendo entre otras cosas, de la eficiencia en el uso de agua para cultivos, así como de si el sistema es de riego o de temporal. Los diversos efectos de la producción de bioenergía en la calidad y cantidad de agua dependen principalmente del posible consumo de agua por parte de los cultivos bioenergéticos, así como en el cambio de uso de suelo. De manera general, los cultivos bioenergéticos optimizados requieren de mayores cantidades de agua en comparación con la flora natural o varios cultivos alimenticios. Algunos cultivos energéticos como la caña de azúcar compiten directamente con cultivos alimenticios en lo que respecta a la irrigación de agua. De acuerdo con el reporte (Hazell, P., Pachauri, R.K., 2020) en algunos casos, como el de residuos de cosecha, el cultivo de árboles sin maleza o bien plantas que no la producen, podría reducir la cantidad de agua de lluvia que permea en el suelo y reabastece los mantos acuíferos subterráneos, agravando con ello los problemas de disponibilidad. El modelo propuesto por (Kim HK, Parajuli PB, Filip SD., 2013) ejemplifica que la amplia plantación de cultivos bioenergéticos podría incrementar

la cantidad de evapotranspiración⁶ (ET por sus siglas en inglés), que afectan la superficie anual de agua, así como la captación de agua en el río Yazoo en la cuenca del Mississippi, que se convierte en la principal fuente de agua para los cultivos de maíz en esta región de los Estados Unidos de América. Conclusiones similares pueden ser encontradas en los estudios de (Wu Y, Liu S., 2012); (Guo T, Cijin R, Chaubey I, Gitau M, Arnold JG, Srinivasan R, Kiniry JR, Engel BA., 2018). Estos reportes también pronostican que la conversión de uso de suelo hacia cultivos bioenergéticos podría causar la reducción de los recursos hídricos a escala de cuencas (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020).

Calidad del suelo y su fertilidad.

Algunos de los sistemas de producción de bioenergía utilizan y restauran tierras contaminadas, mientras que otros podrían contribuir a la degradación del suelo. Entonces, en muchos casos la producción de bioenergía probablemente modifique la calidad del suelo en términos de contenido de carbono y nutrientes. De igual forma afecta el riesgo asociado con la erosión del suelo. Consecuentemente, los cultivos de biomasa imponen un reto particular para el mejoramiento de la administración de suelos, dado que el material del cultivo es habitualmente cosechado en su totalidad, dejando un poco de materia orgánica o restos del cultivo para su reincorporación al suelo como nutrientes.

Es de resaltar que en muchas zonas rurales de países en desarrollo en los que el manejo de suelo recae en el reciclaje de desechos y abono (excremento de animales rumiantes) en lugar de utilizar insumos externos, la producción de biomasa puede llevar a una reducción intensiva en la fertilidad del suelo. A pesar del hecho de que adicionar una mayor densidad de cultivos en el suelo puede reducir el rendimiento de la cosecha, también se requiere mantener la materia orgánica del suelo añadiendo suficientes residuos de cosecha (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020).

En muchas situaciones es posible para los granjeros reducir el riesgo de reposición de nutrientes permitiendo que se queden para descomposición en el suelo las ramas y hojarasca de los árboles. Los nutrientes disponibles en la materia prima pueden también ser recuperados de las instalaciones de transformación a partir de los lodos o cenizas de tal forma que son convertidos en materiales más apropiados para su aplicación directa en suelos. Este método está disponible en muchos sistemas bioenergéticos. En cualquier caso, el valor de aporte de nutrientes provenientes de los lodos y cenizas podría ser menor que el óptimo.

⁶ Se conoce como evapotranspiración (ET) a la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante la transpiración del cultivo (FAO, 1998).

La erosión del suelo puede ocurrir como consecuencia de la actividad agrícola. Este fenómeno disminuye la calidad del suelo, lo que genera un impacto en la productividad que afecta tanto a los ecosistemas naturales, como a los agrícolas. La erosión actúa removiendo las partículas que componen la capa fina y superficial del suelo, que es rica en materia orgánica y nutrientes provenientes de otras plantas; esta capa posee mayor capacidad de retención de humedad en comparación con el resto de las capas del suelo.

Existen tres formas principales para causar la erosión de suelos (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020):

- i. la extensión de la superficie de cultivo;
- ii. la remoción de residuos y
- iii. el cambio en el uso de suelo.

Este tipo de situaciones podrían surgir a partir de la demanda incremental de cultivos energéticos para ser transformados en bioenergéticos, como el incremento en la superficie de cultivo de maíz amarillo en los Estados Unidos de América para la producción de etanol, lo que de acuerdo con (Hoekman SK, Broch A, Liu X., 2018), puede impactar negativamente en el proceso de retención de suelo y nutrientes.

Los beneficios de varias de las medidas de conservación de suelos podrían reducirse si las extensiones de cultivo de maíz modificado se incrementan. El cultivo de las variedades existentes de maíz empleando prácticas agrícolas adecuadas (como la alternancia con cultivos de leguminosas), reduce la erosión del suelo (Hoekman SK, Broch A, Liu X., 2018). Se documenta en el artículo (Blanco-Canqui H, Wortmann C., 2017) que los residuos de cosecha dejados en la superficie del suelo pueden evitar las fuerzas erosivas del viento y del agua. Entonces, la cosecha de rastrojo, esquilmos y residuos de cultivo puede incrementar el riesgo de erosión debido a que estos residuos de cosechas funcionan como una capa de protección en la superficie del suelo que contribuye a incrementar el SOC (New Zealand's Ministry for Environment, 2011); (Lal, 2005), (Soil Organic Carbon o carbono orgánico del suelo por sus siglas en inglés).

El cambio de uso de suelo también podría agravar la erosión o deteriorar la capa protectora del suelo. Por ejemplo, la conversión de bosques a tierras de cultivos bioenergéticos perennes incrementa el riesgo de pérdidas relacionadas con el suelo y agua (Liu W, Yan J, Li J, Sang T., 2012), mientras que la conversión de cultivo de granos a pastos perennes puede generar efectos de refuerzo en la conservación de agua y suelo debido a los tallos erectos y acanalados de los pastos perennes (Cooney D, Kim H, Quinn L, Lee MS, Guo J, Chen S, Xu B, Lee DK., 2017). Los pastos perennes, particularmente el pasto varilla (*Panicum virgatum*), han demostrado reducir los residuos en la corriente de flujo de rendimientos de cosecha,

así como la erosión del suelo e incrementar el uso de agua y su infiltración sin importar las condiciones climáticas en la meseta de Loes en China, representando ventajas importantes en la conservación de suelo y agua en comparación con los cultivos anteriores de esa región (Cooney D, Kim H, Quinn L, Lee MS, Guo J, Chen S, Xu B, Lee DK., 2017). El cultivo de pastos perennes, particularmente en suelos propensos a la erosión tiene un potencial superior que el cultivo de maíz para producción de bioetanol (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020).

Emisión de gases efecto invernadero (GHG).

Las principales emisiones de GHG provienen del dióxido de carbono (CO₂) y el óxido nitroso (N₂O), éstas deben ser reducidas cuando se produce bioenergía (Dunn JB, Mueller S, Ho-young K, Wang MQ., 2013); (Qin Z, Dunn JB, Kwon H, Mueller S, Wander MM., 2016.). Diversos estudios han probado que los biocombustibles producen menores emisiones de CO₂ en comparación con los combustibles fósiles (emisiones derivadas del proceso de combustión interna bajo condiciones similares) (Fu H, Jiang D, Huang Y, Zhuang D, Ji W., 2014); (Wang M, Han J, Dunn JB, Cai H, Elgowainy A., 2012). (Liu W, Yan J, Li J, Sang T., 2012) reemplazó combustibles fósiles con la finalidad de reducir las emisiones de CO₂ en 29 millones de toneladas equivalentes/año a través de una mayor producción de pasto varilla (*Panicum virgatum*) en tierras marginales⁷. El modelo presentado indica que, en los Estados Unidos de América, las emisiones de GHG podrían ser reducidas entre un 40% y 85% a través de la utilización de bioetanol en comparación con gasolina en una base energética comparativa por mega joule (MJ). Sin embargo, la propuesta de reducción de GHG es distinta para las diferentes materias primas que se emplean en la producción del biocombustible y emisión indirecta de CO₂ (Dunn JB, Mueller S, Ho-young K, Wang MQ., 2013); (Searchinger T, Heimlich R, Houghton RA, Dong F, Elobeid A, Fabiosa H, Tokgoz S hayes D, Yu T-H., 2008).

La determinación experimental de los efectos del contenido de etanol en mezclas de combustibles tiene una variación significativa entre los estudios consultados, sin embargo, es posible observar que existe un consenso en los estudios que refieren niveles bajos en la concentración de etanol (alrededor del 10% en composición) y los relacionan con la disminución en la emisión de monóxido de carbono (CO), a la vez que se incrementan las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOC's por sus siglas en inglés) como el acetaldehído y el propio etanol (Committee on Economic and Environmental Impacts of Increasing Biofuels Production; Board on Agriculture and Natural Resources; Board on Energy and Environmental Systems;

⁷ El concepto de tierras marginales ha sido ampliamente utilizado y comúnmente incluye términos como tierras improductivas, tierras desperdiciadas, tierras subutilizadas, tierras ociosas, tierras abandonadas o tierras degradadas. En Europa, las tierras marginales han sido definidas como las tierras cuyo uso se encuentra en el límite (margen) de la viabilidad económica (Kang et al, 2013).

Division on Engineering and Physical Sciences; 2011) (Durbin, T., Miller, J.W., Younglove, T., Huai, T., Cocker, K., 2007) (Graham, L.A., Belisle, S.L., Baas, C., 2008).

En las consideraciones relacionadas con la biomasa como insumo para la producción de biocombustibles, se comenta que la conversión de tierras con pastos nativos a cultivos de producción de bioenergéticos de primera generación y sotobosque de rotación corta (vegetación y arbustos de cultivo corto, *short rotation coppice*, por sus siglas en inglés SRC) exhibe un notable aumento en las emisiones de CO₂. Por tanto, es importante establecer categorías de los cultivos bioenergéticos, así como su administración con la finalidad de mitigar las emisiones de CO₂.

El N₂O (referido en este texto como uno de los compuestos de la familia de gases considerados en forma genérica como NO_x) es el segundo GHG en importancia que contribuye ampliamente al calentamiento global y es producido principalmente por la actividad agrícola (Williams AG, Audsley E, Sandars DL., 2010). En el estudio de (Liu W, Yan J, Li J, Sang T., 2012) se reemplazó el combustible fósil y estableció que la producción de biomasa en tierras marginales con fines de producción de energía tiene como consecuencia un impacto ambiental positivo en la emisión de gases de efecto invernadero (GHG). Las emisiones de N₂O podrían ser estimuladas por la expansión del cultivo de maíz para atender la demanda de bioetanol. El cultivo de maíz demanda una mayor fertilización con nitrógeno en comparación con otros cultivos, lo que lleva a un proceso de desnitrificación, incrementando las emisiones de N₂O. Dado lo anterior, la selección del tipo de cultivo bioenergético, así como su localización es determinante para controlar las emisiones de N₂O.

(Wielgosiński, G., Łechtańska, P., Namiecińska, O., 2017) comparó distintos contaminantes [i.e. monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NO) y el carbono orgánico total (TOC)] emitidos durante la combustión de siete muestras de biomasa, paja de colza, corteza de roble, leña y pellets de madera, hojarasca de sauce y arbusto de colza, con muestras de carbón pulverizado. El estudio fue llevado a cabo en el horno de un laboratorio a cinco distintas temperaturas dentro del rango de 700 a 1,100 Celsius, y tres distintos flujos de aire con exceso de oxígeno. Se encontró que los distintos contaminantes, especialmente el TOC, fueron más altos en la combustión de biomasa, en comparación con la combustión de carbón duro. Lo anterior sugiere que la biomasa utilizada directamente como un bioenergético no puede ser considerada siempre como una opción amigable con el ambiente, a pesar de tratarse de un combustible renovable (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020), situación que podría ser distinta si se considera a la biomasa como insumo en la producción de biocombustibles como etanol y biogás, como se abordó en párrafos anteriores.

Problemas socio-económicos e implicaciones de gobernanza.

Existen varios problemas relacionados con el riesgo laboral, negociación de tierras, capacidad de construcción, pérdida de prácticas tradicionales culturales y los conflictos que surgen de las disputas de tierra que pueden resultar en problemas socio económicos propios de la producción y consumo de bioenergéticos y biomasa. (Müller, A., Weigelt, J., Götz, A., Schmidt, O., Lobos Alva, I., Matuschke, I., Ehling, U., Beringer, T., 2015) menciona en su investigación que es posible argumentar que la producción y consumo de biomasa podría tener impactos tanto negativos como favorables, basados en las condiciones en las cuales ocurran. Estos efectos se dan a distintos niveles y escalas cubriendo desde el ámbito local hasta el estándar internacional.

Las políticas internacionales, por ejemplo, las Directivas de Biocombustibles de la Unión Europea, esquemas del Banco Mundial como RAIP (Principios de Inversión Agrícola Responsable o *Responsible Agricultural Investment Principles*), etcétera, han sido implementadas para regular la producción de biomasa. Estas políticas son importantes para responder a las preguntas ¿qué?, ¿dónde?, ¿cómo?, ¿por quién? la producción de biomasa debe ser llevada a cabo. De acuerdo con (Müller, A., Weigelt, J., Götz, A., Schmidt, O., Lobos Alva, I., Matuschke, I., Ehling, U., Beringer, T., 2015), como parte de la agenda de desarrollo (posterior al 2015), la comunidad internacional participó en la selección de las metas de desarrollo sustentable (SDGs por sus siglas en inglés) con la finalidad de establecer un marco normativo comprensivo y aceptado universalmente. Es entonces que el año 2015 se convierte en un *benchmark*⁸ de sustentabilidad y gobernanza alrededor del mundo. Estas metas del desarrollo sustentable (SDGs) son más complejas y amplias que sus predecesoras metas del desarrollo del milenio (MDGs por sus siglas en inglés).

Los esquemas de gobernanza considerados son vitales para vincular la demanda diversa e incremental de biomasa resaltando la satisfacción de necesidades sociales dentro de los límites ambientales los cuales actualmente consideran las metas socioeconómicas de las SDGs con respecto a equidad, la protección de los recursos naturales requerida en la producción de biomasa, así como varios impactos de estos parámetros. Adicionalmente, la inequidad en términos de oportunidades, poder, acceso a los recursos requieren ser tomadas en cuenta cuando se implementan estos esquemas de gobernanza (Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S., 2020).

1.4. Biogás.

El sustrato más comúnmente utilizado para la producción de biogás son los residuos agrícolas, abono de animales, excretas humanas, desperdicios industriales y la

⁸ Término utilizado para establecer una comparativa de mejores prácticas o rendimientos.

fracción orgánica del desecho municipal. La ventaja añadida de este tipo de materia prima es la disponibilidad del sustrato, sustentabilidad, valor económico y potencial energético.

La fuente más económica y abundante para producir biogás son los residuos agrícolas que se componen de rastrojos o esquilmos de cosecha, melaza de caña de azúcar, cáscaras de fruta y nueces, hojarasca, etcétera. En general la biomasa lignocelulósica (o lignocelulosa) está compuesta de celulosa, hemicelulosa y lignina, y puede ser empleada como una fuente efectiva para la producción de biogás, el cual rebasa las limitaciones impuestas por el petróleo crudo. Todos los residuos agrícolas, considerados por su naturaleza química como hidratos de carbono, se pueden clasificar principalmente en celulosa (polímero de glucosa), hemicelulosa (polímero de xilosa, manosa y galactosa) y lignina (cadenas complejas de moléculas de fenol) (Chozhaendhan S, Gnanavel G, Karthiga Devi G, Subbaiya R, Praveen Kumar y Bharathiraja B., 2020). La composición de lignocelulosa varía para cada cultivo de acuerdo con su origen (Bertero M, de la Puente G, Sedran U., 2012); (Iqbal HMN, Kyazze G, Keshavarz T., 2013).

La celulosa es uno de los compuestos de carbono más abundantes en el planeta y representa en promedio un 25% de la composición de los organismos vegetales (Klemm D, Schmauder HP, Heinze T., 2005). La hemicelulosa está siempre asociada con la celulosa como un polímero de carbohidrato que otorga la propiedad de firmeza (Laureano-Pérez L, Teymouri F, Alizadeh H, Dale BE., 2005). Su estructura consiste en un arreglo de moléculas de carbohidratos simples formando polisacáridos de 100 a 200 unidades. La lignina es uno de los principales componentes de la pared celular (propia de las células vegetales), la cual actúa como barrera a la degradación enzimática. La lignina tiene un arreglo complicado derivado de las distintas interacciones entre los monómeros de fenil propano (Iqbal HMN, Kyazze G, Keshavarz T., 2013); (Ladisch M. R., Mosier N. S., Kim Y., Ximenes E., Hogsett D., 2010). Esta estructura aleatoria se forma a partir de la polimerización enzimática de radicales libres precursores de lignina en forma de alcoholes de p-hidroxicinamilo (Chozhaendhan S, Gnanavel G, Karthiga Devi G, Subbaiya R, Praveen Kumar y Bharathiraja B., 2020).

El pretratamiento de materia prima para la producción de biogás es un proceso necesario para evitar fallas o desviaciones en los procesos de degradación rápida que tienen por objeto el incremento en el rendimiento de biogás (Mschandete A, Bjornsson L, Kivaisi AK, Rubindamayugi MST, Matthiasson B., 2006). Esta práctica ha sido llevada a cabo por largo tiempo con el propósito de incrementar la porosidad del material, reduciendo las estructuras cristalinas de la celulosa y removiendo el contenido de hemicelulosa y lignina para una mejor utilización del sustrato por los microorganismos responsables de la fermentación (Ye, S., Jiayang, C., 2002).

El pretratamiento de material lignocelulósico ayuda a prevenir la formación de coproductos que inhiban al proceso de fermentación y también previene la degradación o pérdida de los carbohidratos. De igual forma, mejora la formación de azúcar o la habilidad de subsecuentemente formar azúcar por la vía enzimática, así como otros procesos hidrolíticos.

Parámetros que inciden en la producción de biogás.

Junto con el proceso bioquímico de fermentación, el pretratamiento de materia prima debe ser examinado para asegurar una operación exitosa en la producción de biogás (Tiehm A, Nickel K, Zellhorn M, Neis U., 2001). La presencia de toxinas orgánicas o inorgánicas en la materia prima que será utilizada para la producción de biogás, así como la variación en la temperatura, causa problemas repentinos y fallas dentro de los reactores anaerobios. Los parámetros de desempeño que inciden en la mejora de la producción de biogás son: la inoculación (o siembra), ácidos grasos volátiles, pH, reducción de los tamaños de partículas, pretratamiento térmico, adición de metales, etc. (Carlsson M, Lagerkvist A, Morgan-Sagastume F., 2012).

A continuación, se detallan los parámetros referidos.

- **Inoculación.** Se trata del proceso más común de inicialización del crecimiento microbiano en una nueva planta a través de la inoculación del material de una planta existente hacia el sistema nuevo. La finalidad de este método es la de introducir al microorganismo inoculante al sistema. Este método ayudará a reducir el tiempo de digestión de excretas animales o desechos municipales dentro del nuevo reactor, mientras que el material digerido está previamente cargado de una suficiente cantidad de microorganismos (Ward AJ, Hobbs PJ, Holliman PH, Jones DL., 2008).
- **Ácidos grasos volátiles.** El parámetro que principalmente gobierna el proceso de digestión anaerobia o anaeróbica⁹ (AD por sus siglas en inglés) es el de la composición y concentración de los ácidos grasos volátiles (VFA por sus siglas en inglés). La fermentación anaeróbica de desechos orgánicos produce una serie de VFAs que incluyen: ácido acético, propiónico, butírico y valérico (Zhang C, Su H, Baeyens J, Tan T., 2014). Generalmente bacterias acetogénicas y metanogénicas sintróficas (que viven de los productos metabólicos de otras especies) convierten los VFAs producidos durante el proceso anaeróbico para transformarlos en Metano (CH₄) y CO₂. Sin embargo, los VFAs liberan grandes cantidades de compuestos orgánicos que

⁹ La digestión anaerobia (también llamada anaeróbica) (AD) es un proceso fermentativo que se lleva a cabo por distintos grupos o asociaciones de microorganismos dentro de un biorreactor o digester controlando las condiciones para que se realice en ausencia de oxígeno. Uno de los principales productos de este tipo de procesos es el biogás.

reducen el pH del sistema y pueden causar una falla del proceso de digestión anaeróbica (Zhang C, Su H, Baeyens J, Tan T., 2014). La acumulación de VFAs refleja una disparidad cinética entre los microorganismos formadores y consumidores de ácidos. Esta condición típica es causada por la presencia de componentes tóxicos o inhibitorios, por la sobrecarga hidráulica u orgánica del digestor, por la variación repentina de la temperatura, etcétera (Chozhaendhan S, Gnanavel G, Karthiga Devi G, Subbaiya R, Praveen Kumar y Bharathiraja B., 2020).

- **Potencial de Hidrógeno (pH).** Se trata de un parámetro importante que debe ser monitoreado y controlado durante la digestión anaeróbica o el proceso de producción de biogás debido a la influencia que puede causar al microorganismo. Entre las bacterias involucradas en los consorcios que se agregan al biodigestor, se encuentran las del grupo acetogénico, que como residuo producen amoníaco. Altas concentraciones de amoníaco al interior del biodigestor podrían inhibir la acción de las bacterias metanogénicas, con lo que se reduciría la producción de metano, por esto es importante controlar los niveles de amoníaco. La toxicidad de amoníaco es causada debido al incremento en la concentración de amoníaco libre y controlar los niveles de pH ayuda a mantener en condiciones óptimas la proliferación del microorganismo a partir del sustrato. El valor óptimo de pH en la digestión anaerobia se encuentra dentro del rango entre 6 a 7.8. Los valores de pH menores a 6.2 resultan en una caída drástica de la actividad metanogénica¹⁰ y causa diversos efectos secundarios en términos de permeabilidad de los microorganismos (Jiang D, Zhuang D, Fu J, Huang Y, Wen K., 2012).
- **Pretratamiento ácido/alcalino.** Este procedimiento busca solubilizar la hemicelulosa, la presencia de metanogénicos tiene la característica de adaptación a los componentes inhibitorios. Dado que una concentración alta de ácidos puede representar una acumulación de compuestos inhibidores, así como problemas de corrosión, se busca neutralizarlos a través de un tratamiento alcalino. El tratamiento alcalino aplicado a digestión anaeróbica tiene como resultante el mejoramiento en la producción de biogás cuando se utilizan residuos de vegetales como sustrato (Chozhaendhan S, Gnanavel G, Karthiga Devi G, Subbaiya R, Praveen Kumar y Bharathiraja B., 2020).
- **Razón carbono/nitrógeno.** Permite tener una mejor idea de la composición del sustrato. La razón óptima para la producción de biogás se encuentra dentro del rango de valores de 20 a 30. Una razón menor incrementa el riesgo

¹⁰ Actividad metanogénica hace referencia a la generación de metano como producto del metabolismo microbiano en condiciones anaeróbicas o de ausencia de oxígeno.

de inhibición por amoníaco y más alta podría resultar en degradación de nitrógeno (Hassan M, Ding W, Shi Z, Zhao S., 2016).

- Reducción del tamaño de partículas. Para tener condiciones óptimas, se busca un tamaño de partícula de entre los 100 nm a los 2 mm. (Mschandete A, Bjornsson L, Kivaisi AK, Rubindamayugi MST, Matthiasson B., 2006).
- Temperatura. Se trata de uno de los parámetros que influyen mayormente las propiedades de la fase líquida al interior del reactor durante el proceso de digestión anaerobia, dado que influye directamente la actividad enzimática y coenzimática e indirectamente el rendimiento de metano. El desempeño del reactor mejora conforme la temperatura aumenta (Chozhaendhan S, Gnanavel G, Karthiga Devi G, Subbaiya R, Praveen Kumar y Bharathiraja B., 2020).
- Adición de metales. Los cationes de metales pesados como cromo, cobre, cobalto, zinc, níquel, etc. juegan un papel importante en la digestión anaerobia para la síntesis de enzimas y su mantenimiento en forma adicional a los nutrientes como carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.

Principios básicos en la producción de biogás.

La conversión anaeróbica de residuos orgánicos a biogás consiste en una cadena de biorreacciones interrelacionadas que involucran consorcios de microorganismos (Merlin Christy P, Gopinath LR, Divya D., 2014). El proceso global de la producción de biogás incluye hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

- La hidrólisis es el primer paso en la producción de biogás y consiste en que las grandes cadenas de compuestos orgánicos son reducidas a componentes más simples por la acción de bacterias anaerobias hidrolíticas.
- La acidogénesis es el proceso más rápido dentro de la digestión anaeróbica y consiste en que los componentes resultantes del primer proceso son transformados a ácidos orgánicos volátiles.
- La tercera etapa del proceso es la acetogénesis que resulta en la producción de ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Este proceso es muy importante, pues convierte los ácidos grasos orgánicos en ácido acético que es el sustrato en la metanogénesis, gracias a la acción de microorganismos del género *Clostridium*, *Acetobacter*, *Syntrophospora*, entre otros (Jain S, Wolf IT, Lee J, Tong YW., 2015).
- La metanogénesis es la fase final del proceso de producción de biogás, consiste en la formación de metano a partir del ácido acético formado previamente por la acción de microorganismos del grupo methanosaeta y del

género *Methanosarcina* (Chozhaendhan S, Gnanavel G, Karthiga Devi G, Subbaiya R, Praveen Kumar y Bharathiraja B., 2020).

Utilización del biogás.

El biogás es un excelente combustible con numerosas aplicaciones, combinando calentamiento y energía (*combined heat and power*, o CHP por sus siglas en inglés). El biogás es principalmente utilizado para producir vapor, electricidad y como combustible de vehículos automotores.

El biogás producido de desechos orgánicos renovables es considerado como energía alternativa a los combustibles fósiles en su aplicación dentro del sector de transporte (Appels et al, 2011). El ciclo CHP encuentra su aplicación en motores de combustión interna en la transformación de energía química a energía mecánica producida al interior del motor, a partir de la chispa de ignición. Para el futuro, el biogás toma su argumento central en el hecho de estar considerado como una molécula de energía con alta eficiencia y bajas emisiones (comúnmente utilizado como sustituto de gas natural) (Chozhaendhan S, Gnanavel G, Karthiga Devi G, Subbaiya R, Praveen Kumar y Bharathiraja B., 2020).

Además del metano como componente principal, el biogás contiene otros gases, como CO₂, H₂S, vapor de agua, nitrógeno y oxígeno. La eficiencia del biogás como combustible está determinada por su potencial calorífico. El potencial calorífico del gas natural se aproxima a los 35.8 MJ/m³ y el potencial calorífico del biogás es de alrededor de 21.5 MJ/m³. El CO₂ que es un gas no combustible no sólo reduce el potencial calorífico de la mezcla, sino que también limita la viabilidad económica de la utilización de biogás en la generación eléctrica. Para lograr una mayor calidad de metano y su amplia utilización, se requiere de la remoción de impurezas del biogás.

La calidad mejorada del biogás se logra mejorando la calidad del sustrato, controlando los parámetros que influyen en el proceso de producción o implementando tecnologías de purificación para el biogás producido. El biogás purificado emite menos GHG en comparación con los combustibles fósiles. Entre las principales técnicas de purificación de biogás se encuentran la absorción física, rascado con agua presurizada, adsorción con balance de presión, absorción química, separación por membrana, mejoramiento criogénico y enriquecimiento in situ (Chozhaendhan S, Gnanavel G, Karthiga Devi G, Subbaiya R, Praveen Kumar y Bharathiraja B., 2020).

Costo económico y sustentabilidad ambiental.

El costo es uno de los factores cruciales y determinantes involucrados en la optimización de procesos de producción. El proceso de producción ampliamente depende de los costos de capital y de operación (capex y opex, respectivamente) de las tecnologías utilizadas para mejorar la productividad y calidad del gas

producido, así como del tamaño de la planta de producción (Yang et al, 2014). Los costos de mantenimiento son uno de los factores clave en la producción de biogás dado que incrementan el costo de operación de tecnologías mejoradas (Campanaro 2016). La utilización de biogás como un combustible vehicular requiere una alta concentración de metano puro, que puede ser asegurado a través de diversas tecnologías. Procesos de absorción química proveen mayor eficiencia con mayores costos de inversión, mientras que tecnologías como rascado de agua son económicamente más asequibles (Bauer, F., Hulteberg, C., Persson, T., Tamm, D., 2013).

1.5. Bioetanol o etanol de origen fermentativo.

El bioetanol es un alcohol de cadena simple con dos moléculas de carbono (C_2H_6O) producido principalmente a partir de la acción fermentativa de microorganismos del género *Saccharomyces* a partir de sustrato de biomasa (generalmente almidones provenientes de granos como maíz o biomasa rica en carbohidratos). Las materias primas más comúnmente utilizadas para la producción de etanol incluyen granos (maíz, sorgo y trigo), caña de azúcar y yuca (*Manihot esculenta*) (combustibles de primera generación).

El bioetanol tiene una muy amplia variedad de usos y aplicaciones, tanto en el sector alimentos y bebidas, como en el sector industrial y energía, sin embargo, este trabajo se centrará en su uso como combustible para vehículos automotores.

Utilización como combustible.

En términos de biocombustibles, el bioetanol (en el presente trabajo nombrado indistintamente como etanol) es tanto un sustituto de gasolina, como un aditivo carburante que incrementa el aporte de oxígeno para la combustión al interior del motor de combustión interna. Debido a su estructura molecular compuesta mayormente por cadenas de carbono, su combustión lleva (en forma similar a los combustibles fósiles) a la emisión de cantidades calculables de dióxido de carbono. En el 2015, 11 países consumían el 97% del etanol producido para su uso como combustible mientras que los volúmenes de producción promediaron alrededor de 115,600 millones de litros. Los Estados Unidos de América y Brasil dominan el mercado de producción de etanol, produciendo respectivamente el 49% y el 25% de la producción global (Debnath D, Chandra Babu S., 2019).

Como alternativa al uso de combustibles fósiles, en el siglo 20, el gobierno de los Estados Unidos de América implementó políticas públicas que apoyaron la conversión de la energía química almacenada en las plantas derivando la conversión del almidón en etanol. Esta conversión consume una parte importante de la producción de maíz en los Estados Unidos de América. El almidón es un polímero simple de glucosa que es fácilmente convertido a etanol con las tecnologías existentes, sin embargo, casi un tercio del potencial de energía del

almidón es perdida durante el proceso de producción. Con la finalidad de evitar poner en riesgo la seguridad alimentaria, se han buscado fuentes alternativas de sustrato para producir etanol a partir de la utilización de residuos de cosechas, coproductos forestales, pastos perennes y otras formas de biomasa a las que colectivamente se les conoce como residuos lignocelulósicos y son considerados biocombustibles de segunda generación (Ohlrogge J, Allen D, Berguson B, DellaPena D, Shachar-Hill Y, Stymne S., 2009).

Situación general del bioetanol.

La poca unidad en la aceptación de los biocombustibles con origen en alimentos como el maíz, obliga a la sociedad a analizar las distintas opciones de obtener energía alternativa (Pérez-Fernández, A., Venegas-Venegas, J.A., 2017). Otra opción son los residuos agrícolas, los cuales son atractivos debido a sus costos bajos y abundancia (Sarkar N, Kumar GS, Banerjee S, Aikat K., 2012), sin embargo, (Talebnia F, Karakashev D, Angelidaki I. , 2010), (Otero-Rambla MA, García R, Pérez MC, Martínez JA, Vasallo MC, Saura G, Bello D., 2009) hacen la aclaración que para el aprovechamiento de la paja de algunos cultivos como la del trigo, los costos de producción basados en la tecnología actual son muy altos. (Alejos, C., Calvo, E., 2015) señalan que México es uno de los países que toma como base de su alimentación el maíz, por lo que resulta imperativo reflexionar sobre las restricciones en el uso de éste en la producción directa de biocombustibles (de primera generación), así como importante un enfoque en los biocombustibles producidos a partir de materiales lignocelulósicos (segunda generación) que muestran ventajas económicas, energéticas y ambientales en comparación con el bioetanol producido con base en almidón de maíz o alcohol de caña de azúcar.

La utilización de otras energías para el riego y el aseguramiento de la provisión de materia prima para elaborar etanol de maíz pone en entredicho y propicia el cuestionamiento del desempeño energético de los sistemas productores de maíz que incorporan el riego, basados en el consumo de energía fósil (Denoia J, Di Leo N, Montico S, Bonel B., 2013). Los autores (Morales YL, Kafarov V, Ruíz F, Castillo EF., 2010) indican que la producción de bioetanol a partir de mezclas de jugos secundarios de la producción de azúcar requiere de estudios que desarrollen modelos para las etapas de preparación, molienda y clarificación para simular bajos porcentajes de error en el proceso. El mismo proceso de producción de azúcar y de etanol genera residuos. La producción de etanol a partir de la industria azucarera origina el flujo de aguas residuales que pueden ser aprovechadas para generar energía que, a su vez, la destilería de etanol requiere, contribuyendo así a mantener un ciclo energético más eficiente (Arias-Polo, 2011).

1.6. Bioenergía y Bioeconomía.

Cerca del 75% de la energía renovable utilizada en el mundo involucra bioenergía, con más de la mitad de ese consumo relacionado con uso tradicional de biomasa. La bioenergía representa casi 10% del total del consumo final de energía y representó 1.4% de la generación eléctrica en 2015. La biomasa tiene un potencial significativo para aumentar la oferta energética en países densamente poblados, que tienen una demanda de energía en aumento, ya que se puede utilizar directamente para calefacción, generación de electricidad, o también puede convertirse en sustitutos de petrolíferos y gas. Entre 2010 y 2018, la capacidad instalada en el mundo pasó de 67,929 MW a 115,731 MW, contabilizando biomasa sólida, biogás, desechos renovables y biocombustibles líquidos. (SENER, 2020) ((IRENA), 2020).

El término bioeconomía significa un cambio en la producción económica que lleva a una economía con bases biológicas, así como la sustitución de fuentes fósiles de energía por materiales renovables a través de toda la cadena de valor, tanto en la producción industrial como de energía (Beer, K., Böcher, M., Bollmann, A., Töller, A.E., Vogelpohl, T., 2018).

No es sorprendente que hasta ahora 49 países han adoptado estrategias de bioeconomía etiquetándolas como una contribución hacia una forma más sustentable de producción, especialmente en lo relacionado con las obligaciones del Acuerdo de París o los Objetivos del Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (Böcher, M., Töller, A.E., Perbandt, D., Beer, K., Vogelpohl, T. , 2020).

La bioeconomía parece una promesa de formas más sustentables de producción sin cuestionar sustancialmente las relaciones de poder económico subyacentes (D'Amato, D., Droste, N., Allen, B., Kettunen, M., Lähtinen, K., Korhonen, J., Toppinen, A., 2017). Muchos gobiernos apoyados por la iniciativa privada y por asesoría científica buscan el fortalecimiento de la bioeconomía (Staffas, L., Gustavsson, M., McCormick, K., 2013). La investigación en bioeconomía es un campo en crecimiento, especialmente en Europa (Lovric, M., Lovric, N., Mavsar, R., 2020). Esta línea de investigación está inmersa en un debate general que cuestiona si la bioeconomía realmente tiene el potencial de transformar a la economía moderna hacia formas más sustentables de producción y consumo y en caso de darse por hecho, como las políticas y actos de gobierno que estimulan una mayor adopción de la bioeconomía deben ser organizadas para darse cuenta del potencial de la bioeconomía para el crecimiento económico y la sustentabilidad (Böcher, M., Töller, A.E., Perbandt, D., Beer, K., Vogelpohl, T. , 2020).

Existe también una perspectiva opuesta a la bioeconomía que es crítica acerca de sus promesas. En este sentido las líneas de investigación cuestionan críticamente

si la bioeconomía realmente ofrece el potencial de alcanzar las metas de sustentabilidad en el futuro o si es sólo una pantalla para que la economía permanezca intacta en un periodo en el que el discurso de sustentabilidad y cambio climático se ha vuelto más fuerte. Desde esta perspectiva, algunos investigadores han criticado la fijación tecnológica de las estrategias de bioeconomía, que han llevado al debate científico sobre un diseño más balanceado de las políticas en materia de bioeconomía (Prefier, C., Meyer, R., 2019). En este contexto, los investigadores ahora cuestionan acerca de cuáles podrían ser los efectos negativos de la bioeconomía sobre los recursos ecológicos y uso de suelo o qué tipo de problemas relacionados con el poder pueden surgir de la bioeconomía, por ejemplo, entre los intereses ecológicos y económicos o entre distintos actores políticos envueltos en política de bioeconomía. Con base en estas dos perspectivas que apoyan o critican la bioeconomía, la literatura científica en esta materia puede ser contextualizada. (Böcher, M., Töller, A.E., Perbandt, D., Beer, K., Vogelpohl, T. , 2020).

En relación con la producción de biomasa, surgen conflictos sobre los distintos tipos de uso de suelo, como la producción de alimentos o de insumos para su uso como energéticos. Otros estudios relacionados con el uso de suelo lidian con las consecuencias de la producción de biomasa para desarrollo de proyectos e infraestructura u objetivos de conservación de la naturaleza. En general, se espera una carencia de tierra debido a la intensificación del uso agrícola. Esto afecta a los países, tanto a economías desarrolladas, como a emergentes, llevando a efectos negativos en suelo y agua. La degradación de los ecosistemas resultante de la expansión de uso de suelo para actividades agrícolas relacionadas con la producción de biomasa como prerrequisito de la bioeconomía, pone en peligro la biodiversidad (Böcher, M., Töller, A.E., Perbandt, D., Beer, K., Vogelpohl, T. , 2020).

A diferencia del sol y el viento, la biomasa es una fuente versátil de energía renovable que es recargable por base y que puede ser utilizada en forma descentralizada. Algunos investigadores (Shahzad, U., Elheddad, M., Svart, J., Gosh, S., Dogan, B., 2022) también están discutiendo si el uso de biomasa en la generación de energía contribuye realmente al cuidado del ambiente. Considerando las condiciones de producción de biomasa (como condiciones climáticas, extensión de la fertilización con nitrógeno, posible utilización de mayores cantidades de energía por la intensificación agrícola con un potencial efecto negativo en el clima, reducción del bosque y áreas de conservación) la contribución a la protección del ambiente podría terminar siendo cuestionable u ocurrir solamente bajo ciertas condiciones de uso. Un reto en este contexto es el análisis de los efectos ambientales en una bioeconomía globalizada (por ejemplo, la cantidad y calidad del agua). Los efectos ambientales pueden ser calculados utilizando modelos económicos complejos. En relación con el uso de biocombustibles, estos efectos

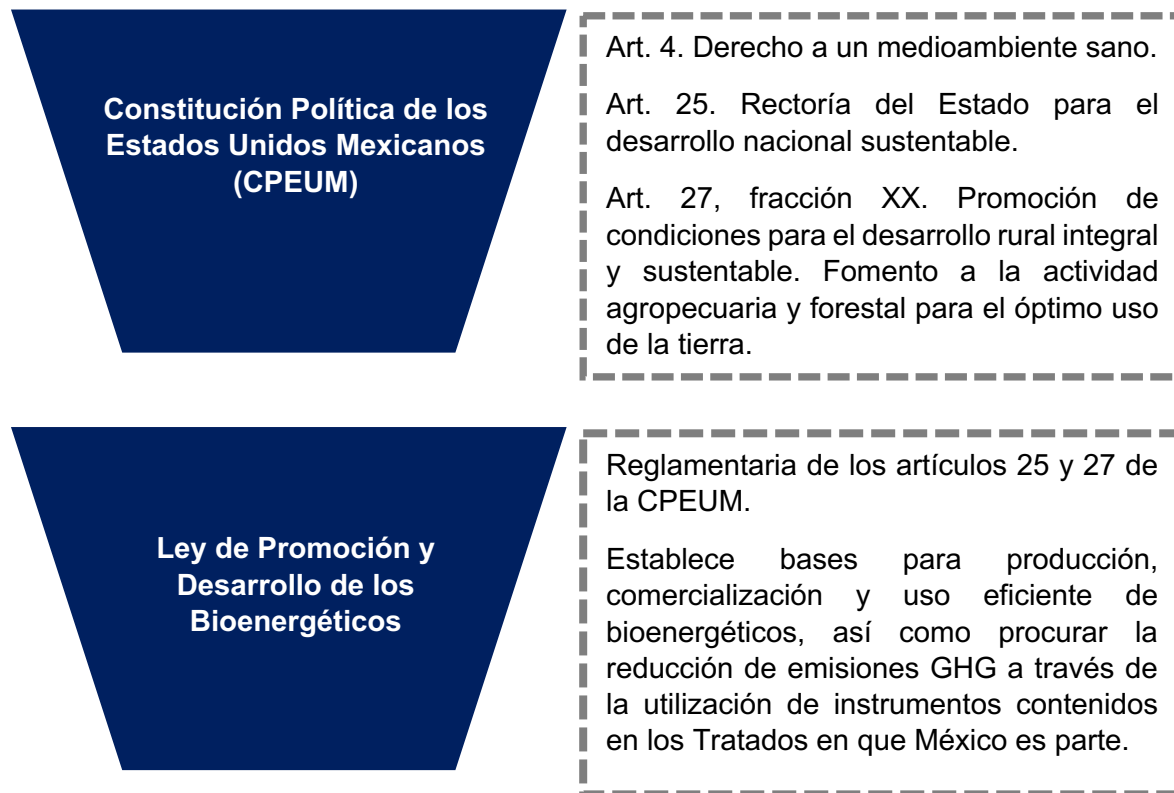
son discutidos bajo el término LUC (Cambio en el uso indirecto del suelo, por sus siglas en inglés) (Böcher, M., Töller, A.E., Perbandt, D., Beer, K., Vogelpohl, T. , 2020).

