

# Estudio de los Procesos de Producción de Biogasolinas y Análisis de las Prestaciones Obtenidas en Motores

Autor: Rodrigo Astigarraga Pozo

Tutor: Miguel Torres García

Sevilla, 2019





Proyecto Fin de Carrera  
Grado de Ingeniería de Tecnologías Industriales

# **Estudio de los Procesos de Producción de Biogasolinas y Análisis de las Prestaciones Obtenidas en Motores**

Autor:

Rodrigo Astigarraga Pozo

Tutor:

Miguel Torres García

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Carrera: Estudio de los Procesos de Producción de Biogasolinas y Análisis de las Prestaciones  
Obtenidas en Motores

Autor: Rodrigo Astigarraga Pozo

Tutor: Miguel Torres García

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis maestros*



# Agradecimientos

---

Este trabajo ha sido posible gracias a la gran cantidad de documentos que la Escuela Técnica Superior de Ingenieros tiene acceso y cuya accesibilidad es otorgada a todos sus alumnos, con el importante desembolso económicos que eso supone. Es por ello, que le estoy agradecido. También me gustaría agradecerse a mi tutor Miguel Torres García, por permitirme y ayudarme a hacer este trabajo y sobre todo a mi familia por su apoyo.

*Rodrigo Astigarraga Pozo*

*Alumno de GITI*

*Sevilla, 2019*



# Resumen

---

En las últimas décadas el planeta está sufriendo muchos cambios debido al efecto de los gases de efecto invernaderos, como son el CO<sub>2</sub> o el NO<sub>x</sub>, alterando los hábitats en que vivimos y contaminando el espacio en el que habitamos. Además, a esto, hay que añadir la reciente crisis energética que, está poniendo en jaque a nuestra civilización, cuyos niveles de consumo parece ser insostenible.

Como solución a estos problemas, se están desarrollando a día de hoy diferentes alternativas que nos permitan emanciparnos de los combustibles fósiles. En este trabajo, se pretende recoger la situación actual de los tres procesos de obtención más importantes de bioetanol, para poder dar a conocer al lector en que consiste dichos procesos y cual es el futuro real que les espera. Así, como de exponer cuales son las consecuencias de emplear bioetanol como combustible en los vehículos del ciudadano de a pie, es decir, cuáles son las diferentes posibilidades de su uso y que parámetros obtienen los motores al emplearlo.



# Abstract

---

In the last decades, the planet Earth is suffering so many changes due to greenhouse gases, like CO<sub>2</sub> or NO<sub>x</sub>, which modify habitats where we inhabit and pollute our space. In addition, we have to consider the recent energetic crisis that is defeating our civilization, whose levels of consume seem to be unavailable.

As solution for these issues, nowadays, it is being developing several alternatives that allow us be fossil fuels freed. This survey pretends to gather information about the current ethanol productions, showing the reader how this processes work and what is their future. Also, this survey wants to expose which are the consequences of using bioethanol on vehicles, in other words, what are its different use ways and what performance engines acquires.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvi</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>Notación</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>11</b>
1.1 <i>Crisis Energética y Medio Ambiental</i>	11
1.2 <i>Producción y consumo de Bioetanol Mundial</i>	13
1.3 <i>Características del Etanol</i>	17
1.4 <i>Bioetanol Como Combustible</i>	18
1.5 <i>Bioetanol Como Aditivo</i>	18
<b>2 Los Bioetanoles</b>	<b>20</b>
2.1 <i>Bioetanol de 1ª Generación</i>	21
2.1.1 Introducción	21
2.1.2 Materias Primas Para la Primera Generación de Bioetanol	21
2.1.3 Caña de Azúcar	22
2.1.4 Remolacha Azucarera	23
2.1.5 Maíz	23
2.1.6 Proceso de Producción	24
2.1.7 El Nexo Agua-Comida-Tierra de la Primera Generación	26
2.1.8 Integración de la Primera-, Segunda-, y Tercera Generación en las Biorefinerías	29
2.1.9 Conclusión de la Primera Generación	30
2.2 <i>Bioetanoles de 2ª Generación</i>	30
2.2.1 Introducción	30
2.2.2 Bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica	31
2.2.3 Composición y Estructura Lignocelulósica	32
2.2.4 Utilización de los Azúcares Hexosa y Pentosa en Diferentes Microorganismos	34
2.2.5 Proceso de Obtención de Bioetanol de Segunda Generación	35
2.2.6 Metodologías Actuales Adoptadas para la Producción de Bioetanol a Partir de Biomasa	

Lignocelulósica.	38
2.2.7 El Futuro de la Producción de la Segunda Generación de Bioetanol	39
2.2.8 Conclusión	40
<b>2.3 Bioetanoles de 3ª Generación</b>	<b>41</b>
2.3.1 Introducción	41
2.3.2 Visión General de la Biomasa de Microalgas	42
2.3.3 Microalgas y Cyanobacteria para Biocombustibles	44
2.3.4 Ciclo de Calvin y Tilacoides	45
2.3.5 Producción de Bioetanol a partir de Hidrólisis y Fermentación	47
2.3.6 Cultivo de microalgas y acumulación de carbohidratos	51
2.3.7 Simultánea sacarificación y fermentación (SSF)	52
2.3.8 Producción de etanol a partir de la fermentación oscura	52
2.3.9 Bioetanol a partir de fotofermentación	53
2.3.10 Economía, viabilidad comercial y perspectivas de futuro de la tercera generación de bioetanol	53
2.3.11 Conclusión	54
<b>2.4 Conclusión Bioetanoles</b>	<b>54</b>
<b>3 Prestaciones en los motores</b>	<b>56</b>
<b>3.1 Introducción</b>	<b>57</b>
3.1.1 Coches de Gasolina	59
3.1.2 Propiedades de la Gasolina	60
3.1.3 Aplicación de los Biocombustibles en el Transporte	62
3.1.4 Propiedades típicas de los combustibles	62
3.1.5 Bioalcoholes: Metanol, Etanol, Butanol	63
<b>3.2 Aplicaciones del Etanol como Combustible en Vehículos</b>	<b>64</b>
3.2.1 Mezcla Directa de Etanol y Gasolina	64
3.2.2 Como Aditivo en las Gasolinas: ETBE	73
3.2.3 Alta Concentración de Etanol (E85)	74
3.2.4 Mezcla de Etanol con Diésel (“E-Diesel”)	77
3.2.5 Motores Diésel con Alta Concentración de Etanol	77
3.2.6 Conclusión	78
<b>4 Conclusión Global</b>	<b>79</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>80</b>
<b>Glosario</b>	<b>84</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1: Producción mundial de bioetanol en 2017.	14
Tabla 2: Consumo por países de la Unión Europea en el año 2017 en tep	16
Tabla 3: Consumo de biocombustibles para el transporte en 2016 y 2017 de los principales socios comerciales externos a la Unión Europea	16
Tabla 4: Características del etanol.	17
Tabla 5: Principales materias primas para etanol.	22
Tabla 6: Consumo de energía, agua, área y equivalente en número de personas alimentadas en el 2013 de los principales países productores.	27
Tabla 7: Composición de distintas biomásas lignocelulósicas	32
Tabla 8: Análisis de la producción a partir de materiales lignocelulósicos	40
Tabla 9: Composición bioquímica de microalgas (% base materia seca)	43
Tabla 10: Enzimas empleadas en la degradación de las paredes de las células de las microalgas	50
Tabla 11: Comparación hidrólisis ácida y enzimática	51
Tabla 12: Contenido de carbohidratos de algunas microalgas y cianobacterias	52
Tabla 13: Especificaciones Gasolinas	61
Tabla 14: Propiedades típicas de los combustibles	63
Tabla 15: Propiedades Bioalcoholes	63
Tabla 16: Especificaciones técnicas del motor y dispositivos de prueba	65
Tabla 17: Propiedades del etanol	66
Tabla 18: Propiedades propuestas por el CEN	75
Tabla 19: Comparación emisiones con E85 y E0 combustibles	76

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1: Demanda energética frente a PIB	11
Figura 2: Gigatoneladas de CO <sub>2</sub> emitidas desde 1960 hasta 2018	12
Figura 3: Consumo de energía primaria en 2015 en España.	12
Figura 4: Dependencia energética en España en 2016	13
Figura 5: Consumo de biocombustibles para el transporte en la Unión Europea en kilotoneladas de petróleo equivalente.	15
Figura 6: Reacción de hidrólisis de sacarosa y fermentación	25
Figura 7: Esquema de producción de bioetanol a partir de caña de azúcar	26
Figura 8: Bioetanol producido, agua y tierra consumida, equivalente de alimentos.	28
Figura 9: Porcentajes de extensión de cultivo, agua consumida y producción de bioetanol.	29
Figura 10: Comparación del diagrama de flujos de la producción de bioetanol, a partir de distintas biomásas.	31
Figura 11: Morfología de la pared de la célula vegetal.	33
Figura 12: Componentes estructurales.	34
Figura 13: Comparación de las vías de utilización de los azúcares hexosa (glucosa) y pentosa (xilosa y arabinosa) por diferentes microbios.	35
Figura 14: Etapas del proceso de obtención del bioetanol de segunda generación a partir de biomasa lignocelulósica.	36
Figura 15: Principales procesos de obtención de energía a partir de biomasa de algas	42
Figura 16: Rutas de la producción de etanol a partir de microalgas	44
Figura 17: Producción de biocombustibles a partir de microalgas.	45
Figura 18: Esquema cloroplasto y tilacoides	46
Figura 19: Ciclo de Calvin	47
Figura 20: Esquema de la producción de almidón en microalgas.	48
Figura 21: Esquema general para el pretratamiento de la tercera generación	49
Figura 22: Demanda energía final del transporte según el escenario 2DS	58
Figura 23: Demanda de energía final en el transporte por biocombustible (2DS)	59
Figura 24: Diagrama esquemático de la instalación	65
Figura 25: Par frente a revoluciones por minuto	66
Figura 26: Potencia frente a velocidad (rpm)	67
Figura 27: Consumo específico frente a rpm	68
Figura 28: Eficiencia efectiva frente a rpm	68
Figura 29: Eficiencia volumétrica frente a rpm	69
Figura 30: Equivalencia Combustible-Aire ( $\Phi$ ) frente a rpm	70
Figura 31: Emisiones de CO frente a rpm	71
Figura 32: Emisiones de CO <sub>2</sub> frente a rpm	71
Figura 33: Emisiones de hidrocarburos frente a rpm	72

Figura 34: Emisiones de NO <sub>x</sub> frente a rpm	73
Figura 35: Emisiones de NO <sub>x</sub> del diésel convencional y ED95	78
Figura 36: Emisiones de partículas del diésel convencional y ED95	78

# Notación

---

ppm	Partes por millón
L	Litros
%m/m	Concentración porcentual en masa
mol	Moles
ha	Hectáreas
log	Logaritmo
atm	Atmósferas
KPa	Kilo Pascales
C.C	Pulgadas cúbicas
M <sup>3</sup>	Metros Cúbicos
KJ	Kilo Julios
cSt	Centistokes
Nm	Newton por metro
mm	Milímetros
kW	Kilo watios
° C	Grados centígrados
Cm <sup>3</sup>	Centímetros Cúbicos
Cm	Centímetros
rpm	Revoluciones por minuto
v/v %	Porcentaje volumen a volumen
Kg	Kilogramos
tep	Toneladas equivalentes de petróleo
Mtep	Megatoneladas equivalentes de petróleo
:	Tal que
<	Menor o igual
>	Mayor o igual
lge	Litro de gasolina equivalente
↔	Si y sólo si



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Crisis Energética y Medio Ambiental

Hoy en día una de las mayores preocupaciones mundiales son la crisis energética y el aumento de la contaminación ambiental. El consumo energético tiende a aumentar cada año a medida que crece la población mundial, lo cual se puede observar en la Figura 1.1, en la que se aprecia el aumento lineal del consumo energético a medida que se incrementa el Producto Interior Bruto (PIB o GDP por sus siglas en inglés, Gross Domestic Product) tanto en países en desarrollo como China e India o en países altamente desarrollados como Estados Unidos y Japón.

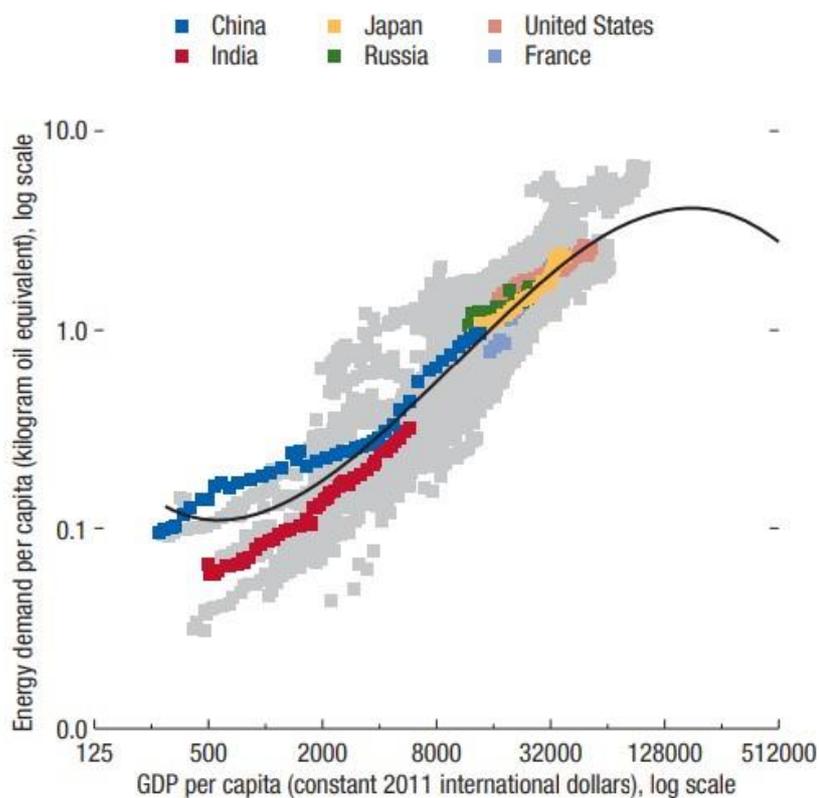


Figura 1: Demanda energética frente a PIB

Fuente: World Economic Outlook (2018)

A fecha de 2015, el 86 % del consumo de energía primaria a nivel mundial es dependiente de los combustibles fósiles, mientras que tan sólo un 2,8 % deriva de energías renovables. En el sector del transporte la dependencia se ve incrementada a la cifra del 98% de los combustibles derivados del petróleo. Según el World Energy Outlook (WEO) 2018, el gas natural y el petróleo seguirán respondiendo a una parte fundamental de la demanda energética mundial en 2040. Debido a este hecho, el Departamento de Energía de la Oficina del Programa de Biomasa de Estados Unidos ha desarrollado una iniciativa en el que pretende que el 30% de la gasolina sea sustituida por biocarburantes para 2030. De la misma forma, en la Unión Europea se ha desarrollado un programa en el que una cuarta parte de los carburantes utilizados en transporte deben ser derivados de biocarburantes para 2030 (Laura Benítez Casanova, 2017)

Por otro lado, se tienen los problemas medioambientales que causan la utilización de estas fuentes fósiles de energía, según la Agencia Internacional de Energía (IEA), la creciente demanda de energía de combustibles fósiles a jugado un papel clave en el aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> (que es esencialmente producido a partir de procesos de combustión), las que eran prácticamente cero antes de la revolución industrial. A pesar de todas las nuevas políticas anunciadas por los gobiernos para reducir estas emisiones, en el año 2018 se alcanzó

un récord histórico en las emisiones de CO<sub>2</sub> superando la barrera de los 35 gigatoneladas. La Figura 2 muestra las emisiones globales de CO<sub>2</sub> a partir de combustibles fósiles, dividido en emisiones de China (rojo), India (Amarillo), Estados Unidos (azul claro), Unión Europea (azul oscuro) y el resto del mundo (gris).

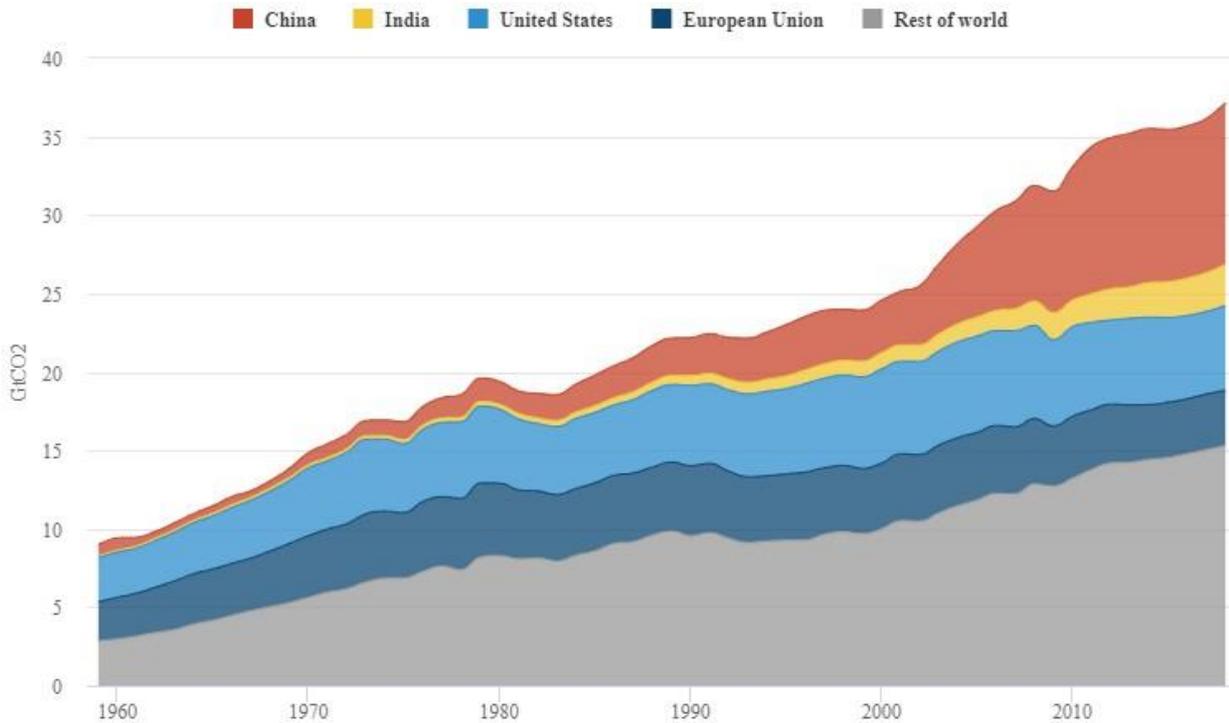


Figura 2: Gigatoneladas de CO<sub>2</sub> emitidas desde 1960 hasta 2018

Fuente: Fossil-fuel emissions in 2018 increasing at fastest rate for seven years | Carbon Brief

Este ascenso en las emisiones de contaminación, posteriormente se traduce en un aumento del número de muertes prematuras debidas a una escasa calidad del aire. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha llegado a estimar que 3 millones de personas mueren cada año por la contaminación ambiental (Hannah Ritchie and Max Roser, 2019)

A todos estos problemas hay que añadir además la naturaleza finita de estos combustibles fósiles, cuyas reservas se ven centradas en la península arábiga, Venezuela y países de África como Nigeria. En cuanto a la estimación acerca de la duración de estas reservas, varían mucho dependiendo de la fuente de información, llegando a oscilar las previsiones desde los 40 años a 700 años en determinados casos.

A nivel nacional, el consumo energético de España se sustenta primordialmente en las fuentes de energía de origen fósil, fundamentalmente petróleo y gas natural.

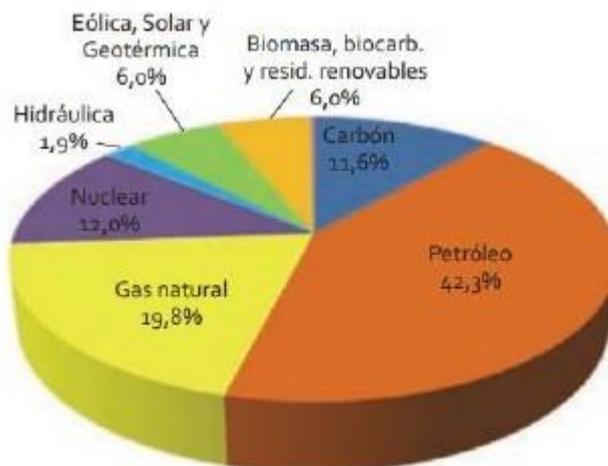


Figura 3: Consumo de energía primaria en 2015 en España.

Fuente: APPA, 2015

La dependencia energética de España se sitúa en el 72,3%, muy por encima de la Unión Europea (53,4%), según los últimos datos publicados por el antiguo Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital en su Balance Energético 2015. Esto supone que, en España, del total de energía consumida, solamente el 27,2% corresponde a energía autóctona (Figura 4). Sin tener en cuenta la energía nuclear, que la UE considera autóctona independientemente de cuál sea el origen del combustible empleado, la dependencia energética de nuestro país se sitúa cerca de veinte puntos por encima de la media europea. Si la UE tiene como uno de sus principales objetivos reducir la dependencia energética del exterior, España debería hacer un mayor esfuerzo que el resto de Europa por reducir esa dependencia, que limita nuestro desarrollo económico (APPA, 2015).

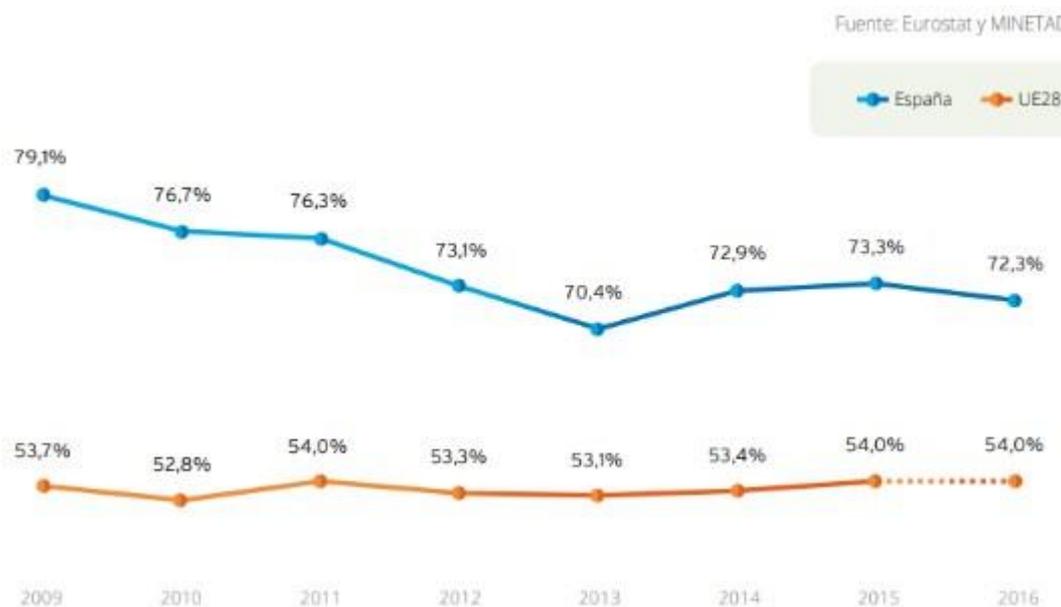


Figura 4: Dependencia energética en España en 2016

Fuente: Eurostat y MINETAD

Aquí es donde tiene lugar la aparición del bioetanol como una posible alternativa para reducir y/o reducir el consumo de crudo, siendo a día de hoy el biocombustible con mayor producción mundial.

## 1.2 Producción y consumo de Bioetanol Mundial

Los dos principales productores mundiales son Estados Unidos y Brasil (Tab.1), que juntos produjeron en el año 2017 el 85% del total de etanol (Renewable Fuels Association, RFA). A lo largo de los últimos años, la tendencia en la producción mundial de etanol ha ido en aumento, en concreto, Estados Unidos ha pasado de producir 6.521 millones de galones en 2007 a los 15.845 del año 2017.

Estas cantidades de etanol hacen referencia a la producción de este biocombustible de primera generación, donde se aprovecha el contenido en almidón de productos agrícolas. En Estados Unidos la fuente principal es el almidón del maíz, en cambio, la materia prima empleada en Brasil para la obtención de este biocombustible es la sacarosa proveniente de la caña de azúcar. Para la producción de bioetanol también se emplean otros cultivos como el sorgo, la remolacha o el trigo. La utilización de productos alimentarios con fines energéticos ha generado gran controversia, como es la reducción de dichos productos debido a que el sector energético tiene un poder de consumo mayor que el alimentario, provocando un aumento de los precios de estos productos (Celia Hernández Galán, 2017)

En octubre de 2014 el Consejo Europeo acordó un nuevo marco de trabajo para el clima y la energía, incluyendo un amplio número de objetivos y políticas para el período entre 2020 y 2030, con la intención de ayudar a la UE a conseguir una mejor competitividad, seguridad y sistema de energía sostenible para alcanzar las reducciones de gases de efecto invernadero en 2050. Algunos de los objetivos para el 2030 son disminuir en un 40% las emisiones de efecto invernadero con respecto a 1990 y al menos una producción final del 27%

de energía renovable, con una revisión en el 2020 para aumentar al 30% (2030 Energy Strategy - Energy - European Commission).

Región	Millones de Galones	% Producción Mundial
Estados Unidos	15800	58%
Brasil	7060	27%
Unión Europea	1415	5%
China	875	3%
Canadá	450	2%
Tailandia	395	1%
Argentina	310	1%
India	280	1%
Resto del Mundo	465	2%

Tabla 1: Producción mundial de bioetanol en 2017.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RFA (2017)

Además, durante el 2015, en la Unión Europea se introdujo un límite de 7% sobre la energía renovable procedente de cultivos de alimentos y forrajes en el sector del transporte. Para el año 2020, los carburantes a partir de cultivos agrícola no deberían sumar más del 7% del consumo energético del transporte, con el objetivo de liberar las tierras de cultivo para alimentos y recortar las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por el aumento del uso de tierra para producir biocombustibles (OCDE/FAO, 2016).

Para alcanzar estos objetivos sin provocar el riesgo de alteración de precios de los productos alimentarios o pérdida de biodiversidad se hace necesaria la implementación de la producción de combustibles de segunda generación, aquellos que aprovechan la lignocelulosa de productos de desecho. Como materias primas para los biocombustibles de segunda generación pueden encontrarse residuos agrícolas (paja de trigo, bagazo de azúcar, rastrojo de maíz, etc.), maderas (álamo, pino, abeto, etc.), residuos celulósicos y residuos sólidos urbanos (Cardona y Sánchez 2007).

El consumo de biocombustibles en Europa tuvo un gran aumento entre los años 2002 y 2012, sin embargo, se había producido 3 años de estabilidad entre 2014 y 2016, la cual se ha visto interrumpida ya que los niveles de consumo de bioetanol en Europa para el transporte se han visto incrementados en un 9,2% en el período 2016-2017, habiendo alcanzado las 15.5 mega toneladas de petróleo equivalente (Mtep), como se puede observar en la Figura 5.

Cabe destacar que de entre los biocombustibles consumidos, el biodiésel es el más reclamado representando el 80,7% del pastel de biocombustibles consumidos (Tabla 2), seguido del bioetanol con un 18,4% y finalizando con un 0,9% el biogás. El gran papel que tiene el biodiésel se debe principalmente a que el sector transporte europeo está formado mayoritariamente por vehículos con motores diésel. (Euroserv'ER 2018).

Francia es el primer país consumidor de la Unión Europea, con 3 335 000 toneladas equivalentes de petróleo (tep), superando al segundo (Alemania) en 726 803 tep. Cabe destacar que en dicho país el consumo de bioetanol se ha visto incrementado en un 13,7% en 2017 con respecto a 2016, debido a la prohibición de los motores diésel y la intención de cumplir los objetivos del 20 20 20. También resaltar el gran incremento de consumo de España que ha pasado a colocarse como el cuarto país consumidor, aumentando en un 31% su consumo entre 2016 (981 286 tep) y 2017 (1 287 672) (Euroserv'ER 2018).

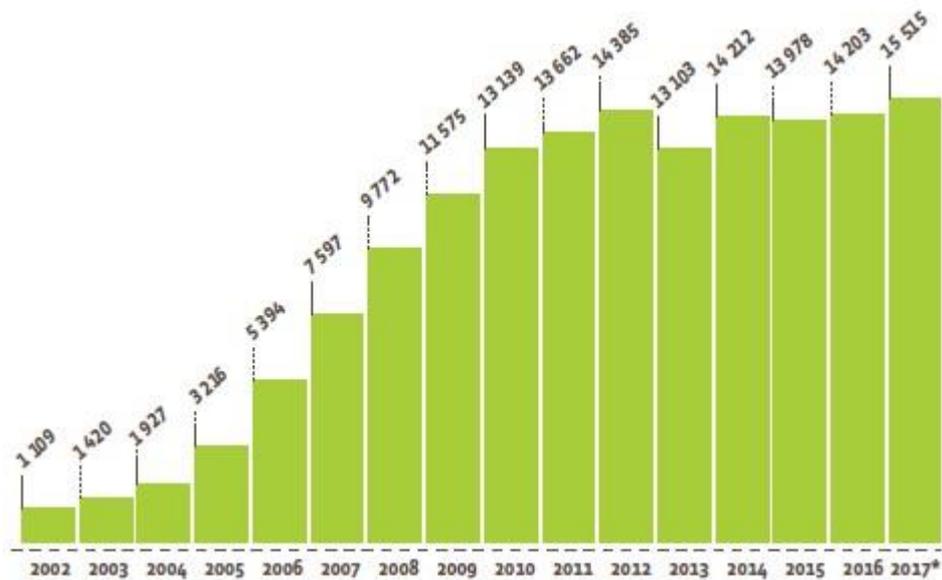


Figura 5: Consumo de biocombustibles para el transporte en la Unión Europea en kilotoneladas de petróleo equivalente.

Fuentes: Datos desde 2002 hasta 2015 Eurostat 2018, datos desde 2016 hasta 2017 EurObserv'ER 2018 \*Estimado.

En cuanto al consumo internacional, fuera de la Unión Europea, podemos ver en la Tabla 3 que las principales naciones consumidoras son Estados Unidos y Brasil, coincidiendo como principales países productores. La tendencia a aumentar el consumo de bioetanol también se encuentra en estos países, aunque el consumo de biodiésel a su vez se ve incrementado, a excepción de Estados Unidos y China.

Country	Bioethanol	Biodiesel***	Biogas fuel	Total consumption	% certified sustainable
France	539 000	2 796 000	0	3 335 000	100.0%
Germany**	730 868	1 843 890	33 438	2 608 197	99.0%
Sweden	104 185	1 431 141	111 111	1 646 436	100.0%
Spain	139 597	1 148 074	0	1 287 672	99.0%
Italy	32 890	1 027 458	0	1 060 348	100.0%
United Kingdom	385 791	548 100	0	933 891	100.0%
Austria	53 860	618 420	358	672 638	99.9%
Poland	159 583	421 514	0	581 097	100.0%
Belgium	90 284	374 702	0	464 985	100.0%
Finland	87 059	303 764	2 603	393 427	99.3%
Czech Republic	75 141	244 077	0	319 218	100.0%
Netherlands	128 953	174 143	0	303 095	98.2%
Hungary	64 058	199 317	0	263 375	100.0%
Romania****	81 300	175 900	0	257 200	100.0%
Portugal	2 924	252 172	0	255 096	100.0%
Denmark	44 000	173 000	0	217 000	100.0%
Bulgaria	38 690	156 722	0	195 413	100.0%
Slovakia	39 338	136 094	0	175 432	100.0%
Ireland	30 168	130 104	0	160 272	100.0%
Greece	0	151 000	0	151 000	100.0%
Luxembourg	6 688	104 686	0	111 374	100.0%
Lithuania	7 356	53 597	0	60 953	91.5%
Slovenia	0	35 161	0	35 161	100.0%
Latvia	7 971	2 895	0	10 866	100.0%
Cyprus	0	8 570	0	8 570	100.0%
Malta	0	3 988	0	3 988	100.0%
Estonia****	2 600	0	0	2 600	100.0%
Croatia	0	324	0	324	100.0%
<b>Total EU 28</b>	<b>2 852 305</b>	<b>12 514 812</b>	<b>147 511</b>	<b>15 514 629</b>	<b>99.7%</b>

Tabla 2: Consumo por países de la Unión Europea en el año 2017 en tep

Fuente: Eurobserv'ER 2018

Pays	2016		2017	
	Bioethanol	Biodiesel	Bioethanol	Biodiesel
USA	27 483 752	6 260 506	28 933 110	5 870 163
Brazil	13 234 917	3 010 563	12 912 139	3 408 275
China	1 790 687	348 592	1 992 739	285 211
Canada	1 436 085	190 141	1 518 421	198 063
Japan	382 889	9 507	449 566	9 507
Norway*	31 360	317 700	32 516	473 324
Turkey*	46 080	56 700	49 920	60 300

\* Data were expressed in tons and have been converted with the following coefficient : 1 ton of bioethanol = 0,66 toe and 1 ton of biodiesel = 0,86 toe.  
Sources : Eurostat, USDA Foreign Agricultural Service, U.S. department of energy, EIA

Tabla 3: Consumo de biocombustibles para el transporte en 2016 y 2017 de los principales socios comerciales externos a la Unión Europea

Fuente: Eurobserv'ER 2018

### 1.3 Características del Etanol

El etanol es un compuesto químico conocido como alcohol etílico, es un alcohol que se presenta en condiciones normales de presión y temperatura como un líquido incoloro e inflamable con un punto de ebullición de 78,4 °C.