Considerando la sustentabilidad, la cuestión central en la investigación sobre bioeconomía recae en si la bioeconomía podría servir sólo como un sustituto para el uso de recursos fósiles (sustentabilidad débil) o si el desacoplamiento del crecimiento con el consumo de recursos puede ser alcanzado (sustentabilidad fuerte). El potencial ecológico de la bioeconomía recae precisamente en el incremento de la eficiencia de recursos y, potencialmente en el cierre de ciclos materiales, incluso si éstos son difíciles de medir (Böcher, M., Töller, A.E., Perbandt, D., Beer, K., Vogelpohl, T. , 2020).

Capítulo 2. El marco legal, normativo y de planeación estratégica nacional en materia de bioenergéticos en México.

De acuerdo con Banacloche (2020), en años recientes, México ha lanzado un paquete de programas e iniciativas para combatir los incrementos en las emisiones de Gases Efecto Invernadero y con ello alcanzar una economía más sustentable. En términos de energía, con la Reforma Energética implementada en 2013 – 2014, México está buscando un sistema energético más limpio que le permita ser autosuficiente, limpio y eficiente en la generación, transmisión y distribución de electricidad (SENER, 2015). Este paquete ha sido entendido como una reforma estructural ambiciosa que tiene el potencial de incrementar la productividad y liberar el crecimiento en el mediano plazo (IEA, 2017). Los pasos que México está tomando hacia un crecimiento verde y alcanzar las metas del Acuerdo de París pueden ser separados en dos categorías principales: Energía y Cambio climático. Estas categorías son complementarias, compatibles entre ellas y profundamente entrelazadas con la actual construcción de política pública.

A continuación, se establecen algunas referencias de las principales leyes, documentos normativos y de planeación que inciden en el tema de biocombustibles en México (véase **Figura 3**).



Ley de Transición Energética

Reglamentaria de los párrafos 6 y 8 del artículo 25 de la CPEUM.

Busca regular el aprovechamiento sustentable de la energía.

Considera el establecimiento de metas de energías limpias y de eficiencia energética

Establece el Programa nacional para el Aprovechamiento Sustentable de Energía.

Ley de los Órganos Reguladores Coordinados en Materia Energética (LORCME)

Reglamentaria del párrafo octavo del artículo 28 de la CPEUM.

Regula la organización y funcionamiento de los Órganos Reguladores Coordinados en Materia Energética y establece sus competencias. Faculta a la CRE el promover el desarrollo eficiente de transporte, almacenamiento y distribución de petrolíferos.

Programa Sectorial de Energía 2020 – 2024 (PROSENER)

Es el instrumento derivado de la planeación estratégica nacional para el desarrollo que contiene la política energética a implementar por parte del gobierno Federal.

Contiene los objetivos, prioridades y políticas que regirán el desempeño de las actividades del sector energético del país.

Estrategia de transición para promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética (ET – LTE)

Ha sido objeto de distintas actualizaciones, la última de las cuales data de 2020.

Se enfoca en la generación eléctrica, sin embargo, contribuye al tema de bioenergéticos, pues dentro de sus objetivos están los de fomentar la reducción de emisiones contaminantes y reducir la dependencia en combustibles fósiles.

Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016.
Especificaciones de calidad de los petrolíferos, con fundamento en el artículo 51 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización

Regula el uso de etanol en las gasolinas que se expenden en México, restringiendo su uso en las zonas metropolitanas del valle de México, de Guadalajara y de Monterrey; sin embargo, permite un volumen de 5.8 por ciento de etanol anhidro como oxigenante de las gasolinas regular y premium en el resto del territorio nacional.

Figura 3. Resumen esquemático de los instrumentos normativos que plantean referencias de las principales leyes, documentos normativos y de planeación que inciden en el tema de biocombustibles en México.

Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos.

La Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos fue promulgada el 1 de febrero de 2008, con el objeto de promover la producción, comercialización y uso de los bioenergéticos, a fin de contribuir al desarrollo sustentable y la diversificación energética.

Establece las bases para:

- I. Promover la producción de insumos para Bioenergéticos, a partir de las actividades agropecuarias, forestales, algas, procesos biotecnológicos y enzimáticos del campo mexicano, sin poner en riesgo la seguridad y soberanía alimentaria del país de conformidad con lo establecido en el artículo 178 y 179 de la Ley de Desarrollo Rural Sustentable.
- II. Desarrollar la producción, comercialización y uso eficiente de los Bioenergéticos para contribuir a la reactivación del sector rural, la generación de empleo y una mejor calidad de vida para la población; en particular las de alta y muy alta marginalidad.
- III. Promover, en términos de la Ley de Planeación, el desarrollo regional y el de las comunidades rurales menos favorecidas;
- IV. Procurar la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera y gases de efecto de invernadero, utilizando para ello los instrumentos internacionales contenidos en los Tratados en que México sea parte, y

-
- V. Coordinar acciones entre los Gobiernos Federal, Estatales, Distrito Federal y Municipales, así como la concurrencia con los sectores social y privado, para el desarrollo de los Bioenergéticos.

Ley de Transición Energética.

La Ley de Transición Energética (LTE) tiene por objeto regular el aprovechamiento sustentable de la energía, así como las obligaciones en materia de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos. Es de orden público e interés social, de observancia general en los Estados Unidos Mexicanos y reglamentaria de los párrafos 6 y 8 del artículo 25 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, así como de los transitorios Décimo Séptimo y Décimo Octavo del Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en Materia de Energía, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 20 de diciembre de 2013.

Uno de los objetivos de esa ley que se destaca e incide en el tema de los bioenergéticos es el de reducir, bajo criterios de viabilidad económica, la dependencia del país de los combustibles fósiles, como fuente primaria de energía.

Ley de los Órganos Reguladores Coordinados en Materia Energética (LORCME).

El 11 de agosto de 2014, se publica en el Diario Oficial de la Federación el decreto que expide la LORCME.

Esta Ley establece en su artículo 41, fracción I, que la Comisión Reguladora de Energía (CRE) tiene la atribución de regular y promover el desarrollo eficiente de las actividades de transporte, almacenamiento, distribución y expendio al público de petrolíferos.

En su artículo 42 establece que la CRE fomentará el desarrollo eficiente de la industria, promoverá la competencia en el sector, protegerá los intereses de los usuarios, propiciará una adecuada cobertura nacional y atenderá a la confiabilidad, estabilidad y seguridad en el suministro y la prestación de los servicios.

Programa Sectorial de Energía (PROSENER) 2020 – 2024.

El 6 de julio de 2020 se publica en el Diario Oficial de la Federación el Programa Sectorial de Energía (PROSENER) 2020–2024, como Programa Sectorial Derivado del Plan Nacional de Desarrollo 2019–2024. En este documento de la planeación estratégica nacional se plasma la política energética a seguir durante el periodo 2020–2024, especificando objetivos y estrategias prioritarias, así como acciones puntuales que las Dependencias, Entidades y Empresas Productivas del Estado

(EPE) deberán seguir a partir de la vinculación con sus documentos estratégicos particulares.

A continuación, se resaltan algunos de los objetivos, estrategias y acciones del PROSENER 2020 - 2024 que se relacionan con el tema del presente documento (se mantiene la numeración original del PROSENER en apego al documento oficial):

Objetivo prioritario 4.- Elevar el nivel de eficiencia y sustentabilidad en la producción y uso de las energías en el territorio nacional.

Estrategia Prioritaria 4.1 Establecer una política en materia de diversificación de fuentes de energía, aprovechando de manera óptima todos los recursos de la nación, avanzando en el uso de Energías Limpias y renovables, para garantizar una Transición Energética Soberana y ordenada.

Acciones puntuales:

- (Acción 4.1.1) Investigar de manera sistemática todas las energías primarias de la nación, así como las tecnologías disponibles para su aprovechamiento sustentable, para establecer políticas que garanticen la autosuficiencia energética de México a lo largo del siglo XXI.
- (Acción 4.1.2) Incorporar a la planeación de la transición energética, criterios para decisiones de inversión en energías primarias, según demandas y disponibilidades, considerando el balance energético, los costos e impactos ambientales y los compromisos internacionales relacionados con el Cambio Climático.
- (Acción 4.1.7) Establecer en la política de eficiencia energética, el aumento del rendimiento de equipos de iluminación, procesos productivos, espacios públicos y domésticos; y el uso de energías renovables, sistemas de almacenamiento, conversión de corriente y tecnologías de interconexión a la red eléctrica.
- (Acción 4.1.8) Promover tecnologías de transformación de desperdicios orgánicos y otros desechos; para recuperar el biogás, reducir la contaminación y generar electricidad.

Estrategia prioritaria 4.5 Implementar instrumentos de planeación acorde a las metas establecidas en la LTE y la LGCC, que permitan incorporar acciones concretas enfocadas a la diversificación de la matriz energética para reducir la pobreza y dependencia energéticas.

Acciones puntuales:

-
- (Acción 4.5.2) Coordinar y proponer planes de financiamiento que contribuyan al avance de la ejecución de las acciones enfocadas al cambio de la matriz energética.
 - (Acción 4.5.3) Fortalecer los mecanismos de coordinación interinstitucional de la Estrategia de Transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios y de la Estrategia Nacional de Cambio Climático.

Estrategia de Transición para promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética (ET – LTE).

El 7 de febrero de 2020 se publica en el DOF el Acuerdo por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética. En su artículo único se aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética.

Dentro de este documento de la planeación nacional, se encuentran algunos temas que fortalecen el objetivo del presente trabajo, por lo cual a continuación se resumen y resaltan:

La seguridad energética es la capacidad de un país para satisfacer la demanda nacional de energía con suficiencia, oportunidad, sustentabilidad y precios adecuados, en el presente y hacia el futuro. Esto significa disponibilidad y acceso a fuentes de energía aceptables ambientalmente y a precio accesible. También implica asegurar que el desarrollo y aprovechamiento de las tecnologías claves para el futuro energético estén guiados por el interés de la Nación. Por lo mismo, reducir la vulnerabilidad energética del país implica recuperar la capacidad de tomar decisiones de política energética e industrial de manera libre y soberana.

Ante el acelerado cambio tecnológico, con integración creciente a la matriz energética de fuentes renovables de energía, con equipos y sistemas cada vez más eficientes y con un funcionamiento coordinado entre el sistema energético con las telecomunicaciones y la informática, una política energética soberana debe incluir elementos de política industrial, donde insumos e infraestructura para el aparato productivo del país son ofrecidos por empresas que tienen una estructura de mercado oligopólica, por lo que tienen la capacidad de fijar precios por encima de situaciones de mercado. En este sentido, es primordial impulsar el establecimiento de industrias o fomentar el tránsito desde las manufacturas hacia las nuevas tecnologías, promoviendo la evolución de las manufacturas clásicas a las llamadas industrias del futuro (como las tecnologías de la información, la biotecnología, la robótica y las energías renovables, entre otras).

Principios de la nueva política energética que se encuentran alineados al PND en materia de renovables:

- Administrar manera ordenada la incorporación de energías renovables en la matriz energética nacional, asegurando que se mantengan la integridad, seguridad, rentabilidad y crecimiento de la red eléctrica, como infraestructura estratégica del Estado.

Dentro de la oferta energética a partir de energías renovables y limpias competitivas con combustibles fósiles se considera: Bioenergía. Cerca del 75% de la energía renovable utilizada en el mundo involucra bioenergía, con más de la mitad de ese consumo relacionado con uso tradicional de biomasa. La bioenergía representa casi 10% del total del consumo final de energía y representó 1.4% de la generación eléctrica en 2015. La biomasa tiene un potencial significativo para aumentar la oferta energética en países densamente poblados, que tienen una demanda de energía en aumento, ya que se puede utilizar directamente para calefacción, generación de electricidad, o también puede convertirse en sustitutos de petrolíferos y gas. Entre 2010 y 2018, la capacidad instalada pasó de 67,929 MW a 115,731 MW en el mundo, contabilizando biomasa sólida, biogás, desechos renovables y biocombustibles líquidos ((IRENA), 2020).

Algunas referencias de políticas públicas nacionales con perspectivas de una transición energética soberana son: Alemania (15.8% de renovables en 2018), Francia (10.4% renovables en 2018) y China [Ejemplo Hecho en China 2025 – vehículos de combustibles alternos, biogás] (12.7% de renovables en 2018). EEUU (7.3% de renovables en 2018).

México se encuentra situado en el lugar 15 de principales países emisores de CO2 del mundo con 443 millones de toneladas de CO2 en 2021 (BP, 2022) véase la **Tabla 1**.

Tabla 1. Principales países emisores de CO2 en el mundo, proveniente de energía, emisiones de procesos, metano y quema de gas.

[Millones de Toneladas de CO2 equivalente]		2017	2018	2019	2020	2021	Tasa 2021 vs 2020	Participación 2021
1	China	10,767.04	11,056.44	11,311.09	11,461.22	12,039.78	5%	31%
2	Estados Unidos de América	5,394.03	5,593.64	5,489.64	4,883.66	5,167.86	6%	13%
3	India	2,529.33	2,673.00	2,702.28	2,494.27	2,797.18	12%	7%
4	Rusia	2,043.84	2,127.47	2,130.92	2,010.61	2,172.12	8%	6%
5	Japón	1,214.05	1,192.40	1,151.41	1,058.27	1,081.70	2%	3%
6	Irán	828.65	852.46	842.38	856.86	892.65	4%	2%

7	Indonesia	645.18	703.44	756.09	694.35	713.06	3%	2%
8	Arabia Saudita	711.38	711.06	685.09	670.41	679.44	1%	2%
9	Alemania	778.85	750.58	697.59	618.13	646.66	5%	2%
10	Corea del Sur	670.38	686.21	662.69	614.16	628.70	2%	2%
11	Canadá	629.37	642.11	639.32	582.24	595.42	2%	2%
12	Brasil	501.08	480.93	481.01	448.62	495.82	11%	1%
13	Sudáfrica	506.77	488.20	510.32	472.56	472.94	0%	1%
14	Turquía	436.76	430.46	419.36	414.96	447.92	8%	1%
15	México	538.35	532.06	511.49	424.73	443.96	5%	1%
16	Australia	463.49	461.53	471.32	441.73	433.44	-2%	1%
17	Reino Unido	414.63	406.68	390.59	329.11	348.41	6%	1%
18	Vietnam	256.80	305.19	359.70	343.03	339.78	-1%	1%
19	Italia	347.78	348.39	341.01	295.29	322.07	9%	1%
20	Polonia	324.0	329.4	311.3	293.6	318.4	8.454%	0.8%
Total en el Mundo		38,194.61	39,104.02	39,152.77	36,963.74	38,976.61	5.450%	100.0%

Fuente: Tomado del Informe BP Statistical Review of World Energy 71st edition. 2022.

Instrumentos económicos. De acuerdo con el Consejo Mundial de Energía (WEC, por sus siglas en inglés), los incentivos que aplican los gobiernos para la promoción de las energías limpias y el uso eficiente de la energía son de dos tipos: Instrumentos económicos e incentivos fiscales.

- Entre los primeros destacan los subsidios a las inversiones y los préstamos a una tasa de interés menor a la del mercado.
- Entre los incentivos fiscales, los más comunes son la depreciación acelerada, los créditos y las reducciones fiscales. Una subcategoría adicional son las exenciones tarifarias a bienes importados.

El Índice de independencia energética en México pasó de 1.42 a 0.87 de 2000 a 2020, debido al incremento de importaciones, estableciendo un aumento en un 20.57% con respecto al año (SENER - SIE, 2021). La matriz energética nacional consideró en 2017 un 4% de energía proveniente de biomasa.

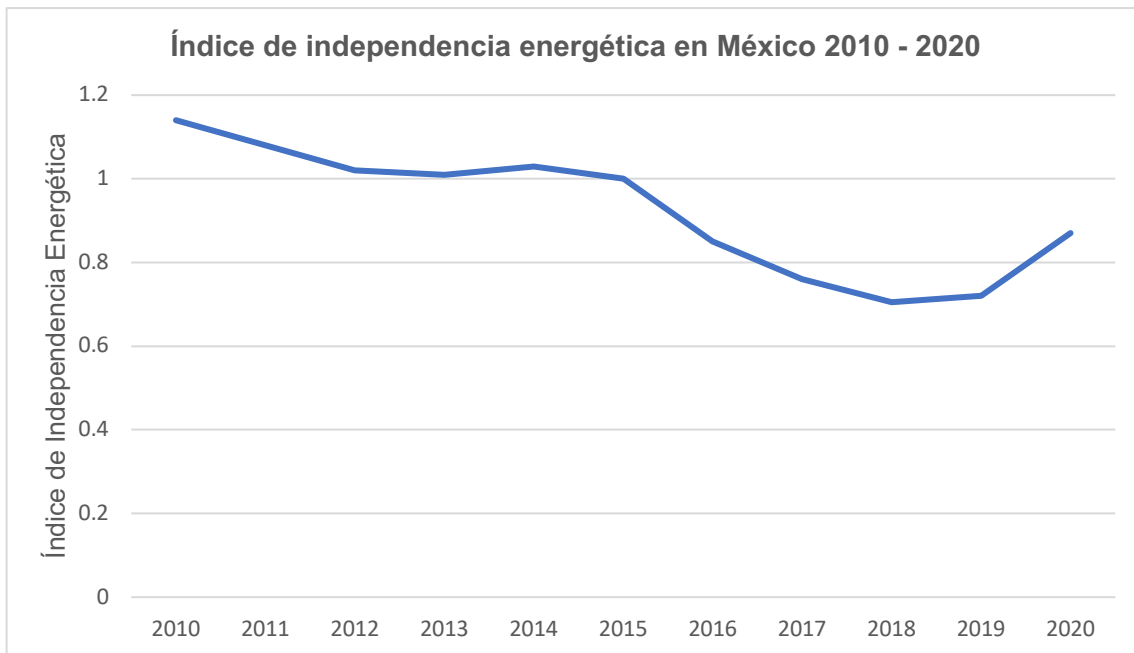


Figura 4. Índice de independencia energética. Fuente: Sistema de Información Energética SENER. 2021.

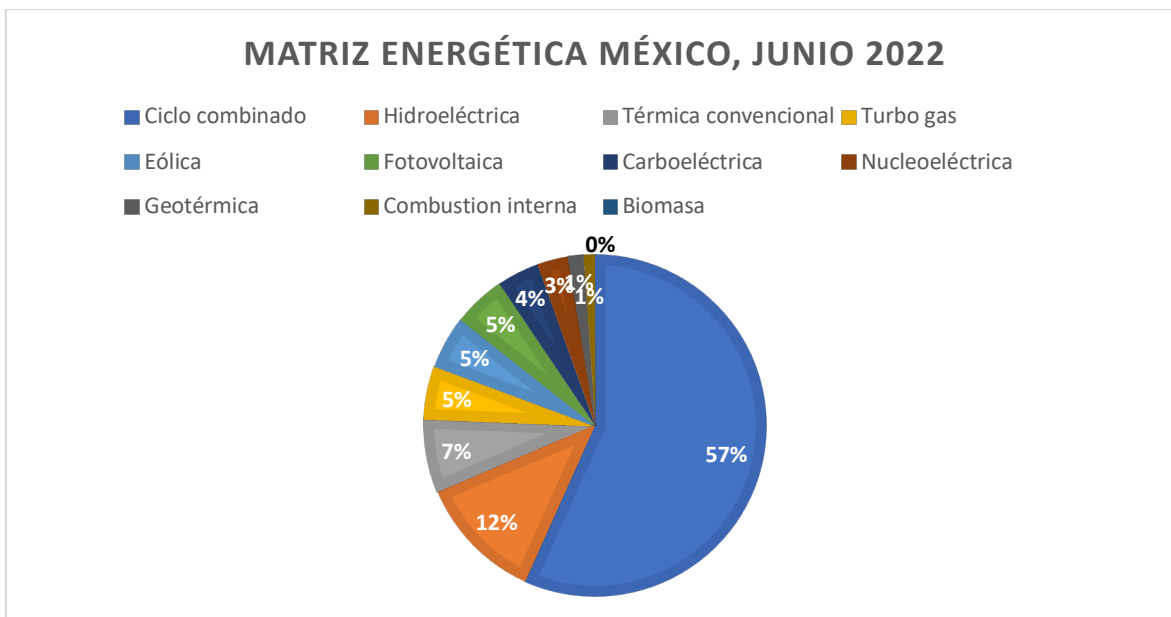


Figura 5. Matriz energética nacional, junio 2022. Fuente: Monitor de Energía (IMCO, 2022).

Estructura y tendencias del consumo nacional de energía (ET- LTE).

Sector Transporte. El sector transporte es el sector que más energía consume en México, en los últimos años ha representado más del 46% del total. Es importante resaltar que el subsector del autotransporte (carretero) demanda el 90% de la

energía del sector transporte, situación que no ha mostrado cambios sustantivos por más de dos décadas.

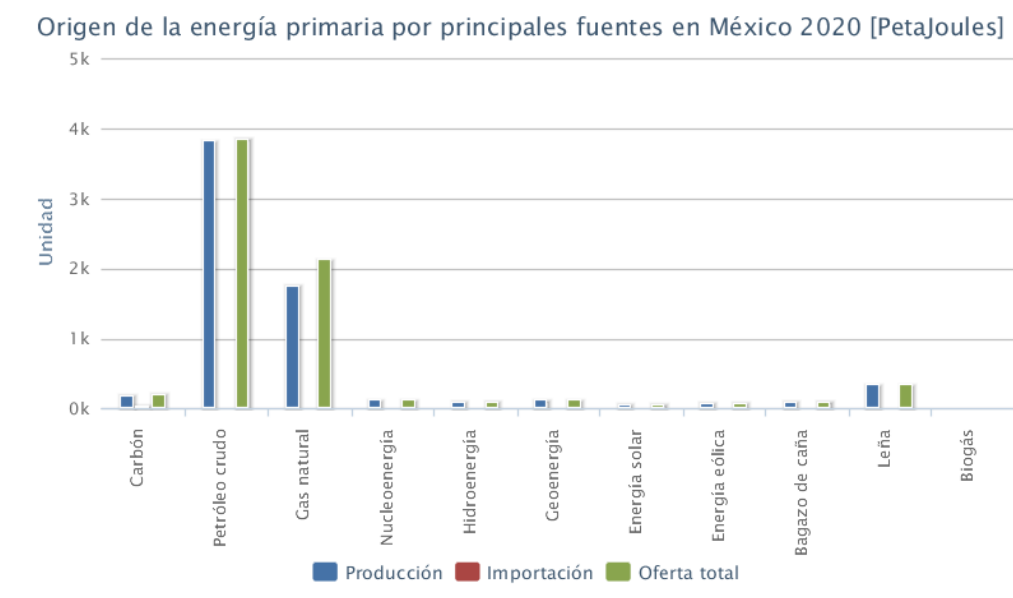


Figura 6. Origen de la Energía primaria en México 2020. Fuente: (SENER - SIE, 2021)

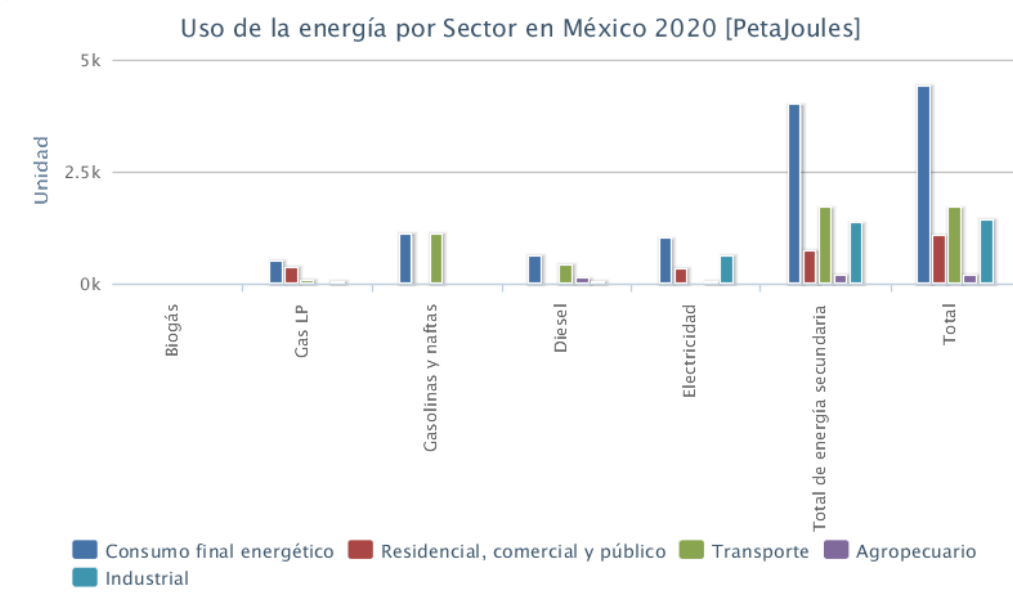


Figura 7. Matriz de uso de la Energía por Sector en México. Fuente: (SENER - SIE, 2021).

El sector transporte (véase **Figura 7**), es clave en el cumplimiento de metas de largo plazo en la transición energética. La evolución de este sector es estimulada por un acelerado cambio social y tecnológico que, entre otros procesos relevantes, apunta a una creciente electrificación. Dada la complejidad y la gran variedad de factores

que afectan al transporte, se establecen tres líneas generales de acción para la transición tecnológica y energética de este sector. En tecnologías vehiculares eficientes, en infraestructura que facilite la integración de diversas modalidades de transporte, en urbanización, planeación de las ciudades y reducción de la necesidad de movilidad.

Dentro de las acciones en tecnologías vehiculares eficientes se resalta en la sección de investigación, desarrollo e innovación el desarrollar un mapa de ruta para la sustitución gradual del uso de combustibles fósiles por tecnologías limpias en ciudades.

Energías Limpias (ET – LTE).

Bioenergía. La bioenergía tiene potencial de aprovechamiento y retos importantes en cuanto a manejo ambiental sustentable. De acuerdo con el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE), existe un potencial probado y probable de 436.8 MW y una generación anual de 2,786.62 GWh.

Dentro de las acciones en bioenergía se resalta en la sección de regulaciones y política pública el fortalecer el marco de políticas para la producción sustentable de bioenergéticos, aumentando la certidumbre a la inversión. Establecer normas y regulaciones técnicas aplicables a la producción de bioenergéticos con criterios de sustentabilidad y con referencia a la calidad y manejo, esquemas de certificación y verificación de sus cadenas de valor.

En la sección de mercados y financiamiento se resalta evaluar el establecimiento de programas de financiamiento a las comunidades rurales que produzcan bioenergéticos, favoreciendo el uso de tierras degradadas no adecuadas para cosechas alimentarias. Impulsar la inversión necesaria para atraer biocombustibles al mercado.

Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016. Especificaciones de calidad de los petrolíferos, con fundamento en el artículo 51 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

El 29 de agosto de 2016 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el Acuerdo por el que la Comisión Reguladora de Energía expide la NOM-016-CRE-2016.

Esta Norma tiene por objeto establecer las especificaciones de calidad que deben cumplir los petrolíferos (incluidos combustibles para el sector transporte) en cada etapa de la cadena de producción y suministro, en el territorio nacional, incluyendo su importación.

En sus especificaciones originales de gasolinas, se permite un contenido máximo de 5.8% en volumen de etanol anhidro como oxigenante. Posteriormente en acuerdo modificatorio realizado en 2017 este máximo de etanol como oxigenante

se incrementa hasta en 10% en volumen, exceptuando las Zonas Metropolitanas de Monterrey, Guadalajara y Valle de México. Finalmente, A principios de 2020, la Suprema Corte de Justicia de la Nación (SCJN) determinó que resultaba inconstitucional la modificación de 2017 a la NOM-016-CRE, pues al

...encontrarse a debate la magnitud de daños a la calidad del aire que podría producir el empleo de etanol como oxigenante en gasolinas, cobra plena aplicación el llamado principio de 'precaución ambiental', el cual obliga a que se lleve a cabo una evaluación con la mayor información científica posible, respecto a los potenciales daños que el incremento de etanol para esos fines podría generar en el medio ambiente (texto transcrito de la Norma).

De esta manera, la sentencia emitida por la Suprema Corte de Justicia de la Nación emitida en enero de 2020 declaró como inconstitucional el uso de etanol al 10% en gasolinas, regresando esta Norma a su versión original mientras la CRE resuelve nuevamente el tema.

El Marco Normativo Mexicano en materia de bioenergéticos se encuentra aún en desarrollo y se detectan abstracciones y generalidades que deben especificarse en materia de facultades y funciones institucionales para su regulación, por lo cual deberá irse ajustando a los cambios que surjan conforme el mercado en materia de bioenergéticos crezca y se establezca nacionalmente.

Capítulo 3. El Mercado de bioetanol y biogás en México.

El incremento en el interés de los países en vías de desarrollo en alcanzar la agenda del Desarrollo Sustentable 2030, ha impulsado diversos proyectos de energías renovables, entre ellos el de los biocombustibles. Como se ha comentado en capítulos anteriores, algunos motivos para enrolarse en la producción de biocombustibles incluyen la diversificación de los recursos energéticos, la reducción de la dependencia en los combustibles fósiles, y la reducción de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) ((OECD - FAO , 2008); (Elbehri, A., McDougall, R., Horridge, M., 2009)). Es importante hacer notar que los países en desarrollo buscan distintas rutas en los insumos para la producción de biocombustibles y que el efecto neto de los biocombustibles en el ambiente es altamente determinado por la fuente utilizada para su producción ((Mortimer, N.D., Ashley, A., Evans, A., Hunter, A.J., Shaw, V.L., 2008); (Zah, R., Boni, H., Gauch, M., Hischer, R., Lehmann, M., Wager, P. , 2007)).

(Janssen, R., Rutz, D.D. , 2010) sugieren que los requerimientos de sustentabilidad establecidos para un determinado país, no serán necesariamente una imposición de cargas injustificables para los productores de biocombustibles, tampoco bloquean las oportunidades de desarrollo en países en vías de desarrollo y en su investigación, sugieren sean implementados mediante los siguientes pasos o etapas:

1. La armonización normativa es indispensable para evitar las distorsiones y barreras de mercado, de otra manera, se correría el riesgo de caer en la exclusión de los países en desarrollo del comercio emergente de biocombustibles, derivado del gran número de iniciativas existentes de esquemas de certificación, mayormente en los países desarrollados.
2. Un programa práctico y generalmente aceptado en materia de sustentabilidad debe ser implementado, pues es requisito para prever y tomar medidas que eviten el impacto negativo derivado de la producción de biocombustibles.
3. Se requiere dedicar recursos para llevar a cabo mayor investigación en diversos aspectos relacionados con el impacto de la producción de los biocombustibles.
4. Se requiere una cooperación cercana entre las partes interesadas y los tomadores de decisiones de Latinoamérica, Europa, Norteamérica, Asia y África para asegurar que los esquemas futuros de sustentabilidad sean implementados para el beneficio tanto de los importadores como de los

productores de biocombustibles. Con respecto a esta situación se resaltan los siguientes inconvenientes:

- Primero, es importante hacer notar que diferentes países buscan distintos insumos para la producción de biocombustibles y la viabilidad de dicha producción es altamente determinada por el tipo de insumo utilizado en la producción de bioetanol y de biogás, así como de las cadenas de suministro en cada país.
- Los arreglos institucionales han hecho la diferencia para alcanzar la viabilidad; un modelo de negocio de biocombustibles puede estar basado en el tipo de cultivo, el capital de producción agrícola, y por otra parte, en los esquemas de subcontratación.
- Otros factores de importancia que se deben considerar, incluyen el costo de capital, el tamaño de la empresa, la selección de la tecnología de proceso y de los esquemas industriales y organizacionales. (Quintero, J.A., Felix, E.R., Rincón, L.E., Crispín, M., Baca, J.F., Khwaja, Y., Cardona, C.A., 2012) sugieren que la inclusión de pequeños productores en la cadena de suministro puede bajo ciertas condiciones, ser competitivo para la producción de biocombustibles líquidos. Algunos argumentan que, a pesar de la significancia estadística de la relación promedio tamaño-costo, el costo de capital promedio de una planta de un tamaño dado en una localización en particular, es altamente variable debido a los costos asociados a circunstancias únicas, posiblemente por la disponibilidad de agua, acceso a servicios públicos y cumplimiento de la regulación ambiental (Gallagher, P.W., Brubaker, H., Shapouri, H., 2005).
- Adicionalmente se debe considerar el costo de mano de obra o salarios, productividad, energía y transporte, tipo y precio de los insumos, entre otros, que inciden en la viabilidad económica del proyecto.

3.1. Viabilidad en la producción de Biocombustibles.

3.1.1. Producción de Bioetanol.

(Aldana, H., Lozano, F.J., Acevedo, J., 2014) proponen en su investigación, una herramienta de análisis (Modelo Lineal de Integración Mixta o MILP por sus siglas en inglés) creada con base en información específica de México (producción, transporte, distancias y demanda) con la finalidad de demostrar la factibilidad de producir biocombustibles en el país. Su trabajo demuestra que la producción de biocombustibles a partir de técnicas de fermentación y síntesis de gas (syngas) puede generar un balance positivo de energía, considerando diversos elementos de la cadena de suministro. También concluyen que la utilización de residuos de

biomasa puede contribuir a diversificar el portafolio energético de PEMEX y de la nación, e incluso ayudar a reducir hasta en 2.6% las emisiones de CO₂ en México, produciendo suficiente etanol para reemplazar por completo al MTBE¹¹ como aditivo en gasolinas en México.

(Lozano-García, D.F., Santibañez-Aguilar, J.E., Lozano, J., Flores-Tlacuahuac, A., 2020)) realizaron un modelo base como Sistema de Información Geográfica (GIS por sus siglas en inglés) para determinar las áreas en México con mayor potencial para la producción de energía renovable a partir de subproductos y residuos agrícolas de cultivos de maíz, sorgo, trigo, caña de azúcar, cebada, agave, arroz y nuez pecana producidos en los valles del Golfo de México, el Pacífico y el Bajío. Sus resultados muestran un potencial de generación de 70,951 MWh de electricidad, o 18,373 Gg de líquidos Fischer-Tropsch (hidrocarburos a partir de gas de síntesis) utilizando únicamente el 60% de la biomasa residual de los cultivos. Este estudio plantea la medida de mantener el 40% restante de la biomasa residual (como mínimo de rastrojo) en la superficie de cultivo como medida para recuperar nutrientes al suelo y evitar la erosión.

Islas, J., Manzini, F., Masera, O., 2007 (Islas, J., Manzini, F., Masera, O., 2007) en su trabajo, a partir de la construcción de escenarios proyectados para México hacia el 2030, estiman que el sector transporte sea el mayor consumidor de biocombustibles con el 8.60% de energía consumida respecto al total de los sectores, con una participación del 20.17% de los combustibles líquidos utilizados en este sector. A partir de estas cifras, su trabajo proyecta un potencial de reducción del 12.7% en las emisiones de CO₂ para México. Sus resultados apuntan a que los biocombustibles empleados como sustitutos de combustibles fósiles tienen el potencial de ser una importante herramienta en el sector energía para dar un paso más hacia la sustentabilidad ambiental.

Rendon-Sagardi, M.A., Sanchez-Ramirez, C., Cortes-Robles, G., Alor-Hernandez, G., Cedillo-Campos, M.G., 2014, (Rendon-Sagardi, M.A., Sanchez-Ramirez, C., Cortes-Robles, G., Alor-Hernandez, G., Cedillo-Campos, M.G., 2014) refieren diversos estudios en torno a los impactos generados por los biocombustibles en México. (Awudu, I., Zhang, J., 2012) indican que estos estudios han demostrado que la utilización de biocombustibles resulta en una disminución de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI o GHG por sus siglas en inglés, como se utilizará en adelante) expresados en CO₂ equivalentes (CO_{2e}). De acuerdo con (García, C.A., Manzini, F., Islas, J., 2010), los combustibles fósiles mexicanos pueden generar 3,104.64 kg de CO₂ por tonelada (kgCO_{2e/t}), mientras que las mezclas de biocombustibles (gasolina adicionada con 10% en volumen de etanol) tiene el

¹¹ MTBE como siglas de Metil Ter Butil Éter. Compuesto derivado del petróleo utilizado como aditivo oxigenante en gasolinas.

potencial de generar 2,722.824 kgCO_{2e/t}, es decir, en promedio alrededor de 12.3% menos. Estos valores se obtienen asumiendo una densidad de 722.5 toneladas por metro cúbico (t/m³) para combustibles fósiles. Lo anterior representa 351,889.68 toneladas de CO₂ por millar de barriles de combustibles fósiles (tCO_{2e/mb}) y 312,791.21 tCO_{2e/mb} para biocombustibles. En sus trabajos, Rendón-Sagardi et al (2014) encuentran con base en un estudio de sensibilidad, que bajo las condiciones actuales y políticas regulatorias, México no es autosuficiente en la producción de combustibles por la escasez en la producción de petróleo (basada en las reservas 1P¹² de petróleo), de tal forma que dicha escasez debe ser complementada con la importación de combustibles para satisfacer la demanda, lo cual no genera beneficios ambientales o económicos, considerando que dichas importaciones contienen aditivos distintos al etanol.

(Elizondo, A., Boyd, R., 2017) realizaron estudios utilizando un modelo de cálculo de equilibrio general (CGE por sus siglas en inglés) que estima el impacto de la producción de etanol (indistintamente bioetanol o etanol) en la economía de México. Utilizando información de costos de Brasil, introducen al etanol en la matriz de contabilidad social¹³ e insertan un sector latente en su modelo para analizar la promoción de bioetanol. Dentro de sus conclusiones encuentran que, en términos de economía agregada, los beneficios de una política diseñada para promover el uso de etanol no son evidentes. La promoción de etanol ha sido etiquetada como el medio para diversificar la producción de energía, el incremento del ingreso de los agentes más pobres y la reducción de gases efecto invernadero de México; sin embargo, el actual diseño de la política energética, así como su enfoque limitado, no necesariamente contribuye a esas metas. Finalmente, este estudio muestra que la promoción pública de etanol no puede ser justificada fácilmente en términos de beneficio social, PIB o seguridad energética.

¹² De acuerdo con lo establecido en el artículo 3, fracciones XXIX y XXXIII de los Lineamientos que Regulan el Procedimiento de Cuantificación y Certificación de las Reservas de la Nación, emitido por la Comisión Nacional de Hidrocarburos, las Reservas 1P o reservas Probadas, son aquellas Reservas de Hidrocarburos en el subsuelo que, a partir de datos de geociencias y de ingeniería, se estiman con certeza razonable a ser recuperables comercialmente a partir de una fecha dada en adelante de Yacimientos conocidos bajo condiciones económicas, métodos de operación y reglamentación gubernamental definidas. Si se emplean métodos deterministas, el término certeza razonable expresa que al menos 90 por ciento de que el volumen a recuperar sea igual o mayor al calculado, es decir, son reservas con alta certidumbre.

¹³ Una Matriz de Contabilidad Social (SAM por sus siglas en inglés) es un modelo utilizado en el análisis de impacto económico que organiza la información de estructuras sociales y económicas de un país en un año en particular. Una de sus ventajas es que considera en forma explícita las transacciones de sus intermediarios, mientras que contabiliza los impactos económicos empleando multiplicadores y por tanto captura las vinculaciones (flujos en detalle) económicas de una economía. Este tipo de modelos pueden ser utilizados para examinar el efecto distributivo de una política pública o el choque exógeno en sectores no industriales, como el valor agregado y varios tipos de instituciones. (King, 1981).

(Gebreegziabher, Z., Mekonnen, A., Ferede, T., Köhlin, G., 2014), investigan la rentabilidad de biocombustibles en África, tomando a Etiopía como caso de estudio. De manera específica analizan la viabilidad de bioetanol producido a partir de melaza en el contexto de Etiopía (etanol de primera generación) utilizando información de encuestas de inversión EEPFE/EDRI de 2010, y realizan estimaciones basadas en visitas de campo. Sus hallazgos revelan que invertir en la producción de bioetanol (a partir de melaza) en Etiopía puede ser viable desde la perspectiva de la rentabilidad.

Iniciativas para impulsar el mercado de etanol.

En años recientes en México, se han llevado a cabo diversas iniciativas y políticas públicas con la finalidad de impulsar el mercado de bioenergéticos. La **Tabla 2** muestra en orden cronológico las iniciativas como acciones y tendencias identificadas para impulsar el mercado de etanol anhidro como oxigenante en gasolinas en México.

Tabla 2. Iniciativas para impulsar el mercado de etanol anhidro como oxigenante de gasolinas en México.		
Tipo de Iniciativa	Año	Iniciativa
Política	2005	<ul style="list-style-type: none"> • Promulgación de la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (para su aprovechamiento como energético)
	2007	<ul style="list-style-type: none"> • Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar (PRONAC): Política integral para la diversificación de la actividad orientada a consolidar una oferta atractiva de bioenergéticos
	2008	<ul style="list-style-type: none"> • Promulgación de la Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos
	2009	<ul style="list-style-type: none"> • Estrategia Intersecretarial de los Bioenergéticos (Gobierno Federal, SAGARPA, SENER, SE, SEMARNAT, SHCP, 2009) • Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico
	2015	<ul style="list-style-type: none"> • Promulgación de la Ley de Transición Energética (SENER) (SEGOB, Secretaría de Gobernación, 2015)

		<ul style="list-style-type: none"> • Creación del inventario nacional de Energías Renovables (INERE)
Industria / Mercado	2009	<ul style="list-style-type: none"> • Prueba piloto realizada en Cadereyta Nuevo León, para estudiar el comportamiento de la gasolina oxigenada con etanol al 6% en sustitución del metil-terbutil-éter (MTBE) con el objetivo de generar experiencia en el manejo de este biocombustible, evaluar el rendimiento de la mezcla de gasolina con etanol en los motores de vehículos y evaluar las emisiones a la atmósfera • Existencia de varios proyectos para producir etanol a partir de diversos insumos (con participación de ingenios azucareros productores o no de etanol) • El 29 de septiembre de 2009 PEMEX convocó a la primera licitación nacional pública para la adquisición de etanol anhidro (823 millones de litros en un plazo de 5 años)
	2010	<ul style="list-style-type: none"> • Iniciativa de Pemex para introducir gasolinas mezcladas con 10% de etanol en el área metropolitana de Guadalajara Jalisco • Convenio de inversión en dos ingenios azucareros próximos a esa ciudad • Se estimó una demanda anual de 200 ML de etanol
	2011	<ul style="list-style-type: none"> • Convocatoria para adquisición de etanol anhidro para el mezclado con gasolinas en las Terminales de Almacenamiento y Reparto (TAR) de PEMEX en Salina Cruz Oaxaca, Tapachula y Tuxtla Gutiérrez Chiapas
	2013	<ul style="list-style-type: none"> • Proyecto para producir bioetanol con desechos de la industria tequilera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UNSNH), escala piloto (el proyecto culminó en 2015)
	2014	<ul style="list-style-type: none"> • Propuesta para la prueba de concepto para la adquisición de etanol anhidro (volumen máximo de 2,214.9 millones de litros por un periodo de 10 años, aproximadamente 190 millones de litros anuales para 2020)

	2015	<ul style="list-style-type: none"> • Suscripción de contratos para la adquisición de etanol anhidro como componente en gasolina • Se dispone de infraestructura para el mezclado de gasolina y etanol (TAR´s de PEMEX) • De acuerdo con la (ANPB), en Tamaulipas se construirá la primera planta de etanol con base en sorgo (con una inversión de 100 millones de dólares), con la intención de reducir las importaciones anuales de gasolinas
	2016	<ul style="list-style-type: none"> • Inició la construcción de una planta con capacidad de 600 ML/D, en Tierra Blanca Veracruz: Empresa Etanoplus. La materia prima será bagazo de caña de azúcar. Inicio, 23 de junio de 2016
Regulatorio	2016	<ul style="list-style-type: none"> • Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-016-CRE-2016, Especificaciones de calidad de los petrolíferos (5.8% volumen máximo de etanol en mezcla con gasolinas, se prohíbe su uso en Zonas Metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey)
	2017	<ul style="list-style-type: none"> • Modificaciones a la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-016-CRE-2016, Especificaciones de calidad de los petrolíferos (10% volumen máximo de etanol en mezcla con gasolinas, se prohíbe su uso en zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey) • COFEMER avala la importación de gasolina con 10% en volumen de etanol que cumplan con certificación de la EPA (Environmental Protection Agency)

Fuente: (IMP, 2017)

3.1.2. Producción de Biogás.

La producción de biogás ha demostrado ser una vía factible para sustituir parcialmente el uso de combustibles fósiles, pues se ha demostrado que el uso de biogás tiene beneficios significativos en materia económica, ambiental y social (Skovsgaard, L., Jacobsen, H.K., 2017) (Díaz-Trujillo, L.A., Nápoles-Rivera, F., 2019). Algunos resultados de estudios técnicos y económicos revelan un porcentaje de índices de rentabilidad de los sistemas equivalentes al 60.99% y reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero equivalentes a 529.65 toneladas de dióxido de carbono por año (Teymoori-Hamzehkolaei, F., Amjady, N., 2018).

El biogás se produce comúnmente a partir de tecnologías de digestión anaeróbica¹⁴ con insumos provenientes de distintas fuentes (Zhang, Q., Hu, J., Lee, D.-J., 2016). Las fuentes potenciales de producción de biogás involucran el uso de estiércol animal, residuos urbanos sólidos, desechos orgánicos, pastos y algas marinas (Montingelli, M.E., Benyounis, K.Y., Quilty, B., Stokes, J., Olabi, A.G., 2016). El proceso de digestión anaeróbica además permite producir residuos bio digeridos que pueden ser procesados para generar biofertilizantes e incrementar la rentabilidad en la producción de biogás (Delzeit, R., Kellner, U., 2013).

En México, el Gobierno de la República espera que el 35% de la electricidad generada en 2024 provenga de fuentes no fósiles y también espera que para 2028 el biogás tenga una participación del 4.8% en la generación de electricidad renovable (Díaz-Trujillo, L.A., Nápoles-Rivera, F., 2019). Por estas razones, se han desarrollado estrategias que puedan determinar si la producción de biogás es rentable con o sin subsidios gubernamentales con la finalidad de cumplir con estas expectativas (Gutiérrez, E.C., Xia, A., Murphy, J.D., 2016). Algunos de los principales combustibles fósiles usados en México son el gas natural y el gas licuado de petróleo, que representan un consumo de alrededor de 282,000 barriles por día y 7000 millones de pies cúbicos por día respectivamente (SENER, 2018), lo que significa que se podría tener un beneficio si las fuentes de combustibles fósiles pudieran ser reemplazadas por otras fuentes renovables y en este caso, el biogás podría ser una buena alternativa.

El biogás puede ser utilizado para producir calor y vapor (por ejemplo, en la generación eléctrica, así como en esquemas de cogeneración), como combustible para vehículos, sustituto de gas natural en canales domésticos y para inyección de gas en la red. El uso del biogás depende de su calidad, que se alcanza a través de procesos de purificación mediante tecnologías de mejora que remueven los componentes que causan pérdidas de eficiencia, daño en los equipos y a la salud.

El biogás consiste principalmente en metano (CH₄) (30% - 65%), dióxido de carbono (CO₂) (25% - 47%), agua y otros gases (como ácido sulfhídrico H₂S, Nitrógeno, Oxígeno y compuestos aromáticos) (Rasi, S., Veijanen, A., Rintala, J., 2007). Se utilizan distintas tecnologías para la purificación de biogás, en las cuales los pasos más importantes son la remoción de humedad (secado), ácido sulfhídrico (desulfuración) y dióxido de carbono (incremento de su capacidad calorífica) (Miltner, M., Makaruk, A., Harasek, M., 2017) (Awe, O. W., Zhao, Y., Nzihou, A., Minh, D. P., Lyczko, N., 2017). Los compuestos mencionados son removidos por procesos físicos y químicos e incluso, recientemente también se involucran procesos fotosintéticos (Toledo-Cervantes, A., Estrada, J. M., Lebrero, R., Muñoz, R., 2017). Las características, clasificación, configuración y costos de los procesos

¹⁴ Descomposición por la acción de consorcios microbianos en ausencia de oxígeno.

de purificación físicos y químicos han sido estudiados en distintos análisis (Awe, O. W., Zhao, Y., Nzihou, A., Minh, D. P., Lyczko, N., 2017) (Miltner, M., Makaruk, A., Harasek, M., 2017) (Khan, I. et al. , 2017). Respecto a la mitigación de GHG, a través de la utilización de la tecnología actual para producir y purificar biogás, se ha demostrado que la reducción de GHG en hasta un 80% es posible (Bekkering, J., Hengeveld, E. J., van Gemert, W. J. T., Broekhuis, A. A., 2015).

La principal tecnología de producción de biogás es, como se comentó en párrafos anteriores, a través de la utilización de biodigestores anaeróbicos, sin embargo, el gran reto hacia el futuro está en las tecnologías de purificación (mejora). Los aspectos técnicos, económicos, y ambientales de la producción de biogás y su mejora a biometano han sido considerados en diversos estudios recientes, incluyendo distintas alternativas de procesos, como membranas de separación, rascado por agua, rascado de aminas, adsorción por oscilación de presión, rascado físico orgánico, separación criogénica, rascado químico y rascado por agua (Cavaignac, R. S., Ferreira, N. L., Guardani, R., 2021).

La absorción por agua es uno de los métodos más comúnmente utilizados para la mejora de biogás, dado que es relativamente simple y confiable. Sin embargo, la absorción por aminas (véase **Figura 8**) tiene la ventaja de obtener alta pureza y baja pérdida de metano en el proceso. Un estudio reciente considera que una unidad de baja escala de rascado por agua de 120 m³/h resulta en un costo de producción específico de biometano de 0.73 Euros / m³ para su utilización como combustible de transporte, y 0.54 Euros / m³ para su inyección en la red de gas natural (Rotunno, P., Lanzini, A., Leone, P., 2017). Una baja escala de rascado por agua es importante porque resulta determinante en los costos de operación, aunque también afecta proporcionalmente la eficiencia de la extracción del metano, es decir, se buscan las condiciones de operación que permitan el balance entre las condiciones de operación y el costo del proceso.

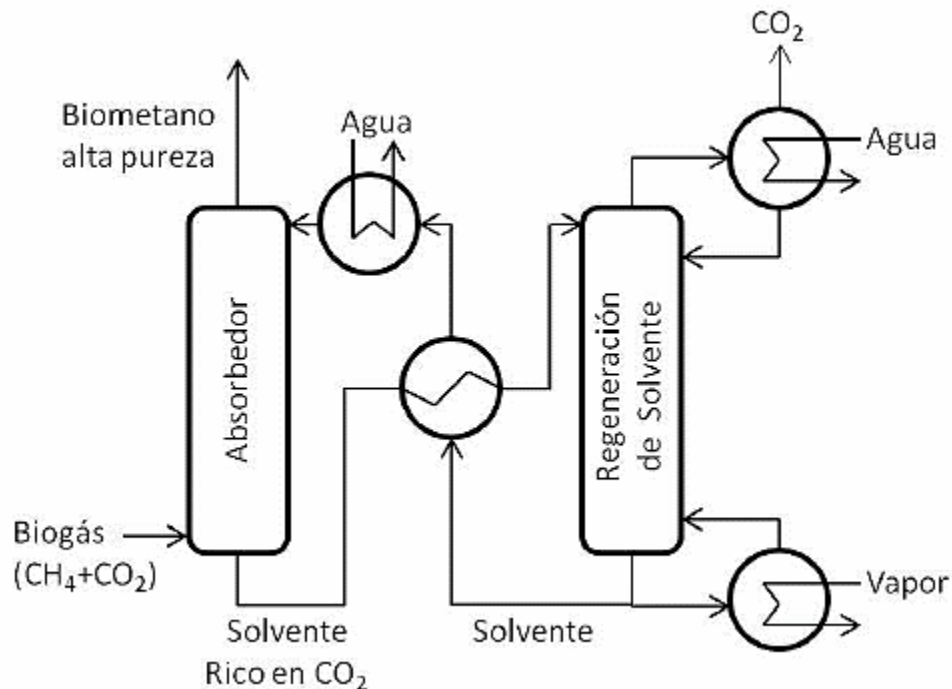


Figura 8. Esquema general del proceso de purificación de biogás por aminas. Fuente: Tomado de (Maldonado, Rainier, Acosta, B., Osorio, J., Soto, D., Zeppieri, S., 2014).

La revisión de literatura reporta altos costos de inversión para unidades de membrana y tecnologías de adsorción por oscilación de presión cercanos a los de las tecnologías de absorción por agua y aminas. A pesar de ello, recientes desarrollos en membranas de separación han permitido alcanzar metano de alta pureza en el producto final (Bauer, F., Hulteberg, C., Persson, T., Tamm, D., 2013).

Una revisión comercial y de técnicas innovadoras de mejora, como métodos biológicos, fue presentada por (Sun, Q., Li, H., Yan, J., Liu, L., Yu, Z., Yu, X., 2015) junto con una comparación de características del biometano obtenido con la restricción de cumplir con las especificaciones regulatorias, sin embargo, las ventajas de utilización de métodos biológicos todavía están en desarrollo (Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, P. G., 2018).

Tal como lo muestran (Willson, P., Lychnos, G., Clements, A., Michailos, S., Font-Palma, C., Elena, M., Pourkashanian, M., Howe, J., 2019), una novedosa y avanzada tecnología de captura criogénica de carbón presenta costos comparables para el mejoramiento de biogás con técnicas de absorción por aminas para plantas de gran escala, y costos significativamente reducidos para aplicaciones de menor escala.

(Michailos, S., Walker, M., Moody, A., Poggio, D., 2020) reportan que la implementación de infraestructura de potencia-a-gas¹⁵ es todavía en una etapa temprana. La integración de la biometanización a sistemas potencia-a-gas puede ser una solución sustentable para múltiples sectores con la competitividad de la generación electrolítica de hidrógeno.

De acuerdo con (Khan, I., Othman, M., Hashim, H., Matsuura, T., Ismail, A. F., Resaeidashtarzhandi, M., Azelee, I. W., 2017), varias revisiones de publicaciones técnicas no consideran los aspectos medioambientales asociados con el enfoque de ciclo de vida, indicando que este aspecto es de crucial importancia para las unidades de mejora.

Con base en los trabajos de (Shimekit, B., Mukhtar, H., 2012), las sustancias monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA), metildietanolamina (MDEA), y diglicolamina (DGA) son solventes comúnmente utilizados en la captura de gases ácidos, con un rango de fracción de disolución de masa entre el 10% y el 70%. La menor presión de vapor del DGA permite una mayor fracción de masa en solución acuosa (40% - 70%), resultando en significativamente menores tasas de circulación y requerimientos energéticos (Al-Juaied, M., Tochelle, G. T., 2006). Adicionalmente, este solvente es selectivo a la absorción de CO₂ en presencia de H₂S. Por otra parte, la amina terciaria MDEA presenta mayor selectividad para H₂S en presencia de CO₂. La reacción entre MDEA y H₂S es prácticamente instantánea, mientras que la reacción de CO₂ ocurre a menores tasas.

3.2. Oferta y Demanda Potenciales.

3.2.1. Estimación de la oferta y demanda de bioetanol.

Tomando como base los trabajos de (Lozano-García, D.F., Santibañez-Aguilar, J.E., Lozano, J., Flores-Tlacuahuac, A., 2020), se realizó la selección de sustrato para la producción de bioetanol, así como las fuentes específicas de biomasa lignocelulósica. El trabajo de (Lozano-García, D.F., Santibañez-Aguilar, J.E., Lozano, J., Flores-Tlacuahuac, A., 2020) emplea un modelo de sistema de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés), que consiste en:

- a) la selección de cultivos adecuados,
- b) la construcción de las bases de datos geográficos,
- c) generación de los calificadores y capas restrictivas e
- d) implementación de los modelos.

¹⁵ El concepto Potencia-a-gas (*Power to gas* o *P2G*) es una forma emergente de mejorar el biogás al interior de un biorreactor, que involucra el suministro de energía eléctrica para electrolizar el agua y causar una subsecuente conversión de hidrógeno y dióxido de carbono en Metano (Michailos, S., Walker, M., Moody, A., Poggio, D., 2020).

En forma adicional, el trabajo de (Lozano-García, D.F., Santibañez-Aguilar, J.E., Lozano, J., Flores-Tlacuahuac, A., 2020) proporciona una aproximación a los tipos de capas restrictivas (enfoque de su metodología) requeridas para el análisis previo, las cuales se categorizan como se muestra a continuación:

- El primer grupo consiste en las fuentes de residuos.
- El segundo grupo incluye cualquier otra capa de calificadores.
- El tercer grupo considera las capas restrictivas.

El primer grupo de datos se toma del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera del Gobierno Federal de México. Estas bases de datos contienen información de la producción agrícola a nivel municipal para todo el país. Esto incluye datos de siembra, cosecha y áreas dañadas para cada cultivo, así como información relativa a producción, rendimientos, precios y valor para cada cultivo sembrado en los municipios.

El segundo grupo (calificadores) son los límites municipales, pendiente, redes carreteras y autopistas, redes eléctricas, y población.

El tercer grupo (capa restrictiva) incluye pendiente, vegetación y área cubierta, ríos y cuerpos de agua (lagos y reservorios), áreas naturales protegidas, aeropuertos, sitios históricos, redes de energía eléctrica, carreteras, autopistas y vías de ferrocarril.

Selección de cultivos, criterios y fuentes de información.

El primer paso en la construcción de la base de datos del Modelo GIS fue la selección de cultivos con base en los siguientes criterios:

1. Selección de la biomasa residual que podría ser almacenada y procesada.
2. Cultivos que producen suficientes cantidades de biomasa residual (donde el volumen va de cientos a miles de decenas de millones de Mg ¹⁶ por año).

Los cultivos que cumplen con estas características son maíz, trigo, caña de azúcar, cebada, sorgo, agave, arroz con cáscara y nuez pecana. La situación general de los residuos por masa de cultivo se encuentra dentro del rango de los 0.55 – 1.8 kg/kg ¹⁷, siendo 0.825 el factor kg/kg para residuos de maíz. La producción promedio nacional conjunta de maíz grano en el periodo 2009 – 2019 fue de 264,191,529.07 Toneladas. **La Tabla 3** muestra la información estadística de la producción nacional de maíz, rendimientos y estimación de residuos.

¹⁶ 1 Mg = 1 Tonelada; 1 Gg = 1,000 Toneladas; 1 Tg = 1,000,000 Toneladas

¹⁷ La relación del factor kg/kg se refiere a kilogramo de rastrojo generado por cada kilogramo de grano de maíz cosechado.

Tabla 3. Estadísticas y estimación del Rendimiento Promedio Ponderado Nacional de Maíz grano en el periodo acumulado 2009 - 2019

Maíz grano	Superficie Sembrada (Ha)	Superficie Cosechada (Ha)	Producción (Ton)	Rendimiento (Ton / Ha)	Ponderador (Producción / Total)	Rendimiento Promedio Ponderado (Ton / Ha)	Residuo Estimado (Ton)
Maíz grano amarillo	5,256,980.98	5,132,841.53	28,706,408.20	5.59	0.108657565	0.607395787	23,682,786.77
Maíz grano azul	40,672.35	40,672.35	65,461.56	1.61	0.000247781	0.000398927	54,005.79
Maíz grano blanco	77,201,735.65	70,668,087.63	234,258,104.86	3.31	0.886698017	2.934970435	193,262,936.51
Maíz grano de color	453,421.44	422,651.65	778,001.46	1.84	0.002944839	0.005418503	641,851.20
Maíz grano pozolero	85,759.55	83,777.55	369,310.41	4.41	0.001397889	0.00616469	304,681.09
Maíz grano s/clasificar	11,741.50	10,280.50	14,242.58	1.39	5.39101E-05	7.4935E-05	11,750.13
TOTAL	83,050,311.47	76,358,311.21	264,191,529.07	0		3.554423278	217,958,011.48

Fuente: Elaboración propia con información del SIAP - SIACON (2020)

La cantidad total residual de los 217 millones de Mg o toneladas para maíz es esencial para una adecuada economía de escala mientras que una disponibilidad sustantiva de biomasa generará un mayor margen de utilidad para posibles instalaciones de procesamiento.

En el Modelo GIS (Lozano-García, D.F., Santibañez-Aguilar, J.E., Lozano, J., Flores-Tlacuahuac, A., 2020), la información agrícola municipal fue asociada con su correspondiente polígono municipal para que sea posible mostrar el residuo estimado de cosecha de acuerdo con cada municipio. De cualquier forma, dado que no toda el área del municipio realiza actividades agrícolas, esta aproximación genera un sesgo; (Comber, A., Dickie, J., Jarvis, C., Phillips, M., Tansey, K., 2015) identifica esto como un importante problema encarando el uso de modelos de evaluación multicriterio dado que a través de estas aproximaciones “se identifican áreas adecuadas, que no se identifican en ubicaciones discretas”, por tanto, un mapa de tierra-cubierta/uso de tierra del INEGI fue utilizado para resolver este problema. Los polígonos agrícolas dentro de los que cada municipio fue seleccionado y subsecuentemente añadidos los valores de los resultantes residuos de cosecha. El uso de polígonos agrícolas fue particularmente relevante para los municipios con áreas extensas, tanto como para aquellos que tienen diversas áreas agrícolas distintivas, sobre todo en las regiones del norte y sureste de México (Lozano-García, D.F., Santibañez-Aguilar, J.E., Lozano, J., Flores-Tlacuahuac, A., 2020).

Luego de combinar la información de cosechas con las áreas agrícolas, el paso final fue clasificar los rangos de residuos de cosecha en cinco categorías para su uso en el modelo GIS (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto), este paso fue alcanzado

calculando los cinco cuantiles (20%) del residuo promedio (Lozano-García, D.F., Santibañez-Aguilar, J.E., Lozano, J., Flores-Tlacuahuac, A., 2020).

Como resultado de lo anterior, (Lozano-García, D.F., Santibañez-Aguilar, J.E., Lozano, J., Flores-Tlacuahuac, A., 2020) define una base de sustrato estimado a partir de 8 cultivos. Con base en la investigación de (Lozano-García, D.F., Santibañez-Aguilar, J.E., Lozano, J., Flores-Tlacuahuac, A., 2020) el presente trabajo partirá de sus hallazgos, y con la finalidad de evaluar la viabilidad de la existencia de un mercado de bioetanol de segunda generación, se seleccionará y trabajará con la información de biomasa proveniente del maíz, dado su elevado potencial de transformación, así como amplia producción a nivel nacional (226,113 km² dentro de las categorías de alta y muy alta idoneidad); teniendo como consideración una utilización del 60% de la biomasa potencial para producción de etanol, mientras que el restante 40% se dejará fuera del estudio, para que sea empleada en la restitución de suelos o bien, para cualquier otro fin que decida darle el productor. En el presente trabajo se asume una combinación de tecnologías óptimas en el proceso en sitio de tal forma que se maximice el beneficio, manteniendo congruencia con los supuestos del trabajo citado.

Para estimar la cantidad de sustrato para la producción de etanol se define la fuente específica de biomasa lignocelulósica con base en los trabajos de Lozano-García (2020), así como Aldana (2014), en los cuales se establece la base tanto de superficie, como de cultivos específicos susceptibles de ser utilizados, dada la generación de residuos lignocelulósicos implícita en su cosecha. Los trabajos citados permiten contar con la base específica de cantidad de sustrato disponible (residuos de biomasa lignocelulósica proveniente de la cosecha de maíz, a los que también se hace referencia como rastrojo de maíz) en una base nacional, así como su rendimiento para la producción de etanol a partir del modelo matemático planteado por (Aldana, H., Lozano, F.J., Acevedo, J., 2014).

En su trabajo, (Aldana, H., Lozano, F.J., Acevedo, J., 2014) desarrollaron una herramienta con base en información real para producción de cultivos, información de transporte, distancia y demanda específica para México. Su propósito fue demostrar la factibilidad de producir a gran escala biocombustibles en México a partir de residuos lignocelulósicos, utilizando rutas no consideradas actualmente en las estrategias del Gobierno Mexicano, determinando las rutas tecnológicas más convenientes para la mayor obtención de energía al menor costo y con el menor impacto ambiental, mientras que se identifican posibles sitios para plantas de proceso y potenciales consumidores.

La herramienta fue desarrollada e implementada como un Modelo Lineal de Integración Mixta (MILP por sus siglas en inglés) que permite la selección de tecnologías de conversión, capacidades, localización de biomasa y logística de

transporte de los campos agrícolas a los sitios de almacenamiento, a las plantas de procesamiento y a los mercados finales de consumo.

El método seleccionado (Aldana, H., Lozano, F.J., Acevedo, J., 2014) para la producción de etanol toma como base la fermentación. La fermentación se refiere al rompimiento de carbohidratos por bacterias, levaduras y hongos para producir etanol. El proceso de producción de etanol a partir de métodos fermentativos es susceptible de partir de carbohidratos de cadena simple, carbohidratos con cadenas extensas de polímeros como el almidón y de carbohidratos de cadenas complejas como la biomasa lignocelulósica. El proceso industrializado consiste en varias etapas: pretratamiento del sustrato, desintoxicación, hidrólisis, fermentación, y separación (Mustafa, 2007). De los arreglos referidos en la literatura, la Sacarificación y Fermentación Simultánea (SSF por sus siglas en inglés) fue seleccionada, dado que es ampliamente utilizada debido a sus ventajas, así como al reducido número de reactores y a la promoción del consumo de glucosa tan pronto como ésta es generada (Hahn-Haegerdal, 2006).

Para determinar la eficiencia teórica de la conversión de biomasa lignocelulósica a etanol, el contenido de hemicelulosa y celulosa fue tomado como base. Dos límites fueron considerados para definir el rango de valores adecuado para el contenido de ambas. Primero, un límite superior fue definido del diseño propuesto por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL por sus siglas en inglés) (Aden, A., Ruth, M., Ibsen, K., Jechura, J., Neeves, K., Sheehan, J., 2002), durante el proceso de conversión de rastrojo de maíz, 76.5% de hemicelulosa y 85.5% de celulosa fueron fermentadas a etanol; este valor fue empleado en la construcción de la ecuación obtenida a partir del análisis estequiométrico:

Ecuación 1.

$$CE_{f_{etanol}} = 0.51 * (1 - H)(0.855X_{Celulosa} + 0.765X_{Hemicelulosa}) \quad (1)$$

donde $X_{Celulosa}$ representa la fracción de celulosa en el residuo base seca¹⁸, $X_{Hemicelulosa}$ representa la fracción de hemicelulosa en el residuo en base seca y H representa la fracción de agua en el sustrato tal como es recibido.

La **Tabla 4** muestra la generación potencial anual estimada de residuos promedio, con base en la superficie de alta y muy alta disponibilidad establecida por (Lozano-García, D.F., Santibañez-Aguilar, J.E., Lozano, J., Flores-Tlacuahuac, A., 2020), e información promedio de residuos agrícolas para México en el periodo 2009 – 2019 así como su composición química (Gaur, S., Reed, T.B., 1998).

¹⁸ La base seca representa la proporción estequiométrica una vez removida el agua del compuesto; es decir, es el reajuste en la proporción de componentes libre de humedad.

Tabla 4. Generación estimada potencial promedio anual de residuos a partir de maíz y su composición química

Cultivo	Producción maíz base alta y muy alta idoneidad (Tg / año) [a, b]	Razón Residuo / Producción [c]	Residuos generados base 60% (Tg / año)	Hemicelulosa [d]	Celulosa [d]	Lignina [d]	Contenido de Carbono [e]
				Porcentaje de Masa en base seca en rastrojo de maíz			
Maíz	80.37	0.825	39.78	41	23	36	56

a ((SIAP), 2020)

b (Lozano-García, D.F., Santibañez-Aguilar, J.E., Lozano, J., Flores-Tlacuahuac, A., 2020)

c (Aldana, 2014)

d (Gaur, S., Reed, T.B., , 1998)

e (Kirubakaray et al., 2009)

El rendimiento base seca obtenido a partir de la ecuación (1) (Aldana, H., Lozano, F.J., Acevedo, J., 2014) es consistentemente más alto que los reportados por otros autores, por ejemplo (Sharma, P., Sarker, B.R., Romagnoli, J.A., 2011) que utilizan un valor de rendimiento promedio de 22.7% para rastrojo de maíz y 26.2% para rastrojo de trigo, por lo que un valor reducido para este parámetro es considerado al 70% del valor estimado por la ecuación. Este valor para la eficiencia de conversión es considerado posteriormente.

La base de estimación de la demanda potencial de bioetanol para su uso en gasolinas es obtenida a partir de la producción de gasolinas en Pemex (SENER S. d., Sistema de Información Energética (SIE), 2020), considerando una sustitución del MTBE utilizado como aditivo en una base máxima de bioetanol del 10%, de acuerdo con lo establecido por la Norma Oficial Mexicana (NOM) – 016. Es importante hacer notar lo comentado en secciones anteriores, donde se especifica la utilización dual del etanol en gasolinas, tanto como componente (sustituto) o bien como aditivo (oxigenante) (Aldana, H., Lozano, F.J., Acevedo, J., 2014). En este sentido se comenta que, de acuerdo con los trabajos de (Rendon-Sagardi, M.A., Sanchez-Ramirez, C., Cortes-Robles, G., Alor-Hernandez, G., Cedillo-Campos, M.G., 2014), con el propósito de incorporar el beneficio de la disminución de las emisiones de gases efecto invernadero dentro de la discusión, se incorporará el uso de etanol como aditivo (oxigenante) en sustitución del MTBE.

Para la base de incorporación de etanol en combustibles se consideran dos escenarios. El escenario 1 consiste en una base de incorporación de Etanol en gasolinas al 5.8% (E5.8); y el escenario 2 consiste en una base de incorporación de Etanol en gasolinas al 10% (E10) en porcentaje volumen/volumen (v/v).

A partir de la definición de la demanda potencial, se realiza la estimación de la oferta potencial haciendo uso de la **Ecuación (1)** con la información proporcionada en la **Tabla 4**.

Con los datos de estimación de los residuos del cultivo de maíz (rastrajo) disponibles como insumos para la producción de etanol y mediante la utilización de la **Ecuación (1)**, se calcula el potencial estimado de producción base nacional, mismo que se ilustra en la **Tabla 5** (la densidad considerada para el etanol al 99% de pureza es de 0.79111 g/cm³ y la humedad promedio del rastrojo de maíz se considera en 40% (Aldana, H., Lozano, F.J., Acevedo, J., 2014)).

Tabla 5. Potencial de producción de etanol a partir de rastrojo de maíz.

Humedad promedio del rastrojo de maíz [%]	Celulosa disponible [Tg / año]	Hemicelulosa disponible [Tg / año]	Potencial de producción de Etanol [m3 / año]
40	915.01	1,631.11	5,496,775.96

Para este trabajo se considera un escenario mínimo delimitado por una demanda anual de 1Tg de etanol, que en su equivalencia volumétrica correspondería aproximadamente a 1,264,046 m³/año, cantidad que representa alrededor de una cuarta parte del potencial de producción anual de etanol a partir de rastrojo de maíz mostrado en la **Tabla 3**. La demanda propuesta se estima con base en la sustitución de MTBE en gasolina (oxigenante), a partir de los datos del promedio de producción de gasolina en México en el periodo 2010 - 2019, reportado por la Secretaría de Energía a través del Sistema de Información Energética (SIE) (SENER S. d., Sistema de Información Energética (SIE), 2020) y consiste en alrededor de 1 Tg de etanol para el escenario de incorporación al 5.8% (E5.8) y 1.7 Tg de etanol para el escenario de incorporación al 10% (E10).

Los requerimientos de insumos de ambos escenarios se encuentran muy por debajo del potencial estimado de producción anual de etanol a partir de rastrojo de maíz (5,496,776 m³/año, equivalentes a 4.35 Tg/año). Se resalta que el escenario E5.8 proporciona en forma suficiente la fracción en masa equivalente al 2.7% de oxígeno (máximo), como lo establece la Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016. De igual forma, el escenario E10, considerando al etanol como oxigenante (de manera exclusiva) estaría fuera de especificaciones derivado de la sentencia emitida por la Suprema Corte de Justicia de la Nación, en la que, en enero de 2020 se declaró como inconstitucional el uso de etanol al 10% en gasolinas (Solís, 2020); sin embargo, dado el potencial de etanol como componente, el antecedente que tuvo proveniente de la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, que en el pasado

permitió las mezclas de etanol – gasolina al 10%, así como posibles resoluciones futuras de la autoridad en materia (Comisión Reguladora de Energía), se mantiene para la discusión de viabilidad técnica el potencial escenario E10.

3.2.2 Estimación de la oferta y demanda de biogás.

La satisfacción de la demanda de biogás y otros biocombustibles no es una tarea fácil. Una estrategia común para lidiar con el problema es la propuesta de un canal que involucre a todos los individuos, organizaciones, recursos y tecnologías involucrados en la creación y venta de productos (cadena de suministro). Fundamentalmente, una cadena de suministro involucra aspectos tecnológicos (Bekkering, J., Broekhuis, A. A., van Gemert, W. J. T., 2010).

Dada la disponibilidad de biomasa de distintas fuentes, la demanda de biogás y biofertilizantes para distintos usos, el periodo de tiempo en el que estas demandas son requeridas, las ubicaciones geográficas en las que las tecnologías de proceso y purificación pueden ser instaladas, las características tecnológicas y la distancia entre locaciones, el problema consiste en sintetizar la cadena de suministro de biogás para satisfacer la demanda en una región geográfica en distintos periodos a través de la instalación óptima de tecnologías de proceso y purificación de biogás y biofertilizante y a la vez determinar si una tecnología debe ser instalada o no y consecuentemente la optimización de la operación del sistema integrado.

La solución óptima debe considerar la configuración del canal de suministro, transporte de materias primas y su acondicionamiento y transformación a productos finales con la mayor rentabilidad posible, así como la maximización en el ahorro de emisiones de GEI. Para resolver este problema (Díaz-Trujillo, L.A., Nápoles-Rivera, F., 2019) proponen un modelo de optimización para cadenas de suministro de biogás que considera aspectos económicos y ambientales. El modelo propone una solución del problema a partir de la optimización multiobjetivo con la finalidad de satisfacer la demanda de biogás y biofertilizante en una región geográfica en particular (compuesta por Estados situados al occidente de México). Sus resultados muestran que dada la utilización de la metodología de optimización es posible alcanzar rendimientos significativos y beneficios ambientales.

En el desarrollo de proyectos de biogás, es esencial estudiar de origen tres condiciones esenciales: ubicación geográfica, disponibilidad de biomasa y demanda de energía y subproductos (Díaz-Trujillo, L.A., Nápoles-Rivera, F., 2019).

Dado que las condiciones para el desarrollo de proyectos de biogás tienen carácter regional, el presente trabajo considera su estudio a nivel regional, tomando como caso de estudio la región compuesta por los Estados de Michoacán, Guanajuato y Jalisco; estados adyacentes con alta disponibilidad de distintos tipos de biomasa. Estos estados concentran al 15.29% de la población (19,263,931 habitantes) (INEGI I. N., 2021), que implica una alta demanda de energéticos. En forma

complementaria, estos estados cuentan con una amplia fuente de biomasa y su actividad agrícola es una de las más importantes del país, lo cual provee un mercado adecuado para biofertilizantes. Con lo anterior se cumplen las tres condiciones esenciales para el caso de estudio seleccionado.

En forma más específica, en la **Tabla 6** se muestran las ciudades seleccionadas (de los Estados de Michoacán, Guanajuato y Jalisco) para el caso de estudio, que cumplen con los criterios de localización geográfica, disponibilidad de biomasa y demanda de energía y subproductos.

Tabla 6. Ciudades seleccionadas para el caso de estudio de producción de biogás, con su población total.

Michoacán		Guanajuato		Jalisco	
Aguililla	14,754	Abasolo	92,040	Acatic	23,175
Apatzingán	126,191	San Miguel de Allende	174,615	Arandas	80,609
Arteaga	20,332	Manuel Doblado	41,240	Atotonilco el Alto	64,009
Coalcomán	19,633	Dolores Hidalgo	163,038	La Barca	67,937
Cotija	20,198	León	1,721,215	Degollado	21,226
La Huacana	30,627	Pénjamo	154,960	Encarnación de Díaz	53,039
Huetamo	41,973	Purísima del Rincón	83,842	Guadalajara	1,385,629
Morelia	849,053	Salvatierra	94,126	Jesús María	18,982
La Piedad	106,490	San Felipe	119,793	San Miguel el Alto	31,965
Puruándiro	69,260	San Luis de la Paz	128,536	Tamazula de Gordiano	38,955
Tanhuato	15,534	Silao	203,556	Tepatitlán de Morelos	150,190
Tepalcatepec	24,074	Valle de Santiago	150,054	Tomatlán	36,316
Zamora	204,860	Yuriria	68,741	Zapopan	1,476,491
				Zapotlanejo	64,806

Fuente: Elaboración propia con base en (Díaz-Trujillo, L.A., Nápoles-Rivera, F., 2019) e información del Censo Nacional de Población y Vivienda, INEGI 2020.

Como posibles fuentes de biomasa se consideran estiércol de bovinos, desechos orgánicos y aguas residuales. Con base en información de (INEGI, Encuesta Nacional Agropecuaria , 2019), en la región seleccionada se producen diariamente 48,033 toneladas de estiércol de vaca. De acuerdo con (INEGI, Anuario Estadístico y Geográfico por Entidad Federativa, 2018) en estos estados se producen diariamente 1.8 millones de metros cúbicos de aguas residuales municipales y 7,500 toneladas por día de desechos orgánicos. Bajo estos supuestos de disponibilidad de insumos, en combinación con la utilización de tecnología de producción y purificación de biogás en escala del orden de los 150 m³/mes a partir de tres tipos de equipos con tecnología de cámara de tambor flotante, digestor de tambor flotante y de domo fijo (véase **Figura 9**), adaptada con la instalación de una unidad de biodigestión del tipo de prensa de tambor de cribado para la producción conjunta de biofertilizante, así como un equipo purificación de biogás, de acuerdo con (Díaz-Trujillo, L.A., Nápoles-Rivera, F., 2019) en la región señalada existe un potencial optimizado para producción de biogás aproximado a los 288,467 m³ por año. En la tabla 6 se muestra el potencial de producción de biogás, así como insumos, subproductos y desechos estimados bajo los supuestos mencionados.