En la Tabla 4 podemos ver sus características físicas, químicas y termoquímicas.

De los datos anteriores se puede deducir que es un material inflamable por lo que es recomendable mantenerlo alejado del calor, chispas o fuentes de ignición. Además, en caso de generarse su ignición, los vapores no deberán estar en zonas cerradas ya que se pueden originar mezclas explosivas e inflamables con el aire a temperatura ambiente.

#### PROPIEDADES FÍSICAS

<b>Apariencia</b>	Incoloro
<b>Densidad</b>	789 kg/m <sup>3</sup>
<b>Masa Molecular</b>	46.07 g/mol
<b>Punto de Fusión</b>	-114 °C
<b>Punto de Ebullición</b>	78 °C
<b>Temperatura Crítica</b>	241 °C
<b>Presión Crítica</b>	63 atm
<b>Estructura</b>	Estructura cristalina monoclinico
<b>Viscosidad</b>	1.074 mPa a 20 °C
<b>Índice de refracción</b>	1.3611
<b>PROPIEDADES QUÍMICAS</b>	
<b>Acidez</b>	15.9 pKa
<b>Solubilidad</b>	Miscible
<b>PROPIEDADES TERMOQUÍMICAS</b>	
<b>Entalpía de Vaporización</b>	-235.3 KJ/mol
<b>Entalpía de líquido</b>	-277.6 KJ/mol

Tabla 4: Características del etanol.

Fuente: EcuRed

## 1.4 Bioetanol Como Combustible

Se entiende por biocombustibles, a aquellos combustibles que se han obtenido a partir de biomasa, es decir, empleando cualquier tipo de materia orgánica cuyo origen provenga del proceso biológico de organismos recientemente vivos, como pueden ser plantas o sus desechos metabólicos como el estiércol. En el caso de la grasa animal, también se puede ser utilizada como materia prima para los biocombustibles, lo cual es menos habitual. Por lo tanto, el término de biocombustible sirve para denominar al grupo de productos energéticos y materias primas renovables que se originan a partir de materia prima de origen orgánico. Incluyen el bioetanol, el biobutanol, el biodiésel, los aceites vegetales, el biometanol, los aceites de pirólisis, e biogás y el biohidrógeno (Dermirbas, 2009).

Para que la producción de un biocombustible sea viable, tiene que cumplir los siguientes requisitos: suponer beneficios ambientales con respecto a los combustibles fósiles y competir con ellos económicamente, tener una producción suficiente como para satisfacer la demanda, y producir una ganancia energética en comparación con la invertida en el proceso de producción (Orlando et Chaparro, 2009).

La historia de los biocombustibles se inicia con la idea de emplear aceites vegetales como combustible para motores de combustión interna. Fue el Dr. Rudolf Diesel quien desarrolló en el año 1885 el primer motor diésel, previsto para aceites vegetales. Posteriormente, en el año 1908, Henry Ford diseñó el primer vehículo para el uso de etanol, una variante del modelo T, que estaba pensado para ser utilizado en las granjas, de forma que sus propios dueños pudieran producir el alcohol a partir de la fermentación del maíz. A principios de los años veinte, la empresa Estándar Oil empleó en sus motores, una mezcla de etanol y gasolina. Sin embargo, el alto coste del maíz, su almacenamiento, y la irrupción de petróleo a un precio más económico, hicieron que hasta el 1938 no se emplease por primera vez como biocombustible en el transporte público (J. Manuel García Camús y J. Ángel García Laborda, 2006).

Actualmente, para que los vehículos de explosión puedan funcionar con etanol es necesaria una serie de modificaciones, que incluyen el depósito, las conducciones de combustible, los inyectores, el sistema informático de gestión del motor y el sistema anti-sifón. En los últimos años se han desarrollado una serie de vehículos capaces de funcionar tanto con gasolina como con etanol o una mezcla de ambos. Se denominan Flexible Fuel Vehicles (FFV). Estos automóviles disponen de un sensor que detecta la relación etanol/gasolina y en función de la mezcla ajustan la carburación del motor. La utilización del etanol modifica la mezcla de aire y combustible tratando de mantener la potencia y el consumo del automóvil en un valor óptimo (J. Manuel García Camús y J. Ángel García Laborda, 2006).

El etanol, como combustible único, es utilizado principalmente en Brasil y Argentina. Su uso con temperaturas inferiores a 15°C puede dar lugar a problemas de encendido, para que esto no ocurra el método más común de solucionarlo es añadirle una pequeña parte de gasolina. La mezcla que se usa más ampliamente es el E85 que está compuesto de un 85% de etanol y un 15% de gasolina. Desafortunadamente el etanol contiene menos energía por litro que las gasolinas, con lo que su rendimiento es menor, pudiendo llegar hasta un 30% menos, principalmente en modelos antiguos, cuando se utiliza el E85. Saab produce el modelo 95 turboalimentado que asegura una mayor economía que los motores de gasolina, utilizando una mayor relación de compresión, ofreciendo rendimientos semejantes a sus equivalentes con combustibles convencionales. El etanol tiene un octanaje mucho mayor que la gasolina –en torno a 110- lo que hace que no se quemara de forma tan eficiente en los motores convencionales. El uso continuado de combustibles con una alta proporción de etanol, como el E85, produce corrosiones en el metal y en las piezas de goma. (J. Manuel García Camús y J. Ángel García Laborda, 2006).

## 1.5 Bioetanol Como Aditivo

Otra alternativa para el uso del bioetanol como combustibles es transformarlo para su utilización en aditivo de la gasolina, en lugar de como su sustituto. Con la introducción de las gasolinas sin plomo, necesarias por el uso de catalizadores para la disminución de las emisiones nocivas, se vio afectado el número de octano de la gasolina. Para recuperar el octanaje y reducir las emisiones contaminantes se añadieron aditivos oxigenantes tales como el metanol, etanol, tercbutil alcohol (TBA) o el metil-tercbutil éter (MTBE). En los últimos años el etil-tercbutil éter (ETBE) se está imponiendo sobre los otros aditivos por ser sus emisiones de hidrocarburos

menos tóxicas, debido a que el acetaldehído es mucho menos tóxico que el formaldehído, además de poderse obtener a partir de recursos renovables en lugar del petróleo, como el MTBE. Además, el ETBE es mucho menos soluble en agua que el MTEB, lo que disminuye la posibilidad de contaminar las aguas. El ETBE presenta dos grandes ventajas sobre el bioetanol, como son su menor afinidad con el agua y una presión de vapor más adecuada que el alcohol, además de no requerir modificaciones en los motores actuales. Por estas razones su uso se está imponiendo en Europa, prevaleciendo sobre la mezcla con la gasolina. En España todo el etanol dedicado a la automoción es convertido a ETBE (J. Manuel Gacía Camús y J. Ángel García Laborda, 2006).

## 2 LOS BIOETANOLES

---

En este capítulo se van a exponer las tres generaciones de biocombustibles que se conocen a día de hoy, centrándonos en la producción de bioetanol, de tal forma que al final del capítulo el lector tenga una idea clara de la situación actual de cada una de ellas.

Las diferentes generaciones se diferencian entre ellas por la materia prima que es empleada en la elaboración del biocombustible (bioetanol en nuestro caso). Así, los biocombustibles de primera generación son aquellos que utilizan cultivos básicos que pueden destinarse a la alimentación humana, como son el almidón o el azúcar (bioetanol) y cultivos de semillas oleaginosas (biodiésel), donde se encuentran la palma, el girasol, la soja o el coco. Los combustibles de segunda generación son aquellos obtenidos a partir de la biomasa lignocelulósica, la cual no tiene función alimenticia y es, además, el tipo de material biológico más frecuente en nuestro planeta. Por último, nos encontramos con los biocombustibles de tercera generación que son generados a partir de microalgas, empleadas como materia prima. Estas algas son organismos unicelulares procariotas y autótrofos que llevan a cabo la fotosíntesis oxigénica y acumulan glucógeno como principal forma de carbono almacenado.

## 2.1 Bioetanol de 1º Generación

### 2.1.1 Introducción

A principios de 2017, el bioetanol de primera generación contribuyó a la mayor parte de los 25 000 millones de galones de bioetanol producidos en todo el mundo. Estados Unidos y Brasil producen aproximadamente el 85% de la producción mundial, predominantemente a base de maíz y caña de azúcar, respectivamente. Sin embargo, las preocupaciones sobre la sostenibilidad a largo plazo del bioetanol de primera generación, como los impactos en el uso del suelo, el consumo de los recursos hídricos, la posible contaminación de los suelos con la destilación de residuos, y la competencia con la producción alimentaria hacen que sea frecuentemente cuestionado. (Bertrand, E., Vandenberghe, L. P., Soccol, C. R., Sigoillot, J. C., & Faulds, C. (2016)).

Como resultado, han surgido una serie de preguntas pendientes sobre el nexo entre la energía y los alimentos, incluida la cantidad de personas que podrían ser alimentadas por los cultivos utilizados para los biocombustibles; la medida en que estos cultivos, si se utilizan para el consumo de alimentos en los países productores, podrían aliviar la desnutrición; y si la producción de bioenergía conlleva un importante desplazamiento del uso de la tierra a través de su dependencia en el comercio de materias primas o aceite vegetal (Rulli, M. C., Bellomi, D., Cazzoli, A., De Carolis, G., & D'Odorico, P. (2016)).

La investigación y el desarrollo actual del etanol como combustible se esfuerzan por minimizar estas externalidades negativas.

### 2.1.2 Materias Primas Para la Primera Generación de Bioetanol

Las materias primas de bioetanol se pueden clasificar en tres tipos: (i) materias primas que contienen sacarosa (por ejemplo la remolacha y la caña de azúcar), (ii) materias con almidón (por ejemplo, trigo, maíz y cebada) y (iii) lignocelulósica biomasa (por ejemplo, residuos orgánicos, madera, paja y pastos) (Balat et al. 2008).

Las materias primas (i) y (ii) tienen un procesamiento para la producción de bioetanol muy sencillo, pero son fuente de alimentación humana, teniendo su uso el riesgo de causar desabasto alimentario. Finalmente, los residuos agroindustriales si bien son abundantes, su uso es complejo pues primero se necesita sacarificar la materia prima, es decir, liberar los carbohidratos simples como la glucosa de estructuras complejas como la lignocelulosa, teniendo los de primera generación por tanto unos costes de producción e inversión menores.

En la tabla 5 se muestra la variación en el costo de producción de bioetanol de primera generación según la fuente de carbono y materia prima empleada.

Con la creciente inestabilidad de los precios del petróleo, muchos países han decidido cambiar sus políticas energéticas hacia el uso de los biocombustibles. Esto impone la destinación de los cultivos de maíz, remolacha azucarera y otros al suministro de demanda de bioetanol sin entrar en conflicto con la producción de víveres. Los granos de cereal es el cultivo más abundante actualmente para la producción de la primera generación de bioetanol. Las infraestructuras para el crecimiento, cosecha y procesamiento del maíz están muy bien establecidas. Los granos de maíz contienen aproximadamente 65–76% p / p de almidón, mientras que el trigo (66–82%), la cebada (55–74%), el sorgo (68–80%), la avena (45–69%) y el arroz (74 –85%) también son fuentes ricas de materias primas de primera generación (Serna, F., & Barrera, L., & Montiel, H. (2011)).

La caña de azúcar es la segunda materia prima más usada en la producción de bioetanol. La mayoría es cultivada en Brasil. A diferencia de los cereales, que producen almidón como fuente de azúcares fermentables, la caña de azúcar produce directamente azúcar, por lo que no requiere un paso de calentamiento inicial antes de la fermentación. Al igual que con el maíz, la infraestructura para la producción, cosecha y procesamiento de la caña de azúcar está bien establecida (Serna, F., & Barrera, L., & Montiel, H. (2011)).

Fuente de carbono	Cultivo	Rendimiento (lts/ton de cultivo)	Rendimiento (lts/ha)	Costo de producción (USD/litro)	País
Sacarosa	Remolacha (jugo)	100	7000	0.48	Unión Europea
	Caña (jugo)	70-85	6000	0.21	Brasil
		10	590	0.32	India
	Caña (melaza)	10	730	0.23-0.37	México
	Sorgo	56-90	2500-4000		Suecia
Almidón	Maíz	400	3000	0.29-0.37	Estados Unidos
	Trigo	340	2700	0.62	Unión Europea
	Maíz/trigo	285		0.59	Estados Unidos
Celulosa	Bagazo (caña)	55	3850	0.8	Chile

Tabla 5: Principales materias primas para etanol.

Fuente: Serna, F., & Barrera, L., & Montiel, H. (2011).

### 2.1.3 Caña de Azúcar

La caña de azúcar representa dos tercios de la producción mundial de azúcar y una tercera parte proviene de la remolacha azucarera. Son las fuentes más prometedoras para la producción de bioetanol. Ambos se producen en regiones geográficamente distintas. La caña de azúcar se cultiva en países tropicales y subtropicales, mientras que la remolacha azucarera solo se cultiva en países de clima templado (Rulli, M. C., Bellomi, D., Cazzoli, A., De Carolis, G., & D'Odorico, P. (2016)). A diferencia de los cereales, que producen almidón como fuente de azúcares fermentables, la caña de azúcar produce directamente azúcar, por lo que no requiere un paso de calentamiento inicial antes de la fermentación. Al igual que con el maíz, la infraestructura para la producción, cosecha y procesamiento de la caña de azúcar está bien establecida. Brasil es el mayor productor mundial de caña de azúcar con 632 mil millones de toneladas (Unica 2015).

Los rendimientos de la caña de azúcar para 2015 y 2020 se estiman en 79 y 84 t de caña / ha, respectivamente, con una tasa de incremento promedio de 1.3% por año (Wang et al. 2014).

En Brasil, el gobierno en 1975 creó un programa para la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles (Programa Nacional del Alcohol). Se introdujo la adición del 25% de etanol a la gasolina, reduciéndose una importación de 550 millones de barriles de crudo y las emisiones de CO<sub>2</sub> se redujeron en 110 millones de toneladas. (Rulli, M. C., Bellomi, D., Cazzoli, A., De Carolis, G., & D'Odorico, P. (2016)).

Brasil pretende una expansión de la producción de etanol a partir de la caña de azúcar en 104 000 millones de litros para 2025, sin embargo, esto necesitará la reducción de los costes para sostener el transporte entre las áreas distantes dentro de Brasil a mercados internos y externos. Además, una tecnología avanzada puede proveer una mejor actuación medioambiental y una mayor productividad por unidad de tierra. Aunque esto conllevaría un aumento de los costes adicionales. Una hectárea de caña de azúcar produce unos 6000 litros de etanol y alrededor del 70% de los costes de producción del etanol corresponden a la materia prima (J. Technol. Manag. Innov. 2011)

### 2.1.4 Remolacha Azucarera

De acuerdo con la Ley de seguridad e independencia energética de EE. UU. (EISA) de 2007, la remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.) puede ser una materia prima elegible para biocombustibles avanzados siempre que la producción y conversión a biocombustibles cumpla con el umbral de reducción del 50% de gases de efecto invernadero requerido (Haankuku et al. 2015)

Las estrategias energéticas europeas pretenden alcanzar un 20% de energías renovables en la UE y un 20% en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (en relación con los niveles de 1990) para el año que viene (2020), a esto hay que añadir los objetivos para el año 2030 que es aumentar ambos porcentajes en un 27% y 40% respectivamente. Para conseguir estos objetivos, el potencial de la bioenergía es un tema clave.

Los principales cultivos de producción de bioetanol en la unión europea son la remolacha azucarera, el trigo, el maíz, o cebada (Salazar-Ordóñez et al. 2013). El trigo y la remolacha azucarera son los cultivos más empleados en el noroeste de Europa, mientras que el maíz es más frecuente en centro Europa y España.

En España, en la zona Norte (Castilla y León, País Vasco, La Rioja y Navarra) se lleva a cabo prácticamente la totalidad del cultivo en regadío, practicándose una siembra primaveral. La fecha de siembra recomendada está comprendida entre el 15 de febrero y el 15 de marzo. Esta recomendación es importante porque, según AIMCRA, cada día de retraso en la siembra supone un 0,6% de pérdidas en el aprovechamiento.