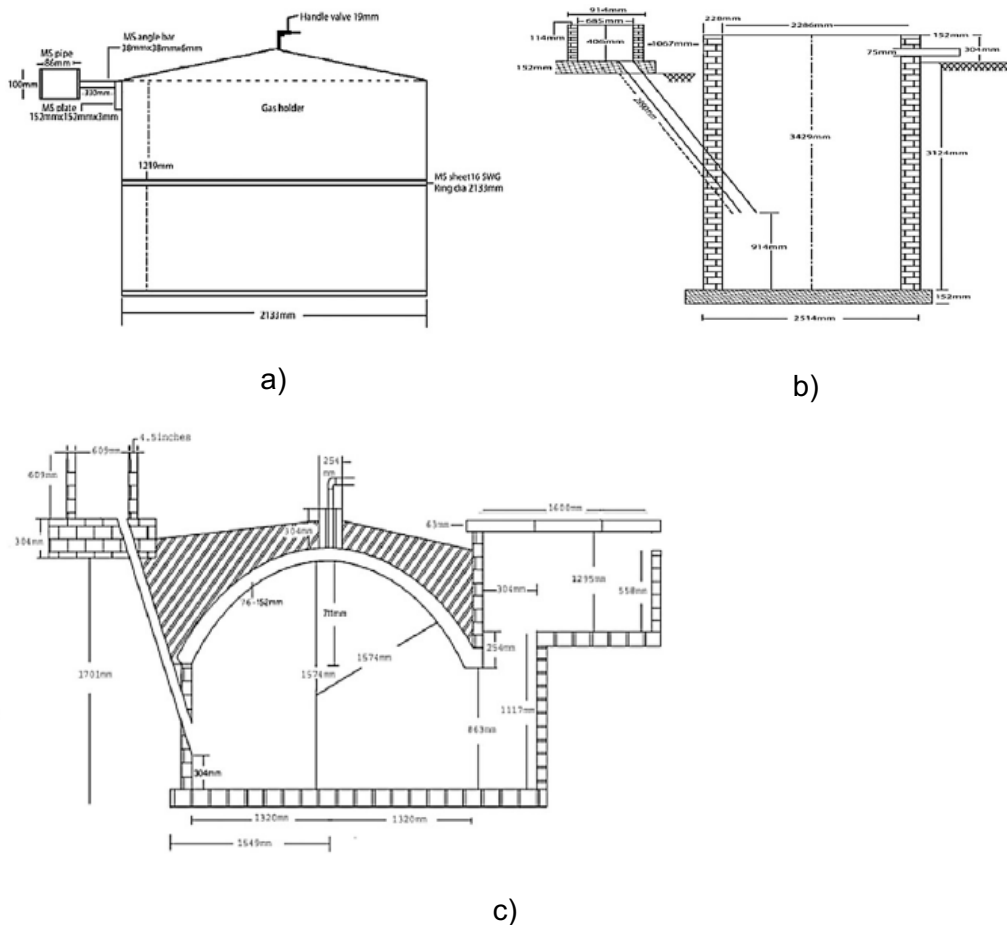


Figura 9: Diagramas con los tipos de biodigestores considerados en el estudio citado: a) planta de biogás tipo cámara de tambor flotante, b) biodigestor tipo tambor flotante y c) planta de biogás de tipo domo fijo. Fuente: Tomado de (Díaz-Trujillo, L.A., Nápoles-Rivera, F., 2019).

Tabla 7. Potencial de Producción de Biogás en la Región de Michoacán, Jalisco y Guanajuato, así como insumos y subproductos.

Biomasa total requerida (como insumos)	424,216 Ton/año
Desechos orgánicos (insumos)	164,275 Ton/año
Aguas residuales (insumos)	259,941 m ³ /año
Biogás purificado	288,467 m³/año
Biofertilizante total	8,880 Ton/año
Desechos orgánicos (desecho)	3,194 Ton/año
Aguas residuales (desecho)	5,686 m ³ /año
<i>Fuente: (Díaz-Trujillo, L.A., Nápoles-Rivera, F., 2019)</i>	

La demanda de biogás se estima como consumo general per cápita con el equivalente a la sustitución de las necesidades energéticas que satisface el gas L.P. (GLP) (6.16 kg GLP/mes per cápita) (SENER, PROSPECTIVA DE GAS L.P. 2017-2031, 2017) y considerando la demanda de los sectores. De la misma forma, la demanda de biofertilizantes se puede estimar con los datos reportados por el banco mundial de 102.2 kg de biofertilizante por hectárea cultivable de tierra (BIRF, AIF, MIGA, CIADI, BANCO MUNDIAL, 2018). La superficie total cultivable para esta región geográfica es de más de 2 millones de hectáreas (INEGI, Anuario Estadístico y Geográfico de Guanajuato, 2016) (INEGI, Anuario Estadístico y Geográfico de Jalisco, 2016) (INEGI, Anuario Estadístico y Geográfico de Michoacán de Ocampo, 2016). En la **Tabla 7** se muestra la distribución porcentual de la demanda de GLP por sector en México.

Tabla 8. Demanda de GLP por sector en México

Sector	%
Residencial	59.5
Servicios	14.8
Auto transporte	12.5
Industrial	10.3
Petrolero	1.5
Agropecuario	1.4
Total	100

Fuente: (Díaz-Trujillo, L.A., Nápoles-Rivera, F., 2019)

De acuerdo con las estimaciones presentadas, se propone una demanda de biogás en los municipios seleccionados para el caso de estudio, considerando su uso doméstico en sustitución de las necesidades energéticas que satisface el GLP equivalente a 30,245 Ton/mes o bien 706,120 m³ por año y una oferta estimada correspondiente de 288,467 m³/año. Al ser la demanda muy superior a la oferta, se considera viable la satisfacción de necesidades energéticas domésticas a partir de la utilización de biogás como combustible alternativo y en complemento a la utilización general del GLP para las ciudades seleccionadas dentro del caso de estudio propuesto.

3.3. Parámetros Económicos.

3.3.1. Parámetros para Etanol.

Para la estimación de los parámetros económicos, se toma como base el trabajo de (Aldana, H., Lozano, F.J., Acevedo, J., 2014). En su trabajo, Aldana basa las estimaciones del costo anualizado de inversión (CAI) y el Costo de Operación (COp) en la información provista por (Aden, A., Ruth, M., Ibsen, K., Jechura, J., Neeves, K., Sheehan, J., 2002). Para determinar el costo de inversión, se utiliza un factor de escala exponencial de 0.7, como está recomendado en el trabajo de (Polagye, B.L., Hodgson, T., Malte, P.C., 2007). A partir de este análisis es posible determinar la viabilidad económica de la producción de bioetanol para suponer una factibilidad en su utilización como aditivo en gasolinas.

El enfoque de análisis de inversión (Rosas-Barajas, A., Aguilar-Ortega, A., Cornejo, 2018) toma una perspectiva de largo plazo. Se considera una valuación detallada y análisis de flujos futuros de efectivo, costos y beneficios de empresas de

biocombustibles, incluyendo riesgos asociados a volatilidad de precios, tecnología, etc. Se parte del supuesto que la competitividad y viabilidad de la industria de bioetanol es en gran parte determinada por el mercado de combustibles fósiles, así como los precios de etanol en referencias internacionales (*U.S. Gulf Coast*).

La estimación de parámetros ambientales se realiza como factor de emisión para combustión de MTBE, considerando la combustión completa del material, con base en los datos proporcionados por (Corezen, H., Kampman, B., 2009). El factor de mitigación de emisiones fue obtenido asumiendo la sustitución de MTBE por etanol (Aldana, H., Lozano, F.J., Acevedo, J., 2014).

3.3.2 Estimación de Costos Etanol.

La **Tabla 9** muestra el costo medio anualizado por tamaño de planta (inversión y operación) así como el factor de mitigación. Se considera una evaluación y amortización de los activos de las biorrefinerías a 20 años.

Tabla 9. Costo y parámetros ambientales para la tecnología de Sacarificación y Fermentación Simultánea de biomasa lignocelulósica de cultivos de maíz (Aldana, 2014).

Proceso	Costo anualizado de Planta 2	Costo anualizado de Planta 4	Costo anualizado de Planta 6	Costo de Operación (USD/Mg)	Factor de Emisiones	Factor de Mitigación
	Gg/día	Gg/día	Gg/día			
	M USD/año				Mg / Mg	
SSF	24.9	41.5	56	21.62	0	1.91

La utilización de biomasa absorbe las emisiones de CO₂ generadas durante su proceso y uso final a partir de la fotosíntesis que proporciona su origen (Aldana, H., Lozano, F.J., Acevedo, J., 2014). Esto hace que sea considerada como una fuente neutral de emisiones al completar su ciclo como biocombustible.

Para satisfacer la demanda estimada en 1Tg de etanol y con base en lo mostrado en la **Tabla 8**, cualquiera de las opciones de tamaño de planta es adecuada y su selección dependerá de la región donde decida ubicarse, así como la disponibilidad cercana de materia prima (rastrajo de maíz) y su cercanía con las Terminales de Almacenamiento y Reparto (TAR) de PEMEX.

Es importante tener en cuenta que, si bien se considera la utilización de biomasa lignocelulósica como insumo para la producción de bioetanol y el estimado de costo es muy bajo como materia prima (al no existir un mercado específico para este tipo de residuos), es necesaria una adecuada integración y optimización de la cadena de suministro y transformación de materias primas a productos y subproductos. En este sentido, surge una especial relevancia en torno a que los lugares con potencial de establecimiento de biorrefinerías guarden relativa cercanía con las fuentes de

insumos que utilizarán, principalmente para acceder a un costo moderado de transporte de insumos, así como garantizar su adecuado manejo y calidad previos a su ingreso en la cadena de transformación.

De acuerdo con (Aldana, H., Lozano, F.J., Acevedo, J., 2014), hay 19 municipios de México, distribuidos en todo el territorio nacional que tienen el potencial para ubicar a una biorrefinería, que cumplen con las condiciones mencionadas anteriormente.

Tabla 10. Municipios con el potencial de producción de bioetanol y máxima distancia de las fuentes de insumo (biomasa lignocelulósica) (Aldana, 2014).

Número	Municipio	Estado	Distancia Máxima (km)
1	Mexicali	Baja California	0
2	Hermosillo	Sonora	348
3	Cajeme	Sonora	86
4	Chihuahua	Chihuahua	101
5	Culiacán	Sinaloa	120
6	Durango	Durango	474
7	Gómez Palacio	Durango	455
8	Cadereyta de Jiménez	Nuevo León	62
9	Valle Hermoso	Tamaulipas	127
10	Altamira	Tamaulipas	155
11	Juanacatlán	Jalisco	74
12	San Luis de la Paz	Guanajuato	139
13	Tula de Allende	Hidalgo	399
14	Pedro Escobedo	Querétaro de Arteaga	142
15	Cuatlancingo	Puebla	216
16	Acapulco de Juárez	Guerrero	112
17	Medellín	Veracruz - Llave	111
18	Palizada	Campeche	483
19	Othón P. Blanco	Quintana Roo	333

Para fines de diversificación y mayor presencia nacional, la evaluación financiera se realiza con base en el modelo de biorrefinerías de menor capacidad (2 Gg/día) y considerando un periodo de amortización de 20 años.

En la **Tabla 11** se observa que en el proceso de Sacarificación y Fermentación Simultánea los costos más importantes son fijos (relacionados con la inversión), equivalentes al 41%, seguidos por los costos de insumos (biomasa) equivalentes al

35% de los totales. Los costos variables representan un 15%, los correspondientes al transporte de residuos 8% y finalmente el transporte de productos se estima en un costo equivalente del 1% (Aldana, H., Lozano, F.J., Acevedo, J., 2014).

Tabla 11. Distribución de costos para producción de etanol a partir de rastrojo de maíz

(Aldana, H., Lozano, F.J., Acevedo, J., 2014)

COSTO TOTAL	0.5946	[USD/L]
Costos Fijos	41%	0.2438
Costos Variables	15%	0.0892
Materia Prima	35%	0.2081
Transporte de Productos	1%	0.0059
Transporte de Residuos	8%	0.0476

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Aldana (2014).

El costo total de la tecnología se obtiene a partir de los trabajos de (Aldana, H., Lozano, F.J., Acevedo, J., 2014) sobre una base energética de la molécula de etanol. A partir del poder calorífico reportado como promedio por (SENER S. d., 2018) se cambia a una base comparativa de dólares de los Estados Unidos por litro (USD/L). El valor obtenido como costo total de 59 centavos de dólar, equivale a 11.89 pesos por litro de etanol considerando un tipo de cambio de 20 pesos por dólar.

Los precios de etanol en la costa del Golfo de los Estados Unidos de América (*U.S. Gulf Coast*, precio referencia para PEMEX) han sido muy variables (presentando un máximo de 0.86 USD/L en 2014 y un mínimo de 0.24 USD/L en 2020, en el análisis de la última década) y con frecuencia siguen a los de la gasolina (siendo menores a los del MTBE), excepto cuando el precio del crudo es bajo y entonces el piso de precio del etanol queda determinado por los costos del sector agrícola (Mayers, J., Davis, S., Leger, M. P. E. , 2020). Cuando los precios de la gasolina aumentan, los del etanol también se incrementan; aunque existe un precio piso, debajo del cual es muy poco probable que se llegue (Mayers, J., Davis, S., Leger, M. P. E. , 2020). Los precios de referencia del spot de etanol en la costa del Golfo de los Estados Unidos de América son relevantes porque definen el precio al que está dispuesto a pagar PEMEX con base en el criterio de costo de oportunidad, es decir, el precio de importación.

De acuerdo con (Mayers, J., Davis, S., Leger, M. P. E. , 2020), en 2012 el diferencial de precios de MTBE/etanol superó los \$4.47 pesos/L, mientras que el diferencial más bajo fue de \$0.40 pesos/L en 2016, siendo la constante durante la última década que los precios de MTBE siempre fueron superiores a los de etanol en el

mercado *U.S. Gulf Coast*. Aunado a los beneficios en el precio, el etanol contiene mayor cantidad de octanos al mezclarlo (115 para etanol en comparación con 110 del MTBE, (API, 2001)). Esto permite a los refinadores producir una base previa de gasolina para mezcla con menor octanaje y una vez adicionado el etanol en la mezcla, alcanzar el octanaje requerido de 87 para la gasolina regular y 91 para la premium (de acuerdo con el Marco Normativo Mexicano) (Mayers, J., Davis, S., Leger, M. P. E. , 2020).

En las condiciones actuales de la oferta nacional, PEMEX no puede adquirir etanol bajo un esquema que le implique incurrir en costos adicionales o subsidios directos, ya que esta situación vulneraría su obligación legal de crear valor económico para la empresa. PEMEX sólo puede adquirir etanol bajo un esquema que considere la capacidad para la producción de insumos en el país, la demanda de gasolinas que puede ser remplazada sin complicar la operación regular de la empresa y que se ajuste a las premisas de cero subsidios (precio máximo comparable a una referencia internacional más el costo de la logística e importación) De acuerdo con SENER 2013 (SENER S. d., 2013).

3.3.3. Estimación de Precio para Etanol.

De acuerdo con SENER 2013 (SENER S. d., 2013), el precio del etanol se debe calcular con base en lo establecido por la **Ecuación (2)** como se muestra a continuación:

Ecuación 2.

$$PE = \frac{(PE_{spot} * (1 + CI) * FC_1) + LI}{FC_2} * TC + CT \quad (2)$$

Donde:

PE es el precio de etanol en cada Terminal de Almacenamiento y Reparto en pesos por litro;

PE_{spot} es el promedio del precio spot (cotizaciones altas y bajas) del etanol, publicada en *Platt's Market Scan* del periodo 21 del mes *T-2* al 20 del mes *T-1*,

T es el mes de aplicación del precio, UScts/gal;

CI son los costos de importación del etanol, será el porcentaje aplicable de acuerdo con los derechos de importación establecidos por la Secretaría de Economía y aplicados por el Servicio de Administración Tributaria (porcentaje);

FC₁ es el factor de conversión UScts/gal a USD/bl (equivalente a 0.42);

LI es la logística de importación, costo de logística incluyendo transporte marítimo y almacenamiento en terminal marítima (terrestre para Cadereyta), reportados por compañías especializadas en la importación de productos en USD/bl;

FC_2 es el factor de conversión de barriles a litros, equivalente a 158.9873;

TC es el promedio de las publicaciones realizadas por el Banco de México en el Diario Oficial de la Federación, comprendidas entre el día 21 del mes $T-2$ al día 20 del mes $T-1$, siendo T el mes de aplicación del precio, del tipo de cambio para solventar obligaciones denominadas en moneda extranjera pagaderas en la República Mexicana; y

CT es el costo de transporte terrestre desde el punto de importación hasta cada TAR, correspondiente a lo reportado por las compañías especializadas en MXP/L.

Con base en lo mostrado por la Ecuación (2), independientemente del origen del etanol, el precio de compra de PEMEX debe ser equivalente al precio de importación. Esta premisa pone en desventaja a tecnologías de producción de segunda generación, pues lo requerido como inversión inicial, durante el pretratamiento de la materia prima y durante el proceso, lo hacen más caro en términos comparativos con las tecnologías de primera generación (como la base principal de producción en los Estados Unidos de América) y en este sentido se les relaciona con una menor competitividad respecto a su precio.

Aplicando la Ecuación (2), y con base en datos promedio correspondientes al año 2020, se obtendría un precio de compra por PEMEX para etanol de alrededor de \$8.86 Pesos/Litro (equivalentes a 0.41 USD/L), considerando un precio de etanol en el mercado de la Costa del Golfo de los Estados Unidos de América de 0.37 USD/L (referencia). Los costos de logística e importación se reducen considerablemente dado que, en el marco del Tratado de Libre Comercio de México, Estados Unidos y Canadá (TMEC) se establece una exención del Impuesto General a las Importaciones (aranceles) para este producto.

Tabla 12. Precios promedio y proyección de precios para etanol anhidro en la región Costa del Golfo en los Estados Unidos de América.

Año	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Precio promedio Etanol Anhidro [USD/galón]	1.38	1.35	1.45	1.45	1.49	1.55	1.45	1.54	1.57	1.60	1.62	1.65
Precio promedio Etanol Anhidro [USD/L]	0.37	0.36	0.38	0.38	0.39	0.41	0.38	0.41	0.41	0.42	0.43	0.44

Fuente: Elaboración propia con base en información de *Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2020. Precios U.S. Gulf Coast. Precios anuales promedio 2019 – 2021 y proyección de precios 2022 – 2030.*

En este contexto de precios de etanol en Estados Unidos, dentro el Marco del T-MEC y bajo el criterio de costo de oportunidad de PEMEX, no se encuentran en la actualidad las condiciones en México que propicien el surgimiento de bioetanol de segunda generación, porque estas tecnologías se sujetarían a una competencia contra la referencia de precio en Estados Unidos (*U.S. Gulf Coast*), que en términos

prácticos y a la luz del presente trabajo se encuentra fuera de competencia (Bautista-Herrera, A., Ortiz-Arango, F., Álvarez-García, J., 2021), dado que el precio máximo de compra autorizado de Pemex en el corto plazo (2022 - 2024) es de \$0.41 USD/L, contra un costo de producción de bioetanol de segunda generación de \$0.59 USD/L.

A pesar de que en estricto sentido el costo de producción debería ser menor que el costo de importación de Pemex (costo de oportunidad), se considera que existen incentivos adicionales para la producción en México (dada su naturaleza de biocombustible), como la reducción en la dependencia de gasolinas de importación, el aumento en el inventario de combustibles nacional, la generación de empleos directos e indirectos relacionados, una derrama económica adicional en el sector productivo de maíz, así como ingresos anuales para el Estado estimados en alrededor de 3 mil millones de pesos por concepto de Impuesto al Valor agregado, e ingresos estimados en 862 millones de pesos por Impuesto Sobre la Renta, que como alternativa podrían ser redirigidos como estímulos para reducir el efecto del sobreprecio.

Con base en las cifras del párrafo anterior, y realizando el ejercicio de cálculo, con el propósito de tener un precio más justo de etanol de segunda generación, el potencial de estímulo fiscal equivalente al prorrateo de la sumatoria de ingresos fiscales mencionados por IVA e ISR, equivale a \$3.10 pesos por litro, o bien 0.1434 USD/L al tipo de cambio referencia de la base de cálculo. Esta estimación de 0.1434 USD/L sería el potencial de subsidio que el gobierno mexicano podría emplear para cada litro de etanol (sin afectar las finanzas del Estado Mexicano) y con ello estimular el surgimiento de un mercado nacional para este insumo estratégico.

3.3.4. Parámetros para Biogás.

Para la estimación de los parámetros económicos, se toman como base los trabajos de (Díaz-Trujillo, L.A., Nápoles-Rivera, F., 2019) y de (Cavaignac, R., Ferreira, N.L., Guardini, R., 2021). En su trabajo, Díaz-Trujillo propone el desarrollo de un método de optimización multiobjetivo (MILP por sus siglas en inglés) para la definición de la cadena de suministro con un enfoque determinístico.

El modelo propuesto por Díaz-Trujillo considera la selección del tipo de biomasa, el lugar de compra, la ubicación de la tecnología de proceso, y la distribución de los productos finales. Como variante, se propone un método específico de purificación, que considera la técnica de rascado con aminas¹⁹ a partir de la utilización de diglicolamina (DGA) y metil dietanolamina (MDEA) con dietanolamina (DA) como

¹⁹ Las aminas son componentes orgánicos obtenidos del amoníaco (NH₃). Al utilizarse como método de purificación de biogás, un grupo alquil aromático sustituye uno o más átomos de hidrógeno. El enlace covalente logrado promueve la generación de reacciones exotérmicas en presencia de gases ácidos como el CO₂ y el H₂S (Cavaignac, R., Ferreira, N.L., Guardini, R., 2021)

solventes (ruta de purificación base diglicoamina) que puede remover hasta el 99% de dióxido de carbono, así como generar un biometano con 91% de pureza (Cavaignac, R., Ferreira, N.L., Guardini, R. , 2021).

La combinación de ambos modelos permite estimar la cadena de suministro, insumos y costos de operación y purificación. El modelo combinado inicia a partir de una función para calcular rendimientos, una más para estimar ahorro de emisiones, y otra con la función objetivo de maximización, como se muestra en las **Ecuaciones (3), (4) y (5)**.

Ecuación 3.

$$\text{Rendimiento Total} = \text{Ingresos Biogás} + \text{Ingresos Biofertilizante} - (\text{Costo biomasa} + \text{Costo Transporte} + \text{Costos Fijos} + \text{Costos Variables}) \quad (3)$$

Ecuación 4.

$$\text{Ahorro Total de Emisiones} = \text{Emisiones Evitadas} - (\text{Emisiones Transporte} + \text{Emisiones Conversión} + \text{Emisiones por Uso}) \quad (4)$$

Ecuación 5.

$$\text{Función Objetivo} = \{\text{Max. Rendimiento Total}; \text{Max. Ahorro Total de Emisiones}\} \quad (5)$$

De acuerdo con (Wellinger, A., Murphy, J., Baxter, D., 2013), la composición estándar de biogás (por ejemplo, el proveniente de rellenos sanitarios) es de entre 25% - 47% CO₂ y 30% - 65% CH₄ en volumen. Es importante considerar que, durante el proceso de generación de biogás por la acción metabólica de consorcios microbiológicos, se generan otros gases contaminantes que forman parte de la composición del biogás no purificado, como el nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂), ácido sulfhídrico (H₂S), y compuestos aromáticos (Sasi, S., Veijanen, A., Rintala, J., 2007). Para un adecuado aprovechamiento del biogás es necesario un proceso de purificación (obtención de biometano) que implica la remoción de los gases ácidos y un consecuente incremento en el poder calorífico, así como la disminución en la generación de gases contaminantes al utilizar el producto final (combustión) (Cavaignac, R., Ferreira, N.L., Guardini, R. , 2021).

El requerimiento energético para la tecnología de purificación de rascado por aminas es aproximado a 0.14 (energía eléctrica) y 0.55 (térmica) kWh/m³ de biogás purificado (Bauer, F., Hulteberg, C., Persson, T., Tamm, D., 2013).

La tecnología seleccionada de purificación propuesta se acopla a una planta de producción de escala media, con una capacidad operativa de 1,600 m³/h de biogás. El potencial de producción de biogás / tonelada de insumos es de 90 – 120 m³/ton

(Cavaignac, R., Ferreira, N.L., Guardini, R. , 2021). El caso de estudio considerado para la estimación de parámetros económicos se basa (como se comentó en la sección 3.2.2) en 39 ciudades pertenecientes a 3 Estados de la República ubicados en la región del Bajío mexicano (**véase Tabla 6**).

Para efectos de balance de masa implícito en la transformación, se consideran como supuestos que para los insumos propuestos (desechos orgánicos y aguas residuales) en promedio, el 51.4% en masa es susceptible de aprovechamiento para su transformación a biogás (Cavaignac, R., Ferreira, N.L., Guardini, R. , 2021). También se considera una composición media del biogás de 52.79% CH₄ (metano), 38.2% CO₂ (dióxido de carbono), 4.5% N₂ (nitrógeno), 0.009% H₂S (ácido sulfhídrico) y 0.001% CO (monóxido de carbono) (base seca) en base molar, una temperatura de entrada de 45°C, y tasa de flujo de masa de 1947.11 kg/h. El estudio base (Cavaignac, R., Ferreira, N.L., Guardini, R. , 2021) considera una solución de aminas en procesos de simulación compuesta por 50% (en masa) de DGA y una mezcla de MDEA-DEA (35% en masa – 15% en masa).

Los parámetros económicos se estiman con base en la instalación completa de la planta de procesamiento con capacidad media comentada en párrafos anteriores. Los gastos de capital incluyen costos fijos directos (equipos, instalaciones, edificios, ingeniería y construcción) y costos indirectos (transportes, seguros e impuestos, sobrecarga de construcción y contratista de ingeniería). La evaluación de costos se basó en los trabajos de (Díaz-Trujillo, L.A., Nápoles-Rivera, F., 2019) y (Cavaignac, R., Ferreira, N.L., Guardini, R. , 2021). Los equipos considerados en la estimación incluyen sopladores, compresores, columnas de pelado y absorción, tanques contenedores de proceso, intercambiadores de calor y bombas. Adicionalmente, también se considera un porcentaje de sobre costo para gastos de contingencia, tarifas y costos de instalaciones auxiliares (15%, 3% y 50% respectivamente).

Los costos de operación incluyen costos fijos directos, gastos generales, insumos, utilitarios y un operador por turno por unidad de producción. Se fijó un tiempo de operación de 8000 horas por año. Se consideran los costos reportados por (Cavaignac, R., Ferreira, N.L., Guardini, R. , 2021), mismos que se enuncian en líneas siguientes.

Se asumen precios de agua de proceso y electricidad de 0.49 USD/m³ y 0.09 USD/kWh, respectivamente. El vapor generado en la unidad de proceso se estima utilizando un porcentaje del biometano producido como combustible para la generación de este servicio, alcanzando un costo en sitio de 0.24 USD/m³. El costo operativo de los generadores eléctricos de gas natural se encuentra en el rango de los 0.2 a 0.3 USD/kWh para un valor estimado de 0.5 USD/m³ incluyendo impuestos. Los costos de aminas se estiman en 3.26 USD/kg para DGA y 4.07/kg para MDEA-DEA. De acuerdo con resultados obtenidos por (Cavaignac, R., Ferreira, N.L.,

Guardini, R. , 2021), la eficiencia de purificación de la tecnología de rascado por aminas utilizando DGA es muy similar a la eficiencia cuando se utiliza MDEA-DEA, y al ser menor el costo de DGA como insumo, se toma como referencia para la selección de tecnología de purificación.

La **Tabla 13** muestra los parámetros económicos generales para biogás.

Tabla 13. Parámetros económicos y ambientales generales de biogás.

Tecnología	Rendimiento [Miles de USD/año]	Ingresos [Miles de USD/año]		Costos (Miles de USD/año)				Emisiones GHG (GEI) [Ton CO ₂ eq /año]		
		Biogás Purificado	Biofertilizante	Biomasa	Transporte	Fijos	Variables	Transporte	Conversión	Uso
HPWS	2,604	6,923	53	30	1,785	2,477	80	71,401	261,780	936

Fuente: Elaboración propia con base en (Díaz-Trujillo, L.A., Nápoles-Rivera, F., 2019)

En resumen, los parámetros económicos considerados para el presente trabajo incluyen los costos de materia prima (biomasa incluyendo desechos orgánicos y aguas residuales); los costos de transporte (biomasa, biogás y biofertilizante); los costos de tecnología de producción (tecnología de cámara de tambor flotante, digestor de tambor flotante). Se considera como referencia un precio de venta de 0.38 USD/m³ y costos de capital (Capex) de 120.3 USD/m³biogás/día (que incluye contingencias, impuestos, acondicionamiento de sitio y servicios auxiliares, costo modular de equipos, planta y unidad de cogeneración) y costos de operación (Opex) equivalentes a 1,161.6 Miles de USD/año (que incluyen costos directos de producción variables, costos fijos, costos generales adicionales, operación de planta y operación de unidad de cogeneración) (Cavaignac, R., Ferreira, N.L., Guardini, R. , 2021).

La **Tabla 14** muestra los parámetros específicos para el caso de estudio del presente trabajo.

Tabla 14. Parámetros específicos para el caso de estudio del presente trabajo

Tecnología	Insumos			Emisiones totales (preparación y proceso) [gCO ₂ eq / MJ]	Productos biogás [m ³ /año]	Características	
	Biomasa [ton / año]	Electricidad [MWh/año]	Combustible de proceso [m ³ /año]			Poder calorífico [Mj/m ³]	Contenido de Metano [% Molar]
HPWS + DPA	127,571.10	414.8	2,944,184.50	0.61	5,087,480.50	32.7	91.1

Fuente: (Cavaignac, R., Ferreira, N.L., Guardini, R. , 2021)

3.4. Evaluación Financiera.

3.4.1. Evaluación para Etanol.

Se realiza un análisis financiero bajo la perspectiva de la evaluación de proyectos, para una biorrefinería con capacidad instalada de 2 Gg/día de etanol a partir de la transformación de biomasa lignocelulósica (rastrojo) de maíz mediante la tecnología de sacarificación y fermentación simultáneas (SSF). Se considera un margen de utilidad del 15% sobre la base de costos totales e impuestos, con un precio base de 0.6996 USD/L y una operación de 300 días al año al 80% de la capacidad instalada durante un periodo de 20 años, así como flujos anuales constantes (sin afectaciones por inflación). De acuerdo con la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, la tasa social de descuento a utilizar es del 10%. La inversión inicial de planta y terreno (activo fijo) se estima en USD \$498 millones y el valor residual después de 20 años se asume como el 10% del valor de la inversión inicial.

Bajo los supuestos considerados en el párrafo anterior, el Valor Presente Neto (VPN) que se alcanza es de casi USD \$ 51.5 millones y la Tasa Interna de Retorno (TIR) es del 11.45%, por lo cual de acuerdo a estos criterios el proyecto es viable desde el punto de vista financiero.

Tabla 15. Consideraciones financieras y resultados del análisis de rentabilidad para etanol.

Costo Total Unitario	0.5946 USD/L
Días de Operación/año	300 días
Producción	606,742,425.20 litros
Margen sobre precio	15%
Precio base (venta)	0.6996 USD/L
Flujo Neto Anual estimado	63,669,011.53 USD
Valor residual estimado	49,800,000.00 USD
Tasa de descuento (SHCP)	10%
VPN	51,452,639.29 USD
TIR	11.45%
Demanda teórica anual	1,267,427,122.94 litros
Monto teórico IVA anual	2,933,607,419.65 MXP
Monto teórico ISR anual	825,077,086.78 MXP

Fuente: Elaboración propia con datos de Tablas 5, 9, 11 y Tipo de cambio promedio 2020 - 2022* publicado en el DOF.

*Periodo enero - agosto 2022

3.4.2. Evaluación para Biogás.

La evaluación financiera para biogás se tomó del estudio económico presentado por (Cavaignac, R. S., Ferreira, N. L., Guardani, R., 2021), con base en las tecnologías propuestas de producción y purificación discutidas en los parámetros económicos, considerando la capacidad de producción y un precio de 0.38 USD/m³ biogás purificado.

Bajo los supuestos comentados en la definición de oferta y demanda y con base en el acoplamiento de tecnologías seleccionadas, se estima una inversión de USD \$ 3,128,651.3 y se mantiene la tasa de descuento del 10%. Los resultados se muestran en la **Tabla 16**.

Tabla 16. Consideraciones financieras y resultados del análisis de rentabilidad para biogás.

Costo Variable Unitario	120.3	USD/m ³ /día
Costo Fijo	1,161,626.70	USD/año
Inversión Inicial	3,128,651.30	USD
Producción	5,087,480.50	m ³ /año
Precio base (venta)	0.38	m ³ /año
Flujo Neto Anual estimado	615,640.70	USD
Valor residual estimado	0.00	
Tasa de descuento (SHCP)	10%	
VPN	654,194.29	USD
TIR	14.67%	

Fuente: Elaboración propia con datos de (Cavaignac, R., Ferreira, N.L., Guardani, R. , 2021)

El Valor Presente Neto que se alcanza con una evaluación de proyecto a 10 años es de USD \$ 615,640.7 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 14.7%. Nuevamente los resultados obtenidos muestran que el proyecto es rentable.

Capítulo 4. Mecanismos económicos frecuentemente utilizados como estímulos para el mercado de bioenergéticos.

4.1. Instrumentos de Política Pública utilizados en el mundo para el fomento y fortalecimiento del uso de bioenergéticos.

Dentro de la revisión llevada a cabo de la literatura, se resaltan dos grandes vectores que propician el desarrollo y utilización de los bioenergéticos: los ambientales relacionados con objetivos de descarbonización y en general para alcanzar las metas de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS – ONU); y los relacionados con temas estratégicos – coyunturales (geopolíticos incluidos) propios del Estado, como el fortalecimiento de la soberanía energética, desarrollo económico regional (nuevos mercados) e integración de cadenas productivas.

A nivel de política pública, la literatura sugiere cinco tipos de instrumentos (Avalos-Rodriguez M.L. et al., 2021):

1. Los relativos a regulación (lineamientos y control) como normas, permisos, autorizaciones, prohibiciones, entre otros;
2. los que ejercen presión directa sobre el gobierno como infraestructura ambiental, parques nacionales, áreas naturales protegidas, rehabilitación de ecosistemas, entre otros;
3. los relacionados con la participación pública y social, como acuerdos voluntarios y asociaciones;
4. los que involucran el uso de mercados, como la eliminación de subsidios, impuestos verdes (ambientales), monitoreo, etcétera; y
5. los que están envueltos en la creación de mercados, como derechos de propiedad, marketing, adquisición de productos amigables con el ambiente, fondos de inversión, fondos internacionales, incentivos, y pagos por servicios ambientales, entre otros (Avalos-Rodriguez M.L. et al., 2021).

En el mundo existen diversos ejemplos de cómo los países adoptan políticas energéticas y regulatorias para fomentar y estimular el surgimiento de opciones que contribuyan con los ODS, así como la diversificación de su matriz energética e incremento de energías renovables. En el caso particular de los bioenergéticos, es posible resaltar que, a través de los últimos años, algunos organismos internacionales como la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) muestran incrementos de la participación de los bioenergéticos en los esfuerzos para mitigar el cambio climático. Los biocombustibles líquidos y biogás crecen consistentemente en el Escenario de Políticas Declaradas²⁰ (STEPS por sus

²⁰ STEPS (*Stated Policies Scenario*) por sus siglas en inglés o Escenario de Políticas Declaradas, es un escenario utilizado y construido por la Agencia Internacional de Energía para agrupar el impacto de marcos normativos y de política pública en las

siglas en inglés) por causa de diversos mandatos y objetivos, subrayando que el apoyo a las políticas es una variable crítica para la descarbonización de combustibles, especialmente en un contexto de precios bajos de combustibles fósiles. Los actuales niveles de gasto e inversión requieren elevar la emisión de políticas públicas anunciadas por los gobiernos que se reflejen en el escenario de políticas declaradas; se requeriría elevar con mucho mayor intensidad la emisión de políticas públicas para lograr las metas más ambiciosas de los ODS ((IEA) I. E., International Energy Agency Outlook 2020, 2021).

Ejemplos de políticas que fortalecen el uso de bioenergéticos son cada vez más abundantes en los tres sectores domésticos de uso final: calefacción, transporte y energía. Canadá es uno de los casos de Norteamérica que se ha enfocado en el uso de biocombustibles. La Regulación Federal de Combustibles Renovables (de Canadá) requiere el uso del 5% de mezcla de bioetanol en gasolinas y un 2% de contenido de renovables en Diesel (Canada, 2021). En Asia, Japón se ha enfocado en el uso de bioenergía para la generación eléctrica, así como a la introducción de biocombustibles (mayormente de importación) considerando la situación internacional y la tendencia al desarrollo de los biocombustibles de siguiente generación ((METI), 2018) y China ha implementado políticas para biocombustibles líquidos y generación eléctrica (Jiang, Z., Dai, Y., Luo, X., Liu, G., Wang, H., Zheng, H., Wang, Z., 2017). En Europa se han implementado medidas de política energética para fomentar su utilización en calefacción, transporte y electricidad, con varios países que tienen instrumentos de política pública implementados para el uso de bioenergéticos en cada sector (Bacovsky, D., Ludwiczek, N., Pointer, C, Verma, V.K., 2016).

A continuación, se revisan algunos casos específicos en contexto general como instrumentos de política pública para estimular el uso de bioenergéticos.

4.1.1. El caso de los Estados Unidos de América.

Los mercados de biocombustibles están en constante flujo. La principal política pública en materia de biocombustibles en los Estados Unidos de América es el Portafolio Estándar de Renovables (RFS por sus siglas en inglés). El RFS establece una cantidad mínima del volumen de venta de biocombustibles en cuatro categorías hasta alcanzar los 36 millones de galones en el 2022 (Dahiya, A., Krivov, A., 2014). El RFS está reforzado por los números de identificación de combustibles renovables (RINs por sus siglas en inglés). Se tiene un RIN²¹ relacionado con cada lote de

intenciones anunciadas en el presente. Su intención es proveer en sentido detallado la dirección en la cual los marcos normativos y de política pública existentes en el presente y de los que se tenga intención anunciados para el futuro, marcharán en el sector energético hacia el 2040 ((IEA) I. E., World Energy Model Documentation. Report Extract Stated Policies Scenario. 2020 Version, 2021)

²¹ Los RIN son en la práctica créditos numéricos que las refinerías e importadores de gasolina envían a la EPA cada año para demostrar el cumplimiento de las obligaciones establecidas por el RFS y mantener la capacidad de venta de combustibles fuera del mercado de los EE.UU. El banco de RINs es el agregado de RINs adicionales que provee liquidez al mercado. Los RINs son generados cuando los biocombustibles elegibles del RFS son mezclados en gasolinas (para el caso de etanol) o

etanol producido o importado. Al final del año, las partes involucradas (refinerías e importadores de gasolina) deben entregar a la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA por sus siglas en inglés) los RIN equivalentes a sus obligaciones de mezclado de todo el año (Dahiya, A., Krivov, A., 2014).

El RFS fue creado originalmente en el Acto de Política Energética de 2005 (Congreso de los EE. UU., 2005) y posteriormente reformado en el año 2007 a través del Acto Independiente y de Seguridad de Energía (EISA por sus siglas en inglés) y consta de cuatro categorías: Diesel basado en biomasa, biocombustible celulósico, biocombustibles avanzados y combustible renovable (biocombustibles convencionales). A continuación, se describen los detalles de cada categoría de las que conforman el RFS (Dahiya, A., Krivov, A., 2014), ((EPA), 2022).

- Diesel basado en biomasa (biodiesel). El piso establecido para biodiesel originalmente (en el estatuto de la EISA para el RFS) es de 1 billón de galones (1 BG), pero la EPA (por tener la facultad) lo incrementó como requerimiento a 1.28 BG. La categoría de biodiesel debería reducir la emisión de Gases Efecto Invernadero (GHG) en al menos 50%, comparado con la alternativa de energía fósil de acuerdo con lo definido por la EPA. Puede tratarse de combustible para el transporte, aditivos de combustibles de transporte, aceite para calefacción, o bioturbosina. Se puede tratar de biodiesel base éster (por ejemplo, proveniente de aceite de soya), o biodiesel renovable no esterificado (por ejemplo, el obtenido de insumos celulósicos). Este tipo de biodiesel se utiliza para satisfacer el requerimiento de la categoría biodiesel en el RFS. De cualquier forma, el biodiesel también puede ser utilizado para satisfacer el requerimiento en la categoría de avanzados.
- Biocombustible celulósico. En esta categoría entran sólo los biocombustibles provenientes de biomasa lignocelulósica, como rastrojo de maíz, pastos, residuos forestales, o cultivos maderables de rotación corta. Los biocombustibles celulósicos deben ser utilizados para reducir la emisión de gases efecto invernadero en un 60%. En 2022, se requiere en el RFS un volumen en esta categoría de 16 BG.
- Biocombustibles avanzados (otros avanzados): Esta categoría puede contener un amplio rango de biocombustibles para reducir la emisión de gases efecto invernadero (GHG) en al menos 50%. El etanol de caña de azúcar que cumple con la reducción de GHG califica, biodiesel califica, y biocombustibles celulósicos también pueden ser considerados. El etanol de maíz no cumple con esta categoría.

producidos (para el caso de biodiesel). Cuando los créditos RIN del año de cumplimiento anterior no se utilizan (lo que significa que había más RIN disponibles ese año que las obligaciones de volumen de renovables), el banco crece. El banco RIN se agota cuando los créditos se envían a la EPA para el cumplimiento del RFS o cuando los créditos se vencen ((EIA), 2021).

- Combustibles Renovables (biocombustibles convencionales). Esta categoría es la única que permite el etanol de maíz (basado en almidón) y requiere de una reducción de emisiones GHG en al menos 20%. Desde 2015 y hasta 2022 el volumen objetivo de esta categoría se ha mantenido en 15 BG.

En la **Tabla 17** se muestran los volúmenes estándar del RFS por categoría establecidos por la EISA.