En la zona Sur se realiza una siembra otoñal y las recomendaciones la sitúan entre el 25 de septiembre y el 30 de octubre en el caso del cultivo de secano (se da mayoritariamente en Cádiz y en la zona sur de Sevilla) y entre el 15 de octubre y el 30 de noviembre en el caso del cultivo de regadío. (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Gobierno de España, 2014)

Las remolachas azucareras son cultivos de tubérculos compuestos de aproximadamente un 75% de agua, un 18% de azúcar (principalmente sacarosa) y un 7% de materiales insolubles y solubles (que deben estar en niveles bajos). A diferencia de las remolachas azucareras convencionales que se crían para producir azúcar para el uso alimentario, las remolachas industriales con biocombustibles son variedades especializadas sin valor criadas para la producción total de azúcar (Haankuku et al. 2015).

Se están examinando algunas alternativas para reducir los costos de producción de bioetanol de la remolacha azucarera. Se propusieron nuevas variedades de remolacha azucarera y procesos de evaporación de efectos múltiples como los principales factores en la futura reducción de costos. Aunque los costos de la fermentación directa del jugo de remolacha azucarera (ajustar el contenido de azúcar agregando melaza) es más bajo que el proceso que utiliza la concentración de jugo de remolacha azucarera, la evaporación de efectos múltiples permite una fermentación con alto contenido de azúcar y ahorra costos de destilación y equipos (Ruan et al. al. 2001). Al mismo tiempo, también reduce la infección microbiana del jugo exprimido. Parte del agua impregnada y el agua diluida son los desechos de la torre de destilación. El agua se puede reciclar en el proceso de producción y, por lo tanto, reducir las emisiones (Zhou et al. 2011). Además, con este método, la separación de las pulpas de remolacha azucarera antes de la fermentación mejora la utilización del equipo de la fermentación y la destilación, ahorra el consumo de energía y facilita mucho la utilización integral de las pulpas de remolacha azucarera. El proceso de enriquecimiento conserva el azúcar, que podrá extender el período de producción en plantas de etanol.

### 2.1.5 Maíz

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) tiene un programa dedicado a la industria del etanol de maíz. Las áreas de investigación científica abordan el establecimiento de nuevos coproductos de etanol de mayor valor, el desarrollo de microbios capaces de convertir diversos materiales de biomasa en etanol, procesos mejorados para la sacarificación enzimática de fibras de maíz en azúcares y varios métodos para mejorar la eficiencia del proceso de etanol de maíz (McAloon et al. 2000). En el 2013/2014, la producción de maíz en los Estados Unidos alcanzó casi 351.3 millones de toneladas de maíz y aproximadamente el 11% de la producción se exportó a más de 100 países diferentes. Más de un tercio de la cosecha de maíz de los Estados Unidos se utiliza para alimentar al ganado, el 13% se exporta y el 40% se utiliza para producir etanol.

La producción de etanol como combustible a partir del maíz se puede describir como un proceso de cinco etapas: pretratamiento de materia prima, hidrólisis, fermentación, separación y deshidratación, y tratamiento de

aguas residuales. La producción de bioetanol a partir de almidón incluye la descomposición de este polisacárido para obtener una concentración apropiada de azúcares fermentables, que se transforman en etanol por levaduras. Después de lavar, triturar y moler los granos de maíz (proceso de molienda en seco), el material almidonado se gelatiniza para hacer que la amilosa y la amilopectina sean susceptibles de ataque enzimático en la siguiente etapa de licuefacción. Este paso se considera como un proceso de pretratamiento debido a la hidrólisis parcial de las cadenas de almidón mediante el uso de  $\alpha$ -amilasa (enzima) termoestable. El hidrolizado obtenido tiene una viscosidad reducida y contiene oligómeros de almidón llamados dextrinas. Luego, el proceso de fermentación ocurre cuando el azúcar es asimilado inmediatamente por la levadura *Saccharomyces cerevisiae* en el mismo reactor y se convierte en etanol. El caldo de cultivo que contiene 8-11% (p / p) de etanol se recupera en una etapa de separación que consta de dos columnas de destilación (Quintero et al. 2008).

### 2.1.6 Proceso de Producción

Producir bioetanol es más simple y menos costoso cuando se utilizan materias primas ricas en sacarosa. Esto es debido a que los mismos microorganismos responsables de la fermentación, hidrolizan la sacarosa produciendo azúcares reductores que son fácilmente asimilados por las levaduras en el proceso de fermentación, produciendo etanol y dióxido de carbono. Diferente es el proceso cuando la materia prima es rica en almidón. El almidón es un polisacárido constituido por moléculas de azúcares, por este motivo los azúcares necesitan ser liberados del almidón previo a la fermentación para que las levaduras puedan asimilarlas, lo que obliga a la instalación de una unidad de hidrólisis enzimática. La liberación de los azúcares del almidón se logra mediante hidrólisis enzimática, que consiste en dos etapas: (1) licuefacción, se lleva a cabo utilizando las enzimas  $\alpha$ -amilasa o  $\beta$ -amilasa, en esta etapa la conversión de almidón a azúcares puede llegar a 7-10%, (2) sacarificación, se utiliza la enzima glucoamilasa, en esta etapa se produce la conversión total del almidón a azúcares reductores. El proceso de hidrólisis enzimática hace que la producción de bioetanol a partir de fuentes amiláceas sea más costosa y compleja, debido al costo de las enzimas y la mayor demanda de energía (Alejos, C., & Calvo, E. (2015)).

A continuación, se va a exponer el proceso de producción que utiliza la caña de azúcar y la remolacha, pues la primera es la materia prima (cultivable en climas tropicales y subtropicales) más empleada en la obtención de etanol y la segunda tiene las características necesarias para ser empleada en la producción de biocombustibles en climas templados como Europa ayudando a la reducción de los gases de efecto invernadero. Además, este proceso utiliza las tecnologías más difundidas y perfeccionadas.

#### 2.1.6.1 Extracción del Caldo

Una vez recibida la caña de azúcar en la planta de producción, se procede a una limpieza para remover impurezas provenientes de la cosecha, la limpieza puede ser hecha con agua o aire. La caña limpia es enviada a un proceso de molienda para la extracción del caldo. Esta operación utiliza agua caliente proveniente de otras unidades de proceso que ayuda a optimizar la extracción de los azúcares retenidos en el bagazo. El caldo extraído representa aproximadamente 70% en peso de la caña molida y de 15-16% en contenido de sacarosa (Alejos, C., & Calvo, E. (2015)).

#### 2.1.6.2 Tratamiento y Concentración del Caldo y Preparación del Mosto de Fermentación

El tratamiento del caldo consiste en la eliminación de impurezas solubles que afectan la fermentación, estos son eliminados por adición de lechada de cal, luego el caldo es calentado a aproximadamente 105°C para acelerar la precipitación de dichas impurezas. Los compuestos precipitados forman un lodo que es separado en decantadores, obteniéndose un caldo clarificado. Seguidamente, el caldo tratado es concentrado por evaporadores de múltiple efecto, alcanzando una concentración final de azúcares entre 60 a 65°Brix. El caldo tratado y concentrado es enfriado a 35°C aproximadamente y mezclado con una corriente de reciclo de levaduras, luego es enviado a los fermentadores (Alejos, C., & Calvo, E. (2015)).

#### 2.1.6.3 Fermentación

La fermentación del mosto puede llevarse a cabo tanto en reactores cerrados como abiertos. Los reactores abiertos permiten la evacuación libre del dióxido de carbono formado, pero tiene la desventaja de poder ocurrir

una contaminación con agentes externos y pérdida de alcohol por evaporación o arrastre. En los reactores cerrados el arrastre de mosto de fermentación por el dióxido de carbono evacuado es recuperado por un sistema de ciclones. En reactores cerrados la contaminación es menor. La fermentación puede llevarse a cabo en procesos por lotes o continúa, debido a que este proceso es exotérmico es necesario ajustar la temperatura a 30°C aproximadamente, temperatura óptima para el metabolismo de las levaduras y la conversión de azúcares a etanol (Alejos, C., & Calvo, E. (2015)).

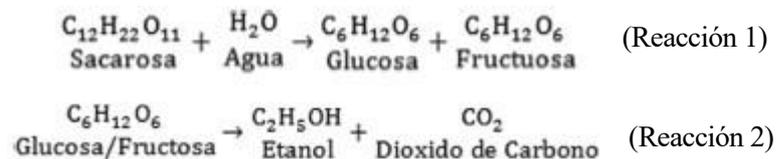


Figura 6: Reacción de hidrólisis de sacarosa y fermentación

Fuente: Alejos, C., & Calvo, E. (2015)

En la reacción 1 ocurre la hidrólisis de la sacarosa, convirtiéndose a glucosa y fructosa. Luego la glucosa y fructuosa son metabolizadas por las levaduras formando etanol y dióxido de carbono, de acuerdo con la estequiometría de la reacción 2, 1 kg de glucosa genera 0,511 kg de etanol y 0,489 kg de dióxido de carbono. En la práctica el rendimiento en etanol es menor, ya que aproximadamente 5 a 10% de glucosa es utilizada por las levaduras para la producción de nuevas células. Al final de la fermentación, las levaduras del mosto fermentado son separadas por centrifugación. Una parte de estas son recirculadas al proceso y otra es direccionada para otros fines (Alejos, C., & Calvo, E. (2015)).

#### 2.1.6.4 Destilación y Deshidratación

El mosto fermentado y centrifugado es destilado en una primera columna de destilación donde se obtiene un destilado con 45-50%V de etanol, luego este es introducido en otra columna de rectificación para obtener etanol con una concentración aproximada de 96% V, a esta concentración la mezcla etanol-agua forma un azeótropo, es decir el etanol tiene la misma concentración en la fase líquida que en la fase vapor en el equilibrio, lo que no permite continuar la separación de los componentes por destilación convencional. El etanol a esta concentración es denominado etanol hidratado. La deshidratación es la última etapa para la obtención de etanol para su uso como combustible, tiene por objetivo obtener etanol anhidro a una concentración de 99,3%V aproximadamente. Existen diversas tecnologías de deshidratación: (1) destilación azeotrópica, (2) destilación extractiva, (3) destilación al vacío, (4) adsorción en tamices moleculares y (5) deshidratación por membranas (Alejos, C., & Calvo, E. (2015)).

Actualmente la destilación azeotrópica y la adsorción en tamices moleculares son los procesos comercialmente utilizados. En la destilación azeotrópica un tercer componente, generalmente ciclo-hexano se adiciona a la mezcla etanol-agua, obteniéndose en el fondo de la columna etanol anhidro y en la parte superior la mezcla ternaria ciclo-hexano-etanol-agua que es enviado a un sistema de recuperación deciclo-hexano para su reutilización. Finalmente, el etanol anhidro es almacenado y aditivado con componentes que le confieren su uso restricto como combustible. Producto de la destilación y rectificación, se produce un líquido en el fondo de las columnas con alto contenido de materia orgánica comúnmente llamado vinaza. Para la producción de etanol anhidro a nivel industrial, procesando una tonelada de caña de azúcar con 15-16% de sacarosa y utilizando deshidratación por destilación azeotrópica, puede obtenerse 90 litros de etanol anhidro en especificación y 230 kg de bagazo húmedo para la generación de energía (Alejos, C., & Calvo, E. (2015)).

#### 2.1.6.5 Generación de Energía

En la extracción del caldo se genera el bagazo con 50% de humedad aproximadamente, este es quemado en calderas para la generación de vapor de alta presión que es utilizado en diversos sistemas mecánicos de la planta y para la generación de electricidad. El vapor de escape producto de la generación eléctrica es utilizado para su aprovechamiento térmico en las distintas unidades de proceso. Cabe destacar que el bagazo generado es suficiente para suministrar toda la energía necesaria para la planta e inclusive energía eléctrica para la venta. La Figura 7 muestra un esquema simplificado de la producción de bioetanol a partir de la caña de azúcar.

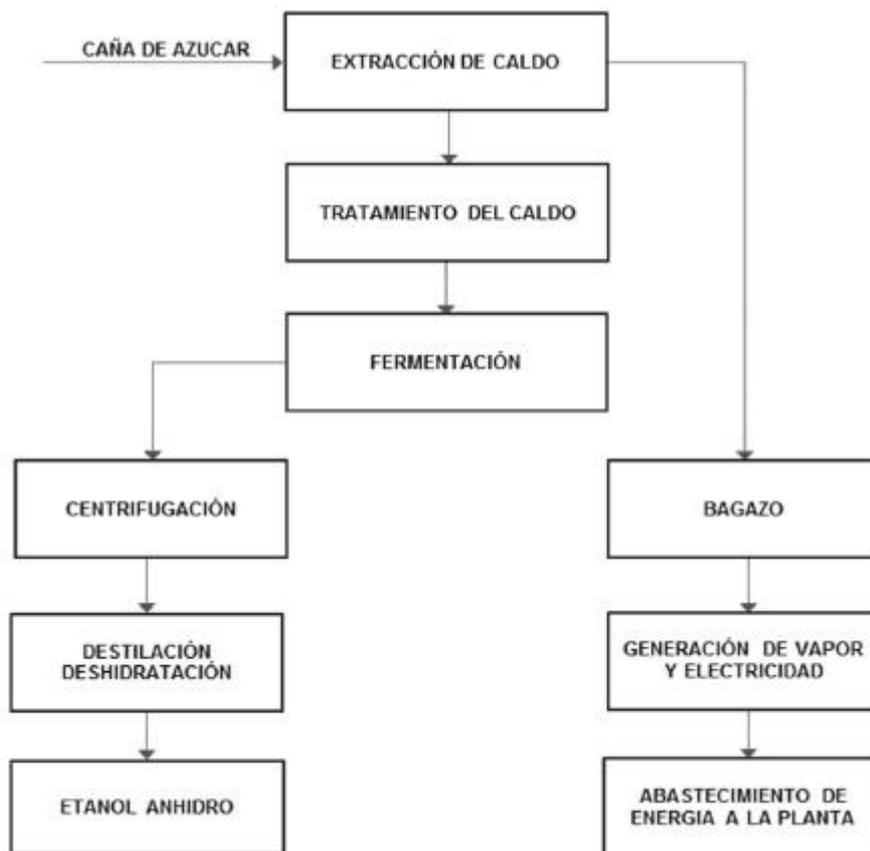


Figura 7: Esquema de producción de bioetanol a partir de caña de azúcar

Fuente: Alejos, C., & Calvo, E. (2015)

### 2.1.7 El Nexa Agua-Comida-Tierra de la Primera Generación

A partir de la producción de bioetanol mundial del año 2013, la revista científica Nature realizó un estudio (recogido en Scientific reports, 6, 22521) a cerca del agua y tierra consumida, así como del equivalente de alimentos que supuso la producción de etanol en dicho año. Gracias a la información recogida por dicha revista, se expone de manera muy clara los costes que enfrentan esta primera generación de biocombustibles con el dilema ético de la alimentación.

Así, en el 2013, debido a su mayor rendimiento en la producción de etanol, el maíz representó el 67% del suministro global de bioetanol (Fig. 9A). Sin embargo, aunque la caña de azúcar es, con mucho, el mayor contribuyente a la producción de bioetanol (en términos de biomasa de cultivos), no es el mayor consumidor de agua porque el bioetanol producido a partir de maíz y trigo tiene una mayor huella hídrica (Fig. 9C) (Gerbens-Leenes, P. W., van Lienden, A. R., Hoekstra A. Y. & van den Meer, T. H. Biofuel (2012)).

Así, los diferentes cultivos de bioetanol utilizados por los países productores explican su uso diferente de los recursos (agua, tierra y equivalente de alimentos) (Fig. 8). El impacto de la producción de bioetanol también se evalúa en términos del número de personas que podrían ser alimentadas por cultivos de bioetanol (Fig. 8D). Por ejemplo, alrededor de 200 millones de personas podrían ser alimentadas por los recursos agrícolas utilizados para satisfacer la demanda de bioetanol en los países enumerados en la tabla 6 (Scientific Reports volume 6, Article number: 22521 (2016))

	Energía Consumida (10 <sup>3</sup> TJ/año)	Agua Consumida (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /año)	Área Cultivada (10 <sup>3</sup> ha)	Población Alimentada 10 <sup>3</sup>
EE.UU	1 162.40	88 498.60	11 245.40	143.3
Brasil	506.7	30 254.60	2752	29.1
Canadá	69.3	6 853.50	1 127.70	9.3
China	62	7 744.60	1 212.10	10
Alemania	32	1 960.80	331.5	3.4
R.U	19.2	1 718.10	237.9	2.1
Francia	16.6	694.4	122.6	1.6
India	9	1 097.40	60.7	1
Colombia	8.6	505.5	160.5	0.6
Suecia	7.6	598.6	106.4	0.8
España	7.1	665.5	95.1	1
Polonia	6	387.5	99.3	0.7
Holanda	5	593	93.6	0.6
Italia	3.1	229.2	39.6	0.4
<b>Total</b>	<b>1 914.70</b>	<b>141 801.40</b>	<b>17 684.40</b>	<b>203.9</b>

Tabla 6: Consumo de energía, agua, área y equivalente en número de personas alimentadas en el 2013 de los principales países productores.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos proporcionados por Scientific Reports volume 6, Article number: 22521 (2016)

Los cultivos empleados para producir 1 TJ de biocombustibles sería suficiente para alimentar 110 y 90 personas, en el caso de bioetanol y biodiesel, respectivamente. A escala mundial, 280 millones de personas podrían ser alimentadas con las calorías cultivadas para la obtención de biocombustibles en 2013 (lo cual supone más de un cuarto de la población malnutrida) (Scientific Reports volume 6, Article number: 22521 (2016)). Aun así, el artículo publicado por la revista Nature, remarca que esta cantidad de personas probablemente no verían una mejora en acceso a los alimentos, si el uso de combustibles se redujera a cero. Añade, además, que claramente hay importantes factores económicos y políticos que subyacen en las tendencias actuales en el consumo de biocombustibles que no se tienen en cuenta en su reemplazo 1:1 de biocombustible por cultivos alimentarios.

En cualquier caso, estas cifras resaltan el importante contraste entre la producción de biocombustibles (que proporciona solo el 4% de la energía que necesita el sector del transporte y el 0,2% del uso mundial de energía en todos los sectores) y la seguridad alimentaria (que podría ser fuertemente reforzada por los cultivos de biocombustibles) (Scientific Reports volume 6, Article number: 22521 (2016)). Esto provoca la necesidad de revisar las políticas actuales de mitigación de cambio climático, a partir de los biocombustibles, que está llevando a cabo la Unión Europea, pues se pretende que para el año 2020 el 7% de los combustibles empleados en el sector transporte sean biocombustibles.

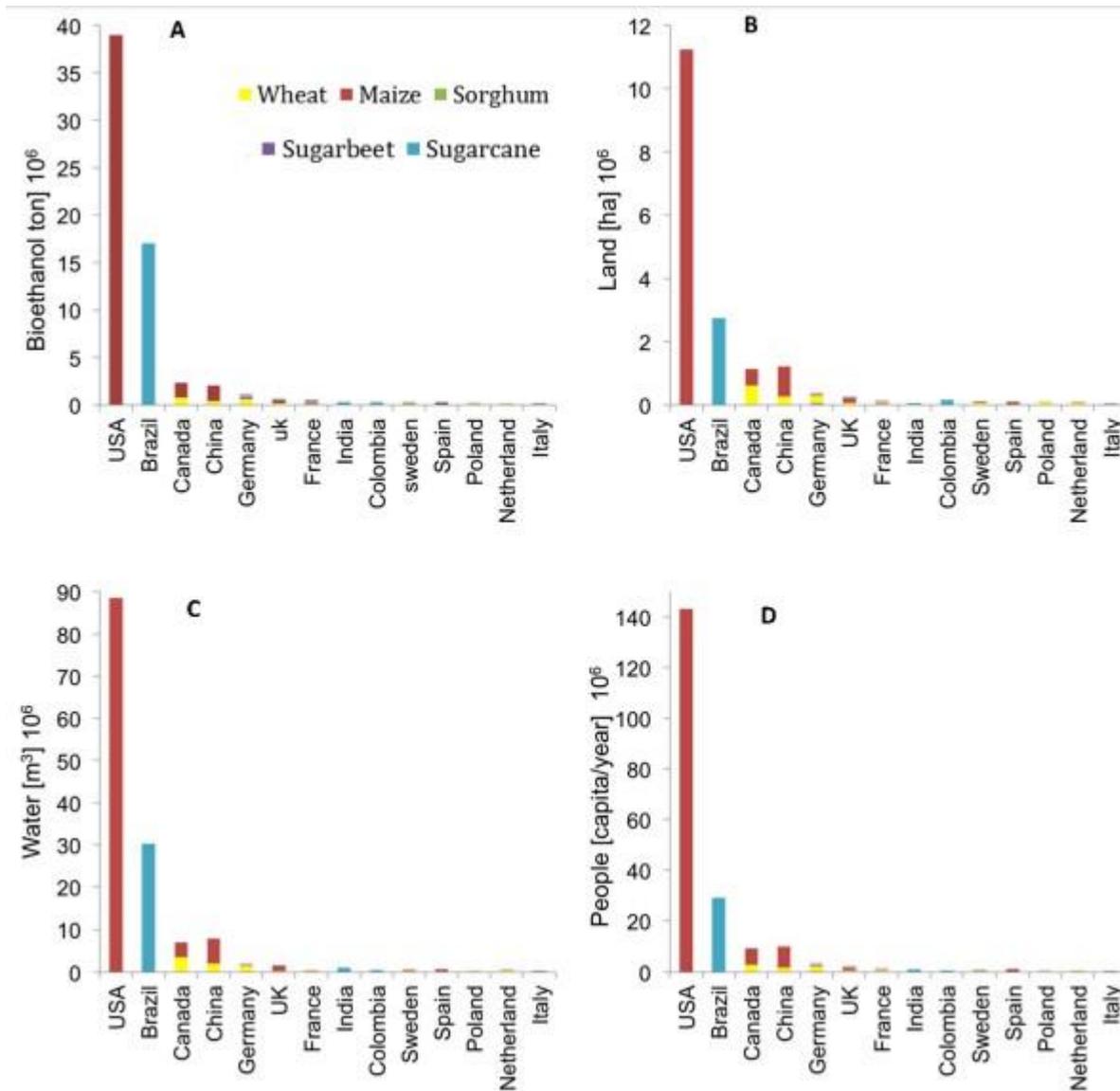


Figura 8: Bioetanol producido, agua y tierra consumida, equivalente de alimentos.

Fuente: Scientific Reports volume 6, Article number: 22521 (2016)

- (A) Bioetanol producido por los 14 principales países productores
- (B) Tierra empleada en la producción de bioetanol
- (C) Agua consumida en la producción de bioetanol
- (D) Personas que podrían ser alimentadas

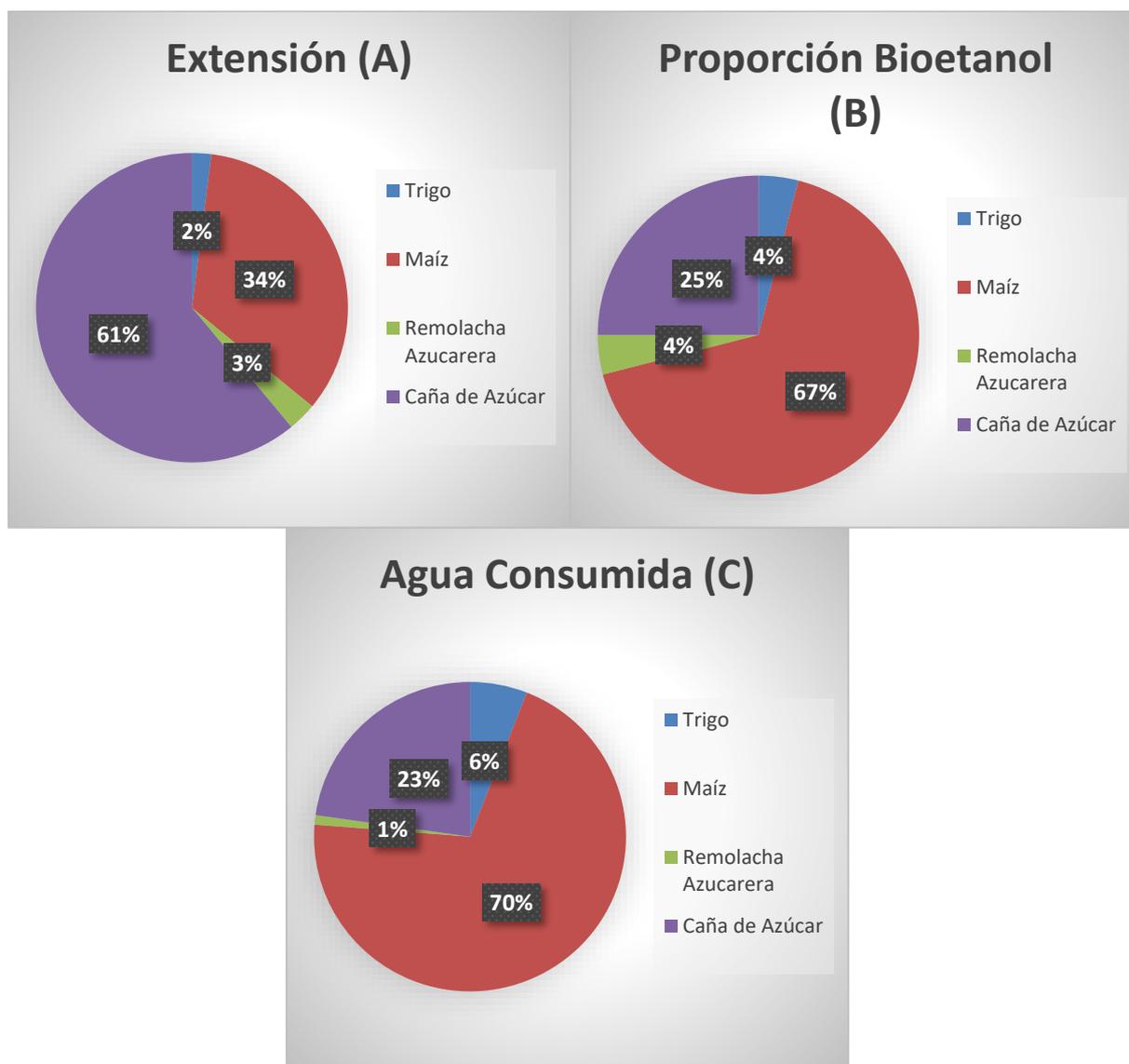


Figura 9: Porcentajes de extensión de cultivo, agua consumida y producción de bioetanol.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos proporcionados por Scientific Reports volume 6, Article number: 22521 (2016)

(A) Proporción de territorio de cultivo que contribuye a la producción global de bioetanol

(B) Proporción de bioetanol producido a partir de los diferentes cultivos

(C) Agua consumida en la producción de bioetanol

### 2.1.8 Integración de la Primera-, Segunda-, y Tercera Generación en las Biorefinerías

Actualmente la producción de la segunda y tercera generación de biocombustibles a partir de la materia lignocelulósica de los residuos agroindustriales o de las algas es despreciable (pero se espera que sea sustancial en los próximos 10-20 años) (Scientific Reports volume 6, Article number: 22521 (2016)), a pesar de sus menores huellas de agua y tierra, y su falta de competencia con la producción de alimentos. Debido a los altos costes de investigación e incertidumbres de estas generaciones, una solución al problema sería la integración de estas en los procesos de la primera generación.

Para ser funcional, requiere la adaptación de la etapa de fermentación a nuevos sustratos. Las refinerías de 1G se ubican generalmente cerca de los campos de producción y, por lo tanto, evocarían bajos costos de transporte para la incorporación de paja, mazorcas de maíz o salvado como materias primas 2G. La combinación del proceso de etanol 1G de alto rendimiento requeriría menos conversión de la materia prima 2G para que la

biorrefinería sea rentable. La caña de azúcar proporciona una materia prima atractiva para este proceso, y se proyecta que una planta combinada supere potencialmente a una planta 1G si se usa toda la planta, por ejemplo, hojas y pentosas (Bertrand E., Vandenberghe L.P.S., Soccol C.R., Sigoillot J.C., Faulds C. (2016)).

La reciente evaluación del análisis del ciclo de vida en las instalaciones integradas de bioetanol de primera, segunda e incluso tercera generación demuestra su potencial en términos de reducción de las debilidades ambientales de las instalaciones de primera generación (Bertrand E., Vandenberghe L.P.S., Soccol C.R., Sigoillot J.C., Faulds C. (2016)).

### **2.1.9 Conclusión de la Primera Generación**

La primera generación de bioetanol es producida a grandes escalas a nivel mundial y económicamente se ha comprobado a lo largo de todos estos años de producción que es viable. Sin embargo, la sostenibilidad de esta generación a largo plazo trae consigo varias preocupaciones, como son el impacto en el cambio de uso del suelo, el consumo de agua y la competitividad con el sector de alimentación. Se ha demostrado que, el equivalente en alimento de la cantidad de bioetanol producido supondría la nutrición de millones de personas, aunque una reducción a cero de los biocombustibles no significaría un aumento directo a la producción alimentaria por factores económicos y políticos. Además, la producción actual de bioetanol no supone un porcentaje importante en el consumo energético y aumentar dicho porcentaje a partir de esta generación implicaría mayor consumo de cultivo y por tanto mayor conflicto con el sector de alimentación. Un camino prometedor para el futuro de la primera generación parece ser la integración de biorrefinerías, siendo un paso importante hacia la mitigación de la competencia entre alimentos y biocombustibles a través de nuevas tecnologías que dependen de los residuos agrícolas.

## **2.2 Bioetanoles de 2º Generación**

### **2.2.1 Introducción**

La segunda generación de bioetanol es, el etanol obtenido a partir de la lignocelulosa de la biomasa, surge como promesa para ser otra alternativa en el reemplazo de los combustibles fósiles debido a su ahorro y su posibilidad de aumentar la responsabilidad ambiental debido a un mejor uso de los recursos. Además, esta generación aparece como solución al problema del conflicto entre la primera generación y sus detractores, cuyos argumentos en contra de esta primera generación son el empleo de grandes cantidades de agua, suelo y su competencia con el sector alimentario.

Los biocombustibles de segunda generación, y en nuestro caso el bioetanol, se obtienen de materias primas que no poseen una función alimentaria y de biomasa procedente de la basura de desechos industriales o de consumo. Como se consiguen a partir de materias primas que no tienen la posibilidad de ser destinadas a consumo humano, estas pueden ser cultivadas en tierras marginales u obtener de bosques, de tal manera que se consigue evitar el consumo de agua de riego que se produce en los biocombustibles de primera generación.

Un aspecto que se debe tener muy en cuenta a día de hoy es, la tendencia positiva del incremento de residuos agroalimentarios que son generados a nivel mundial. En concreto, en Europa se desecha una tercera parte de los alimentos producidos, la continua acumulación de dichos residuos orgánicos produce una amplia y negativa problemática ambiental por el deterioro gradual del medio, añadiendo además que, desde un punto de vista económico los costes de recolección, transporte y disposición final se ven aumentados. Los residuos agroindustriales se establecen como la biomasa más abundante del planeta y su uso presenta un amplio potencial debido a que son sustratos renovables y no presentar ningún valor comercial (Murillo et al., 2016).

La producción de biocombustibles de segunda generación a partir del empleo de residuos genera dos ventajas, desde el punto de vista económico y ecológico, ya que se está disminuyendo la producción de residuos al tiempo que se obtiene un producto de valor añadido (Celia Hernández Galindo, 2017). Por ejemplo, los excedentes derivados de frutas durante el proceso agroindustrial son ricos en componentes como el almidón, celulosa, hemicelulosa y lignina, constituyendo una buena fuente para la obtención de azúcares que pueden ser

reutilizados para compostaje, a la alimentación animal, producción de biocombustibles, etc.

## 2.2.2 Bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica

Las materias primas compuestas de biomasa lignocelulósica son las más abundantes en el mundo, por lo que representan la fuente de azúcares con mayor potencial para la producción de bioetanol de segunda generación. (Loreto Alejandra Martínez Bocaz, 2012).

Este sistema ofrece numerosas ventajas, entre las que destacan la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y el no uso de cultivos con potencial alimenticio para su producción. El problema de este proceso es que es bastante más complejo y costoso que la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar o maíz. Al realizarse un análisis comparativo de costes entre ambos procesos, se obtiene que la producción de un litro de bioetanol a partir de material lignocelulósico cuesta aproximadamente 5 veces más (1.00 US \$) que un litro de bioetanol obtenido a partir de caña de azúcar el cual oscila entre 0.18-0.20 US \$ (Loreto Alejandra Martínez Bocaz, 2012).