Tabla 17. Estándares de volumen establecidos para el RFS en la EISA [BG]

Año	Biocombustible Celulósico	Diesel basado en Biomasa	Biocombustible Avanzado	Biocombustible Total Renovable	Biocombustible "Convencional"
2012	0.50	1.00	2.00	15.20	13.20
2013	1.00	*	2.75	16.55	13.80
2014	1.75	*	3.75	18.15	14.40
2015	3.00	*	5.50	20.50	15.00
2016	4.25	*	7.25	22.25	15.00
2017	5.50	*	9.00	24.00	15.00
2018	7.00	*	11.00	26.00	15.00
2019	8.50	*	13.00	28.00	15.00
2020	10.50	*	15.00	30.00	15.00
2021	13.50	*	18.00	33.00	15.00
2022	16.00	*	21.00	36.00	15.00

Fuente: ((EPA), 2022)

* El estatuto establece 1 billón de galones como mínimo, pero la EPA podría incrementar el requerimiento.

Nota: no existe un requerimiento estatutario de volumen para biocombustible "convencional". El volumen presentado en la tabla para esta categoría se calcula como la sustracción de la categoría total renovable, menos biocombustible avanzado y se refiere a ciertos biocombustibles que no califican como avanzados.

El RFS se refuerza con la creación de las obligaciones de mezclado para cada tipo de biocombustible. Estas obligaciones se basan en la participación de mercado de cada tipo de combustible. Por ejemplo, si se toma el caso de un expendedor de combustible que tenga el 10% de participación en el mercado de gasolinas, para un año referencia posterior a 2015 requeriría de 15 BG de etanol de maíz, por lo que el vendedor tendría que mezclar 1.5 BG de etanol de maíz. Para satisfacer este requerimiento, sería necesario que el vendedor entregara a la EPA los certificados RIN demostrando que efectivamente mezcló 1.5 BG de etanol de maíz.

Para la mayor parte del combustible renovable, los certificados RIN son sólo el proceso de cumplir con el requisito de mezclado. Los certificados RIN son negociados y vendidos por aquellos que esperan mezclar más volumen que su obligación de mezclado, creando con ello un mercado de estos certificados que permita monetizar el cumplimiento. En general, si el precio del RIN es cercano a cero, sería un indicador de que el RFS no es realmente vinculante. Un precio elevado del RIN sugeriría tal vez, en combinación con la barrera de mezclado²², que está guiando el comportamiento en el mercado. Históricamente, en los Estados Unidos de América, los precios de certificados RIN de etanol de maíz son cercados a cero, pero los RIN para el biodiesel y otros biocombustibles avanzados son mucho más altos (Dahiya, A., Krivov, A., 2014).

Dahiya y Krivov (2014) realizan una evaluación de posibles impactos con ocho escenarios alternativos a esta política pública en los Estados Unidos, misma que a continuación se resume:

1. Eliminación del RFS. Esta medida pondría en alto riesgo al biodiesel, así como a la industria de biocombustibles de segunda generación (lignocelulósicos), dado el costo que éstos tienen superior al de los derivados del petróleo, por lo que no serían competitivos en un ambiente puro de mercado. Las importaciones de etanol de caña (primera generación) también se verían severamente afectadas o incluso eliminadas. En el corto plazo, en los Estados Unidos, el etanol de maíz seguiría siendo utilizado para su mezcla en combustibles, hasta llegar a la barrera de mezclado (límite permitido por la EPA), dado que su costo es comparativamente menor que el de la gasolina y funciona como oxigenante mejorador del índice de octano.
2. Eliminación de la rampa de salida del biocombustible celulósico. Eliminar la rampa de salida (como volumen piso) sería un paso positivo en proporcionar un mandato más fuerte para los biocombustibles celulósicos, sin embargo, podría no ser suficiente para mover a la industria rápidamente. Los acuerdos de apoyo inicial son lo que se necesita como incentivo (y en ocasiones justificación en el análisis técnico – económico) para construir plantas industriales de refinación.
3. Reducción en el RFS general cada vez que se renuncie parcialmente al mandato celulósico: esta opción contribuiría en gran medida a tener un RFS viable dado el problema de la pared de mezcla, especialmente si los mandatos generales y avanzados se redujeron por el monto de la exención

²² Se refiere al volumen máximo anual permitido de etanol para su mezcla en combustibles en los Estados Unidos de América. Es establecido por la U.S. EPA.

de celulosa. Se requeriría un aumento en la producción de biodiésel, pero probablemente este sería manejable.

4. Eliminación de la otra categoría avanzada y expansión del biodiésel: con esta opción, la otra categoría avanzada se eliminaría por completo y el biodiésel crecería 300 millones de gal/año durante al menos los próximos 2 años. El RFS general también se reduciría por la suma de las otras categorías avanzadas y celulósicas anteriores (suponiendo que se siguiera eximiendo a la celulosa). Esta opción también ayudaría a resolver el problema de la barrera de mezclado, pero requiere un aumento bastante grande en la producción de biodiésel. También causaría problemas políticos con Brasil, el principal proveedor de etanol de caña de azúcar.
5. Reducción del RFS general para ajustarse a la barrera de mezclado: esta opción también ajusta a la barrera de mezclado (por definición). Sin embargo, es difícil determinar exactamente dónde está o dónde se encontrará la barrera de mezclado dados los ajustes dinámicos del mercado y los precios de RIN. Esta opción resulta más atractiva si se combina con la exención del mandato general cuando existe una exención de celulosa como origen del bicomcombustible.
6. Propuesta de Irwin/Good para congelar el RFS en los niveles de 2013: Scott Irwin y Darrel Good propusieron congelar el RFS para 2014 y 2015 en los niveles de 2013 (Irwin, S., Good, D., 2013). Los niveles para los biocombustibles generales renovables (etanol de maíz) y avanzados en 2013 fueron 16.55, 13.8 y 2.75 BG, respectivamente. Esta opción nos lleva al escenario que se alcanzó en 2015, pero no es una solución a largo plazo.
7. Aprobación de la EPA de E15 para todos los vehículos: esta opción, si se implementara en las estaciones de servicio a lo largo de los Estados Unidos de América, resolvería el problema (para ese país). Sin embargo, parece poco probable que el etanol E15 se implemente rápidamente en todo el país (Estados Unidos de América).
8. Mayor penetración en el mercado del E85. Existe cierto potencial para expandir el tamaño del mercado del E85 incluso con la infraestructura actual en los Estados Unidos de América (bombas despachadoras E85 y vehículos de combustible flexible o *flex fuel*). El mercado potencial teórico es lo suficientemente grande como para resolver el problema de la barrera de mezclado, pero no se sabe qué tan grande podría ser el mercado en realidad porque no se tiene certeza sobre cuántos RIN podrían tener valor para la mezcla E85.

La evaluación que realizan en su trabajo (Dahiya, A., Krivov, A., 2014) no sugiere que alguno de los escenarios alternativos sea mejor o peor que los demás, sino que busca como propósito explorar escenarios posibles, así como reflexionar sobre lo que podría ocurrir bajo un amplio rango de posibles cambios. Lo que queda claro es que el RFS es una herramienta de política pública de gran importancia para el sector de biocombustibles en los Estados Unidos de América.

Desde el surgimiento del RFS, el desarrollo de tecnologías de producción de biocombustibles celulósicos no ha tenido un progreso de acuerdo con las expectativas. De acuerdo con los trabajos y el análisis realizado por (Dahiya, A., Krivov, A., 2014), existen al menos cinco tipos de situaciones clave que generan incertidumbre y dificultan el desarrollo de los biocombustibles lignocelulósicos:

1. Disponibilidad y costo de materias primas. Los primeros trabajos de investigación para el desarrollo de las tecnologías de producción de etanol de segunda generación (que parte de residuos lignocelulósicos como materia prima) asumían que potencialmente habría grandes cantidades de residuos lignocelulósicos disponibles para su utilización como materias primas, dentro del precio de \$30 USD/tonelada. La situación de las consideraciones iniciales contrasta con la realidad, pues a lo largo del tiempo se documentó en años posteriores (National Research Council , 2011) los costos de insumos lignocelulósicos podrían ser hasta tres veces el precio asumido en las consideraciones iniciales. En la actualidad, el rastrojo de maíz en base seca se estima con un costo de \$90 USD por tonelada en base seca, y los pastos energéticos en el rango de \$98 USD a \$133 USD por tonelada en base seca, dependiendo de las condiciones de producción. Con un rendimiento de transformación de 70 galones de etanol por tonelada seca de biomasa, con este tipo de insumos el costo de producción podría alcanzar los \$1.43 USD por galón de etanol en los Estados Unidos de América (véase **Tabla 18**).

Una buena noticia en este contexto es que los principales estudios (Dahiya, A., Krivov, A., 2014) concluyen que existe suficiente disponibilidad de biomasa lignocelulósica para alcanzar el mandato establecido por el RFS, de tal forma que las dificultades han sido por precio de insumos más que por disponibilidad.

Tabla 18. Precio unitario estimado que las biorrefinerías están dispuestas a pagar (DAP) por biomasa para etanol, así como precio unitario estimado que los productores están dispuestos a aceptar (DAA) en los Estados Unidos de América bajo las condiciones del estudio*

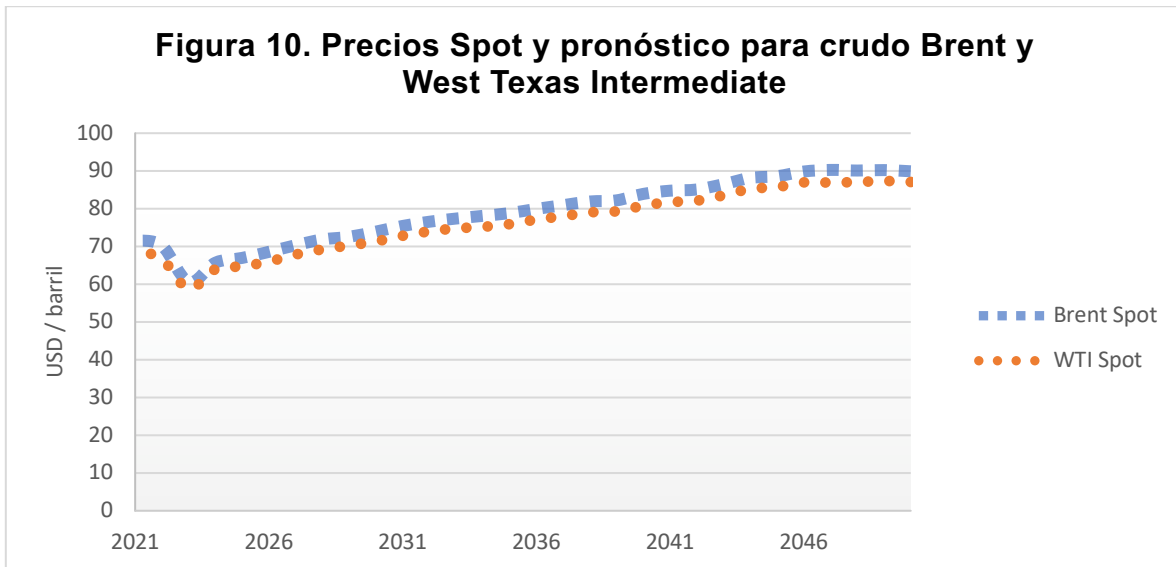
	DAP [USD/ton base seca]	DAA [USD/ton base seca]	Gap de precio [USD/ton base seca]	Gap de costo [USD/galón de etanol]
Rastrojo de maíz en rotación de cultivo maíz-soya	\$92	\$25	\$67	\$0.96
Rastrojo de maíz en rotación a 4 años con alfalfa	\$92	\$26	\$66	\$0.94
Alfalfa	\$118	\$26	\$92	\$1.31
Pastos energéticos del oeste medio	\$133	\$26	\$106	\$1.51
Pastos energéticos de los Apalaches	\$100	\$26	\$74	\$1.06
<i>Miscanthus</i> en el medio oeste	\$115	\$26	\$89	\$1.27
<i>Miscanthus</i> en los Apalaches	\$105	\$27	\$79	\$1.13
Paja de trigo	\$75	\$27	\$49	\$0.70
Cultivos maderables de rotación corta	\$89	\$24	\$65	\$0.93
Residuos forestales	\$78	\$24	\$54	\$0.77

*Cuando el precio del petróleo es de \$111 por barril y no existen incentivos de política pública.

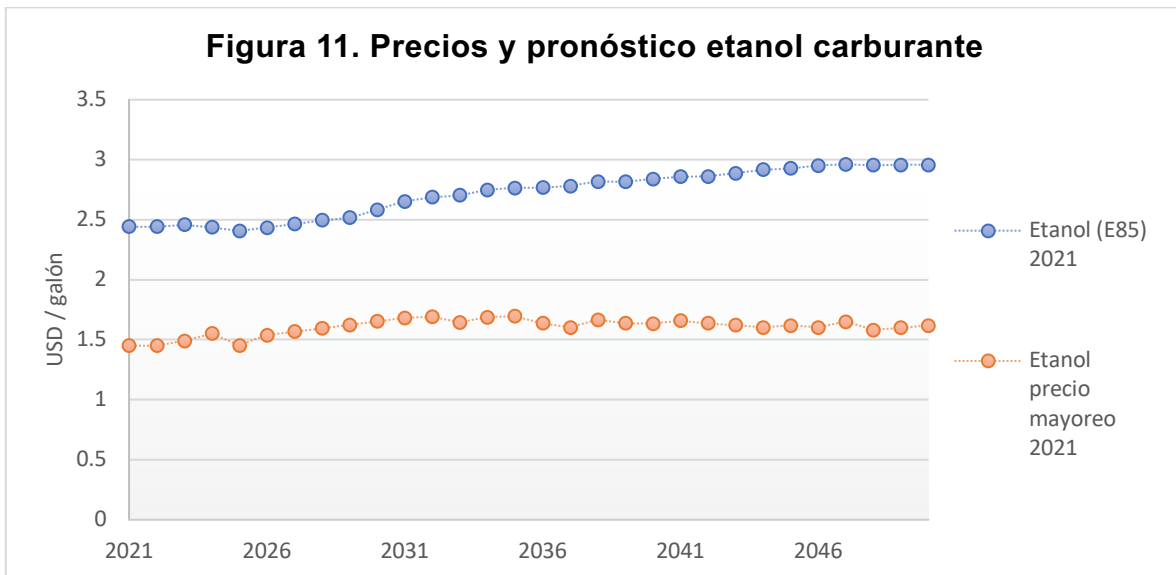
Fuente: (National Research Council , 2011)

2. Eficiencia de conversión y costo. Una gran cantidad de los primeros estudios de investigación para la producción de biocombustibles de segunda generación se centraron en los procesos bioquímicos de producción. Estos procesos requieren la separación inicial de lignina de los residuos celulósicos y de hemicelulosa (acondicionamiento de insumos). Recientemente se ha documentado que este proceso de separación es altamente complejo y costoso, al igual que las enzimas requeridas para el proceso de fermentación, que también son de costo elevado. En forma adicional, la barrera de mezclado establece un tope de contenido tanto para etanol celulósico, como para etanol de almidón (primera generación). Estas condiciones dificultan que se detone la producción comercial de etano celulósico en los Estados Unidos de América.
3. Precios de futuros de petróleo. El Departamento de Energía de los Estados Unidos de América realiza un ejercicio de pronóstico de precios de petróleo a través del servicio de la agencia EIA (*Energy Information Administration*) como caso de referencia. De acuerdo con el pronóstico, se espera una caída hasta tocar el piso de los \$60 USD/barril para el crudo Brent (indicativo superior) en 2023, para luego iniciar un incremento gradual en la banda de los \$65 USD/barril hasta los \$90 USD/barril en el periodo 2024 – 2050 (véase

la **Figura 10**). Este movimiento gradual de precios no funciona como incentivo importante en la producción de etanol celulósico, considerando los costos de las tecnologías vigentes, pues no sería suficientemente competitivo en relación a los precios de gasolinas derivadas del petróleo. (Dahiya, A., Krivov, A., 2014) presentan en su análisis una referencia de competitividad en la producción de etanol celulósico en relación con los precios del crudo, estableciendo una estimación de punto de quiebre con precio mínimo de \$110 USD/barril de petróleo en la vida media de la planta de fabricación de etanol celulósico para justificar económicamente este proceso en los Estados Unidos de América.



Fuente: (EIA, 2022)



Fuente: (EIA, 2022)

-
4. Problemas ambientales. De manera general, existe consenso en las investigaciones que concluyen que el impacto ambiental del etanol de segunda generación podría ser menor en comparación con el etanol de primera generación (proveniente de almidón de maíz). La principal preocupación ambiental se relaciona con la pérdida de biodiversidad, pues es probable que las tierras aledañas a las biorrefinerías se dediquen a la producción de cultivos que puedan ser utilizados como insumos.
 5. Política pública. La principal fuente de incertidumbre alrededor del tema de etanol celulósico tiene que ver con la política gubernamental. En los Estados Unidos de América existe oposición significativa al RFS, sobre todo de la industria de refinación de petróleo, pues perciben al RFS como un factor de incremento de sus costos. Es muy difícil persuadir a los inversionistas privados a invertir en una planta cuando la única garantía del mercado es la política gubernamental, sobre todo si existe incertidumbre en su permanencia. En el supuesto de que el RFS fuera eliminado en los Estados Unidos de América, la industria de biocombustibles no se desarrollaría. Los biocombustibles de segunda generación están muy cerca de ser económicamente competitivos, sin embargo, sin el RFS no podrían ser desarrollados.

4.1.2. El caso de la Unión Europea.

La Unión Europea (UE) se ha fijado la meta de reducción de emisiones en un 40% comparado con los niveles que tenía en 1990 para el año 2030 (UNFCCC, 2015) e incrementar la participación de las energías renovables en la matriz energética en al menos 32% del consumo de energía (European Council, 2016). Para alcanzar este nivel, el esquema de negociación de emisiones que cubre generación eléctrica y otros productores intensivos de energía está llevando a cabo cambios con el propósito de incrementar la señal de precios para impulsar el aumento de acciones de mitigación (Comisión Europea, 2016). Adicionalmente, la reducción de metas de CO₂ ha sido acordada para que cada estado miembro comparta el esfuerzo de reducción de emisiones en aquellos sectores que están fuera del esquema de comercio de emisiones en un 30% en comparación con los niveles de 2005 para 2030 (Consejo Europeo, 2016).

A continuación, se resalta el ejemplo de la Política Pública de establecimiento de metas basadas en fuentes renovables de Irlanda como caso ejemplo de la Unión Europea, y de igual forma se abordan en forma indicativa algunos aspectos esenciales y comparativos de los casos del Reino Unido, Finlandia, Suecia y Dinamarca, para contrastarse en forma posterior con otros casos en el mundo.

Situación regulatoria en Irlanda.

El sistema energético de Irlanda está basado en combustibles fósiles importados (Clancy, J. M., Curtis, J., Ó'Gallachóir, 2018). En 2016 Irlanda importaba 69% de los 603 PJ de energía primaria utilizada (33% para calefacción, 33% para generación eléctrica y 34% para transporte) (Clancy, J. M., Curtis, J., Ó'Gallachóir, 2018).

Al igual que la Unión Europea en su conjunto, Irlanda ha limitado la utilización de recursos domésticos de biomasa, así como establecido metas ambiciosas de descarbonización.

En el sector transporte, la biomasa toma un papel significativo en Irlanda, con un 11% del total de energías renovables presentes en la matriz de 2016 (Clancy, J. M., Curtis, J., Ó'Gallachóir, 2018). El sector transporte de Irlanda toma el 42% del consumo total de energía en el país y depende en su mayoría de petróleo importado. El Diesel es popular, y representa el 59% del uso final de energía. Los biocombustibles cuentan como el mayor grupo de energía renovable utilizado en este sector, al grado que 5.7% de la demanda de transporte automotor y de ferrovías provino de biocombustibles en el 2015 (Clancy, J. M., Curtis, J., Ó'Gallachóir, 2018). Sobre la base del objetivo de alcanzar el 20% como composición de biocombustibles en el sector transporte para 2020, la Directiva de energías renovables 2018/2001 / UE (European Commission, 2018) (en adelante EU RED por sus siglas en inglés) estableció un nuevo objetivo vinculante de energía renovable para la Unión Europea para 2030 de al menos el 32%, con una cláusula para una posible revisión al alza para 2023 ((EUR-LEX), 2018).

Los principios impulsores de política pública en materia energética para Irlanda, de acuerdo con diversos documentos oficiales, incluyen lo siguiente: “La política debería ser económica; la bioenergía entrega reducciones genuinas de emisiones de carbono; la política contribuye a ampliar los objetivos de política ambiental; la política busca optimizar las oportunidades de empresa y empleo; la ciudadanía de la energía tiene un papel importante en la transición energética”.

De acuerdo con el Plan Nacional de Clima y Energía 2021 – 2030 de Irlanda (NECP 2021 – 2030 por sus siglas en inglés) ((DECC), 2020), el esquema de obligación de biocombustibles fue introducido en 2010 y requiere a los proveedores de combustibles para autotransporte incluir una fracción de biocombustibles sustentables en sus mezclas generales. Esta política es administrada por la Agencia Nacional de Reservas de Petróleo. El nivel de obligación se incrementó al 11% en volumen a partir de enero 2020. El plan sienta las bases para alcanzar la meta de contenido del 10% de biocombustibles en mezcla de gasolinas y 12% en biodiésel para 2030.

En términos generales, el Plan Nacional de Clima y Energía de Irlanda 2021 – 2030 se basa en seis dimensiones ((DECC), 2020):

-
- i. Descarbonización – GHG (gases efecto invernadero por sus siglas en inglés) de emisiones y remoción. Tiene como objetivos estratégicos la reducción de emisiones provenientes de los sectores al exterior del Sistema de Intercambio de emisiones de la Unión Europea²³ (EU ETS por sus siglas en inglés) en un 30% (respecto de los niveles de 2005) para 2030. Entre sus políticas y medidas principales se destacan: decisiones gubernamentales y grandes inversiones a prueba de carbono; un nuevo acto de acción climática que incluye las metas hacia 2050; incremento de ciclovías e instalaciones de estacionamiento de bicicletas; expansión de la reforestación y manejo de uso de suelo para asegurar el abatimiento de carbono proveniente de cambios de uso de suelo para el periodo 2021 – 2030 y años posteriores; promover la diversificación en la agricultura y uso de suelo para desarrollar cadenas de valor circulares y sustentables, así como modelos de negocio para agricultura con menor intensidad de carbono.
 - ii. Descarbonización – energías renovables. Tiene como objetivos estratégicos alcanzar el 34% de participación de energías renovables en el consumo para 2030, incrementar la generación eléctrica de fuentes renovables al 70%, un mínimo de 3.5GW de energía renovable costa afuera, hasta 1.5 GW de energía solar en la red y una capacidad de 8.2 GW de generación eólica costa adentro. Algunas de sus políticas y medidas principales para alcanzar sus metas son: incrementar la electricidad generada proveniente de fuentes renovables al 70%, apoyada en el Esquema de Apoyo de Electricidad Renovable²⁴ (RESS por sus siglas en inglés); eliminación progresiva de la generación eléctrica a partir de carbón y turba; introducción de un sistema de micro generación eléctrica; promover la participación de la comunidad en la generación a partir de renovables bajo el esquema de soporte RESS; apoyar la investigación en la energía del océano, el desarrollo y demostración de rutas para tecnologías marinas emergentes asociadas a pruebas de infraestructura; acelerar la penetración en el mercado de los vehículos eléctricos (EV's por sus siglas en inglés) de tal forma que se puedan tener 936,000 unidades EV circulando en 2030, incentivados por las herramientas de política de impuestos especiales a vehículos y combustibles como

²³ EU ETS se trata del mayor mercado de carbono del mundo y es la herramienta base de la Unión Europea para combatir al cambio climático. Opera en los países miembros de la Unión Europea, más Islandia, Liechtenstein y Noruega; limita las emisiones de alrededor de 10,000 instalaciones en el sector energía y manufacturero, así como de las aerolíneas que operan al interior de sus países miembros; cubre alrededor del 40% de las emisiones de gases efecto invernadero de la Unión Europea (https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en).

²⁴ RESS es una iniciativa del Gobierno de Irlanda que brinda apoyo a los proyectos de energía renovable. Es un componente pivote del Programa para el Gobierno y Plan de Acción Climática 2021, cuyo principal objetivo es alcanzar al menos un 70% de generación eléctrica renovable para 2030. Funciona como marco normativo basado en subastas costo efectivas <https://www.seai.ie/community-energy/ress/overview/>.

medidas, así como una fuerte trayectoria de impuestos al carbono; incremento en el contenido de biocombustibles para automotores apoyado por el esquema de obligación de contenido mínimo; legislar para prohibir la venta de nuevos vehículos automotores de combustibles fósiles a partir de 2030; desarrollar un canal de distribución de combustible de gas natural comprimido (CNG por sus siglas en inglés) como soporte de promoción de los vehículos CNG.

- iii. Eficiencia energética. Tiene como objetivos estratégicos el contribuir a la meta de la Unión Europea de alcanzar al menos un 32.5% de mejora en la eficiencia energética para 2030, preservar las obligaciones de acuerdo con lo establecido en los artículos 5 y 7 de la Directiva de Eficiencia Energética²⁵ (EED por sus siglas en inglés). Algunas de sus políticas y medidas principales para alcanzar sus metas son: Toda nueva vivienda deberá ser construida dentro del estándar de edificios de energía casi nula (NZEB por sus siglas en inglés) a partir de noviembre de 2019 y en adelante²⁶; prohibir la instalación de calentadores (*boilers*) de aceite para 2022 y de gas para 2025 en todo desarrollo nuevo de vivienda a través de la introducción de nuevos estándares regulatorios para sistemas de calefacción en hogares; progresivamente sustituir calentadores de gas y aceite en viviendas existentes a través de una combinación de incentivos, información y medidas regulatorias; objetivo del 50% de eficiencia energética en el sector público para 2030; desarrollar la cadena de suministro necesaria, incluido el trabajo con foros regionales de habilidades para capacitar a trabajadores calificados.
- iv. Seguridad energética. Su principal meta es la de mantener la seguridad del sistema energético de Irlanda de la manera más efectiva en costo. Algunas de sus principales políticas y medidas son: realizar una revisión de la seguridad del suministro del sistema eléctrico y de gas natural de Irlanda, manteniendo el foco de objetivo en 2030 en el contexto de asegurar una ruta sustentable para 2050; apoyar los esfuerzos para aumentar las fuentes renovables autóctonas en la matriz energética, incluidas las eólica, solar y bioenergía; facilitar proyectos de infraestructura incluidos los proyectos comerciales del sector privado que mejoren la seguridad energética para el

²⁵ EED es un documento normativo emitido por el Parlamento Europeo y la directiva del Consejo Europeo, que se enfoca en atender barreras y fallas de mercado para entregar una economía sustentable, que permita contribuir óptimamente a la reducción de emisiones de GHG en al menos 55% para 2030 https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/proposal_for_a_directive_on_energy_efficiency_recast.pdf.

²⁶ La definición de edificios de energía casi nula en la Directiva sobre rendimiento energético en edificios (EPBD) es "un rendimiento energético muy alto, según se determina de acuerdo con el anexo 1 del propio documento. La cantidad de energía necesaria casi nula o muy baja debe cubrirse de manera significativa medida por la energía procedente de fuentes renovables, incluida la producida en el lugar o en las inmediaciones" ((SEAI), 2017).

suministro en Irlanda y estén alineados con los objetivos climáticos y de energía; el Consejo Nacional de Ciber Seguridad (NCSC por sus siglas en inglés) está trabajando para mejorar el nivel general de ciberseguridad en el sector energético.

- v. Mercado energético interno. Tiene como principales objetivos continuar la profundización de la integración del mercado eléctrico con el mercado interno de la Unión Europea, la construcción de programas y acciones en materia soportados sobre los planes vigentes; desarrollar interconexiones futuras para facilitar la meta 2030 de Irlanda, de alcanzar la base del 70% de electricidad renovable; continuar con la alineación del mercado eléctrico minorista con el mercado interno de la Unión Europea; continuar el desarrollo del mercado interno de gas natural alineado con la política energética de la Unión Europea. Algunas de sus principales políticas y medidas son: mantener y desarrollar el mercado eléctrico único al mayoreo de todas las islas, para garantizar que las reformas programadas se implementen en próximos años; apoyar la participación de consumidores en la generación dentro del sistema energético y permitirles vender sus excedentes a la red; desarrollar la regulación y el régimen de mercado para que sea posible inyectar gas renovable en las redes de distribución de gas natural, para su utilización en los sectores de calefacción y transporte; monitoreo cercano del regulador independiente en los mercados de distribución al menudeo de gas y electricidad para asegurar un adecuado nivel de competencia de proveedores para protección del consumidor.
- vi. Investigación, innovación y competitividad. Tiene como objetivos asegurar que la mejor asesoría y evidencia científica se encuentre disponible para la construcción de política pública gubernamental y respaldo de los objetivos, políticas y medidas en Irlanda; dado el nivel de ambición en la meta de reducción de gases efecto invernadero (GHG) en Irlanda, nuevas tecnologías deben ser desarrolladas y puestas a disposición. Algunas de sus principales políticas y medidas son: ampliar la base de exportación y de empresas a partir del fortalecimiento de negocios autóctonos para escalarlos e internacionalizarlos; incrementar la inversión de capital en conocimiento (por ejemplo, propiedad intelectual, software, diseño, etc.); la actualización a las prioridades de investigación nacional 2018 – 2023 refleja el sentido de urgencia en incrementar la toma de acciones por el cambio climático, con nuevas prioridades de investigación enfocadas en cambio climático, sustentabilidad y dos áreas prioritarias en la descarbonización y vida sustentable, así como producción y procesamiento de alimentos inteligente y sustentable; fortalecer la liberación de recursos públicos para investigación básica y aplicada que lleve a alcanzar las metas de descarbonización del

país, así como abrir nuevas oportunidades económicas; aumento gradual del financiamiento público para el Programa para el Desarrollo y Demostración de la Investigación Energética del SEAI; consideración del rol del Hidrógeno en la descarbonización del sistema energético de Irlanda, incluyendo al potencial de producción de hidrógeno renovable a partir de excedentes de electricidad renovable.

En los países que se sitúan en el centro y norte de Europa es posible identificar que se cuenta con cierta homogeneidad de características culturales y económicas, entre las que se destacan altos niveles de desarrollo económico y sólidos objetivos sobre combate al cambio climático y energías renovables; tal es el caso del Reino Unido, Suecia, Dinamarca y Finlandia (Cross, S., Welfle, A.J., Thornley, P., Syri, S., Mikaelsson, M., 2021). Estos cuatro países han sido sujetos a la vinculación legal de sus objetivos nacionales, con los de la EU RED, así como al Esquema de Negociación de Emisiones para la reducción de emisiones de GHG.

Situación Regulatoria en el Reino Unido de la Gran Bretaña.

Para el Reino Unido, la UE RED fijó como objetivo que el 15% del consumo total de energía se diera a partir de fuentes renovables para el año 2020. La estrategia fue alcanzar esta meta con la contribución del 30% de la electricidad, 12% de la calefacción y 10% de la energía de transporte. La bioenergía proporciona una buena parte para alcanzar esta meta, pues participa en el 22% de la generación eléctrica y en el 63% de la calefacción (Cross, S., Welfle, A.J., Thornley, P., Syri, S., Mikaelsson, M., 2021).

El Reino Unido ha apoyado especialmente el desarrollo de la bioenergía a través de Certificados de Obligación Renovable (ROC's por sus siglas en inglés para electricidad) e Incentivos de Calor Renovable (RHI por sus siglas en inglés) (entendido como energía para calefacción). A partir de 2015, el Reino Unido ha migrado el apoyo para electricidad renovable pasando de ROC's hacia "Contratos para Diferencia", un sistema basado en subastas a partir de un precio de ejercicio para renovables (por MWh) y otorgando un subsidio efectivo mediante la recompensa de generadores renovables para diferenciar entre los precios de mercado de electricidad convencional (precios de referencia) y los precios de ejercicio (E E & I.S, 2017).

Situación Regulatoria en Finlandia.

La meta RED para Finlandia consideró alcanzar el 38% del consumo total de energía proveniente de fuentes renovables para 2020, a partir del 28.5% logrado en el año 2005. La estrategia de Finlandia fue alcanzar su meta a través del 33% de electricidad, 47% de calefacción y 20% de energía de transporte.

La bioenergía tiene un importante rol en la generación a partir de renovables en Finlandia, dado su amplio sector forestal y gracias a ésta pudo obtener un rápido progreso en la consecución de sus metas, después de la implementación de la Directiva de Renovables.

Sus principales políticas de conducción están implicadas dentro de su estrategia de Clima y Energía de 2010, que considera subsidios bajo la Ley del Financiamiento para el Bosque Sustentable²⁷, así como el esquema de alimentar el régimen de tarifas (Cross, S., Welfle, A.J., Thornley, P., Syri, S., Mikaelsson, M., 2021).

Situación Regulatoria en Suecia.

En el caso de Suecia, los objetivos bajo la meta RED fueron alcanzar el 49% del consumo total de energía a partir de fuentes renovables para 2020, partiendo del 39.8% logrado en el 2005. El desglose de la meta nacional establecida por Suecia considera que las energías renovables proveen 62.9% de la electricidad, 62.1% de calefacción y 13.8% de energía de transporte. Suecia aprovechó el camino de la utilización forestal como estrategia para alcanzar sus metas de generación renovable, así como el aprovechamiento de residuos agrícolas y desechos, como rutas clave manejadas por mecanismos de soporte como los establecidos en la Directiva de Certificados de Electricidad y su Programa para el Desarrollo Rural (Cross, S., Welfle, A.J., Thornley, P., Syri, S., Mikaelsson, M., 2021).

Situación Regulatoria en Dinamarca.

Los objetivos RED de Dinamarca fueron alcanzar el 30% del consumo total de energía a partir de fuentes renovables para 2020, partiendo del 17% logrado en 2005. La estrategia que se tomó para el logro de esta meta consideró la generación a partir de fuentes renovables del 51.9% de la energía eléctrica, 39.8% de la calefacción y 10.1% de la energía de transporte.

De los países nórdicos se destaca Dinamarca con la meta más ambiciosa para generación eléctrica a partir de biomasa, con un 45% del total de generación. Esta estrategia se basa en desperdicios y residuos agrícolas como cadena de generación de biogás. La biomasa forestal es importada como pellets de madera. Su política ambiental está definida por la Directiva de Biocombustibles Sustentables y el Acuerdo de Biomasa, los cuales proveen una serie de mecanismos de soporte para el crecimiento del sector bioenergía, mientras que el Secretariado Danés de Biogás ha sido establecido para apoyar a las autoridades locales con la planeación de

²⁷ La Ley de Financiamiento para el Bosque Sustentable en Finlandia es un documento normativo vigente en Finlandia, que tiene por objetivos la promoción económica, ecológica y socialmente sustentable en el manejo y aprovechamiento de los bosques; incluyendo (1) el incremento de medidas de reforestación; (2) el mantenimiento de la red de caminos con propósitos de aprovechamiento forestal; el aseguramiento de la biodiversidad de bosques; y la promoción de la adaptación de los bosques al cambio climático. Ministerio de Agricultura y Bosque, Finlandia, 2017.

instalaciones e infraestructura para la producción y almacenamiento de biogás (Cross, S., Welfle, A.J., Thornley, P., Syri, S., Mikaelsson, M., 2021).

4.1.3 El caso de Brasil.

El 8 de diciembre de 2020, Brasil envió a la Conferencia Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC por sus siglas en inglés) el documento Contribución Nacional Determinada (NDC por sus siglas en inglés) bajo el Acuerdo de París, aprobada el mismo día por el Comité Interministerial Brasileño para el Cambio Climático.

Con base en el año referencia 2005, la NDC de Brasil reafirma el compromiso de ese país en la reducción total neta de emisiones de GHG en 37% para 2025 y toma el compromiso oficial de reducción de emisiones en 43% para el año 2030. La NDC también establece el indicador objetivo de alcanzar la neutralidad climática (cero emisiones netas) para el año 2060 (Governo Federal do Brasil, 2020).

La contribución de Brasil es una de las más ambiciosas en el mundo, por sus cuatro principales elementos:

1. Hace referencia a emisiones absolutas y no a factores relativos como intensidad de emisiones de carbono o tendencias de crecimiento históricas (como en los casos de varios documentos equivalentes emitidos por países desarrollados).
2. Se ocupa de la economía en su conjunto y no sólo se enfoca en sectores específicos.
3. La magnitud de sus objetivos de mitigación de emisiones (37% y 43%) se encuentra por encima del promedio de países desarrollados.
4. Incluye objetivos intermedios para 2025, forzando el seguimiento de una ruta de bajas emisiones a través del tiempo y no sólo para el año 2030.

Adicionalmente, el anuncio del indicador objetivo de alcanzar la neutralidad climática para el año 2060 es sobresaliente dado que, al no ser un elemento requerido para la NDC, la inclusión de esta meta refleja el compromiso de Brasil en el ámbito climático. Con base en la NDC, estos objetivos serán eventualmente traducidos a políticas públicas y mediciones para ser detallados e implementados por el Gobierno Federal de Brasil (Governo Federal do Brasil, 2020).

En materia de política pública, una parte importante para el cumplimiento de estas metas se deberá alcanzar a partir del incremento en Brasil en la participación de la bioenergía sostenible en la matriz energética, alcanzando alrededor del 18% para 2030, ampliando el consumo de biocombustibles e incrementando la generación eléctrica a partir de biomasa (Machado, P.G., Cunha, M., Walter, A., Faaij, A., Guilhoto, J.J.M., 2021). Una de las ventajas competitivas de Brasil es que, al tener

gran extensión de territorio y abundantes recursos naturales, cuenta con la posibilidad de implementar políticas con enfoque en bioeconomía.

En forma adicional a la reducción de emisiones, se ha observado que la bioeconomía resuelve problemas socioeconómicos promoviendo la diversificación del ingreso (Mwakaje, 2012), el incremento del Producto Interno Bruto (GDP por sus siglas en inglés) (Huang, J., Yang, J., Msangi, S., Roselle, S., Weersink, A., 2012) y la reducción de la pobreza (Ardnt, Ch., Benfica, R., 2011), dependiendo de la tecnología de producción (Machado, P.G., Cunha, M., Walter, A., Faaij, A., Guilhoto, J.J.M., 2021). Es posible prevenir posibles impactos en seguridad alimenticia como efectos de la bioeconomía, a través de la combinación de producción de biomasa, con administración agrícola mejorada, invirtiendo en sistemas de producción de gestión mejorada, para inducir el uso más eficiente de suelos (Machado, P.G., Cunha, M., Walter, A., Faaij, A., Guilhoto, J.J.M., 2021).

Durante décadas pasadas, Brasil y los Estados Unidos de América han dominado el mercado de producción de etanol en el mundo (Lamers, P., Hamelinck, C., Hunginger, M., Faaij, A., 2011). Desde hace algunos años, la producción de etanol brasileño se da principalmente a partir de la fermentación de carbohidratos provenientes del jugo de caña de azúcar (Carioca, J.O.B., Leal, M., 2011), alcanzando una producción de casi 0.47 EJ desde el año 2011 (Chum, H.L, Warner, E., Renewable, N., Seabra, J.E.A., Macedo, I.C., Estadual, U., et al., 2013).

Las potenciales opciones de Brasil para expandir su producción de etanol incluyen el incremento de áreas de cultivo, incremento en rendimientos agrícolas e industriales y la incorporación de nuevas rutas de procesamiento industrial (Jonker, J.G.G., van der Hilst, F., Junginger, H.M., Cavalett, O., Chagas, M.F., Faaij, A.P.C., 2015).

Un componente importante en materia de política pública que tiene por objetivo permitir a Brasil alcanzar sus compromisos y metas climáticas es la recientemente implementada Política Nacional de Biocombustibles conocida como RenovaBio. El diseño del Programa RenovaBio fue lanzado en diciembre de 2016 por el Ministerio de Minas y Energía (MME), para posteriormente ser formalizado por el Congreso Brasileño en 2017 como la “Política Nacional de Biocombustibles” a través de la iniciativa #13,576. De manera adicional a contribuir a que Brasil cumpla los compromisos establecidos para alcanzar las metas del Acuerdo de París, RenovaBio promueve la expansión y uso de biocombustibles en la matriz energética brasileña (para alcanzar el 18% de participación para 2030), enfatizando la continuidad en el abasto de combustibles (B3, 2021).