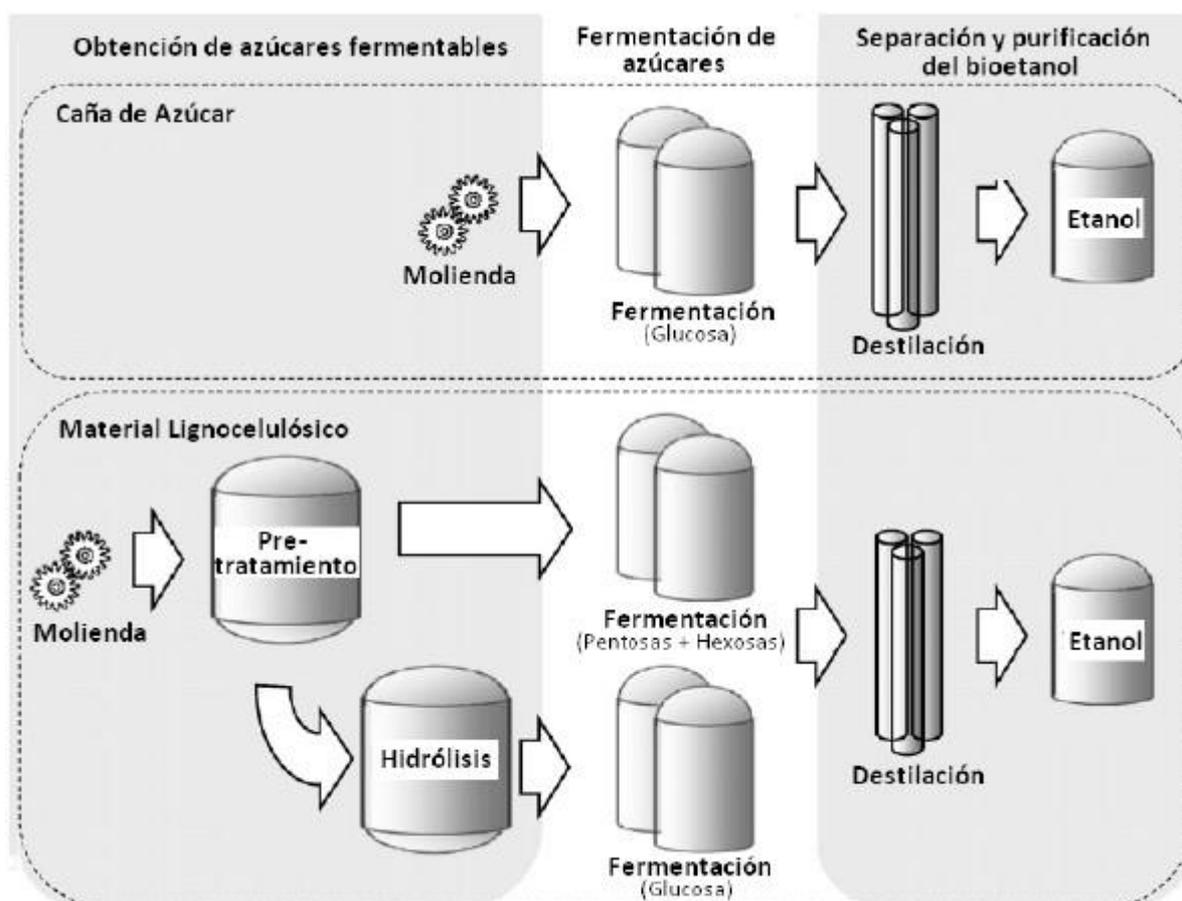


Figura 10: Comparación del diagrama de flujos de la producción de bioetanol, a partir de distintas biomásas.

Fuente: Loreto Alejandra Martínez Bocaz (2012)

Este aumento de los costes es debido a las etapas extras, como por ejemplo la molienda del material para aumentar el área superficial del material y un pre-tratamiento, que se pueden observar en la Figura 10, los cuales son pasos necesarios para aumentar el rendimiento de las etapas posteriores, la hidrólisis enzimática o sacarificación. A estas etapas debemos añadirles, además, dos etapas de fermentación en lugar de una, en una se fermenta la glucosa y en la otra se emplean otros azúcares fermentables, como las pentosas. La razón de estos procesos adicionales es que la biomasa lignocelulósica está conformada mayoritariamente por 3 macromoléculas: celulosa, hemicelulosa y lignina, compuestos que al formar una red tridimensional que recubre a la celulosa dificultan el acceso de las enzimas para poder monomerizarla en glucosa (Loreto Alejandra Martínez Bocaz, 2012). Hay que destacar también que la hemicelulosa, la cual está formada por hexonas y pentosas, es bastante complejo fermentar en etanol (Loreto Alejandra Martínez Bocaz, 2012).

### 2.2.3 Composición y Estructura Lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa, lignina, variando las proporciones de los mismos en función del tipo de material, de la especie y la edad del cultivo, y otras sustancias que no forman parte de la pared celular como son las cenizas y pequeñas cantidades de extractivos.

A continuación, se van a presentar una tabla con una serie de ejemplos de biomasa lignocelulósica y sus respectivos porcentajes en hemicelulosa, lignina y celulosa.

BIOMASA		CELULOSA (%)	HEMICELULOSA (%)	LIGNINA (%)	CENIZAS Y EXTRACTIVOS (%)
MADERAS DURAS	NOGAL	46.2	20.9	21.9	11
	ARCE	44.9	23	28	4.1
	CHOPO	43.5	21.8	26.2	8.5
	ÁLAMO	49.9	25.1	18.1	6.9
MADERAS BLANDAS	PINO	46.4	20.6	29.4	3.6
	ABETO	49.9	21.6	28.7	0.2
RESIDUOS AGRÍCOLAS	PAJA DE TRIGO	30.2	22.3	17	30.5
	PAJA DE CEBADA	33.1	24.9	16.1	25.9
	RESIDUOS DE MAÍZ	36.8	30.6	23.1	9.5
BIOMASA HERBÁCEA	PASTO VARILLA	45	31.4	12	11.6
RESIDUOS CELULÓSICOS	PAPEL PERIÓDICO	40-55	25-40	18-30	17-25

Tabla 7: Composición de distintas biomásas lignocelulósicas

(Fuente: Rocío Abascal Fernández, 2017)

La lignocelulosa es el componente estructural principal de la pared celular de las plantas, siendo su función dar estabilidad, rigidez y protección a la misma. (Laura Benítez Casanova, 2017).

En la figura 11, se representa una imagen en la que se pueden diferenciar las distintas partes que forman una pared celular.

En primer lugar, nos encontramos con una lámina media (ML) que está formada por lignina, entre el 70% y 90% del total de la lignina presenta en la materia lignocelulósica. Acto seguido, aparece una pared principal formada por hemicelulosa y celulosa (P) seguida de una serie de paredes secundarias (S) que se diferencian en sus características físicas y químicas.

La hemicelulosa se encuentra rodeando a las fibras de celulosa para unirla así a la lignina. A su vez la lignina actúa como adhesivo natural en las paredes celulares generando soporte estructural, impermeabilidad y resistencia contra el ataque microbiano y enzimático que intenten romper o penetrar dicha estructura. (Rocío Abascal Fernández, 2017)

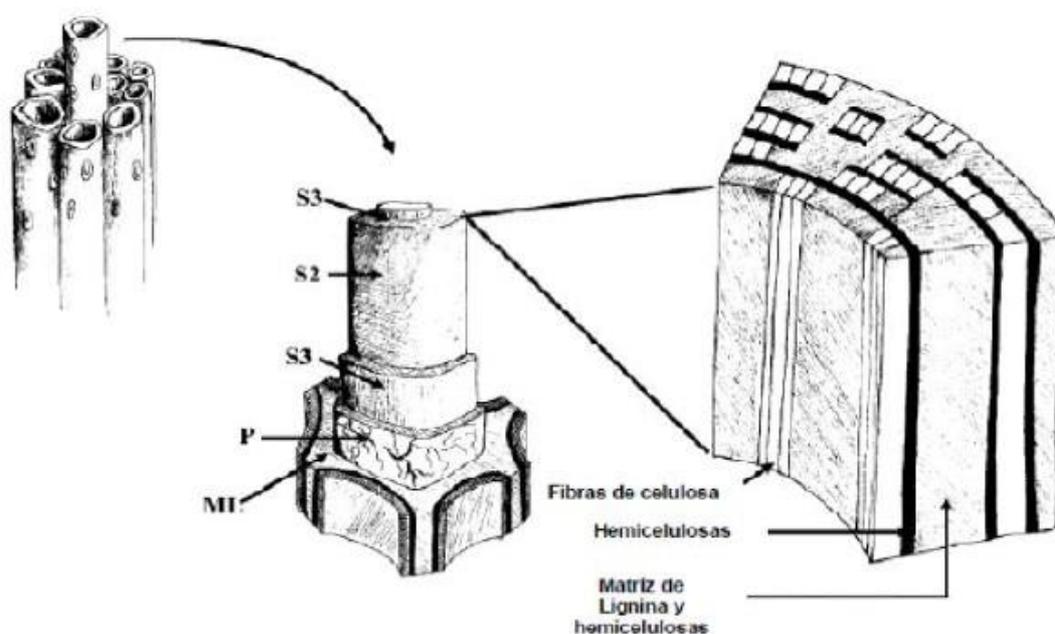


Figura 11: Morfología de la pared de la célula vegetal.

Fuente: Rocío Abascal Fernández, 2017

La celulosa es un polisacárido formado por la unión de monómeros D-glucosa mediante enlaces glucosídicos  $\beta(1,4)$ . Estos polímeros se encuentran formando microfibrillas, que a su vez se asocian con otras mediante puentes de hidrógeno, interacciones hidrofóbicas y fuerzas de Van de Waals para formar las fibras de celulosa, obteniendo una estructura cristalina resistente e insoluble (Dashtban y col., 2009). Como en todo polímero, uno de sus parámetros más importantes es la fracción cristalina, la celulosa se constituye principalmente por regiones cristalinas con un alto grado de ordenación y compactación que oscila entre el 50 y 90%, aunque también existen ciertas regiones con menor ordenación denominadas amorfas. Este porcentaje es muy importante, ya que la fracción amorfa es fácilmente hidrolizable, la cristalina es mucho más resistente. Debido a este factor, entre otros, será necesaria la realización de pretratamientos para obtener bioetanol. (Barroso, 2010).

El segundo polímero mayoritario de la lignocelulosa es la hemicelulosa, un heteropolímero con menor grado de polimerización, pero mayor complejidad que el primero por sus ramificaciones y sustituciones. Está formada principalmente por pentosas (xilosa y arabinosa), hexosas (glucosa, galactosa y manosa). De los tres tipos de polímeros que componen la lignocelulosa es la más sensible a los procesos termo-químicos, pudiendo ser solubilizada en las condiciones de temperatura y pH correctos. La hemicelulosa se encuentra entrelazada entre las fibras de celulosa unidas por puentes de hidrógeno, actuando como nexo de unión entre la lignina y la celulosa (Laura Benítez Casanova, 2017).

En último lugar nos queda el tercer componente principal de la lignocelulosa, la lignina. Este polímero está caracterizado por proporcionar rigidez a la pared celular y servir como barrera frente al ataque de químicos o patógenos. Proporciona impermeabilidad a la planta gracias a su composición que le otorga un carácter hidrofóbico (Laura Benítez Casanova, 2017).

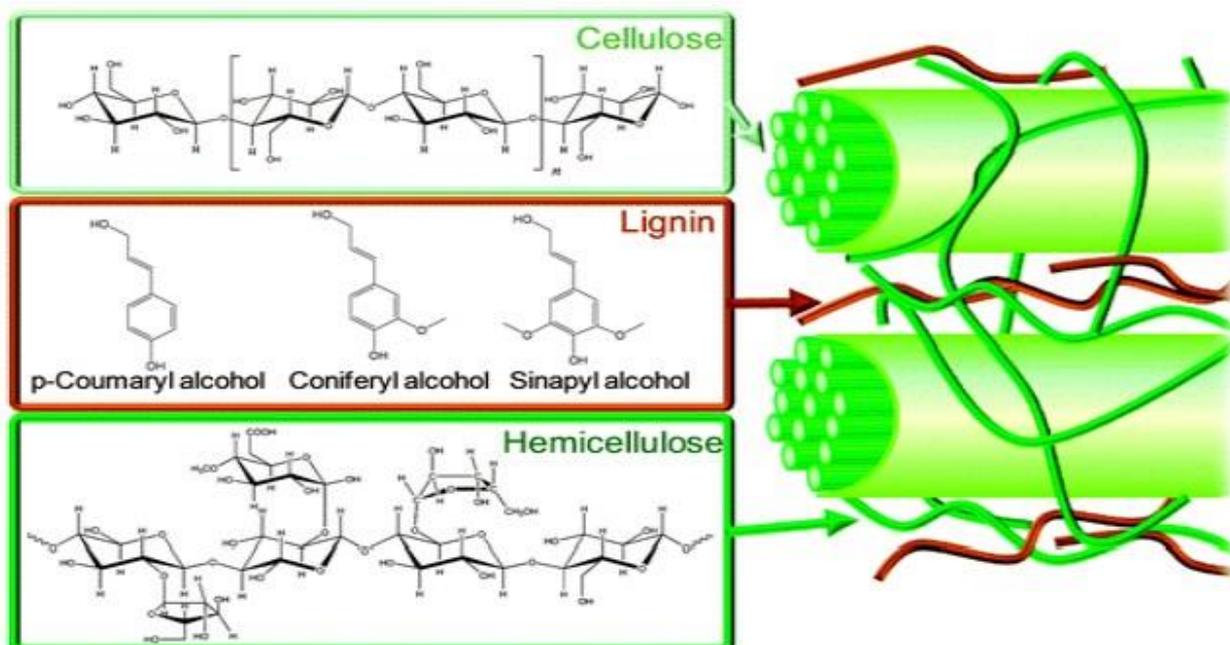


Figura 12: Componentes estructurales.

Fuente: Rocío Abascal Fernández, 2017

#### 2.2.4 Utilización de los Azúcares Hexosa y Pentosa en Diferentes Microorganismos

Hay una variedad de microbios capaces de fermentar los azúcares hexosa y pentosa tanto por separadas como a la vez. Géneros bacterianos como *Aerobacter*, *Bacillus*, *Klebsiella*, *Thermoanaerobacter*, *Aeromonas*; levaduras como *Candidashehatae*, *Pichiastipitis*, *Pachysolen tannophilus* y hongos como *Fusarium*, *Mucor*, *Neurospora*, *Monilia*, *Rhizopus* son capaces de fermentar la xilosa al etanol. En todos los microorganismos, la ruta metabólica de la D-xilosa implica su conversión a D-xilulosa seguida de la reacción de la xilulosa quinasa (XQ) a la D-xilulosa-5-fosfato. Una vez convertidos a xilulosa-5-fosfato, estos azúcares se dirigen a la vía de fosfato de pentosa nativa (FPN) (Fig.13). Las bacterias generalmente convierten la D-xilosa directamente en D-xilulosa a través de la enzima xilosa isomerasa (XI), mientras que las levaduras y los hongos emplean una vía de reducción-oxidación en dos etapas (Rastogi, M., & Shrivastava, S., 2017).

En hongos y levaduras, la D-xilosa se reduce primero a xilitol por la D-xilosa reductasa (XR) seguida de la posterior oxidación a D-xilulosa por la xilitol deshidrogenasa (XDH), que se convierte secuencialmente en D-xilulosa-5-fosfato. La fosfo pentosa epimerasa (FPE), la transaldolasa (TAL) y la transcetolasa (TK) metabolizan aún más la D-xilulosa-5-fosfato en gliceraldehído-3-fosfato y fructosa-6-fosfato por transposición no oxidativa que conduce a la fermentación de azúcares a etanol por Embden -Meyerhof-Parnas (EMP) Pathway. Alternativamente, la fosfo cetolasa (PKL) (importante en la levadura que produce lípidos) puede dividir la D-xilulosa-5-fosfato en gliceraldehído-3-fosfato y acetilfosfato. En la mayoría de los hongos, la conversión inicial de L-arabinosa en D-xilulosa-5-fosfato se realiza a través de una serie de etapas de reducción y oxidación a través de la arabinosa reductasa (AR) y L-arabitol deshidrogenasa (LAD) que involucran a los cofactores NAD (P) + / NAD (P) H. Alternativamente, en las bacterias, la isomerización de arabinosa (AI) convierte la arabinosa en ribulosa seguida de su conversión en ribulosa-5-fosfato a través de la ribococinasa (RK). Posteriormente, la ribulosa-5-fosfato-4-epimerasa (R5PE) cataliza la epimerización final de la ribulosa-5-fosfato a D-xilulosa-5-fosfato, un intermediario en la vía de la fosfatasa pentosa (Rastogi, M., & Shrivastava, S., 2017).