RenovaBio proporciona el marco normativo para certificar la producción de biocombustibles según su eficiencia en la reducción de GHG, y permite la venta y comercialización de créditos de descarbonización (CBios). Cada unidad de CBio

representa una tonelada métrica de ahorro de carbono derivado de la sustitución del uso de combustibles fósiles por biocombustibles. Mediante la creación de un mercado de CBios (B3²⁸), RenovaBio pretende formalizar el reconocimiento de los beneficios de la utilización de biocombustibles, así como incrementar la remuneración de los productores participantes del programa (USDA - Foreign Agricultural Services; Global Agricultural Information Network, 2021).

En noviembre de 2018, el Ministerio de Minas y Energía de Brasil, en conjunto con la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP) adoptó la resolución #758/2018 que define los siguientes estándares de RenovaBio:

- Producción eficiente o importación de biocombustibles. Se fija el criterio para calcular la puntuación / clasificación de eficiencia del entorno energético, tanto para productores locales, como para importadores de biocombustibles.
- Se definen los requerimientos para acreditar la certificación de inspectores y plantas de producción individuales.
- El programa establece RenovaCalc, la herramienta analítica para medir el grado de intensidad del carbono de un biocombustible, comparando biocombustibles con el combustible fósil equivalente.

Dentro de la normativa de RenovaBio productores certificados e importadores de biocombustibles pueden vender CBios que ayudan a mejorar la rentabilidad de los productores. El programa es voluntario para productores e importadores de biocombustibles, pero obligatorio para distribuidores de combustible, a quienes se requiere alcanzar las metas de descarbonización individuales con base en su participación de mercado. El número de CBios que cada parte puede comercializar depende del volumen de biocombustible vendido y de la clasificación de eficiencia energética y ambiental determinada por RenovaCalc (USDA - Foreign Agricultural Services; Global Agricultural Information Network, 2021).

A partir de 2019, el Consejo Nacional de Política Energética encabezado por el Ministerio de Minas y Energía estableció objetivos obligatorios para ser cumplidos por los distribuidores de combustible para el periodo 2020 – 2029. Estos objetivos obligatorios permiten la reducción de la intensidad de carbono en combustibles de transporte a 66.1 g CO₂/MJ (una reducción efectiva en 10.2%) para 2029 de la base

²⁸ B3 S.A. Brasil, Bolsa, Balcão (B3) es uno de los mercados financieros más grandes del mundo de compañías de infraestructura, que provee servicios de comercialización, mercadeo e intercambio y ambiente OTC (Over the Counter o sobre mostrador). B3 es una compañía pública comercializada con el símbolo B3SA3 en el segmento premium de la lista del Novo Mercado y sus acciones forman parte de distintos índices (Ibovespa, IBRX-50, entre otros). Se enfoca en la creación y manejo de sistemas de mercadeo, compensación, liquidación, depósito y registro de valores como patrimoniales, renta fija, derivados, estructurados y *commodities* agrícolas. [https://www.b3.com.br/en_us/b3/about/who-we-are/]

que se tenía en 2018 de intensidad de carbono de 73.6 g CO₂/MJ (USDA - Foreign Agricultural Services; Global Agricultural Information Network, 2021).

Para garantizar el cumplimiento de los objetivos obligatorios, el Ministerio de Minas y Energía estableció una meta que estimaba la comercialización de 759 millones de CBios para el Periodo 2020 – 2030, misma que posteriormente fue ajustada a 620 millones de CBios, de los cuales, se estiman 24.86 millones comercializados en 2021.

Para finales de 2020 había 241 plantas de biocombustibles (que representaban el 59% del total de plantas en Brasil) certificadas para expedir CBios. La mayoría de estas plantas producen etanol a partir de caña de azúcar y del total, 22 plantas producen biodiesel (USDA - Foreign Agricultural Services; Global Agricultural Information Network, 2021).

El mercado crediticio brasileño de descarbonización alcanzó las metas combinadas del programa para 2019 y 2020 con un total de 18.87 millones de CBios comercializados. Los distribuidores de combustibles compraron 15.096 millones de CBios con rangos de comercialización de entre US\$2.88 a US\$12.5 dólares americanos por tonelada métrica de carbono (USDA - Foreign Agricultural Services; Global Agricultural Information Network, 2021).

De acuerdo con cifras proporcionadas por la ANP, 35 de los 141 distribuidores de combustible no lograron alcanzar sus objetivos específicos para 2020, lo que representó 2.4% del objetivo total del programa. De acuerdo con la legislación brasileña, los distribuidores que no alcanzaron sus metas son sujetos a una penalización y también deben adicionar los objetivos no cumplidos al año posterior.

La ANP estima una expedición en 2021 de entre 30.9 y 32.4 millones de CBios provenientes de alrededor del 60% de las plantas de biocombustibles en Brasil (246 plantas) (USDA - Foreign Agricultural Services; Global Agricultural Information Network, 2021).

Bajo la metodología establecida por RenovaCalc, en términos de eficiencia energética, los productores de etanol a partir de caña de azúcar generalmente reciben las mayores puntuaciones, mientras que los productores de etanol a partir de maíz no son considerados tan eficientes por esta herramienta. Los productores de etanol a partir de maíz en los Estados Unidos de América no cumplen los requisitos para obtener la certificación RenovaBio y con ello poder ser elegibles para exportar etanol a Brasil (USDA - Foreign Agricultural Services; Global Agricultural Information Network, 2021).

Adicionalmente, a través de la resolución ANP n° 807/2020 que entró en vigor el 2 de agosto de 2020, se incrementó el índice de octano mínimo para las gasolinas comercializadas en Brasil, pasando de 87 a 92 octanos para gasolina regular (93

octanos a partir del 1 de enero de 2022), y un mínimo de 97 octanos para gasolina premium.

En el caso de aditivos biocarburantes, de acuerdo con la regulación MAPA n° 75/2015, para la gasolina tipo C, en Brasil se permite un contenido de hasta 27% en volumen de etanol anhidro y 25% en volumen de etanol anhidro para la gasolina C premium ((ANP), 2020). Con este tipo de marco normativo se estimula la utilización de etanol como aditivo en gasolinas, generando una demanda estimable que fortalece el crecimiento del mercado interno de etanol anhidro.

4.1.4 El caso de Pakistán.

Pakistán es un país del sureste asiático que se encuentra en vías de desarrollo, en donde el suministro de energía está acotado por problemas de infraestructura, robos, pérdidas y otros temas propios de las fuentes de energía mayormente utilizadas (Zameer, H., Wang, Y., 2018). La región del sureste asiático compuesta por India, Pakistán y Bangladesh (IPB) representó en 2019 el 7.57% del consumo total de energía en el mundo y el 20.3% del consumo de energía a partir de biocombustibles y desechos, al que Pakistán contribuyó con el 3.46% ((IEA) I. E., 2019). El desarrollo industrial, la urbanización y el crecimiento poblacional han sido factores causantes de un déficit extremo de energía en los países que integran la región IPB. (Salam, R.A., Amber, K.P., Ratyal, N.I., Akram, M.A.N., Gómez-Muñoz, C., García-Márquez, F.P., 2020). Uno de los factores que ha contribuido a esta crisis energética y de crecimiento es la falla en políticas energéticas comprensibles, que son influenciadas por decisiones equivocadas y presiones políticas en casa paso de la cadena de suministro de energía (Salam, R.A., Amber, K.P., Ratyal, N.I., Akram, M.A.N., Gómez-Muñoz, C., García-Márquez, F.P., 2020).

La mayoría de la energía consumida en Pakistán proviene de fuentes fósiles, su matriz energética general está compuesta por 61% de combustibles fósiles, 29% generación hidroeléctrica, 4% nuclear y 6% otras fuentes (entre las que se encuentran los bioenergéticos) ((NTDC), 2019).

La bioenergía es una de las principales fuentes de energía en el mundo (Von Cruz M.V., Dierig D.A., 2015). De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía, en 2018 en el mundo, fueron producidas 727 MTOE (Millones de Toneladas de Petróleo Equivalente por sus siglas en inglés) (5.2%) a partir de bioenergía, y 658 MTOE a partir de biomasa, de un potencial total técnico de 1,194 MTOE ((IEA) I. E., World Energy Outlook 2018, 2018). Para Pakistán, la producción de bioenergía para el año 2017 fue de 67,543 TOE, que representaron sólo el 0.65% de la energía total para ese año (Ali, Z., Liaquat, R., Khoja, A.H., Safdar, U., 2021).

Pakistán tiene un alto potencial de utilización de biomasa como fuente de energía, sin embargo, debido a la falta de políticas eficaces, grandes cantidades de biomasa

se desperdician anualmente, como residuos de cosecha, excretas de ganado, residuos forestales y alimenticios (Salam, R.A., Amber, K.P., Ratyal, N.I., Alam, M., Akram, N., Gómez-Muñoz, C., García Márquez, F.P., 2020). Más de 1200 plantas de biogás han sido instaladas en distintas regiones de Pakistán y en total cuenta con un potencial de biogás estimado en 201 TWh (Naqvi, S.R., Jamshaid, S., Naqvi, M., Farooq, W., Niazi, M.B.K., Aman, Z., Zubair, M., Ali, M., Shahbaz, M., Inayat, A., 2018).

A través de la historia de Pakistán, distintas políticas e iniciativas han sido implementadas para favorecer la utilización del potencial de bioenergía de este país (Ali, Z., Liaquat, R., Khoja, A.H., Safdar, U., 2021). En la revisión de la literatura, se observa que la década de 1970 s fue el momento en que Pakistán por primera vez se enfocó en la utilización de bioenergía a través de las técnicas modernas de conversión de energía. Esto pudo haber sido una consecuencia de la incertidumbre en mercados energético, así como el incremento en los precios del petróleo durante esa época. No existió una política oficial en ese entonces, pero distintas iniciativas fueron tomadas a través de la formación de nuevas organizaciones del sector público. Fue en 1994 cuando la política energética de Pakistán incluyó a la bioenergía dentro de su enfoque. La utilización de biomasa para bioenergía en la industria se dio hasta el año de 2006. En 2006 Pakistán implementó una política específica para el desarrollo de energía renovable en el país (Zafar, U., Ur Rashid, T., Khosa, A.A., Khalil, M.S., Rahid, M., 2018). El primer enfoque de esta política se centró en la energía eólica y solar, mientras que la bioenergía fue dejada fuera de esta política. Luego en 2008, la Asociación de Infraestructura Privada de Energía (PPIB por sus siglas en inglés) ideó la política nacional para la cogeneración de energía para la industria azucarera. Este fue el primer paso hacia la utilización de bioenergía a partir del potencial de Pakistán a nivel nacional. Esta política fue revisada en el año 2013 como marco de trabajo para la cogeneración eléctrica a partir del bagazo de la caña de azúcar. En este mismo año, el enfoque de la política de energía renovable del año 2006 con la inclusión de bioenergía fue extendida hasta marzo del año 2018. Posterior a esto, una nueva política debió ser emitida a partir de 2018, sin embargo, esto no se dio. A partir de 2019, se circuló en las partes interesadas el proyecto de nueva política de energía renovable, que busca incrementar la participación de la energía renovable en la matriz energética de Pakistán (Ali, Z., Liaquat, R., Khoja, A.H., Safdar, U., 2021).

A pesar de que el gobierno de Pakistán ha ideado múltiples políticas en el pasado y ahora se encuentra en el proceso de promulgar una nueva política para la utilización de las fuentes autóctonas de energía renovable, aún quedan desafíos por superar (Madurai, E.R., Afridhis, S., Vijayaraghavan, R.R., Subramaniam, U., Nurnnavbi, M., 2020). Los retos enfrentados caen en dos categorías, la de generación de política pública y la de su implementación.

Alí et al (Ali, Z., Liaquat, R., Khoja, A.H., Safdar, U., 2021) realizaron un estudio comparativo de medición de la efectividad de la política pública enfocada en bioenergéticos de Pakistán en términos de seguridad energética, medio ambiente, aspectos económicos y de equidad. En los resultados encontrados se observa que mientras que las políticas de superación han evolucionado para bien en términos de su efectividad, la proporción de bioenergía en la matriz energética de Pakistán permanece comparativamente baja. El estudio citado de Alí et al encontró que los retos de la política pública en materia energética de Pakistán fueron principalmente de naturaleza endógena, que pueden superarse mediante la propia política pública. De esta forma y partiendo del citado estudio, la política de bioenergía de Pakistán debe diversificarse, ampliando su enfoque de sólo bagazo de caña a otras fuentes de biomasa lignocelulósica, así como residuos municipales; los generadores de política pública necesitan proveer de incentivos a entidades privadas para invertir en el sector de la bioenergía. La política necesita garantizar provisiones para la concientización y el desarrollo de capacidades entre las partes interesadas, así como establecer objetivos y planificar en consecuencia para utilizar los recursos bioenergéticos subutilizados en este país.

4.1.5 Resumen comparativo de los casos de instrumentos de Política Pública.

A partir de la revisión de la literatura y con la finalidad de realizar un análisis comparativo, se definieron algunos parámetros comparativos para el análisis y evaluación de la política pública, que se describen en las **Tablas 19 y 20**. En muchos de los parámetros definidos, la política pública está dirigida a la cadena de generación de energía eléctrica a partir de renovables, sin embargo, como se ha comentado en capítulos anteriores, los bioenergéticos en general, al formar parte de la cadena de generación como biocombustibles o vehículos energéticos (biomasa), son susceptibles de formar parte de estas cadenas de generación y por tanto ser beneficiarios directos o indirectos de la política pública en la que están inmersos los parámetros que se muestran. Adicionalmente, algunos de los modelos de parámetros de política pública desarrollada para el impulso del sector eléctrico, son susceptibles de ser adaptados o acotados a objetivos específicos de fomento de biocombustibles.

Con base en la metodología que en su trabajo muestran (Ali, Z., Liaquat, R., Khoja, A.H., Safdar, U., 2021), para la comparativa de políticas públicas a partir de parámetros definidos, éstos se categorizan y definen en los siguientes párrafos (y se muestran desagregados en las **Tablas 19 y 20**).

Los **incentivos fiscales** son incentivos en materia financiera, que se ofrecen alrededor del mundo para maximizar el despliegue de energías renovables. La utilización de este tipo de incentivos puede contribuir a la reducción de costos, así como a inversiones relacionadas con las tecnologías de bioenergéticos.

Las **finanzas públicas** implican los parámetros bajo los cuales se muestra qué tanto interés existe de parte del gobierno o de las instituciones públicas en la provisión de financiamiento a los proyectos de energías renovables. La provisión de financiamiento público es esencial para el desarrollo de bioenergía, así como para otras energías renovables. El financiamiento público podría también detonar la existencia de financiamiento privado en las tecnologías de renovables.

Los **incentivos regulatorios** indican cómo el gobierno ejerce la regulación del sector energético, tanto en el aspecto público como privado, con la finalidad de incrementar la participación de renovables en la matriz energética.

Los **parámetros de factibilidad institucional** son empleados para evaluar la presencia de instituciones que regulen los proyectos de energías renovables, desde las etapas básicas de planeación hasta su implementación, con la finalidad de imponer una determinada política de manera efectiva.

Los **parámetros de viabilidad política** son utilizados para evaluar la situación política presente en un país determinado. Adicionalmente, la viabilidad política también provee de parámetros que pueden analizar políticas para priorizar su aplicación por otro país.

Tabla 19. Parámetros para el análisis de políticas públicas en materia energética que involucran el fomento de energías renovables.

Parámetro	Descripción	Referencia
Incentivos fiscales		
Subsidios	Asistencia monetaria provista por el Estado para la implementación de nuevos proyectos. Los subsidios son pagos de una ocasión que no deben ser devueltos. Los subsidios se presentan en forma de reembolso una vez que el inversor ha realizado la inversión.	(Mitchell, C., Sawin, J.L., Pokharel , G.R., Dammen, D., Wang, Z., Fifita, S., Jaccard, M.,
Exenciones fiscales	La reducción de impuestos o exención fiscal como incentivo directamente provee una reducción en el pago de impuestos, el cual puede incluir ventas, valor agregado, impuesto al carbón o a la energía. Dichos incentivos también son aplicados a la	

	compra (o producción) de energías o tecnologías renovables.	Langniss, O., Lucas, H., Nadai, A., 2011)
Créditos al carbón	Son créditos otorgados a los productores de energía renovable a partir de mecanismos de desarrollo limpios (CDM por sus siglas en inglés). Estos se basan en reducciones a emisiones de carbono (dióxido de carbono) en comparación con proyectos de generación tradicional de energía, tales como a partir de carbón o petróleo.	
Pagos por generación de energía	Se trata de pagos directos realizados al productor de energía renovable por el gobierno, por unidad de energía renovable producida.	
Tarifa de alimentación	La tarifa de alimentación (FIT por sus siglas en inglés) es uno de los incentivos fiscales más comunes proporcionados a los productores de energía renovable en los países desarrollados. FIT es un precio fijo pagado al proveedor (varía según la tecnología) por unidad de energía entregada en el año dado. FIT puede estar relacionado con la realización de un pago por generación de energía.	

Finanzas Públicas

Inversión	La inversión es la participación directa de instituciones de finanzas públicas en proyectos de energías renovables, en donde las instituciones públicas proveen financiamiento a cambio de una participación del patrimonio del proyecto o empresa. Dichas inversiones pueden ser realizadas a través del modelo de fondos de riesgo o bien de fondos de desarrollo tecnológico.
Créditos	Los créditos son otra modalidad de financiamiento proveniente del sector público. Cuando los proyectos de energía renovable son elegibles o presentan viabilidad económica pueden ser otorgados créditos para la ejecución de los

proyectos. Los créditos podrían no estar limitados a aquéllos provistos por instituciones públicas. Estos podrían ser extendidos también a instituciones privadas. Este tipo de créditos difiere de los créditos generales en términos del uso de tasas de interés bajas.

Garantías

Las garantías no implican la provisión directa de financiamiento, sino se trata de un rol que es cubierto por una institución pública. Para proveer una garantía, las instituciones públicas funcionan como aval de proyectos o compañías de energías renovables, que buscan créditos o financiamiento proveniente de la banca comercial u otras instituciones financieras. Las garantías son provistas a personas físicas o morales con sólidos antecedentes financieros o una sólida estrategia de negocio.

Incentivos Regulatorios

Portafolio estándar de renovables (RFS por sus siglas en inglés).

El portafolio estándar de renovables, cuota obligatoria o mandato, son términos equivalentes para un mismo concepto. Se utiliza para asegurarse que exista una suficiencia de componentes renovables en la producción, es decir, funge como mandato sobre renovables. Este mandato requiere a los productores existentes de energía alcanzar un objetivo mínimo que incluya la cantidad definida de renovables en su portafolio energético.

Medición neta (facturación neta)

Se introduce el término de medición o facturación netas para fomentar proyectos de generación de energía de pequeña o mediana escala. Bajo la medición neta, cualquier persona con excedente de energía (renovable) se le autoriza por parte del regulador un flujo en dos vías de energía entre la compañía de distribución y el generador (cautivo).

Banco de energía de Un banco de energía es como un banco tradicional, en el que se deposita una cantidad dada de energía y se retira de igual forma. Esta herramienta regulatoria permite a una persona física o moral invertir en una planta de generación a partir de renovables fuera de su lugar de residencia. Este tipo de inversionista tiene el privilegio de acceder a esta energía en el lugar de su elección, en la misma cantidad que su planta genera.

Compra garantizada de energía de La compra garantizada de energía es una garantía provista para los generadores de energía. Los acuerdos de garantía de compra de energía son realizados con la finalidad de priorizar y asegurar la construcción de un sector energético de renovables. Estos incentivos garantizan la compra de cada unidad de energía producida por un generador de energía renovable.

Factibilidad Institucional

Potencial de implementación de La política de potencial de implementación se refiere a la presencia de instituciones que se encargan del registro y regulación de los proyectos de energía renovable.

Interés de inversionistas de El interés de los inversionistas muestra el interés del inversionista por invertir en una determinada tecnología y situación política. Lo anterior puede ser fácilmente evaluado en términos del número de solicitudes recibidas.

Viabilidad Política

Existencia del apoyo de las partes interesadas de La existencia del apoyo de las partes interesadas (*stakeholders* como término en inglés) muestra cómo una parte interesada se ve favorecida bajo partes interesadas

distintas situaciones. Esto podría incluir un cambio de régimen de política pública.

Estabilidad del apoyo de las partes interesadas	La estabilidad del apoyo de las partes interesadas se reporta en presencia del apoyo de largo plazo hacia las partes interesadas. Este parámetro es utilizado para verificar cuando los objetivos gubernamentales son consistentes a lo largo de la línea de tiempo, en adición a que, con los incentivos las partes interesadas se adhieran a la política.
Influencia de grupos de partes interesadas	La influencia de grupos de partes interesadas se involucra para asesorar el enfoque de la política pública en torno a los intereses de las partes interesadas. Este parámetro proporciona una vista general de la influencia de las partes interesadas, lo que incluye la propiedad de industrias clave.
Fiabilidad del concepto de política pública	El concepto de fiabilidad de la política pública se refiere a la presencia de políticas comparables entre sí, así como el éxito de dichas políticas en países con contextos similares.

Fuente: Adaptada de (Ali, Z., Liaquat, R., Khoja, A.H., Safdar, U., 2021), con información de (Mitchell, C., Sawin, J.L., Pokharel, G.R., Dammen, D., Wang, Z., Fifita, S., Jaccard, M., Langniss, O., Lucas, H., Nadai, A., 2011)

Tabla 20. Parámetros para la evaluación de políticas públicas en materia energética que involucran el fomento de energías renovables.

Parámetro	Descripción	Referencia
Seguridad Energética		(Löschel, A., Moslener, U.,

Capacidad instalada Capacidad instalada es la capacidad total de generación de potencia eléctrica en mega watts, para un año dado. La capacidad instalada únicamente considera la generación eléctrica a partir de fuentes de bioenergía.

Electricidad generada La electricidad generada (como parámetro de evaluación de renovables) se refiere a la energía eléctrica total generada en un determinado año por plantas de generación a partir de biomasa.

Participación de Bioenergía La participación de bioenergía es la proporción porcentual de energía generada proveniente de plantas de generación a partir de bioenergéticos con respecto al total de energía generada en un país y año determinados.

Objetivos de bioenergía Los objetivos de bioenergía se definen por la bioenergía a ser utilizada en el futuro o en la vida útil de la política que se promulga.

Ambientales

(Botha, T.,
Von
Blottnitz,
H., 2006)

Combustibles fósiles reemplazados El parámetro de combustibles fósiles reemplazados se refiere a la cantidad de combustibles fósiles reemplazados, en condiciones en que la misma cantidad de energía es producida utilizando hidrocarburos y sus derivados.

Reducción de CO₂

El parámetro de reducción de CO₂ se refiere a la cantidad de emisiones de dióxido de carbono reducida a partir de la utilización de fuentes de bioenergía (como el caso de biocombustibles o biomasa). A pesar de que los proyectos de

bioenergía emiten dióxido de carbono, este CO2 es en realidad reciclado durante la producción de biomasa.

Económicos

(Dalton, G.J., Lewis, T., 2011)

Creación de empleos El parámetro de creación de empleos se define como el número de empleos creados por la industria de la bioenergía. Esto incluye al personal que labora en la cadena de suministro, operaciones y mantenimiento.

Ingreso bruto El parámetro de ingreso bruto se refiere a la cantidad de capital estimado generado por las compañías de bioenergía a partir de la comercialización de sus productos.

Equidad energética

(Sovacool, 2011); (Mitchell, C., Sawin, J.L., Pokharel, G.R., Dammen, D., Wang, Z., Fifita, S., Jaccard, M., Langniss, O., Lucas, H., Nadai, A., 2011)

Acceso a energía eléctrica a El parámetro de acceso a energía eléctrica se refiere al número de personas con acceso a energía eléctrica del total de población del país.

Objetivo de electrificación de Se trata del objetivo fijado por la política de electrificación de áreas no electrificadas al interior del país.










Acceso a combustibles domésticos a El parámetro de acceso a combustibles domésticos se define como la proporción porcentual de la población con acceso a combustibles limpios para uso doméstico, como gas natural o gas licuado de petróleo (GLP).

Asequibilidad El parámetro de asequibilidad representa la proporción del ingreso familiar gastado en combustibles y electricidad. El combustible en este caso representa a los que se destinan para su uso doméstico.

En la **Tabla 21** se establece una comparativa de la política de bioenergéticos de cada país o región analizado con base en los parámetros de evaluación previamente comentados.

Tabla 21. Comparación de la política energética de fomento a los biocombustibles en distintos países.					
Parámetros de evaluación de Política.	Estados Unidos	Unión Europea	Brasil	Pakistán	México
Incentivos Fiscales					
Subsidios	✗	✗	✓	✓	✗
Reducción de Impuestos / exenciones	✓	✓	✓	✓	✗

Créditos / Certificados de Carbono	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Finanzas Públicas					
Inversión / Créditos	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Garantías	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Regulatorios					
RFS / Cuota obligatoria o mandato	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Medición neta	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Banco de energía	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Compra garantizada	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Factibilidad Institucional	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Potencial para implementar política	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Interés de Inversionistas	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Viabilidad Política	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Existencia de apoyo de partes interesadas	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Estabilidad de apoyo de partes interesadas	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Influencia de grupos de partes interesadas					
Dependencia del concepto de política					

4.2. Instrumentos de Política Pública utilizados en México para el fomento y fortalecimiento del uso de bioenergéticos.

El principal instrumento normativo que establece el marco legal y de promoción de los biocombustibles es la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, así como su reglamento. Estos instrumentos normativos permanecen vigentes, fueron emitidos y publicados en el Diario Oficial de la Federación en los años 2008 y 2009.

El artículo 1 de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LDPB) establece las bases para promover la producción de insumos para Bioenergéticos, a partir de las actividades agropecuarias, forestales, algas, procesos biotecnológicos y enzimáticos del campo mexicano, sin poner en riesgo la seguridad y soberanía alimentaria del país; desarrollar la producción, comercialización y uso eficiente de los Bioenergéticos para contribuir a la reactivación del sector rural, la generación de empleo y una mejor calidad de vida para la población, en particular las de alta y muy alta marginalidad; promover el desarrollo regional y el de las comunidades rurales menos favorecidas, y procurar la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera y gases de efecto de invernadero y coordinar acciones entre los Gobiernos Federal, Estatales, Distrito Federal y Municipales, así como la concurrencia con los sectores social y privado, para el desarrollo de los Bioenergéticos.

A su vez, como parte de este marco normativo, también se cuenta con los Lineamientos para el otorgamiento de permisos para la producción, el almacenamiento, el transporte y la comercialización de bioenergéticos (del tipo etanol anhidro y biodiesel que fueron emitidos por Acuerdo publicado el 13 de noviembre de 2009 en el Diario Oficial de la Federación. El objeto de estos Lineamientos es establecer los criterios a que deben ajustarse los solicitantes de permisos para la producción, el almacenamiento, el transporte y la comercialización de Bioenergéticos del tipo Etanol Anhidro y Biodiesel, de conformidad con la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos y su Reglamento.

En México, la venta y uso de biocombustibles líquidos como etanol se permite cuando se cumple con los permisos establecidos en los Lineamientos referidos en el párrafo anterior; sin embargo, como se ha descrito en secciones previas ésta es limitada a su uso como oxigenante de gasolinas en composición máxima de 5.8%

(E5.8) en las regiones del país distintas de las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey.

Como tema de política energética relacionada con el fomento al uso de combustibles más limpios, el 7 de febrero de 2020, la Secretaría de Energía publicó el Acuerdo por el que se aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición Energética para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética (en adelante la Estrategia).

Esta estrategia guarda alineación con el Plan Nacional de Desarrollo 2019 – 2024, y toma como eje la seguridad energética, definida en el propio documento como la capacidad del país para satisfacer la demanda nacional de energía con suficiencia, oportunidad, sustentabilidad y precios adecuados, en el presente y hacia el futuro. Los principios implicados en el documento, con los que contribuye el tema de promoción y uso de biocombustibles son:

- Uso racional y sostenible de todos los recursos energéticos y tecnologías disponibles para el desarrollo nacional.
- Administrar de manera ordenada la incorporación de energías renovables en la matriz energética nacional, asegurando que se mantengan la integridad, seguridad, rentabilidad y crecimiento de la red eléctrica, como infraestructura estratégica del Estado.
- Impulsar y apoyar la ciencia, tecnología, ingeniería e industrias nacionales de equipos y bienes de capital, para que se refleje un crecimiento en el contenido nacional y obtengamos transferencia tecnológica.
- Promover el cambio tecnológico y cultural en la economía y sociedad, para tener mayor eficiencia en el uso y destino final de la energía.
- Impulsar cambios tecnológicos y normativos que reduzcan los requerimientos energéticos que representan la mayor proporción del uso final de la energía, como la movilidad, industria, servicios, producción agropecuaria, iluminación, entre otros.

Conforme a lo establecido en la Ley de Transición Energética, la Estrategia constituye el instrumento rector de la política nacional en el mediano y largo plazos, en materia de obligaciones de energías limpias y de eficiencia energética.

Con base en la Estrategia, la visión 2050 plantea que México contará, entre otros, con:

- Un sector energético basado en tecnologías limpias, energéticamente eficientes y que promueve la productividad, el desarrollo sustentable y la equidad social del país.

-
- Una oferta de energéticos de acceso universal, diversificada, suficiente, de alta calidad y a precios competitivos.
 - Una industria nacional de bienes de capital y equipos diseñados y producidos por el sector público, social y privado del país que garantice una Transición Energética soberana y que contribuye a la seguridad energética del país.
 - Una población con acceso total a las tecnologías de punta, a los menores costos, con mejor calidad de vida, menor desigualdad social y que incorpore y adopte en sus servicios energéticos a las energías renovables y las prácticas de eficiencia energética.

La Estrategia tiene tres objetivos principales:

- Establecer las metas y la hoja de ruta para la implementación de dichas metas.
- Fomentar la reducción de emisiones contaminantes originadas por la industria eléctrica.
- Reducir, bajo criterios de viabilidad económica, la dependencia del país de los combustibles fósiles, como fuente primaria de energía.

Esta Estrategia funciona como documento rector a partir del cual se elaboran otros Programas, como el Programa Especial de Transición Energética (PETE) y el Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (PRONASE), así como la Hoja de ruta de Eficiencia Energética y otros programas enfocados al desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional.

El PETE tiene como objetivo instrumentar las acciones establecidas en la Estrategia dentro del ámbito de la Administración Pública Federal, asegurando su viabilidad económica, en términos de lo establecido en el artículo 34 de la Ley de Transición Energética (LTE).

El PRONASE es el instrumento que contiene acciones, proyectos y actividades derivadas de la Estrategia, enfocadas al objetivo de alcanzar las metas en materia de eficiencia energética en el corto plazo, en términos de lo establecido en el artículo 35 de la LTE. La Hoja de ruta de Eficiencia Energética, marca el camino a seguir para alcanzar las metas.

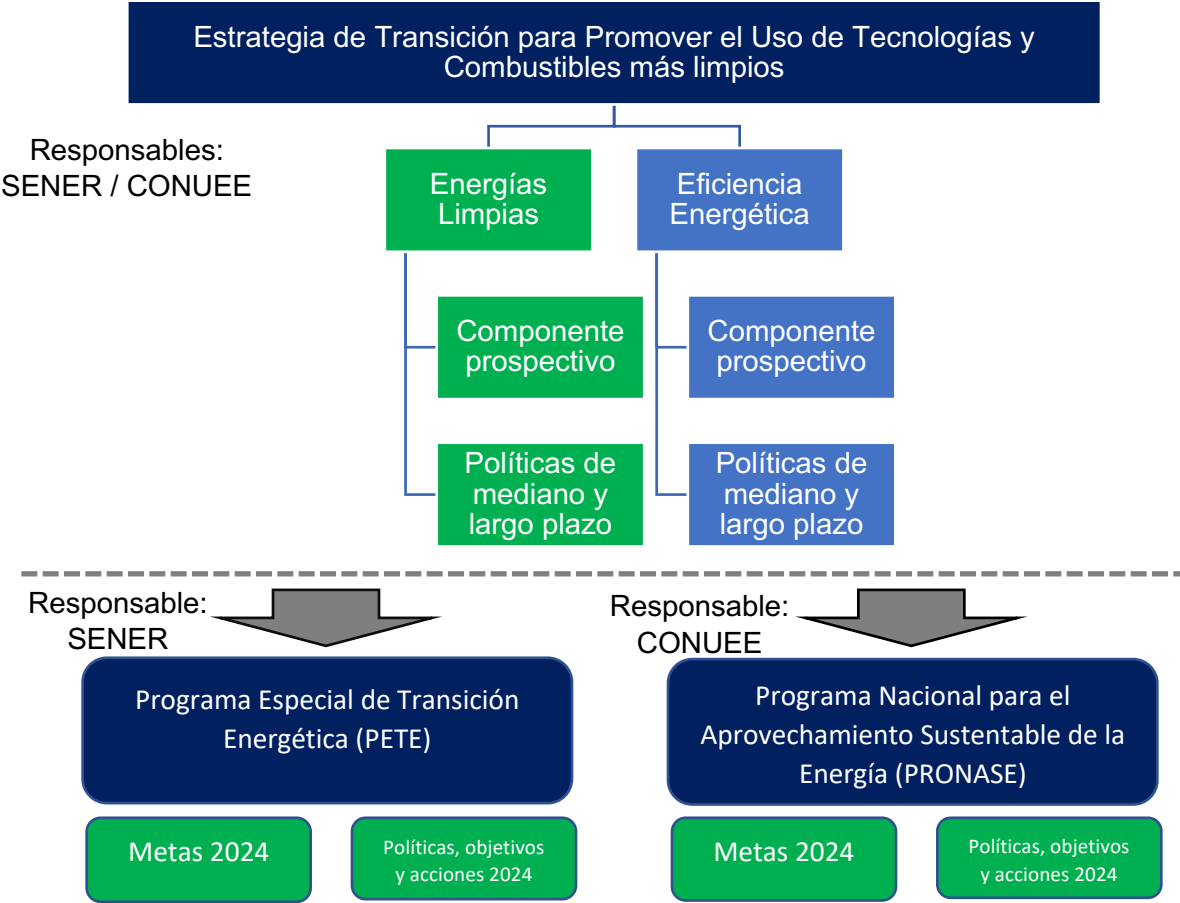
La alineación de las metas de energías limpias y eficiencia energética en los instrumentos de planeación derivados de la LTE se muestra en la **Figura 12**.

En la actual administración del Poder Ejecutivo Federal de México (2018 – 2024) han disminuido las políticas públicas en materia de promoción y desarrollo de biocombustibles respecto a sexenios anteriores, y las remanentes, guardan una mayor relación con el mercado eléctrico (generación eléctrica) que con el de combustibles para el transporte, tal como se evidencia en la Estrategia de Transición

Energética para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios. No obstante lo anterior, es posible resaltar algunas iniciativas y políticas públicas que directa o indirectamente inciden en la promoción de los biocombustibles, mismas que son discutidas en esta sección.

De acuerdo con el contenido de la **Figura 12**, se observa que las políticas públicas se encuentran definidas en la Estrategia, e integradas en el PETE y en el PRONASE, por lo que a continuación se abordarán algunos de sus detalles relacionados con los biocombustibles.

Figura 12. Alineación de las metas de energías limpias y eficiencia energética con los instrumentos de planeación derivados de la LTE.



Fuente: Tomado de (SENER, ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética, 2020)

De acuerdo con (SENER, ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética, 2020), las políticas y acciones de la propia Estrategia parten de la aplicación de las mejores prácticas internacionales, de los Programas existentes (en

el sexenio 2018 -2024) y de las recomendaciones hechas por expertos en el sector, todos ellos bajo sus tres objetivos (mencionados en párrafos anteriores).

Las líneas de acción de la Estrategia tienen los siguientes propósitos:

- A. Resolver los problemas identificados que obstaculicen el cumplimiento de las metas de energías limpias y eficiencia energética.
- B. Reducir bajo condiciones de viabilidad económica, la contaminación ambiental originada por la industria eléctrica.
- C. Reducir la dependencia del país de los combustibles fósiles como fuente primaria de energía.
- D. Promover el cumplimiento de las metas de energías limpias y eficiencia energética.
- E. Promover el desarrollo futuro de las energías limpias como un elemento que contribuye al desarrollo y bienestar socioeconómico del país.

Estas líneas de acción corren por tres principales vertientes:

- Aprovechamiento y uso eficiente de energía.
- Aprovechamiento de energías limpias.
- Desarrollo de infraestructura integradora.

Las líneas de acción de la Estrategia se categorizan como se muestra a continuación:

- Investigación, desarrollo e Innovación. Movilizar todos los recursos disponibles para acelerar la investigación, desarrollo, demostración e implementación de nuevas tecnologías es fundamental para una política de estado soberana para la transición energética.
- Regulaciones y política pública. Las reglas que emite el Estado y que norman las actividades económicas y sociales de los particulares. Mediante estas reglas se pretende garantizar el funcionamiento eficiente de los mercados, generar certeza jurídica, garantizar derechos de propiedad, evitar daños inminentes o bien atenuar o eliminar daños existentes a la salud o bienestar de la población, a la salud animal y vegetal, al medio ambiente, a los recursos naturales o a la economía. Por ello, las regulaciones son las reglas o normas emitidas por el gobierno para garantizar beneficios sociales.
- Instituciones. Las instituciones sirven para coordinar el diseño, implantación, operación y evaluación de las políticas, programas y proyectos. Ante un proceso dinámico y de largo alcance como lo que se plantea en la presente Estrategia, el marco institucional tiene que mejorar, evolucionar y adecuarse

a necesidades cambiantes. Por el carácter complejo de estos procesos, es importante contar con una buena coordinación interinstitucional, que incluya la participación del sector privado y de otros actores relevantes para generar consenso y llevar adelante las políticas, programas y proyectos.

- Capacidades técnicas y recursos humanos. El proceso de transición energética requiere un proceso de adopción masiva de tecnología y mejores prácticas que evolucionan y se modifican, generando nuevas oportunidades y necesidades. Por esta razón, es fundamental contar con recursos humanos suficientes y calificados que diseñen, implanten, operen y mantengan no sólo elementos tecnológicos sino también los programas y las políticas que se requieran.
- Mercados y financiamiento. El principal costo de la energía renovable y de la eficiencia energética es el de la inversión, por lo que es necesario el financiamiento soberano para aprovecharlas, y éste debe tener condiciones para poder fluir de manera suficiente, a los menores costos de transacción y de acuerdo con las oportunidades que el cambio regulatorio y tecnológico permitan.

Dentro de la vertiente de aprovechamiento y uso eficiente de la energía se consideran cinco sectores: transporte, industria, edificaciones, servicios públicos municipales y agroindustria. Dado el enfoque de utilización de los biocombustibles objeto del presente trabajo, la discusión se enfocará en el sector transporte.

De acuerdo con (SENER, ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética, 2020), el sector transporte es el mayor consumidor de energía a nivel nacional con el 46% del consumo energético final, por tanto se considera un sector clave para el cumplimiento de metas a largo plazo en la transición energética. La evolución de este sector es estimada por un acelerado cambio social y tecnológico que, entre otros procesos relevantes, apunta a una creciente electrificación.

Dada la complejidad y gran variedad de factores que afectan el transporte, en la Estrategia se establecen tres líneas generales de acción para la transición tecnológica y energética de este sector: en tecnologías vehiculares eficientes; en infraestructura que facilite la integración de diversas modalidades de transporte; y en urbanización, planeación de ciudades y reducción de la necesidad de movilidad. Con la finalidad de enfatizar políticas y acciones que se relacionen con biocombustibles, en la **Tabla 22** se muestran los detalles de la primera línea general de acción (las otras dos líneas de acción generales no se consideran con relación directa al tema de biocombustibles).

Tabla 22. Acciones en tecnologías vehiculares eficientes.

Categorías	Líneas de acción
Regulaciones y política pública	<ul style="list-style-type: none"> • Ampliar y fortalecer las NOMs de rendimiento mínimo de combustible para todos los vehículos. • Ampliar y fortalecer las NOMs de calidad de combustibles de forma responsable y que permita una transición ordenada al uso de tecnologías y combustibles más limpios. • Fortalecer la regulación del tránsito vehicular con base en rendimiento de combustibles. • Fortalecer la política fiscal considerando las externalidades de los combustibles fósiles utilizados en el transporte. • Promover el uso de vehículos híbridos, eléctricos y con tecnologías eficientes.
Capacidades técnicas y recursos humanos	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar programas de preparación de especialistas en eficiencia energética asociados a la manufactura del sector.
Mercados y financiamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer programas de renovación del parque vehicular.
Investigación, desarrollo e innovación	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar un mapa de ruta para la sustitución gradual del uso de combustibles fósiles por tecnologías limpias en ciudades.

-Énfasis añadido a líneas de acción relacionadas con el uso de biocombustibles-
Fuente: Tomado de (SENER, ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética, 2020).