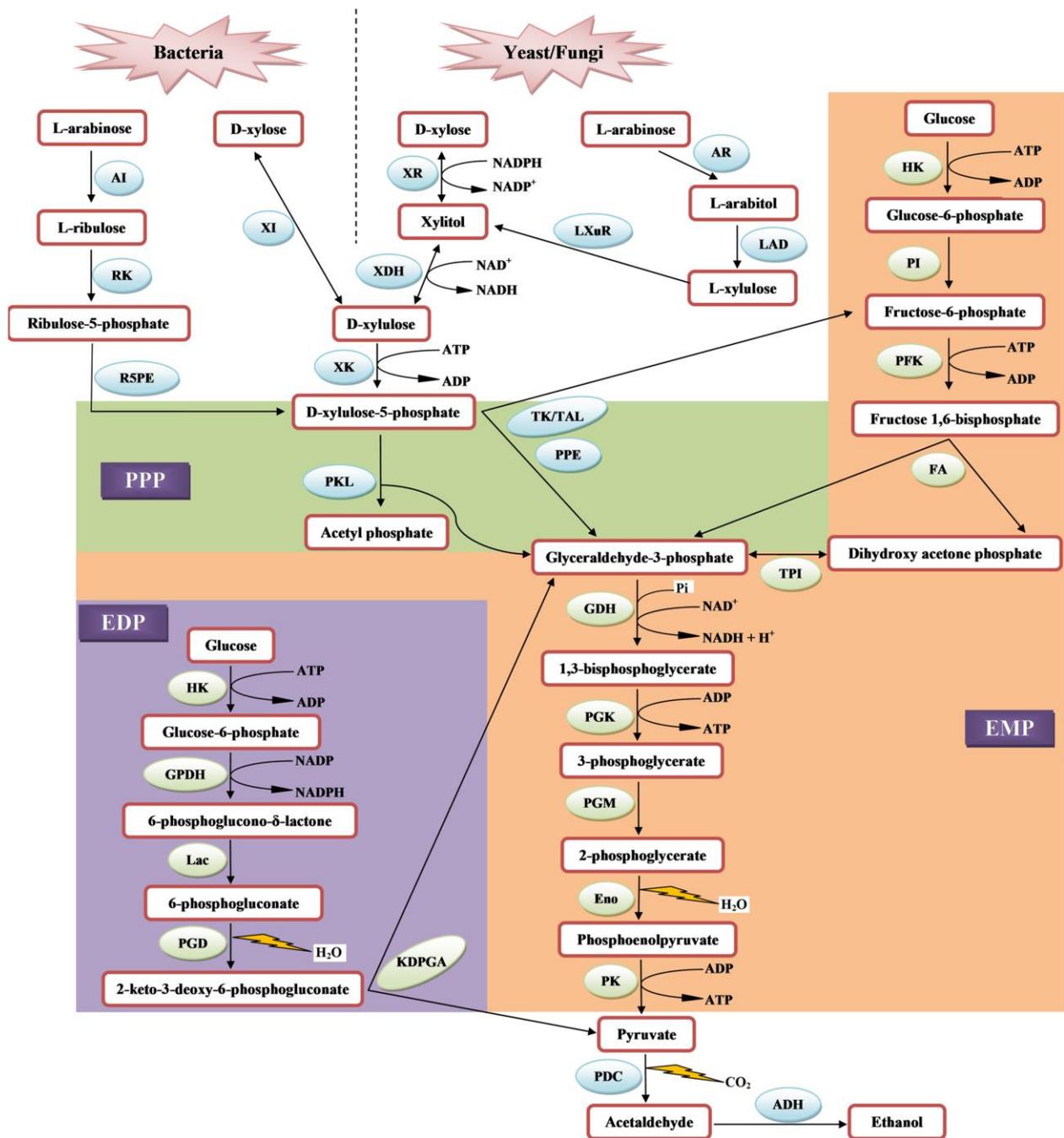


Figura 13: Comparación de las vías de utilización de los azúcares hexosa (glucosa) y pentosa (xilosa y arabinosa) por diferentes microbios.

Fuente: Rastogi, M., & Shrivastava, S. (2017)

### 2.2.5 Proceso de Obtención de Bioetanol de Segunda Generación

Como se explicó en la introducción, desde el punto de vista técnico, la utilización de biomasa lignocelulósica para la producción de bioetanol en comparación con el empleo de materias primas de primera generación supone un proceso de síntesis más complicado. Esto es debido a que la materia prima empleada consta de una

estructura compleja y difícil de penetrar y atacar por agentes químicos, por tanto, se requiere un pretratamiento para romper esa estructura y facilitar los procesos posteriores. Por ello, la mayoría de los azúcares presentes no son directamente fermentables o su fermentación es complicada, como en el caso de las pentosas. Provocando que la tecnología de conversión se encarezca, a pesar de que el costo de la materia prima celulósica como tal es inferior al de las materias primas de primera generación.

Se requieren realizar dos fases para la transformación de material celulósico a bioetanol:

- Los componentes de celulosa y hemicelulosa deben ser hidrolizados en azúcares simples o reductores.
- Los azúcares simples o reductores obtenidos deben ser fermentalizados para obtener bioetanol.

A pesar de que la celulosa y la hemicelulosa puedan ser convertidas en azúcares y posteriormente en bioetanol, la lignina al ser un polifeno no puede ser fermentada (Celia Hernández Galindo, 2017).

El proceso global consta de las siguientes etapas descritas a continuación y resumidas en la Figura

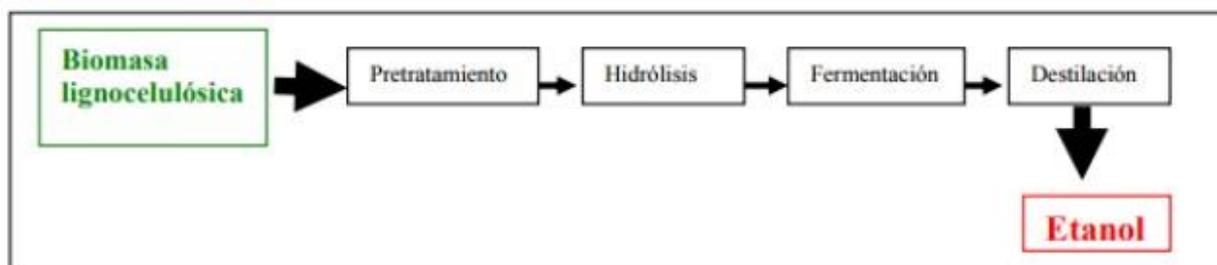


Figura 14: Etapas del proceso de obtención del bioetanol de segunda generación a partir de biomasa lignocelulósica.

Fuente: Celia Hernández Galindo, (2017).

### 2.2.5.1 Pretratamientos

Es el primer proceso de transformación al que se van a someter los componentes principales, es decir, la celulosa, hemicelulosa y lignina. El objetivo principal es la eliminación parcial de la lignina (evita reducir el ataque enzimático) y la hemicelulosa, así como disminuir el grado de cristalinidad de la celulosa (consiguiendo aumentar el área superficial) y aumentar la porosidad de la biomasa. El pretratamiento debe cumplir varios requisitos: mejorar la liberación de azúcares durante el mismo o en la posterior hidrólisis y fermentación; y finalmente, ajustarse a la rentabilidad (Sun, Y., & Cheng, J, 2002). Según su naturaleza, podemos encontrar varios métodos de pretratamiento, que se pueden clasificar en:

- Químicos, aquellos en los que se emplean solventes, ácidos o bases para la alteración estructural de la lignocelulosa.
- Físicos, en los que se encuentran la presión, temperatura y molienda para la disminución del tamaño de la partícula y aumento del área accesible.
- Físico-Químicos donde se combinan cambios de temperatura y presión con el uso de ácidos o bases (la explosión de vapor es el más utilizado)
- Biológicos en los que se aprovechan las enzimas lignolíticas de algunos microorganismos, principalmente hongos basidiomicetos, para la eliminación de la lignina que resulta el componente más difícil de degradar, siendo este método el menos agresivo y de menor coste energético, pero también el menos controlable.

El tipo de material lignocelulósico, así como las características del pretratamiento utilizado condicionan las propiedades del material, variando la accesibilidad de la celulosa, el grado de polimerización y su composición, lo que puede influir en la formulación del cóctel enzimático y la dosis del mismo para una óptima degradación de la biomasa (Laura Benítez Casanova, 2017).

### 2.2.5.2 Hidrólisis Enzimática

Tras el pretratamiento llevado a cabo, el siguiente paso es llevar a cabo la conversión de la celulosa y hemicelulosa mediante la acción combinada de celulasas, hemicelulasas y enzimas auxiliares a monómeros de hexosas y pentosas. Debido a la complejidad y a la variabilidad de los materiales, para conseguir la completa degradación de los polímeros ha de haber una combinación óptima de las distintas actividades enzimáticas en función del material y del pretratamiento utilizados. En la naturaleza podemos encontrar diversos microorganismos que han desarrollado esta función pues emplean la materia lignocelulósica como fuente de carbono. Desde escarabajos y termitas o bacterias presentes en el rumen y tracto intestinal de los animales herbívoros hasta bacterias aerobias presentes en agua fecales y hongos basidiomicetos de la podredumbre blanca u hongos filamentosos (Martínez y col., 2008), de tal manera que la hidrólisis de los polímeros de celulosa y hemicelulosa pueden llevarse a cabo gracias a la capacidad de una gran variedad de organismos de producir enzimas hidrolíticas. Para conseguirlo se deben establecer unas condiciones en el proceso en las que las enzimas puedan actuar de forma eficiente, que suele ser en el rango de 45°-55°C y pH 4.8-5.8. Gracias a estas condiciones de temperatura, se favorece la solubilización de los componentes de la lignocelulosa ya que disminuyen la viscosidad de la biomasa y así facilitan la licuefacción (Laura Benítez Casanova, 2017).

Además, para aumentar las concentraciones de etanol al final del proceso, durante un periodo de 24-80h la hidrólisis se realiza a altas concentraciones de sólidos totales entre 15-22% (Chen y col., 2016). Durante muchos años la principal limitación para la rentabilidad del proceso de obtención del bioetanol lignocelulósico, ha sido la sacarificación o hidrólisis enzimática, habiendo tanto a nivel de sustrato como de la enzima factores limitantes. Entre los factores limitantes dependientes del sustrato, podemos contar la cristalinidad de la celulosa, el grado de polimerización, la superficie disponible, el porcentaje de humedad y el contenido de lignina. Como factores limitantes dependientes de los mecanismos de acción de las enzimas se encuentran la desnaturalización por estabilidad de las propias enzimas, las uniones inespecíficas y la inhibición por producto o por otros compuestos presentes en la hidrólisis. Debido a que la cantidad de enzimas necesaria para la hidrólisis impacta muy significativamente en el coste final del etanol, se están realizando en la actualidad grandes esfuerzos enfocados en la mejora enzimática, teniendo como objetivo económico lograr una contribución de la enzima al coste del bioetanol lignocelulósico de 40 centavos de dólar por galón (Laura Benítez Casanova, 2017).

### 2.2.5.3 Fermentación

Los monosacáridos obtenidos de la hidrólisis enzimática de la lignocelulosa se transforman en etanol por fermentación alcohólica mediada por cepas industriales de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. En el caso de las hexosas, la levadura incorpora la glucosa del medio y la convierte en piruvato a través de la glucólisis. Este piruvato es llevado a acetaldehído y este a su vez a etanol gracias a la acción catalítica secuencial de la enzima piruvato descarboxilasa y la enzima alcohol deshidrogenasa. La utilización industrial de la levadura *S. cerevisiae* para la producción de bioetanol se ve beneficiada por los altos niveles de producción que alcanza, así como su tolerancia al etanol y a los productos inhibitorios presentes en la biomasa, además de crecer bien a pH relativamente bajos lo que protege el proceso de la contaminación por bacterias. Sin embargo, está limitado a la fermentación de glucosa, ya que *Saccharomyces cerevisiae* no es capaz de metabolizar la xilosa, que representa en torno al 40% de los azúcares resultantes de la hidrólisis de la lignocelulosa. Para aprovechar la xilosa liberada se están generando cepas modificadas genéticamente para conseguir fermentar este azúcar (Laura Benítez Casanova, 2017).

### 2.2.5.4 Destilación

Se emplean columnas de destilación para poder recuperar el etanol del mosto fermentado, en las columnas se separa una mezcla de alcohol/agua de una suspensión acuosa de sólidos que se extrae por el fondo. Mediante los procesos convencionales de destilación es posible obtener etanol con concentraciones cercanas a la composición azeotrópica (96% en peso); sin embargo, con el objetivo de evitar la formación de dos fases líquidas en la mezcla etanol-gasolina, el contenido de agua en el etanol debe ser muy bajo. La primera alternativa puesta en consideración para superar el punto azeotrópico consiste en modificar las condiciones de operación de la destilación, las cuales abarcan desde la aplicación de alto vacío hasta la adición de solvente; dichas modificaciones varían los coeficientes de actividad de la mezcla. Posteriores a las técnicas de destilación, que involucran operaciones líquido-vapor, se han introducido otras que utilizan los principios de

adsorción y permeación: entre ellas se destacan la utilización de zeolitas y membranas de pervaporación, y como propuestas alternas se encuentran los procesos híbridos que combinan diferentes técnicas y procesos. Estos procesos alcanzan una pureza de 99,5% de etanol (Laura Benítez Casanova, 2017).

### **2.2.6 Metodologías Actuales Adoptadas para la Producción de Bioetanol a Partir de Biomasa Lignocelulósica.**

A día de hoy, en un intento por aumentar la eficacia de la producción de bioetanol, se han propuesto diferentes métodos para integrar la hidrólisis y la fermentación (Rastogi, M., & Shrivastava, S., 2017). Sin embargo, antes de comenzar a explicar los diferentes métodos, se va a realizar un pequeño resumen de lo desarrollado en profundidad en el punto 2.2.5, para que el lector menos experimentado tenga claro en que situación del proceso estamos y obtenga una clara idea de lo expuesto.

El tratamiento previo de la biomasa lignocelulósica es necesario para aumentar la disponibilidad de celulosa, que está confinada dentro de las capas de hemicelulosas y lignina y hacerla accesible para la sacarificación enzimática. Diferentes celulasas y hemicelulasas actúan sobre el componente de celulosa y hemicelulosa, liberado de la biomasa y además las convierte en glucosa y xilosa, respectivamente (proceso de hidrólisis). O estas enzimas se producen en un reactor separado o se compran externamente. Estos azúcares monoméricos, hexosas y pentosas, así formados como resultado de la sacarificación (hidrólisis) se convierten posteriormente en bioetanol por una variedad de microorganismos a través del proceso de fermentación.

#### **2.2.6.1 Fermentación e Hidrólisis Separadas (FHS)**

Este es un proceso de dos etapas en el que los procesos de hidrólisis y fermentación funcionan de manera distinta, es decir, la biomasa lignocelulósica pretratada se degrada primero en unidades monoméricas (glucosa y xilosa) a través de enzimas, seguido de la fermentación de estos azúcares en etanol. La principal ventaja de este proceso es que tanto la hidrólisis enzimática como la fermentación funcionan en sus respectivas condiciones óptimas, sin embargo, la acumulación de azúcares que inhiben la actividad de la enzima sigue siendo un inconveniente importante que finalmente afecta el rendimiento de etanol (Rastogi, M., & Shrivastava, S., 2017).

#### **2.2.6.2 Simultánea Sacarificación y Fermentación (SSF)**

Este enfoque combina la sacarificación de la biomasa con la fermentación simultánea de los azúcares liberados en un solo reactor. La característica clave de este proceso es que tan pronto como los azúcares se forman a partir de la biomasa, se convierten rápidamente en etanol, lo que disminuye la acumulación de azúcares inhibitorios en el medio. Algunos de los beneficios de este proceso son algunos de los beneficios de la facilidad de operación, los bajos requisitos de equipo que el proceso SSF y la presencia de etanol en el caldo que hace que el medio sea menos vulnerable a la contaminación. El principal inconveniente de este proceso es la dificultad en la optimización de los parámetros del proceso considerando al mismo tiempo enzimas y microorganismos. Por ejemplo, las enzimas celulolíticas para la hidrólisis enzimática funcionan mejor a alrededor de 50 ° C, pero las condiciones óptimas para los microbios para la fermentación de etanol son entre 28 ° C y 37 ° C. Reducir la temperatura óptima de las enzimas a través de la ingeniería de proteínas sería prácticamente difícil y, por lo tanto, se requieren cepas termo-tolerantes que puedan crecer bien y producir etanol de manera eficiente a alta temperatura (Rastogi, M., & Shrivastava, S., 2017).

#### **2.2.6.3 Sacarificación y Co-Fermentación Simultáneas (SCFS)**

Esta integración está orientada a la asimilación microbiana de todos los azúcares liberados anteriormente durante el tratamiento previo y los procesos hidrolíticos de la biomasa lignocelulósica. El uso de cultivos mixtos de levaduras que puedan asimilar tanto las hexosas como las pentosas es otra opción, pero el único problema es una mayor conversión de las hexosas en etanol, ya que los microorganismos que utilizan la hexosa crecen más rápido que los microorganismos que utilizan la pentosa. Otra variante es utilizar un solo microorganismo que pueda asimilar óptimamente tanto las hexosas como las pentosas para permitir una alta conversión y un rendimiento de etanol. Ventajas como bajo coste, menor tiempo de operación, menor riesgo de contaminación y menos efectos inhibitorios durante la hidrólisis enzimática han atraído una creciente investigación en esta tecnología (Rastogi, M., & Shrivastava, S., 2017).