En la **Tabla 23** se muestran las principales tecnologías eficientes en el sector transporte.

La tecnología de vehículos *Flex-Fuel* (FFV por sus siglas en inglés) se aplica a vehículos automotores de combustión interna, que de acuerdo con (de Melo, T. C., Machado, G.B., Belchior, C.R.P., Colaco, M.J., Barros, J.E.M., de Oliveira, E.J., de Oliveira, D.G., 2012) tienen la capacidad de operación con mezclas en distintas

proporciones de etanol anhidro – gasolina (E22, E25, E85), 100% etanol (E100, incluso con humedad de hasta 4.9%) o cualquier mezcla de estos combustibles. En su trabajo, de Melo et al., muestran que la combustión en FFV con etanol E100 reduce la generación de emisiones de hidrocarburos no oxigenados. A su vez, (Kroyan, Y., Wojcieszky, M., Kaario, O. Larmi, M., 2022) encuentran en su investigación que en distintos casos de mezclas de etanol – gasolina, los FFV presentan un mejor desempeño de economía de combustible, con respecto a los motores de combustión interna de vehículos ligeros; encontrando que cuando se utilizan mezclas con alta concentración de etanol, se reduce el consume de energía, así como las emisiones de CO₂ a pesar de que se consuman cantidades mayores de combustible. Por lo anterior, esta política planteada en la Estrategia se resalta como positiva para México, tanto en el cumplimiento de objetivos de descarbonización y reducción de emisiones, como en materia de eficiencia energética.

Tabla 23. Principales Tecnologías eficientes en el sector transporte

Tecnologías o enfoques sistémicos	Grado de madurez	Tendencia de desarrollo	Costo de la Tecnología		Nivel de uso de la Tecnología	
	Global	Global	Local	Global	Local	Global
Mejoras motrices y de diseño aeronáutico	Alto	Rápida	Medio	Medio	Alto	Alto
Vehículos Flex-Fuel	Alto	Rápida	Bajo	Bajo	Bajo	Medio
Autos eléctricos e híbridos	Alto	Rápida	Alto	Alto	Bajo	Medio
Infraestructura para la movilidad	Alto	Lenta	Alto	Alto	Bajo	Medio
Sistemas de conducción inteligente	Bajo	Lenta	Alto	Alto	Nulo	Bajo

Fuente: Tomado de (SENER, ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética, 2020)

En la línea vertiente de energías limpias, las acciones se llevan a cabo en siete sectores (bioenergía, energía eólica, energía solar, geotermia, hidroenergía y energías del océano, captura y almacenamiento de carbono, y desarrollo e impacto social), de las cuales, por su relación con los biocombustibles, únicamente se discutirán bioenergía y desarrollo e impacto social.

Como se ha discutido en secciones anteriores, la bioenergía tiene el potencial de aprovechamiento y retos importantes en cuanto al manejo ambiental sustentable. Las líneas de acción, así como las principales tecnologías eficientes para el aprovechamiento de la bioenergía se muestran en las **Tablas 24 y 25**.

Tabla 24. Acciones en bioenergía

Categorías	Líneas de acción
Regulaciones y política pública	<ul style="list-style-type: none"> • Fortalecer el marco de políticas públicas para la producción sustentable de bioenergéticos, aumentando la certidumbre a la inversión. • Establecer normas y regulaciones técnicas aplicables a la producción de bioenergéticos con criterios de sustentabilidad y con referencia a la calidad y manejo, esquemas de certificación y verificación de cadenas de valor. • Armonizar marcos legales propicios para el aprovechamiento energético de los residuos urbanos y el reciclado de materiales, en todos los niveles de gobierno.
Instituciones	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar e implantar un sistema nacional de gestión del uso sustentable del suelo que promueva que la tierra agrícola y forestal se utilice de manera equilibrada y sustentable. • Fortalecer capacidades institucionales para la aplicación del marco jurídico relativo a la elaboración y aprovechamiento de los bioenergéticos. • Promover el uso y adquisición de bioenergéticos en las empresas del sector público.
Capacidades técnicas y	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar programas de capacitación en planeación y financiamiento de procesos y

recursos humanos	<p>operación de tecnologías más avanzadas de pretratamiento, producción, mejora y aprovechamiento de bioenergéticos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Establecer programas o instituciones para profesionalizar a los certificadores y verificadores de cadenas de valor sustentables de los bioenergéticos.
Mercados y financiamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar el establecimiento de programas de financiamiento a las comunidades rurales que produzcan bioenergéticos, favoreciendo el uso de tierras degradadas no adecuadas para cosechas alimentarias. • Facilitar el acceso a financiamiento para la producción de bioenergía sustentable que favorezcan el desarrollo de cadenas de valor. • Impulsar la inversión necesaria para atraer biocombustible al mercado. • Evaluar el establecimiento de programas de financiamiento o incentivos para municipios y el sector privado que aprovechen los residuos urbanos energéticamente.
Investigación, desarrollo e innovación	<ul style="list-style-type: none"> • Fortalecer las capacidades nacionales y regionales de investigación para aprovechar bioenergéticos de segunda generación. • Desarrollar y fortalecer la capacidad de análisis sobre el impacto económico y ambiental de la producción de bioenergéticos y sus ciclos de vida.

-Énfasis añadido a líneas de acción relacionadas con el uso de biocombustibles-
Fuente: Tomado de (SENER, ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética, 2020).

Tabla 25. Principales Tecnologías eficientes para el aprovechamiento de la Bioenergía.

Tecnologías o enfoques sistémicos	Grado de madurez	Tendencia de desarrollo	Costo de la Tecnología		Nivel de uso de la Tecnología	
	Global	Global	Local	Global	Local	Global
Estufas eficientes y ahorradoras de leña	Alto	Rápida	Bajo	Bajo	Medio	Medio
Secado de biomasa y torrefacción	Alto	Rápida	Medio	Medio	Bajo	Alto
Biodigestores para el aprovechamiento de biogás	Alto	Rápida	Medio	Medio	Bajo	Alto
Biocombustibles sólidos: Pellets	Alto	Rápida	Medio	Medio	Nulo	Alto
Gasificación para producir hidrógeno	Bajo	Moderada	Alto	Alto	Nulo	Bajo
Biocombustibles de primera y segunda generación	Alto	Rápida	Medio	Bajo	Bajo	Medio
Biocombustibles avanzados	Alto	Rápida	Alto	Alto	Nulo	Medio

Fuente: Tomado de (SENER, ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética, 2020)

A pesar de que el marco legal mexicano se considera congruente con la Estrategia, se requieren de acciones y esfuerzos especiales para lograr una observancia efectiva, así como metas de equidad de género, eliminación de pobreza energética y mayor participación ciudadana en los proyectos energéticos.

La **Tabla 26** muestra las acciones en materia de desarrollo e impacto social que considera la Estrategia.

Tabla 26. Acciones de desarrollo e impacto social.

Categorías	Líneas de acción
<p>Perspectiva de género</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Responder a las consideraciones de equidad de género en la política pública energética de México. <ul style="list-style-type: none"> ○ Los proyectos de distribución y consumo de energía observan lineamientos que contribuyen a eliminar la brecha de desigualdad de género. ○ En el desarrollo de los proyectos se identifican impactos socio ambientales con perspectiva de género y se garantiza la participación activa de mujeres y hombres en los beneficios compartidos. ○ Se garantizan oportunidades laborales en condiciones de igualdad para mujeres y hombres en el desarrollo de proyectos del sector.
<p>Pobreza energética</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Reducir la pobreza energética mediante la promoción de proyectos incluyentes de energías limpias. <ul style="list-style-type: none"> ○ Desarrollar programas de acceso universal de energía alineados al Programa de Naciones Unidas “Energía Sustentable para todos” (llamado SE4ALL por sus siglas en inglés). ○ Fomentar el aprovechamiento de los residuos sólidos rurales, para la producción de biogás, la instalación de sistemas fotovoltaicos, aislados o conectados a la red, a través de proyectos incluyentes que reduzcan la pobreza energética y contribuyan a reducir condiciones de pobreza de forma más general.
<p>Protección a los derechos humanos</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Implementar proyectos de energía con un enfoque de protección, respeto y garantía de derechos humanos.

<p>derivada de la explotación de recursos naturales</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Implementar actividades de desarrollo acompañadas por medidas adecuadas de prevención y mitigación para garantizar que las mismas no vulneren los derechos humanos de las personas ubicadas en una determinada área de influencia. ○ Implementar mecanismos adecuados para monitorear y prevenir violaciones futuras a los derechos humanos, con la coadyuvancia de los Estados. ○ Asegurar que la consulta a pueblos y comunidades indígenas se desarrolle en plena observancia de los estándares nacionales e internacionales en materia de derechos humanos. ○ Asegurar que los procesos de evaluación de impacto social sean eficientes y eficaces, que incluyan beneficios compartidos. ○ Inculcar la percepción de la EvIS²⁹ como un proceso participativo para establecer un proyecto.
<p>Participación ciudadana</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Promover una activa participación de los distintos grupos sociales en la transición energética. <ul style="list-style-type: none"> ○ Construir una nueva relación entre sociedad y gobierno, basada en la confianza y reconocimiento de la autonomía y capacidad crítica y propositiva de la sociedad, para el diseño de políticas públicas y acciones colaborativas. ○ Desarrollar coordinación interinstitucional entre dependencias y entidades del sector energético para unificar estrategias y líneas de acción que impulsen la participación ciudadana. ○ Aplicar los principios del gobierno abierto (i) transparencia, (ii) participación ciudadana, (iii) rendición de cuentas, y (iv) tecnología e innovación

²⁹ Evaluación e Impacto Social. Documento que contiene la identificación de pueblos en el área de influencia de un proyecto, así como la identificación, caracterización, predicción y valoración de las consecuencias que podrían derivarse, medidas de mitigación y planes de gestión social.

<https://www.gob.mx/sener/articulos/tramite-evaluacion-de-impacto-social-egis?idiom=es>

y alentar el debate sobre políticas en el tema de consumo de energía.

- Establecer los mecanismos específicos de participación de la sociedad civil, procurando aquellos de gobierno colaborativo, y de las áreas de vinculación de las dependencias federales, estatales y municipales.
- Crear herramientas de comunicación y participación por Estados o regiones.

Financiamiento

- **Promover proyectos energéticos desde el sector social y con la ciudadanía.**
 - **Desarrollar incentivos económicos y de acompañamiento para promover la creación de emprendimientos sociales y con ello el fortalecimiento del sector social de la economía, con la participación del Instituto Nacional de la Economía Social (INAES).**
 - **Promover la formación y el desarrollo de microempresas de generación eléctrica limpia de base social en el sector rural y urbano.**

-Énfasis añadido a líneas de acción relacionadas con el uso de biocombustibles-
Fuente: Tomado de (SENER, ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética, 2020).

Instrumentos de Política Pública y apoyos específicos.

Dentro de los instrumentos de apoyo dirigidos o relacionados con la promoción de biocombustibles, derivados de la Estrategia, se destaca el Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (FOTEASE).

El FOTEASE es un instrumento de política pública estructurado como fideicomiso público operado y administrado por la Secretaría de Energía, cuyos fondos destina la Administración Pública Federal para instrumentar acciones que sirvan para contribuir al cumplimiento de la Estrategia Nacional para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, promoviendo la utilización, el desarrollo y la inversión de las energías renovables y la eficiencia energética.

Como consecuencia del cumplimiento del objetivo del FOTEASE se pretende alcanzar lo siguiente:

- Promover, incentivar y difundir el uso y la aplicación de tecnologías limpias en todas las actividades productivas y de uso doméstico, comercial, industrial y agropecuario.
- Promover la diversificación de fuentes primarias de energía, incrementando la oferta de las fuentes de energía renovable.
- Establecer un programa de normalización para la eficiencia energética.
- Promover y difundir medidas para la eficiencia energética, así como el ahorro de energía.
- Proponer las medidas necesarias para que la población tenga acceso a información confiable, oportuna y de fácil consulta en relación con el consumo energético de los equipos, aparatos y vehículos, que requieren del suministro de energía para su funcionamiento.

Actualmente la Ley de Transición Energética (LTE) es el instrumento reglamentario de los párrafos sexto y octavo del artículo 25 de la Constitución, que tiene por objeto normar el aprovechamiento sustentable de la energía, así como las obligaciones en materia de Energías Limpias y reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos.

Los recursos del FOTEASE provienen de los Presupuestos de Egresos de la Federación (PEF) y están encaminados a otorgar apoyos de carácter recuperable y no recuperable, incluyendo garantías de crédito u otro tipo de apoyo financiero a los Proyectos que permitan instrumentar acciones que sirvan para contribuir al cumplimiento de la Estrategia y que diversifiquen y enriquezcan las opciones para el cumplimiento de las metas en materia de energías limpias, permitiendo con ello:

- Prever el incremento gradual de la participación de las Energías Limpias en la Industria Eléctrica con el objetivo de cumplir las metas establecidas en materia de generación de energías limpias y de reducción de emisiones.
- Facilitar el cumplimiento de las metas de Energías Limpias y Eficiencia Energética referidas en la Ley de una manera económicamente viable.
- Establecer mecanismos de promoción de energías limpias y reducción de emisiones contaminantes.
- Reducir, bajo condiciones de viabilidad económica, la generación de emisiones contaminantes en la generación de energía eléctrica.
- Promover el aprovechamiento sustentable de la energía en el consumo final y los procesos de transformación de la energía.

-
- Promover el aprovechamiento energético de recursos renovables y de los residuos.

La selección de proyectos para otorgar apoyo se lleva a cabo por un comité técnico formado por 9 miembros de distintas instituciones, presidido por la Secretaría de Energía.

En la investigación realizada, dentro de los proyectos aprobados y vigentes en 2022 del Gobierno de México, no se encontró ninguno con apoyos directamente relacionados con el fomento a los biocombustibles objeto del presente trabajo, por lo que a pesar de aparecer como parte de los objetivos de la Estrategia (dado que los biocombustibles tienen el potencial de elevar el contenido nacional en el inventario de gasolinas y gas, así como ser sustitutos de combustibles fósiles provenientes de fuentes renovables), es un asunto que se considera deberá seguir pendiente para el Gobierno.

Aunado a lo anterior, en la investigación realizada durante el segundo trimestre de 2022, no se encontró publicado el Programa Especial de Transición Energética, por lo que el grueso de políticas y acciones en apoyo al fomento de combustibles se mantiene sólo a nivel planeación estratégica sin concretar.

Como conclusión de esta sección, la principal política pública en México vigente en 2022, relacionada con el apoyo a los biocombustibles para su fomento a nivel nacional es de carácter normativo; se trata de la NOM-016-CRE-2016 que permite un contenido máximo de 5.8% en volumen de etanol anhidro como oxigenante en gasolinas Regular y Premium en el país, exceptuando las zonas metropolitanas del Valle de México, Monterrey y Guadalajara. No obstante lo anterior, considerando el marco teórico y los trabajos de investigación referidos en secciones previas del presente documento, no se considera suficiente estímulo esta política limitativa, dado el potencial de producción de etanol de segunda generación con el que cuenta México, así como para contribuir al cumplimiento de las metas de descarbonización, mitigación de GHG, transición de la matriz energética y sustitución de combustibles fósiles.

En los casos de biogás, la discusión se reduce al tema de costos (sobre todo de inversión) sin que se pueda percibir una solución generalizada, pues los trabajos referidos de investigación se limitan a casos locales y específicos, que en México no se podrían abordar desde una perspectiva nacional, dado que por los elevados costos de producción (al considerar los procesos de purificación por desulfuración y descarbonización), la molécula de biogás no podría competir con el precio del gas natural o el GLP fósiles. A pesar del escenario complejo para el biogás, éste sí podría resultar en una consolidación de mercados locales específicos, como alternativa de solución para el auto abasto o abasto local de energía en comunidades rurales y de difícil acceso, para las que el costo de transporte de la

molécula energética desde la terminal de almacenamiento y reparto, hasta el punto de consumo eleva considerablemente el costo, permitiéndoles la autosuficiencia energética a partir de la producción de biogás, fomentada con el apoyo de proyectos específicos de infraestructura y transferencia tecnológica que cuenten en una proporción mayor con el financiamiento del Estado.

Capítulo 5. Propuestas para la estimulación del mercado de biocombustibles en México y su impacto en economías locales y nacional.

5.1 Propuestas.

Alineación con la Planeación Estratégica Nacional.

Como alineación con la Planeación Estratégica Nacional, se toma como base lo establecido en el Plan Nacional de Desarrollo 2019 – 2023 (Gobierno de México, 2019), considerando como impulso y justificación de la política pública los siguientes Objetivos y Estrategias:

Del Eje General III – Desarrollo Económico;

- Objetivo 3.3 Promover la innovación, la competencia, la integración en las cadenas de valor y la generación de un mayor valor agregado en todos los sectores productivos bajo un enfoque de sostenibilidad.
 - Estrategia 3.3.8 Potenciar las capacidades locales de producción y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y minerales, a través de la innovación, y fomentar la inversión en proyectos agropecuarios y mineros, en un marco de certidumbre y respeto a las comunidades y al medio ambiente.
- Objetivo 3.5 Establecer una política energética soberana, sostenible, baja en emisiones y eficiente para garantizar la accesibilidad, calidad y seguridad.
 - Estrategia 3.5.8 Fomentar la generación de energía con fuentes renovables y tecnologías sustentables, y coadyuvar a la reducción de las emisiones del sector energético, promoviendo la participación comunitaria y su aprovechamiento local, así como la inversión.
- Objetivo 3.10 Fomentar un desarrollo económico que promueva la reducción de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero y la adaptación al cambio climático para mejorar la calidad de vida de la población.
 - 3.10.1 Promover políticas para la reducción de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero en sectores productivos, así como promover y conservar sumideros de carbono
 - 3.10.2 Promover la inversión pública y fomentar la transferencia de otras fuentes de financiamiento para invertir en medidas de mitigación y adaptación al cambio climático.
 - 3.10.3 Fomentar instrumentos económicos y de mercado que impulsen la reducción de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero en sectores estratégicos.

Propuesta Etanol.

La política pública de estímulo de bioetanol combustible deberá ser implementada gradualmente en México, para evitar afectaciones drásticas con efectos negativos en la economía y en el mercado de combustibles.

Considerando los casos de éxito revisados para los Estados Unidos de América y Brasil, la factibilidad técnica y geográfica de producción de etanol de segunda generación a partir de rastrojo de maíz discutida en secciones anteriores, así como una base nacional de política pública, se propone la implementación de un mínimo de mezclado de etanol lignocelulósico para reducir afectaciones a los mercados de alimentos. Dicha política sería un similar del RFS, ajustada a la base de etanol lignocelulósico como aditivo oxigenante para gasolinas producidas en México.

Con base en el promedio de producción de gasolinas de PEMEX durante los años 2011 – 2019 (excluyendo 2020 y 2021 por considerarse atípicos debido a las afectaciones originadas por la emergencia sanitaria causada por el SARS-COV 2) de 335,789 miles de barriles en refinerías (sin considerar el potencial de crecimiento en la producción de las que están siendo reacondicionadas, ni el de la que se encuentra en construcción), se tiene un potencial de mezclado (como aditivo oxigenante) de 3,287,042 m³ de etanol para alcanzar una barrera de mezclado de 5.8% (como lo establece la NOM-016-CRE-2016) sobre la base nacional de producción (aunque la NOM-016-CRE-2016 excluye la mezcla de etanol en gasolinas en las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey).

La propuesta consiste en una primera etapa en mantener la barrera de mezclado (como un máximo permitido) al 5.8% de etanol en gasolinas (E5.8), eliminando de la NOM-016-CRE-2016 la exclusión de zonas que le impide su homologación a nivel nacional, añadiendo un mínimo (piso) de mezclado al 3% de etanol de segunda generación exclusivamente para las gasolinas producidas en México. Con el promedio de producción de gasolinas de PEMEX, el requerimiento para alcanzar la base mínima de mezclado (BMM3) sería cercano a 1,651,116 m³ de etanol lignocelulósico (avanzado) que, en concordancia con lo comentado en capítulos anteriores, podría tener como origen rastrojo de maíz mediante el proceso de producción SSF. Bajo este supuesto de origen del etanol y de acuerdo con la investigación teórica realizada, el potencial estimado de mitigación sería cercano a los 2.5 millones de toneladas de CO₂ equivalente.

En una segunda etapa, se considera que, como impacto positivo en el mercado generado, se podría fomentar la monetización de las posibles ventajas de descarbonización para el etanol de segunda generación, mediante la emisión de certificados de descarbonización (CDD). Para la tecnología SSF referida con potencial de descarbonización de 2.5 millones de toneladas de CO₂ equivalente, tomando como base de referencia el promedio de precios 2022 en el mercado [B]³

de CBios, el potencial de monetización anualizada para CDD es de 44 millones de dólares (USD), que indirectamente impactaría en la migración de tecnologías de producción.

Propuesta Biogás.

El biogás tiene como ventaja que funciona como combustible sustituto del gas natural tanto para su uso como combustible doméstico, para generación eléctrica, así como en el sector transporte. Como se ha comentado en capítulos anteriores, las principales desventajas del biogás son sus elevados costos de inversión y producción (al considerar las tecnologías de purificación) en comparación con el combustible fósil, lo que lo hace menos competitivo.

Dada su factibilidad de producción a partir de desechos orgánicos, presentes prácticamente en todo el país, se flexibiliza su producción, reduciéndolo a un tema de transferencia tecnológica con el reto de minimizar sus costos de distribución.

Bajo las limitantes discutidas en secciones previas para la elaboración de una propuesta regulatoria nacional, categorizadas principalmente como económicas por las externalidades negativas que se podrían generar al considerarse un bien sustituto del gas natural de origen fósil, la propuesta se reduce a fomentar su existencia en las regiones del país en las que los costos de distribución del gas de origen fósil lo vuelvan competitivo. Para esos casos, se considera necesario estimular su existencia mediante la inclusión de un programa permanente de financiamiento de inversión en instalaciones de producción a nivel local con fondos del FOTEASE que permita a particulares invertir en la tecnología requerida para su producción, con el beneficio implícito de la transferencia tecnológica, la producción local y la descarbonización.

CONCLUSIONES.

La biomasa lignocelulósica como insumo en la producción de etanol anhidro (combustibles de segunda generación) es factible desde la perspectiva tecnológica, pues además de no competir directamente con la producción de alimentos (y los efectos que esto conlleva), procesos como la SSF permiten eficiencias de transformación superiores al 10% en peso.

Una ventaja importante de utilización de rastrojo de maíz como insumo en la producción de etanol en México es el potencial de creación de empleos aunado al surgimiento de un mercado para rastrojo, que en la actualidad no tiene un valor comercial considerable. Este pequeño cambio en la cadena de valor incorporaría un potencial de generación y derrama de recursos por 1,144 millones de dólares anuales adicionales a lo que hoy genera el mercado de agro producción de maíz a nivel nacional.

La demanda de etanol para cubrir el escenario E5.8 (tal como lo permite en la actualidad el Marco Normativo de México), se estima equivalente a 1 Tg (respecto del promedio de gasolinas producido por PEMEX), valor que se encuentra muy por debajo del potencial de producción. Incluso en el Escenario E10, la demanda no llega a los 2 Tg (menos de la mitad del potencial de producción) por lo que el uso de esta tecnología no representa una limitante en este sentido.

El gran inconveniente de la posible utilización de etanol de segunda generación bajo las condiciones consideradas en este trabajo es el precio, pues el criterio de costo de oportunidad fijado por PEMEX para la compra de etanol hace que este insumo compita en precio contra el etanol de primera generación del mercado *U.S. Gulf Coast*, lo que en la actualidad lo deja fuera de competencia. Posibles alternativas se encuentran en lo que han hecho otros países, como el propio Estados Unidos, que a partir del *National Energy Act* de 1978 dio el primer paso para el desarrollo del mercado de etanol a partir de esquemas de mecanismos e incentivos fiscales.

Adicionalmente, si se considera un precio base de etanol en México de \$0.6996 USD/L (29 centavos arriba del precio fijado con la fórmula de costo de oportunidad), un proyecto de biorrefinería con capacidad instalada equivalente a 2 Gg/día, sería viable desde la perspectiva de la evaluación financiera de proyectos, generando una TIR del 11.45%, que supera la Tasa Social de Descuento establecida por la SHCP para este tipo de proyectos.

Como parte de las implicaciones en políticas públicas en México, en materia de bioenergéticos como los incluidos en este trabajo, se podrían destacar las siguientes:

- Si fuera el caso de una política pública que estableciera una barrera de mezclado como límite máximo para un portafolio de bioetanol celulósico, se estimularía la

formalización de una industria de biocombustibles de segunda generación (lignocelulósicos), a pesar del costo que éstos tienen superior al de los derivados del petróleo, por lo que los estímulos fiscales serían un prerrequisito para mitigar el sobre costo de este tipo de biocombustible, así como promover el surgimiento de esta industria.

- En las reflexiones derivadas de esta investigación, se aduce que esta industria en México no ha prosperado, dado que los biocombustibles de segunda generación, como se aprecia en el presente trabajo, no son competitivos en un ambiente puro de mercado, en relación con los derivados del petróleo. En el escenario de política pública de uso del biotetanol celulósico como carburante en gasolinas producidas en México, la producción de etanol de caña (primera generación) no se vería necesariamente afectada, pues se mantendría el uso industrial y doméstico que hasta ahora se le ha dado en el mercado mexicano. La cadena de producción de alimentos derivados del maíz tampoco se vería gravemente afectada, siempre que se especifique en la política pública el portafolio de bioenergéticos permitidos para el mezclado en combustibles (bioetanol celulósico). El impacto económico en el precio de la mezcla de combustible no es significativo, dado que como se muestra en la presente investigación, el costo del bioetanol es comparativamente menor que el de la gasolina y funciona como oxigenante mejorador del índice de octano.

La implementación de una política de biocombustibles en México puede ser impulsada por lecciones aprendidas provenientes principalmente de los enfoques exitosos de Estados Unidos y Brasil. A continuación, se presentan tres propuestas prácticas destinadas a guiar el desarrollo sostenible del sector de biocombustibles en México.

1. Diversificación de Materias Primas para la Producción de Biocombustibles:

Inspirándose en la política estadounidense, México debería enfocarse en la diversificación de materias primas para la producción de biocombustibles. Mientras que Estados Unidos ha destacado el maíz, México puede evitar la dependencia exclusiva de un solo cultivo y explorar fuentes alternativas. La política debería fomentar la investigación y el desarrollo de tecnologías para la utilización de residuos agrícolas, forestales y otras biomásas como materias primas viables. Esto no solo promoverá la sostenibilidad ambiental sino también la seguridad alimentaria al evitar la competencia directa con los cultivos destinados a la alimentación.

2. Incentivos Fiscales y Financieros para Estimular la Producción y Consumo:

Tomando como referencia la política brasileña, México podría implementar un sistema de incentivos fiscales y financieros. Estos incentivos deberían abarcar tanto a productores como a consumidores. La reducción de impuestos para los productores de biocombustibles y los consumidores que opten por combustibles sostenibles puede acelerar la transición hacia una matriz energética más limpia. Además, la creación de líneas de crédito preferenciales para proyectos de

biocombustibles facilitaría la inversión y promovería la expansión de la industria en México. Este enfoque financiero puede ser crucial para superar las barreras económicas iniciales asociadas con la adopción de tecnologías más sostenibles.

3. Estándares de Mezcla Obligatorios para Impulsar la Adopción de Biocombustibles:

Siguiendo el ejemplo de Estados Unidos, México podría establecer estándares de mezcla obligatorios. Estos estándares requerirían una proporción específica de biocombustibles en los combustibles convencionales. Establecer metas a corto y largo plazo proporcionaría un marco temporal claro para la transición hacia una mayor utilización de biocombustibles. Además, es esencial establecer un sistema efectivo de cumplimiento y monitoreo para garantizar que las metas se alcancen y se mantenga la integridad del programa. Este enfoque puede no solo impulsar la adopción de biocombustibles sino también establecer una base para la autosuficiencia energética y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

La combinación de enfoques exitosos de Estados Unidos y Brasil proporciona un marco sólido para el desarrollo de una política de biocombustibles en México. Diversificar las fuentes, ofrecer incentivos fiscales y financieros, y establecer estándares de mezcla obligatorios son pasos clave hacia un futuro sostenible y energéticamente independiente. Al adoptar estas propuestas, México puede avanzar hacia una matriz energética más limpia, reducir su dependencia de los combustibles fósiles y contribuir positivamente a la lucha global contra el cambio climático.

Existe una gran brecha en el camino a la utilización de este tipo de tecnologías en México, sin embargo, las bases de factibilidad técnica parecen sólidas, sólo queda pendiente desarrollar la factibilidad económica, la cual en gran medida depende del entorno y de los mecanismos regulatorios como incentivos para la generación de mercados internos.

Bajo los supuestos analizados, en el contexto actual, un mecanismo regulatorio de barrera de mezclado al 5.8% de carácter nacional en las gasolinas producidas en México, en combinación con un piso de mezclado del 3% de etanol lignocelulósico, detonaría en México el surgimiento de un mercado interno para este producto, sin afectaciones significativas en mercados de alimentos, con las ventajas de contar con una viabilidad técnica para la producción a partir de rastrojo de maíz, así como un potencial de descarbonización mínimo estimado en 2.5 millones de toneladas de CO₂ equivalente.

En el caso de biogás, en el presente trabajo se demuestra la factibilidad técnica para su producción, tomando como insumos desechos orgánicos, sin embargo, dados los bajos niveles de precio spot de la molécula de gas natural en mercados internacionales y nacional, así como su elevada expectativa de extracción de la molécula fósil con tecnologías de fracturamiento hidráulico durante los años

próximos (mercado de oferta), no se justifica una política normativa agresiva generalizada. La viabilidad económica del biogás se demostró con un precio de venta de 0.38 USD/m³, consiguiendo una TIR del 14.67% en la evaluación a 10 años.

A pesar del escenario complejo para el biogás, éste sí podría resultar en una consolidación de mercados locales específicos, como alternativa de solución para el auto abasto o abasto local de energía en comunidades rurales y de difícil acceso, fomentado por una política pública de financiamiento tecnológico con fondos gubernamentales.

Entre las ventajas que podrían catalizar una transformación energética de las zonas rurales mexicanas basada en el uso de biogás, para este trabajo se destacan las siguientes:

- **Sostenibilidad Ambiental:** El biogás, derivado de residuos orgánicos, no solo reduce la dependencia de combustibles fósiles, sino que también mitiga la emisión de gases de efecto invernadero. Su producción contribuye a la sostenibilidad ambiental, al tiempo que aborda problemáticas asociadas con la gestión de desechos orgánicos en comunidades rurales.
- **Descentralización Energética:** En el contexto de comunidades rurales, la generación descentralizada de energía mediante biogás promueve la independencia energética. Esto reduce la vulnerabilidad de estas comunidades a interrupciones en el suministro eléctrico centralizado y fomenta la autosuficiencia.
- **Autosuficiencia Agroindustrial:** Las explotaciones agrícolas y ganaderas pueden aprovechar los residuos orgánicos para la producción de biogás. Este ciclo cerrado promueve la autosuficiencia agroindustrial al convertir los desechos en una valiosa fuente de energía, reduciendo así los costos de producción y creando un modelo económico circular.
- **Fomento del Empleo Local:** La implementación de sistemas de producción de biogás en comunidades rurales impulsa la creación de empleo local. Desde la instalación y mantenimiento de los digestores hasta la gestión de la operación diaria, esta transición hacia fuentes de energía sostenible genera oportunidades laborales vitales para el desarrollo económico local.
- **Cumplimiento Regulatorio y Estímulos Gubernamentales:** A medida que el gobierno mexicano refuerza su enfoque en la sostenibilidad, se anticipan incentivos y programas de apoyo para proyectos de energías renovables. El cumplimiento de normativas ambientales y la participación en programas gubernamentales pueden resultar en beneficios fiscales y financieros, incentivando aún más la adopción del biogás.

-
- **Acceso a Energía en Zonas Remotas:** El biogás ofrece una solución viable para llevar energía a áreas remotas donde la conexión a la red eléctrica convencional resulta costosa o logísticamente desafiante. Esto puede mejorar significativamente la calidad de vida en comunidades rurales al proporcionar acceso a electricidad confiable.
 - **Impacto Social Positivo:** Más allá de los aspectos técnicos y regulatorios, la adopción del biogás en comunidades rurales genera un impacto social positivo al mejorar las condiciones de vida, impulsar el desarrollo económico local y fortalecer la resiliencia ante los cambios ambientales y económicos.

El biogás representa una oportunidad única para transformar las comunidades rurales en México. Su potencial para consolidar mercados locales a través de la autosuficiencia energética, la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico local lo posiciona como una alternativa prometedora en la diversificación de la matriz energética del país.

La colaboración entre actores gubernamentales, industriales y comunidades locales será clave para desbloquear el potencial de los bioenergéticos y forjar con ello un futuro más sostenible, aunado a que, el desarrollo de esta industria traería consigo la creación de fuentes de empleo y capacitación en regiones agrícolas, lo cual implicaría el desarrollo de condiciones de estabilidad laboral que contribuyan a mitigar la migración hacia las zonas urbanas y al extranjero.

BIBLIOGRAFÍA.

- Clancy, J. M., Curtis, J., Ó'Gallachóir. (2018). Modelling national policy making to promote bioenergy in heat, transport and electricity to 2030 - Interactions, impacts and conflicts. *Energy Policy* 123, 579-593. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.012>
- Löschel, A., Moslener, U., Rübhelke, D.T.G. (2010). Indicators of energy security in industrialised countries. *Energy Policy* 38, 1165-1171. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.03.061>
- Lal, R. (2005). World crop residues production and implications of its use as a biofuel. *Environment International* 31, 575-584. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.09.005>
- Ladisch M. R., Mosier N. S., Kim Y., Ximenes E., Hogsett D. (2010). Converting cellulose to biofuels. *SBE special supplement biofuels. Chemical Engineering Progress*. 106, 56-63. Obtenido de https://scholar.google.com/scholar_lookup?journal=Chemical+Engineering+Progress&title=Converting+cellulose+to+biofuels.+SBE+special+supplement+biofuels&author=M.+R.+La+disch&author=N.+S.+Mosier&author=Y.+Kim&author=E.+Ximenes&author=D.+Hogsett&volume=106&i
- Lamers, P., Hamelinck, C., Hunginger, M., Faaij, A.,. (2011). International bioenergy trade - a review of past of developments on the liquid biofuel market. *Renewable and Sustainable Energy Review* 15, 2655-2676. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.022>
- Canada, G. o. (18 de 07 de 2021). *Renewable Fuel Regulations SOR/2010-189*. Obtenido de <http://laws-lois.justice.gc.ca>
- Carlsson M, Lagerkvist A, Morgan-Sagastume F. (2012). The effects of substrate pretreatment on anaerobic digestion systems: a review. *Waste Manag.* doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.04.016>
- Carioca, J.O.B., Leal, M. (2011). Ethanol production from sugar-based feedstocks. *Compr. Biotechnology 2nd edition, volume 1*, 27-35. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00184-7>.
- Laureano-Pérez L, Teymouri F, Alizadeh H, Dale BE. (2005). Understanding factors that limit enzymatic hydrolysis of biomass. *Appl Biochem Biotechnol.* doi:https://doi.org/10.1007/978-1-59259-991-2_91
- Cavaignac, R. S., Ferreira, N. L., Guardani, R. (2021). Techno-economic and Environmental Process Evaluation of Biogas upgrading via amine scrubbing. *Renewable Energy*.
- Cavaignac, R., Ferreira, N.L., Guardani, R. . (2021). Techno-economic and environmental process evaluation of biogas upgrading via amine scrubbing. *Renewable Energy* 171. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.097>, 868-880.
- Cicea, C., Marinescu, C. Pintilie, N. (2019). Smart cities using smart choices for energy: Integrating modern bioenergy in consumption. *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management* 14, 22-34. Obtenido de

https://www.researchgate.net/publication/337211013_SMART_CITIES_USING_SMART_CHOICES_FOR_ENERGY_INTEGRATING_MODERN_BIOENERGY_IN_CONSUMPTION

- Liu W, Yan J, Li J, Sang T. (2012). Yield potential of Miscanthus energy crops in the Loess plateau of China. *GCB Bioenergy*. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01157.x>
- Comber, A., Dickie, J., Jarvis, C., Phillips, M., Tansey, K. (2015). Locating bioenergy facilities using a modified GIS-based location-allocation-algorithm: considering the spatial distribution of resource supply. *Applied Energy* 154, 309-316.
- Committee on Economic and Environmental Impacts of Increasing Biofuels Production; Board on Agriculture and Natural Resources; Board on Energy and Environmental Systems; Division on Engineering and Physical Sciences;. (2011). *Renewable Fuel Standard: potential economic and environmental effects of U.S. biofuel policy*. Washington D.C.: The National Academies Press. doi:doi: 10.17226/13105
- Cooney D, Kim H, Quinn L, Lee MS, Guo J, Chen S, Xu B, Lee DK. (2017). Switchgrass as a bioenergy crop in the Loess plateau, China: potential lignocellulosic feedstock production and environmental conservation. *J Integr Agric*. doi:[https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(16\)61587-3](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(16)61587-3)
- Corezen, H., Kampman, B. (2009). The impact of ethanol and ETBE blending on refinery operations and GHG-emissions. *Energy Policy*, 37(12), 5226 - 5238.
- Lovric, M., Lovric, N., Mavsar, R. (2020). Mapping forest-based bioeconomy research in Europe. *Forest Policy Economy* 110, 101874.
- Lozano-García, D.F., Santibañez-Aguilar, J.E., Lozano, J., Flores-Tlacuahuac, A. (2020). GIS-based modeling of residual biomass availability for energy and production in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120.
- Chozhaendhan S, Gnanavel G, Karthiga Devi G, Subbaiya R, Praveen Kumar y Bharathiraja B. (2020). Enhancement of feedstock composition and fuel properties for biogas production. *Springer*. doi:https://doi.org/10.1007/978-981-15-0410-5_9
- Cross, S., Welfle, A.J., Thornley, P., Syri, S., Mikaelsson, M. (2021). Bioenergy development in the UK & Nordic countries: A comparison of effectiveness of support policies for sustainable development of the bioenergy sector. *Biomass & Bioenergy* 144, 105887. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105887>
- Chum, H.L, Warner, E., Renewable, N., Seabra, J.E.A., Macedo, I.C., Estadual, U., et al. (2013). Modeling and Analysis A comparison of commercial ethanol production systems from Brazilian sugarcane and U.S. corn. *BioFPR*, 2013-2019. doi:<http://dx.doi.org/10.1002/bbb>.
- New Zealand's Ministry for Environment. (17 de 05 de 2011). *Environmental Protection Authority Act 2011*. Obtenido de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/nze108498.pdf>
- (ANP), A. N. (9 de 11 de 2020). Gasolina. Sao Paulo, Brasil. Obtenido de <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e>

processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/gasolina

- (DECC), D. o. (15 de Junio de 2020). *Ireland's National Energy and Climate Plan 2021 - 2030*. Obtenido de <https://www.gov.ie/en/publication/0015c-irelands-national-energy-climate-plan-2021-2030/>
- (EIA), U. E. (18 de 02 de 2021). *Energy Information Agency*. Recuperado el 07 de 07 de 2021, de Independent Statistics & Analysis: https://www.eia.gov/petroleum/weekly/archive/2021/210218/includes/analysis_print.php
- (EPA), U. S. (02 de 09 de 2022). *Renewable Fuel Standard Program*. Obtenido de <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/overview-renewable-fuel-standard#structure>
- (EUR-LEX), E. C. (21 de 12 de 2018). *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (Text with EEA relevance.)*. Obtenido de <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>
- (IEA), I. E. (2018). *World Energy Outlook 2018*. doi:<https://dx.doi.org/10.1049/ep.1977.0180>
- (IEA), I. E. (2018). *World Energy Outlook 2018*. Obtenido de Report Extract Renewables: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018/renewables>
- (IEA), I. E. (2019). *International Energy Association*. Recuperado el 21 de 01 de 2022, de <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD&energy=Balances&year=2019>
- (IEA), I. E. (13 de Agosto de 2021). *International Energy Agency Outlook 2020*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020/outlook-for-fuel-supply>
- (IEA), I. E. (7 de mayo de 2021). *World Energy Model Documentation. Report Extract Stated Policies Scenario. 2020 Version*. Obtenido de https://iea.blob.core.windows.net/assets/bc4936dc-73f1-47c3-8064-0784ae6f85a3/WEM_Documentation_WEO2020.pdf
- (IRENA), I. R. (2020). *Bioenergy*. Obtenido de Bioenergy data: <https://www.irena.org/bioenergy>
- (METI), T. M. (Julio de 2018). *Strategic Energy Plan*. Obtenido de https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/others/basic_plan/5th/pdf/strategic_energy_plan.pdf
- (NTDC), N. T. (26 de febrero de 2019). *National Electric Power Regulatory Authority Islamic Republic of Pakistan*. Recuperado el 23 de 02 de 2022, de [https://nepra.org.pk/Admission%20Notices/2019/09-September/IGCEP%20Plan%20\(2018-40\).pdf](https://nepra.org.pk/Admission%20Notices/2019/09-September/IGCEP%20Plan%20(2018-40).pdf)

-
- (SEAI), S. E. (2017). *Nearly Zero Energy Building Standard*. Obtenido de <https://www.seai.ie/business-and-public-sector/standards/nearly-zero-energy-building-standard/>
- (SENER), S. d. (2014). *Prospectiva de Gas Natural y Gas L.P. 2014 - 2028*. México.
- 110th United States of America's Congress. (19 de 12 de 2007). *CONGRESS.GOV*. Obtenido de H.R.6 - Energy Independence and Security Act of 2007: <https://www.congress.gov/bill/110th-congress/house-bill/6>
- Aldana, H., Lozano, F.J., Acevedo, J. (2014). Evaluating the potential for producing energy from agricultural residues in Mexico using MILP optimization. *Biomass and Bioenergy*, *1(67)*, 372 - 389.
- Alejos, C., Calvo, E. (2015). Biocombustibles de primera generación. *Revista Peruana de Ingeniería Química* *18*, 19-30. Obtenido de <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/view/11784/10542>
- Ali, Z., Liaquat, R., Khoja, A.H., Safdar, U. (2021). A comparision of energy policies of Pakistan and their impact on bioenergy development. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* *46*, 101246. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101246>
- Al-Juaied, M., Tochelle, G. T. (2006). Absorption of CO₂ in aqueous Diglycolamine, . *Ind. Eng. Chem. Res.* *45*, 2473-2482.
- Aden, A., Ruth, M., Ibsen, K., Jechura, J., Neeves, K., Sheehan, J. (2002). Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover. *Golden (CO): NREL*;(Report No.: NREL/tp-510-32438), 88.
- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, P. G. (2018). Kouigas, biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnol. Adv.* *36*, 452-466.
- API, A. P. (2001). *Publication 4261. Octane boost with selected oxygenates*. Washington D.C.: API.
- Ardnt, Ch., Benfica, R. (2011). nder Implications of Biofuels Expansion in Africa:The Case of Mozambique. *World Development* *39*, 1649-1662. doi:[doi:10.1016/j.worlddev.2011.02.0121649](https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2011.02.0121649)
- Arias-Polo, G. (2011). Propuesta energética sostenible para destilerías de etanol. *ICIDCA. Sobre los derivados de la caña de azúcar. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar*. doi:<https://doi.org/10.3989/redc.2011.1.790>
- Avalos-Rodriguez M.L. et al. (2021). Review of the environmental policy instruments in the standarization of H₂ for the decarbonization of Mexico. . *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.019> .
- Awe, O. W., Zhao, Y., Nzihou, A., Minh, D. P., Lyczko, N. (2017). A review of biogas utilisation, purification and upgrading technologies. *Waste biomass Valoriz* *8*, 267-283.

-
- Awudu, I., Zhang, J. . (2012). Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: a review. . *Renewable and Sustainable Energy Review* 16, 1359-1368.
- Blanco-Canqui H, Wortmann C. (2017). Crop residue removal and soil erosion by wind. *J Soil Water Conserv.* doi:<https://doi.org/10.2489/jswc.72.5.97a>
- Böcher, M., Töller, A.E., Perbandt, D., Beer, K., Vogelpohl, T. . (2020). Research trends: Bioeconomy politics and governance. . *Forest Policy and Economics* 118.
- B3. (09 de 12 de 2021). *B3 Informational Service*. Obtenido de Decarbonation Credit (CBIO): https://www.b3.com.br/en_us/products-and-services/additional-services/informational-service/decarbonization-credit-cbio/
- Bacovsky, D., Ludwiczek, N., Pointer, C, Verma, V.K. (05 de 08 de 2016). *IEA Bioenergy Countries' Report. Bioenergy policies and status if implementation*. doi:<https://doi.org/10.2172/1326902>
- Bauer, F., Hulteberg, C., Persson, T., Tamm, D. (2013). Biogas upgrading . *Review of commercial technologies*.
- Bauer, F., Hulteberg, C., Persson, T., Tamm, D. (2013). *Biogas Upgrading - Review of commercial technologies, Sweden*. Recuperado el 12 de 06 de 2021, de <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/>
- Bautista-Herrera, A., Ortiz-Arango, F., Álvarez-García, J. (2021). Profitability Using Second-Generation Bioethanol in Gasoline Produced in Mexico. *Energies* 14, 8:2294. doi: <https://doi.org/10.3390/en14082294>.
- Beer, K., Böcher, M., Bollmann, A., Töller, A.E., Vogelpohl, T. (2018). Politische Prozesse der Bioökonomie zwischen Ökonomie und Ökologie . *Arbeitsbericht 1, Hagen* .
- Bekkering, J., Broekhuis, A. A., van Gemert, W. J. T. (2010). Optimisation of a green gas supply chain, a review. *Bioresour Technol* 101 (2), 450-456.
- Bekkering, J., Hengeveld, E. J., van Gemert, W. J. T., Broekhuis, A. A. (2015). Will implementation of green gas into the gas supply be feasible in the future? *Applied Energy* 140, 409-417.
- Bertero M, de la Puente G, Sedran U. (2012). Fuels from bio-oils: bio-oil production from different residual resources, characterization and thermal conditioning. *Fuel*, 263-271. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.08.041>
- BIRF, AIF, MIGA, CIADI, BANCO MUNDIAL. (2018). *[Online] Consumo de Fertilizantes*. México: <https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.CON.FERT.ZS?locations=MX&view=chart>.
- Botha, T., Von Blottnitz, H. (2006). A comparison of the environmental benefits of bagasse-derived electricity and fuel ethanol on a life-cycle basis. *Energy Policy* 34, 2654-2661. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.12.017>

-
- BP. (2022). *Statistical Review of World Energy 71st edition*. Obtenido de <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- Dalton, G.J., Lewis, T. (2011). Metrics for measuring job creation by renewable energy technologies, using Ireland as a case study. *Renewable Sustainable Energy Review* 15, 2123-2133. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.015>
- Dahiya, A., Krivov, A. (2014). *Bioenergy: Biomass to biofuels*. West Lafayette, IN: Elsevier Science & Technology.
- Dahiya, A., Krivov, A. (2014). *Bioenergy: Biomass to biofuels*. Elsevier Science & Technology. doi:<https://doi.org/10.1016/C2012-0-06230-8>
- D'Amato, D., Droste, N., Allen, B., Kettunen, M., Lähtinen, K., Korhonen, J., Toppinen, A. (2017). Green, circular, bio economy: A comparative analysis of sustainability avenues. *J. Clean. Prod.* 168, 716-734.
- Delzeit, R., Kellner, U. (2013). The impact of plant size and location on profitability of biogas plants in Germany under consideration of processing digestates. *Biomass Energy* 52, 43 - 53.
- de Melo, T. C., Machado, G.B., Belchior, C.R.P., Colaco, M.J., Barros, J.E.M., de Oliveira, E.J., de Oliveira, D.G. (2012). Hydrous ethanol - gasoline blends - Combustion and emission investigations on a Flex - Fuel engine. *Fuel* 97, 796-804. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.018>
- Debnath D, Chandra Babu S. (2019). *Biofuels, bioenergy and food security. Technology, Institutions and Policies*. Academic Press, Elsevier. Obtenido de ISBN: 9780128039816
- Demirbas, A. (2009). Biofuels securing the planet's future energy needs. *Energy Convers Manag.* 50, 2239-2249. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.05.010>
- Denoia J, Di Leo N, Montico S, Bonel B. (2013). Análisis energético del empleo de riego complementario en la producción de maíz para etanol en la Cuenca del Arroyo Ludeña, Santa Fe. *Ciencias Agronómicas*. doi:<https://doi.org/10.14409/fa.v11i2.4555>
- Díaz-Trujillo, L.A., Nápoles-Rivera, F. (2019). Optimization of biogas supply chain in Mexico considering economic and environmental aspects. *Renewable Energy* 139, 1227 - 1240.
- Dunn JB, Mueller S, Ho-young K, Wang MQ. (2013). Land-use change and greenhouse gas emissions from corn and cellulosic ethanol. *Biotechnol Biofuels*. doi:<https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-51>
- Durbin, T., Miller, J.W., Younglove, T., Huai, T., Cocker, K. (2007). Effects of Fuel Ethanol Content and Volatility on Regulated and Unregulated Exhaust Emissions for the Latest Technology Gasoline Vehicles. *Environmental Science & Technology* 41, 4059-4064. doi:DOI: 10.1021/es061776o

-
- Elbehri, A., McDougall, R., Horridge, M. (2009). A global model for agriculture and bioenergy: application to biofuel and food security in Peru and Tanzania. *27th Conference of the Association of Agricultural Economists*. Beijing.
- Elizondo, A., Boyd, R. (2017). Economic impact of ethanol promotion in Mexico: A general equilibrium analysis. *Energy Policy* 101, 293-301.
- Economic Planning Unit, Prime Minister's Department. (23 de 04 de 2001). *Eight Malaysia Plan, 2001 - 2005*. Obtenido de Chapter 11 Energy: <https://www.epu.gov.my/en/economic-developments/development-plans/rmk/eight-malaysia-plan-2001-2005>
- E E & I.S, U. D. (2017). *Contracts for Difference*. London, UK. Obtenido de <https://www.gov.uk/government/publications/contracts-for-difference/contract-for-difference>
- EIA, U. (03 de 2022). *Anual Energy Outlook 2022*. Obtenido de <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/data/browser/#/?id=12-AEO2022&cases=ref2022&sourcekey=0>
- European Commission. (11 de December de 2018). Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. Belgium, Brussels. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>
- Fu H, Jiang D, Huang Y, Zhuang D, Ji W. (2014). Evaluating the marginal land resources suitable for developing bioenergy in Asia. *Adv Meteorol*. doi:<https://doi.org/10.1201/b18466-6>
- Gallagher, P.W., Brubaker, H., Shapouri, H. (2005). Plant Size: Capital cost relationship in the dry mill ethanol industry. *Biomass and Bioenergy* 28, 565-571.
- García, C.A., Manzini, F., Islas, J. (2010). Air emissions scenarios from ethanol as gasoline oxygenate in Mexico City Metropolitan Area. *Renewable and Sustainable Energy Review* 14, 3032-3040.
- Gaur, S., Reed, T.B. (1998). Thermal data for natural and synthetic fuels. *New York: Marcel Dekker.*, 258.
- Gebreegiabher, Z., Mekonnen, A., Ferede, T., Köhlin, G. (2014). Profitability of Biofuels Production: the case of Ethiopia. *Environment for Development Initiative*, 14 - 19.
- Goldwyn, D. (06 de 03 de 2020). *Atlantic Council*. Obtenido de A new energy strategy for the Western Hemisphere: <https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/report/a-new-energy-strategy-for-the-western-hemisphere/>
- Gobierno de México. (12 de 07 de 2019). Plan Nacional de Desarrollo 2019 - 2024. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 8-33. Obtenido de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5565599&fecha=12/07/2019#gsc.tab=0

-
- Governo Federal do Brasil, M. d. (09 de 12 de 2020). Brasil submits its National Determined Contribution under the Paris Agreement. Press Release 157. Brasil.
- Graham, L.A., Belisle, S.L., Baas, C. (2008). Emissions from light duty gasoline vehicles operating on low blend ethanol gasoline and E85. *Atmospheric Environment* 42, 4498-4516. doi:doi:10.1016/j.atmosenv.2008.01.061
- Guo T, Cibir R, Chaubey I, Gitau M, Arnold JG, Srinivasan R, Kiniry JR, Engel BA. (2018). Evaluation of bioenergy crop growth and the impacts of bioenergy crops on streamflow, tile drain flow and nutrient losses in an extensively tile-drained watershed using SWAT. *Sci Total Environ.* , <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.148>.
- Gutiérrez, E.C., Xia, A., Murphy, J.D. (2016). Can slurry biogas systems be cost effective without subsidy in Mexico? *Renewable Energy* 95, 22 - 30.
- Hahn-Haegerdal, B. (2006). Bioethanol - the fuel of tomorrow from the residues of today. *Trends Biotechnology*, 24(12), 549 - 556.
- Haider, S., Lindbrathen, A., Hägg, M. B. (2016). Techno-economical evaluation of membrane based biogas upgrading system: A comparison between polymeric membrane and carbon membrane technology. *Green Energy Environ.* 1, 222 - 234.
- Hassan M, Ding W, Shi Z, Zhao S. (2016). Methane enhancement through co-digestion of chicken manure and thermo-oxidative cleaved wheat Straw with waste activated sludge: a C/N optimization case. *Biores Technol.* doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.148>
- Hazell, P., Pachauri, R.K. (2020). Bioenergy and Agriculture: Promises and Challenges. *International Food Policy Research Institute. Sustainable solutions for ending hunger and poverty. Focus 14*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/5055925_Bioenergy_and_agriculture_promises_and_challenges
- Helmut H., Beringer T., Sribas C. B., Karl-Heinz E., Hoogwijk M. (2010). The global technical potential of bio-energy in 2050 considering sustainability constraints. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2010.10.007>
- Hoekman SK, Broch A, Liu X. (2018). Environmental implications of higher ethanol production and use in the US: a literature review. Part I. impacts on water, soil, and air quality. *Renew sustain Energy Rev.* doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.050>
- Huang, J., Yang, J., Msangi, S., Roselle, S., Weersink, A. (2012). Biofuels and the poor: Global impact pathways of biofuels on agricultural markets. *Food Policy* 37, 439-451. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.04.004>
- IMCO. (Junio de 2022). *IMCO MONITOR DE ENERGÍA*. Obtenido de <https://imco.org.mx/monitor/energia/>
- IMP, I. M. (2017). *Reporte de Inteligencia Tecnológica "Bioetanol"*. Ciudad de México.: Fondo de Sustentabilidad Energética.

-
- INEGI. (2016). *Anuario Estadístico y Geográfico de Guanajuato*. México: INEGI.
- INEGI. (2016). *Anuario Estadístico y Geográfico de Jalisco*. México: INEGI.
- INEGI. (2016). *Anuario Estadístico y Geográfico de Michoacán de Ocampo*. México: INEGI.
- INEGI. (2018). *Anuario Estadístico y Geográfico por Entidad Federativa*. México: INEGI.
- INEGI. (2019). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. México:
<https://www.inegi.org.mx/programas/ena/2019/>.
- INEGI, I. N. (2021). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Ciudad de México: INEGI.
- Iqbal HMN, Kyazze G, Keshavarz T. (2013). Advances in valorization of lignocellulosic materials by bio-technology: an overview. *Bio Resources Technol.*
doi:<https://doi.org/10.15376/biores.8.2.3157-3176>
- Irwin, S., Good, D. (10 de abril de 2013). *Freeze it - a proposal for implementing RGS2 through 2015*. Obtenido de Farmdoc Daily: <http://farmdocdaily.illinois.edu/2013/04/freeze-it-proposal-implementing-RFS2.html>.
- Islas, J., Manzini, F., Masera, O. . (2007). A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Energy* 32, 2306-2320.
- Jain S, Wolf IT, Lee J, Tong YW. (2015). A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. *Renew Sustain Energy*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.091>
- Janssen, R., Rutz, D.D. . (2010). Sustainability of biofuels in Latin America. . *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 1312 - 1320.
- Jiang D, Zhuang D, Fu J, Huang Y, Wen K. (2012). Bioenergy potential from crop residues in China: availability and distribution. *Renew Sustain Energy Rev.*
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.012>
- Jiang, Z., Dai, Y., Luo, X., Liu, G., Wang, H., Zheng, H., Wang, Z. (2017). Assessment of bioenergy development potential and its environmental impact for rural household energy consumption: a case study in Shandong, China. *Renewable Sustainable Energy Review* 67, 1153-1161. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.085>.
- Jonker, J.G.G., van der Hilst, F., Junginger, H.M., Cavalett, O., Chagas, M.F., Faaij, A.P.C. (2015). Outlook for ethanol production costs in Brazil up to 2030, for different biomass crops and industrial technologies. *Applied Energy* 147, 593-610.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.090>
- Klemm D, Schmauder HP, Heinze T. (2005). *Biopolymers Online: Biology, Chemistry, Biotechnology Applications*. . Wiley Online Library. doi:<https://doi.org/10.1002/3527600035.bpol6010>
- Kamm, B., Gruber, P. R., Kamm, M. (2010). *Biorefineries - Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions*. Berlin: Wiley-VCH. doi:ISBN: 978-3-527-32953-3

-
- Khan, I. et al. . (2017). Biogas as a renewable energy fuel . *A review of biogas upgrading, utilisation and storage* 150.
- Khan, I., Othman, M., Hashim, H., Matsuura, T., Ismail, A. F., Resaeidashtarzhandi, M., Azelee, I. W. (2017). Biogas as a renewable energy fuel - A review of biogas upgrading, utilisation and storage. *Energy Convers. Management* 150, 277 - 294.
- Kim HK, Parajuli PB, Filip SD. (2013). Assessing impacts of bioenergy crops and climate change on hydrometeorology in the Yazoo river basin, Mississippi. *Agric for Meteorol.* doi:https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.10.007
- King, B. (1981). *What is a SAM? A layman's guide to social accounting matrices*. Washington D.C. : The World Bank.
- Kroyan, Y., Wojcieszuk, M., Kaario, O. Larmi, M. (2022). Modelling the end-use performance of alternative fuel properties in flex-fuel vehicles. *Energy Conversion and Management* 269, 116080. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116080
- McCalmont JP, Hastings A, McNarmara NP, Richter GM, Robson P, Donnison IS, Clifton-Brown J. (2017). Environmental costs and benefits of growing Miscanthus for bioenergy in the UK. *GBC Bioenergy*. doi:https://doi.org/10.1111/gcbb.12294
- Müller, A., Weigelt, J., Götz, A., Schmidt, O., Lobos Alva, I., Matuschke, I., Ehling, U., Beringer, T. (2015). The Role of Biomass in the Sustainable Development Goals: A Reality Check and Governance Implications. *IASS Working Paper*. doi:10.2312/iass.2015.010
- Machado, P.G., Cunha, M., Walter, A., Faaij, A., Guilhoto, J.J.M. (2021). Biobased economy for Brazil: Impacts and strategies for maximizing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 139. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110573
- Maldonado, Rainier, Acosta, B., Osorio, J., Soto, D., Zeppieri, S. (2014). elección y diseño de un esquema de separación CH₄-CO₂ de una corriente de biogás. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 29(1), 115-126.
- Mallick D, Mahanta P, Moholkar VS. (2017). Co-gasification of coal and biomass blends: chemistry and engineering. *Fuel*. doi:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.05.006
- Mallick D, Mahanta P, Moholkar VS. (2018). Synergistic effects in gasification of coal/biomass blends: análisis and review. *Coal and Biomass Gasification*. doi:https://doi.org/10.1007/978-981-10-7335-9_19
- Madurai, E.R., Afridhis, S., Vijayaraghavan, R.R., Subramaniam, U., Nurnnavbi, M. (2020). SWOT analysis: A framework for comprehensive evaluation of drivers and barriers for renewable energy development in significant countries. *Energy Reports* 6, 1838-1864. doi:https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.07.007
- Mathews, J. A. (2009). From the petroeconomy to the bioeconomy: Integrating bioenergy production with agricultural demands. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*. doi:https://doi.org/10.1002/bbb.181

-
- Mayers, J., Davis, S., Leger, M. P. E. . (2020). *Análisis costo-beneficio del etanol anhidro como oxigenante en México* . Dallas, TX. : Turner, Mason & Company. Energy consulting & advisory. .
- Merlin Christy P, Gopinath LR, Divya D. (2014). A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms. *Renew Sustain Energy Rev.* doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.010>
- Michailos, S., Walker, M., Moody, A., Poggio, D. (2020). A techno-economic assessment of implementing power-to-gas systems based on biomethanation in an operating waste water treatment plant. *J. Environ. Chem. Eng.* .
- Miltner, M., Makaruk, A., Harasek, M. (2017). Review on available biogas upgrading technologies and innovations towards advanced solutions. *J. Clean Prod* 161, 1329-1337.
- Mitchell, C., Sawin, J.L., Pokharel , G.R., Dammen, D., Wang, Z., Fifita, S., Jaccard, M., Langniss, O., Lucas, H., Nadai, A. (2011). Policy, financing and implementation. *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, 865-950.
doi:<https://doi.org/10.1017/cbo9781139151153.015>
- Montingelli, M.E., Benyounis, K.Y., Quilty, B., Stokes, J., Olabi, A.G. (2016). Optimisation of biogas production from the macroalgae *Laminaria* sp. at different periods of harvesting in Ireland. *Applied Energy* 177, 671 - 682.
- Morales YL, Kafarov V, Ruíz F, Castillo EF. (2010). Modelamiento de los procesos de producción de bioetanol de primera y segunda generación a partir de caña de azúcar, etapas: preparación, molienda y clarificación. *Umbral Científico*.
doi:<https://doi.org/10.2307/j.ctvckq8c2.7>
- Mortimer, N.D., Ashley, A., Evans, A., Hunter, A.J., Shaw, V.L. (2008). Support for the review of the indirect effects of biofuels. . *Algal Research* 120.
- Mschandete A, Bjornsson L, Kivaisi AK, Rubindamayugi MST, Matthiasson B. (2006). Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste. *Renew Energy*.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.10.015>
- Mustafa, B. (2007). Progress in bioethanol processing. . *Energy Combustion Science*, 34(5), 551 - 573.
- Mwakaje, A. (2012). Can Tanzania realise rural development through biofuel plantations? *Energy for Sustainable Development* 16, 320-327. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.07.001>
- Myhre G, Shindell D, Bréon F-M, Collins W, Fuglestedt J, Huang J, Koch D, Lamarque J-F, Lee D, Mendoza B, Nakajima T, Robock A, Stephens G, Takemura T, Zhang H. (2013). Anthropogenic and natural radiative forcing. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
doi:<https://doi.org/10.1017/cbo9781107415324.018>

-
- Najafpour, M. M. , & Pashaei, B. (2012). *Photosynthesis: How and Why?. In (Ed.), Advances in Photosynthesis - Fundamental Aspects*. Rijeka, Croatia: IntechOpen.
doi:<https://doi.org/10.5772/39060>
- Naqvi, S.R., Jamshaid, S., Naqvi, M., Farooq, W., Niazi, M.B.K., Aman, Z., Zubair, M., Ali, M., Shahbaz, M., Inayat, A. (2018). Potential of biomass for bioenergy in Pakistan basen on present case and future perspectives. *Renewable Sustainable Energy Review* 81, 1247-1258. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.012>
- National Research Council , o. (2011). *Renewable Fuel Standard. Potential Economic and Environmental Effects of U.S. Biofuel Policy*. Washington D.C.: The National Academies Press. doi:doi: 10.17226/13105
- Olsson, O., Bailis, R. . (4 de 12 de 2019). *Stockolm Environment Institute*. Obtenido de Electrification and the bioeconomy: three sides of the story:
<https://www.sei.org/publications/electrification-bioeconomy-three-sides-to-the-story/>
- OECD - FAO . (2008). *Agricultural Outlook 2008 - 2017*. Paris: (Organization for Economic Cooperation and Development - Food and Agriculture Organization of the United Nations).
- Ohlrogge J, Allen D, Berguson B, DellaPena D, Shachar-Hill Y, Stymne S. (2009). Driving on Biomass. *American Association for the Advancement of Science*.
doi:<https://doi.org/10.1126/science.1171740>
- Ohlrogge J, Allen D, Berguson B, DellaPena D, Shachar-Hill Y, Stymne S. (2009). Driving on Biomass. *American Association for the Advancement of Science*.
doi:<https://doi.org/10.1126/science.1171740>
- Otero-Rambla MA, García R, Pérez MC, Martínez JA, Vasallo MC, Saura G, Bello D. (2009). Producción de bioetanol a partir de mezclas de jugos-melazas de caña de azúcar. *ICIDCA sobre derivados de la caña de azúcar*. doi:https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2011-graph16-es
- Ozturk M, Saba N, Altay V, Iqbal R, Hakeem KR, Jawaid M, Ibrahim FH. (2017). Biomass and bioenergy: an overview of the development potencial in Turkey and Malaysia. *Renewable Sustainable Energy*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.111>
- Pérez-Fernández, A., Venegas-Venegas, J.A. (2017). Producción de Bioetanol en México: Implicaciones Socio-económicas. *Revista Internacional de Administración y Finanzas* 10, 13-24. doi:ISSN: 2157-3182
- Polagye, B.L., Hodgson, T., Malte, P.C. (2007). An economic analysis of bio-energy options using thinnings from overstocked forests. *Biomass & Bioenergy*, 31, 105 - 125.
- Praveen Kumar R., Bharathiraja B., Rupam kataki, Moholkar, V.S. (2020). *Biomass valorization to Bioenergy*. Singapore: Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/978-981-15-0410-5>
- Prefier, C., Meyer, R. (2019). One concept, many options: How scientists in Germany think about the concept of bioeconomy. . *Sustainability* 11, 4253.

-
- Qin Z, Dunn JB, Kwon H, Mueller S, Wander MM. (2016.). Influence of spatially dependent, modeled soil carbon emission factors on life-cycle greenhouse gas emissions of corn and cellulosic ethanol. *GCB Bioenergy*. doi:<https://doi.org/10.1111/gcbb.12333>
- Quintero, J.A., Felix, E.R., Rincón, L.E., Crisspín, M., Baca, J.F., Khwaja, Y., Cardona, C.A. (2012). Social and Techno-economical analysis of biodiesel production in Perú. . *Energy Policy* 43, 427-435.
- Rasi, S., Veijanen, A., Rintala, J. (2007). Trace compounds of biogas from different biogas production plants. *Energy* 32, 1375-1380. doi:DOI: 10.1016/j.energy.2006.10.018
- Rendon-Sagardi, M.A., Sanchez-Ramirez, C., Cortes-Robles, G., Alor-Hernandez, G., Cedillo-Campos, M.G. (2014). Dynamic analysis of feasibility in ethanol supply chain for biofuel production in Mexico. *Applied Energy*, 123, 358 - 367.
- Rosas-Barajas, A., Aguilar-Ortega, A., Cornejo-. (2018). Análisis de las cadenas de suministro de bioetanol y biodiésel en México: Estudios de caso. . *Nova Scientia*, 10(1), 13 - 29.
- Rotunno, P., Lanzini, A., Leone, P. (2017). Energy and economic analysis of a water scrubbing based biogas upgrading process for biomethane injection into the gas grid or use as transportation fuel. *Renewable Energy* 102, 417 - 432.
- Rotuno, P., Lanzini, A., Leone, P. (2017). Energy and economic analysis of a water scrubbing based biogas upgrading process for biomethane injection into the gas grid or use as transportation fuel. *Renewable Energy* 102, 417-432.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.062>.
- Rutz, D., Janssen, R. (2007). *Biofuel technology handbook*. Munich: WIP Renewable Energies. Obtenido de www.biofuelmarketplace.com
- Schroder P, Beckers B, Daniels S, Gnadinger F, Maestri E, Marmiroli N, Mench M, Millan R, Obermeier MM, Oustriere N, Persson T, Poschenrieder C, Rineau F, Rutkowska B, Schmid T, Szulc W, Witters N, Saebo A. (2018). Intensify production, transform biomass to energy and novel goods and protect soils in Europe – a vision how to mobilize marginal lands. *SCI Total Environ*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.209>
- Salam, R.A., Amber, K.P., Ratyal, N.I., Alam, M., Akram, N., Gómez-Muñoz, C., García Márquez, F.P. (2020). An Overview on Energy and Development of Energy Integration in Major South Asian Countries: The Building Sector. *Energies* 13, 5776. doi:doi:10.3390/en13215776
- Salam, R.A., Amber, K.P., Ratyal, N.I., Akram, M.A.N., Gómez-Muñoz, C., García-Márquez, F.P. (2020). An Overview on Energy and Development of Energy Integration in Major South Asian Countries: The Building Sector. *Energies* 13, 5776.
doi:<https://doi.org/10.3390/en13215776>
- Sang, T., Zhu, W. (2011). China's bioenergy potential. *GCB Bioenergy* 3, 79-90. doi:Doi: 10.1111/j.1757-1707.2010.01064.x
- Sarkar N, Kumar GS, Banerjee S, Aikat K. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.045>

-
- Sasi, S., Veijanen, A., Rintala, J. (2007). Trace compounds of biogas from different biogas production plants. *Energy* 32. , 1375 - 1380.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.10.018>.
- Searchinger T, Heimlich R, Houghton RA, Dong F, Elobeid A, Fabiosa H, Tokgoz S hayes D, Yu T-H. (2008). Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emisiones from land-use change. *Science*. doi:<https://doi.org/10.1126/science.1151861>
- SENER - SIE. (2021). *Balance Nacional de Energía 2020*. Ciudad de México. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE_NACIONAL_ENERGI_A_0403.pdf
- SENER. (2017). *PROSPECTIVA DE GAS L.P. 2017-2031*. MEXICO: SENER.
- SENER. (2018). *Prospectiva de Gas Natural y Gas L.P. 2018 - 2032*. México.
- SENER. (07 de 02 de 2020). ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética. *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5585823&fecha=07/02/2020#gsc.tab=0
- SENER. (07 de 02 de 2020). Acuerdo por el que la SENER aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética. *Diario Oficial de la Federación* .
- SENER, S. d. (2013). *Análisis y propuesta para la introducción de etanol anhidro en las gasolinas que comercializa PEMEX*. Ciudad de México.
- SENER, S. d. (2018). *Lista de combustibles que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como los factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo*. Ciudad de México. Recuperado el 01 de 12 de 2020, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/302306/Lista_de_combustibles_2018.pdf
- SENER, S. d. (2020). *Sistema de Información Energética (SIE)*. Recuperado el 27 de 11 de 2020, de <http://sie.energia.gob.mx/>
- Shahzad, U., Elheddad, M., Svart, J., Gosh, S., Dogan, B. (2022). The role of biomass energy consumption and economic complexity on environmental sustainability in G7 economies. *Business Strategy and the Environment* 32, 781-801.
- Sharma, P., Sarker, B.R., Romagnoli, J.A. (2011). A decision support tool for strategic planning of sustainable biorefineries. *Comput Chem Eng*, 35(9), 1767 - 1781.
- Shimekit, B., Mukhtar, H. (2012). Natural Gas purification technologies - Major advances for CO2 separation and future directions. *Adv. Nat. Gas Technol.*, 237-269.

-
- Skovsgaard, L., Jacobsen, H.K. (2017). Economies of scale in biogas production and the significance of flexible regulation. *Energy Policy* 101, 77 - 89.
- Solís, A. (15 de enero de 2020). Suprema corte declara inconstitucional uso de etanol al 10% en gasolinas. *Forbes México*.
- Solomon, B.D., Bailis, R. (2014). *Sustainable Development of Biofuels in Latin America and the Caribbean*. New York: Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9275-7>
- Souza GM, Ballester MVR, de-Brito-Cruz CH, Chum H, Dale B, Dale VH, Fernandes ECM, Foust T, Karp A, Lynd L, MacielFilho R, Milanez A, Nigro F, Osseweijer P, Verdade LM, Victoria RL, Van der Wielen L. (2017). The role of bioenergy in a climate-changing world. *Environ Dev*. doi:<https://doi.org/10.1596/29452>
- Sovacool, B. (2011). An International comparison of four polycentric approaches to climate and energy governance. *Energy Policy* 39, 3832-3844. doi:<http://doi:10.1016/j.enpol.2011.04.014>
- Staffas, L., Gustavsson, M., McCormick, K. (2013). Strategies and policies for the bioeconomy and bio-based economy: An analysis of official national approaches. *Sustainability* 5, 2751-2769.
- Sun, Q., Li, H., Yan, J., Liu, L., Yu, Z., Yu, X. (2015). Selection of appropriate biogas upgrading technology - a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. *Renewable Sustainable Energy Review* 51, 521 - 532.
- Talebnia F, Karakashev D, Angelidaki I. . (2010). Production of biethanol from wheat Straw: an overview on pretreatment, hydrolisis and fermentation. *Bioresource Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.080>.
- Teymoori-Hamzehkolaei, F., Amjady, N. (2018). A techno-economic assessment for replacement of conventional fossil fuel based technologies in animal farms with biogas fueled CHP units. *Renewable Energy* 118, 602 - 614.
- Tiehm A, Nickel K, Zellhorn M, Neis U. (2001). Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization. *Water Res*. doi:[https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(00\)00468-1](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(00)00468-1)
- Toledo-Cervantes, A., Estrada, J. M., Lebrero, R., Muñoz, R. (2017). A comparative analysis of biogas upgrading technologies: photosynthetic vs physical/chemical processes. *Algal Research* 25, 237-243.
- Tock JY, Lai CL, Lee KT, Tan KT, Bhatia S. (2010). Banana biomass as potential renewable energy resource: a Malaysian case study. *Renew Sustain Energy*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.010>
- Union of Concerned Scientists. (2017). *he Promises and Limits of Biomethane as a Transportation Fuel*. JSTOR. Obtenido de <http://www.jstor.org/stable/resrep17287>.

-
- USDA - Foreign Agricultural Services; Global Agricultural Information Network. (25 de 02 de 2021). Implementation of RenovaBio - Brazil's National Biofuels Policy. Report Number: BR2021-0008. Sao Paulo, Brazil. Obtenido de https://usdabrazil.org.br/wp-content/uploads/2021/05/Implementation-of-RenovaBio-Brazils-National-Biofuels-Policy_Sao-Paulo-ATO_Brazil_02-25-2021.pdf
- Von Cruz M.V., Dierig D.A. (2015). International Policies on Bioenergy and Biofuels, Ind. Crop. Breed. *Bioenergy Bioproducts*, 1-444. doi:<https://dx.doi.org/10.1007/9>
- Wang M, Han J, Dunn JB, Cai H, Elgowainy A. (2012). Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use. *Environ Res Lett*. doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/045905>
- Ward AJ, Hobbs PJ, Holliman PH, Jones DL. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresour Technol.*, 7928-7940. doi:doi: 10.1016/j.biortech.2008.02.044.
- Wellinger, A., Murphy, J., Baxter, D. (2013). *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications, first edition*. . Woodhead Publishing. Doi: <https://doi.org/10.1533/9780857097415>.
- Williams AG, Audsley E, Sandars DL. (2010). Environment burdens of producing bread wheat, oilseed rape and potatoes in England and Wales using simulation and system modelling. . *Int J Life Cycle Assess.* , <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0212-3>.
- Wicke B, Smeets E, Watson H, Faaij A. (2011). The current bioenergy production potential of semi-arid and arid regions in sub-Saharan Africa. *Biomass Bioenergy*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.03.010>
- Willson, P., Lychnos, G., Clements, A., Michailos, S., Font-Palma, C., Elena, M., Pourkashanian, M., Howe, J. (2019). Evaluation of the performance and economic viability of a novel low temperature carbon capture process. *International J. Greenh. Gas Control* 86, 1-9.
- Wielgosiński, G., Łechtańska, P., Namiecińska, O. (2017). Emission of some pollutants from biomass combustion in comparison to hard coal combustion. *Environmental Science Journal of the Energy Institute*. doi:DOI:10.1016/J.JOEI.2016.06.005
- Wu Y, Liu S, Young CJ, Dahal D, Sohl TL, Davis B. (2015). Projection of corn production and stover-harvesting impacts on soil organic carbon dynamics in the US temperatura prairies. *Sci rep*. doi:<https://doi.org/10.1038/srep10830>
- Wu Y, Liu S. (2012). Impacts of biofuels production alternatives on wáter quantity and quality in the Iowa river basin. *Biomass Bioenergy*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.10.030>
- Wu Y, Zhao F, Liu S, Wang L, Qiu L, Alexandrov G, Jothiprakash V. (2018). Bioenergy production and environmental impacts. *Geosci Lett*. doi:<https://doi.org/10.1186/s40562-018-0114-y>
- Ye, S., Jiayang, C. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresur Technol.*, 1-11. doi:doi: 10.1016/s0960-8524(01)00212-7

- Yihua L, Chung-Li T, Guiping H. (2015). Is now a Good time for Iowa to invest in cellulosic biofuels? A real options approach considering construction lead times. *Int. J. Production Economics*. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.05.019
- Zafar, U., Ur Rashid, T., Khosa, A.A., Khalil, M.S., Rahid, M. (2018). An overview of implemented renewable energy policy of Pakistan. *Renewable Sustainable Energy Review 82*, 654-665. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.034
- Zah, R., Boni, H., Gauch, M., Hischer, R., Lehmann, M., Wager, P. . (2007). Live cycle assessment of energy products: Environmental impact assessment of biofuels. *EHT-EMPA, St. Gallen*. .
- Zameer, H., Wang, Y. (2018). Energy production systema optimization: Evidence from Pakistan. *Renewable Sustainable Energy Review 82*, 886-893. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.089
- Zhang C, Su H, Baeyens J, Tan T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renew Sustain Energy*. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038
- Zhang, Q., Hu, J., Lee, D.-J. . (2016). Biogas from anaerobic digestion processes: reserach updates. *Renewable Energy 98*, 108 - 119.
- Zhao YL, Dolat A, Steinberger Y, Wang X, Osman A, Xie GH. (2009). Biomass yied and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel. *Field Crops Res*, 55-64. doi:https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.10.006

APÉNDICE. GLOSARIO DE DIMENSIONES Y UNIDADES UTILIZADAS.

Con la finalidad de contar con las referencias correspondientes a las unidades utilizadas para dimensionar parámetros, se compilan en forma de glosario y se exponen según su clasificación:

Clasificación, Medición.	Parámetro	Dimensión de unidades	Descripción de unidades
Acidez / Alcalinidad	Potencial de Hidrógeno o pH. [Hace referencia a la cantidad de iones de Hidrógeno disueltos en una solución acuosa. La escala del pH es logarítmica con valores de 0 a 14. Un incremento de una unidad en la escala logarítmica	Adimensional	Adimensional

	equivale a una disminución diez veces mayor en la concentración de iones de hidrógeno. Con una disminución del pH, el agua se hace más ácida y con un aumento de pH el agua se hace más alcalina]		
Energía	PetaJoules [Unidad que se utiliza para medir energía, trabajo y calor]. Es equivalente a $1E^{15}$ Joules.	Joules	El Joule se puede definir como el trabajo necesario para producir un Watt de potencia durante 1 segundo, es decir, un Watt*segundo.
	Mega Watt hora. [Unidad utilizada para contabilizar la energía eléctrica destinada al consumo, equivalente a $1E^6$ Watts*hora.]	MWh	Es una unidad de energía expresada en forma de unidades de potencia respecto al tiempo, con lo que se da a entender que la cantidad de energía de la que se habla es capaz de producir y sustentar una cierta potencia durante un determinado tiempo.
Calor	Potencial Calorífico [Cantidad de calor que se genera, por unidad de masa o volumen de una sustancia, al oxidarse en forma completa]	MJ/m ³	Mega Joules [Unidad de trabajo o energía equivalente a $1E^6$ Joules] m ³ [Unidad de volumen

			equivalente a 1000 decímetros cúbicos o litros]
Potencia	<p>Potencia eléctrica [Se refiere a la cantidad de energía eléctrica entregada o absorbida por un elemento en un momento determinado]</p>	MW	<p>Mega Watts [unidad de potencia] equivale a $1E^6$ Watts. 1 Watt equivale a 1 Joule / segundo.</p>
Masa	<p>Mega gramos [Unidad de masa que se refiere a la cantidad de masa que define el peso de un cuerpo.] Es equivalente a $1E^6$ gramos; $1E^3$ kg; y a toneladas.</p>	Mg	<p>Mega gramos se utiliza como unidad de masa equivale a toneladas.</p>
	<p>Giga gramos [Unidad de masa que se refiere a la cantidad de masa que define el peso de un cuerpo.] Es equivalente a $1E^9$ gramos; $1E^6$ kg; y a un mil toneladas.</p>	Gg	<p>Giga gramos se utiliza como unidad de masa equivale a miles de toneladas.</p>
	<p>Tera gramos [Unidad de masa que se refiere a la cantidad de masa que define el peso de un cuerpo.] Es equivalente a $1E^{12}$ gramos; $1E^9$ kg; y a un millón de toneladas.</p>	Tg	<p>Tera gramos se utiliza como unidad de masa equivale a millones de toneladas.</p>