#### 2.2.6.4 Bioprocesamiento Consolidado (BPC)

La conversión microbiana directa (CMD) o el bioprocesamiento consolidado integra todas las reacciones necesarias para la transformación de la biomasa en etanol. Esta estrategia difiere de otras, ya que solo una comunidad microbiana única realiza la producción de enzimas y la fermentación, es decir, la producción de enzimas, la hidrólisis enzimática y la fermentación se llevan a cabo en una sola etapa. Este proceso tiene varias ventajas, ya que no se requieren costos de capital ni operativos para la producción de enzimas, se utiliza el sustrato completo para la liberación de azúcares y no se destina a la producción de celulasa. Además, los procesos enzimáticos y de fermentación son totalmente compatibles. Los microbios termofílicos tienen una clara ventaja sobre las levaduras convencionales, ya que pueden usar directamente varios materiales de alimentación de biomasa de bajo costo y también soportar altas temperaturas. Sin embargo, tienen una baja tolerancia al bioetanol (<2% v / v), que es un obstáculo importante para su aplicación industrial. A pesar de eso, una cepa de levadura termotolerante *K. marxianus* ha sido diseñada para la visualización conjunta de endoglucanasa y  $\beta$ -glucosidasa en su superficie celular. Puede crecer bien a temperaturas tan altas como 48 ° C y produjo etanol a partir de  $\beta$ -glucano (material celulósico) con un rendimiento de 0,47 g de etanol por gramo de carbohidrato consumido. Otro enfoque propuesto es la utilización de cultivos mixtos para que la hidrólisis y la fermentación de la biomasa lignocelulósica se lleven a cabo simultáneamente (Rastogi, M., & Shrivastava, S., 2017).

#### 2.2.7 El Futuro de la Producción de la Segunda Generación de Bioetanol

Actualmente, hay seis empresas en el mundo que investigan y producen etanol celulósico a escala industrial: Abengoa (EE. UU.), Beta Renewables (Italia), DuPont (EE. UU.), GranBio (Brasil), Poet-DSM (EE. UU.) y Raízen (Brasil)). Sin embargo, ninguno de ellos pudo alcanzar su capacidad y mantener una producción estable debido a algunos desafíos relacionados con la mejora de las enzimas. Debido a que es una biomasa sólida y no soluble, las enzimas actúan en una interacción entre sólido y líquido, lo que confiere complejidad al proceso. Además, se estima que se requieren al menos veinticinco enzimas diferentes para la degradación completa de la estructura de la planta. Otro factor es hacer que un solo microorganismo produzca todo de la manera más eficiente, incluso a escala industrial (Carvalho M., Ishikawa L., 2019).

Además de los desafíos con la mejora de las enzimas, las empresas han informado sobre obstáculos en el proceso de producción debido al alto grado de impurezas que contiene la materia prima debido al uso de equipos inadecuados, ya que se crearon originalmente para la industria de la celulosa. Los procesos de fermentación son de cinco a diez veces más largos y la levadura *Saccharomyces cerevisiae* no puede procesar la xilosa, el azúcar de la hemicelulosa, como se expuso con anterioridad. Las compañías también informan que los equipos deben mejorarse, ya que están sujetos a alta presión y velocidad durante el tratamiento previo. Otro factor es el bajo rendimiento con la hidrólisis, que es 20-30% más bajo que lo esperado (Carvalho M., Ishikawa L., 2019).

A pesar de estos inconvenientes, al resolverse estos obstáculos el etanol de segunda generación podría ser económicamente viable. Además, las diferentes investigaciones que se están llevando a cabo hoy en día para resolver estos obstáculos nos dan pie a realizar previsiones optimistas de cara al futuro sobre la producción de segunda generación.

Se prevé que la producción de bioetanol de segunda generación sea superior a la producción de primera generación en aproximadamente los próximos diez años debido a la desfavorable posición de la materia prima empleada en la primera generación. De hecho, se espera que la producción de segunda generación se superponga al actual predominio de la primera generación en el mercado mundial de biocombustibles (Mahlia, T. M. I. et al. 2016).

La Agencia Internacional de Energía (AIE) ha predicho el coste de producción de bioetanol a partir de la biomasa lignocelulósica. AIE informó que para el 2030 el costo de la producción de bioetanol puede llegar a un nivel tan bajo como US \$ 0.55-0.65 / lge (litros de gasolina equivalentes). La previsión también predijo que el costo de producción para 2050 alcanzaría un rango ligeramente menor de US \$ 0.55 a 0.60 / lge. El pronóstico se observa con los escenarios de reducción del 50% de las emisiones anuales de dióxido de carbono para 2050, alta prioridad en el desarrollo global de la producción de segunda generación y la expectativa de cumplir drásticamente el 26% de la demanda de biocombustibles para el sector de transporte desde el año 2030-2050. En un estudio técnico-económico en Colombia recogido por Mahlia, T. M. I. et al., el costo de

producción de bioetanol a partir de racimos de fruta vacíos como materia prima lignocelulósica es tan bajo como US \$ 0.58 / litro para la planta de producción independiente, y US \$ 0.49 / litro por el sistema de planta de cogeneración. Mahlia, T. M. I. et al. también recogen en su trabajo el análisis del estudio colombiano de la producción de bioetanol a partir de otros materiales lignocelulósicos, que se enumeran en la Tabla 8. Otro dato interesante que proporcionan Mahlia, T. M. I. et al., es la información desarrollada por Malasia, Tye et al., los cuales afirmaron que el costo de producción de bioetanol se estima en alrededor de US \$ 5.62 / GJ, que es comparable con el costo de producción de combustible de gasolina de US \$ 5.12 / GJ (US \$ 1 \$ RM4.23, según la tasa de diciembre de 2015). Si bien en este momento parece que el costo de producción de bioetanol es más alto que el de la gasolina, el costo de la materia prima representa principalmente el costo total de producción. Esto significa que es posible tener un costo de producción de bioetanol factible, de hecho, más barato, que el combustible fósil en el futuro. (Mahlia, T. M. I. et al. 2016).

<b>Biomass</b>	<b>Production cost from stand-alone plant (US\$/litre)</b>	<b>Production cost from co-generation plant (US\$/litre)</b>
<b>Coffee cut stems</b>	0.68	0.59
<b>Empty fruit bunch</b>	0.58	0.49
<b>Rice husk</b>	0.64	0.53
<b>Sugarcane bagasse</b>	0.77	0.68

Tabla 8: Análisis de la producción a partir de materiales lignocelulósicos

Fuente: Mahlia, T. M. I. et al. 2016

El futuro sostenible para la producción de segunda generación está fuertemente ligado con el desarrollo de la tecnología actual. El progreso de esta tecnología es la que provoca que la actual producción de 270 l/ton de biomasa llegue a los 400 l/ton de biomasa de aquí al 2030 (Mahlia, T. M. I. et al. 2016). Para continuar con dicho progreso, es inevitable la inversión de una gran cantidad de capital además de ser arriesgada. Por ello, el éxito de la producción de segunda generación depende directamente de las políticas gubernamentales. Pero la ayuda de los gobiernos no solo contribuirá a la producción de segunda generación, sino que también permitirá que acciones posteriores de muchas aplicaciones de investigación eliminen los daños ambientales causados por las emisiones de ellos productos de energía no renovable.

En cuanto a las políticas que se establezcan con respecto a la producción de segunda generación hay determinados objetivos que deben conseguirse, incluyendo (1) la mejora de la productividad de los cultivos junto con el equilibrio de los ecosistemas, (2) la evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y contenido de carbono en el suelo, (3) análisis del costo de producción total desde la recolección hasta la distribución y (4) oportunidades para permitir que la producción de diferentes tecnologías produzca la mejor eficiencia de producción. En consecuencia, la producción a nivel industrial de bioetanol a partir de la biomasa lignocelulósica otorga numerosas oportunidades de empleo y desarrollo de áreas rurales de donde se obtiene la mayor parte de la biomasa, ya que, para implementar esta industria, se requieren recursos humanos de alta cualificación (Mahlia, T. M. I. et al. 2016).

## 2.2.8 Conclusión

La segunda generación ha surgido como una necesidad a los inconvenientes y conflictos ocasionados de la primera generación con sus detractores. El hecho de que su materia se obtenga de los desechos agroalimentarios, le sitúa como una gran promesa en el ámbito de las energías alternativas, ya que esta

biomasa es la más abundante del planeta y continúa aumentando. Sin embargo, es en la composición de esta biomasa donde reside sus mayores problemas. Esta materia prima, a diferencia del maíz o de la remolacha en la primera generación, requiere unos procesos de transformación más complejos y costosos.

La hidrólisis enzimática es una de las principales limitaciones de esta generación, ya que es difícil encontrar las condiciones óptimas del proceso, así como de encontrar enzimas realmente eficientes. Además, hay que añadir otra gran limitación, que es la fermentación. La levadura empleada actualmente en la fermentación, *Sccharomyces cerevisiae*, no es capaz de metabolizar la xilosa que, es el 40% de los azúcares obtenidos.

Se han creado diferentes métodos de producción de bioetanol, como la FHS, la SSF o la SCFS hallando todas ventajas y desventajas con respecto una de las otras, sin quedar ninguna de ellas como clara vencedora. Las diferentes empresas que intentan producir de manera estable bioetanol a partir de esta generación, han destacado que el obstáculo principal es el gran número de enzimas que se requiere para la obtención de bioetanol. Sin embargo, las investigaciones son optimistas, pues se prevé que, una vez resuelto estas limitaciones, la producción de bioetanol a partir de material lignocelulósico supere a la primera generación de aquí a 10 años, llegando incluso a tener costes de producción iguales o inferiores a los costes de los combustibles fósiles.

## 2.3 Bioetanol de 3<sup>o</sup> Generación

### 2.3.1 Introducción

La tercera generación de bioetanol es aquella que produce bioetanol a partir de biomasa acuática como la cianobacteria, macroalgas y microalgas. De entre ellas, la biomasa de microalgas (y su aplicación dentro del marco de biorrefinería) han despertado un enorme interés debido a que son microorganismos fotosintéticos que se caracterizan por su rápido crecimiento, las células se duplican en un periodo de 1 a 10 días, tienen algunas especies la capacidad de acumular cantidades considerables de almidón y utilizan menos superficie para su cultivo. Además, se obtiene una producción de aceite de 15 a 300 veces mayor que con otras especies para un mismo área (gracias a su alto porcentaje lipídico también presentan una alternativa para la producción de biodiesel, microalgas oleaginosas) y son los microorganismos con mayor capacidad para fijar el CO<sub>2</sub> (Montes, S., María, A., González Arechavala, Y., & Martín Sastre, C. (2014))

Las algas necesitan, para transformar la energía solar en energía química, luz, CO<sub>2</sub>, nutrientes y agua. La luz la obtienen del sol por lo que su utilización está limitada por el ciclo de luz natural y la variación estacional y restringida su viabilidad comercial a áreas con alta radiación solar. Se puede utilizar también luz artificial, aunque esta conlleva un mayor consumo energético y mayores emisiones de CO<sub>2</sub>. El CO<sub>2</sub> que necesitan lo pueden fijar de la atmósfera, de emisiones de gases industriales y de los carbonatos solubles, siendo lo más común la alimentación externa, bien por las emisiones industriales o por carbonatos solubles. Las microalgas pueden utilizar cualquier tipo de agua, lo que minimiza enormemente su consumo de agua dulce. En cuanto a los nutrientes necesarios para su crecimiento, fundamentalmente nitrógeno y fósforo, se tienen que adicionar en los sistemas de cultivo o captarlos de aguas residuales, siendo éste uno de los métodos actuales más efectivos para el tratamiento de aguas residuales. (Montes, S., María, A., González Arechavala, Y., & Martín Sastre, C. (2014)).

El alto potencial de acumulación de almidón marca a las microalgas como una materia prima potencialmente deseable para la transformación del almidón en glucosa y consecutivamente en etanol mediante procesos de fermentación (Rodríguez-Jasso et al, 2018).

Las microalgas son comúnmente conocidas con la capacidad de adaptar las diferentes condiciones ambientales. Diatomeas, Cyanoprocaryota, Euglenophycota, Cryptophycophyta y Chlorophycophyta son algunos ejemplos de los principales grupos de microalgas que pueden vivir en hábitats extremos. Las especies como *Chlorella* sp. y *Scenedesmus obliquus* sp. Se puede encontrar en el ambiente de agua alcalina. E incluso sobreviven en desechos líquidos industriales como hemos mencionado anteriormente. Estas microalgas no compiten con las plantas agrícolas convencionales, ya que pueden sobrevivir en condiciones extremas y pueden cultivarse en diferentes entornos acuáticos. Mientras las condiciones sean favorables, las microalgas se pueden recolectar durante todo el año. La producción de biomasa de microalgas se puede lograr entre 15 y 25 toneladas por año. (Abdulla, R., Azhar, S. H. M., et al. (2016)).

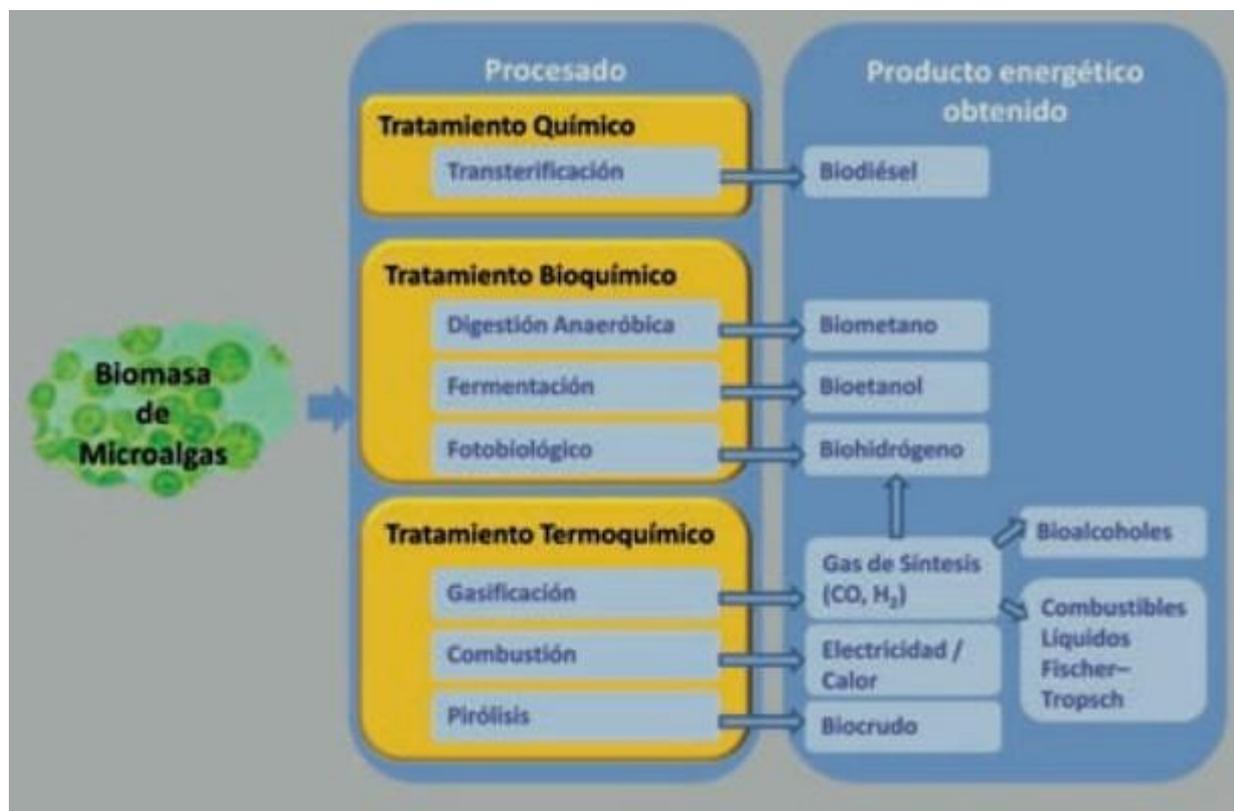


Figura 15: Principales procesos de obtención de energía a partir de biomasa de algas

Fuente: Montes, S., María, A., González Arechavala, Y., & Martín Sastre, C. (2014)

### 2.3.2 Visión General de la Biomasa de Microalgas

Las microalgas son organismos unicelulares microscópicos (2-200  $\mu\text{m}$ ), polifiléticos, su metabolismo puede ser autótrofo o heterótrofo y suelen ser eucariontes, aunque las cianobacterias procariontes son frecuentemente incluidas como microalgas (Fernández-Linares, L. C., Montiel-Montoya, J., Millán-Oropeza, A., & Badillo-Corona, J. A. (2012)).

Desde el punto de vista de la composición, las microalgas están compuestas principalmente de proteínas, carbohidratos, lípidos, cenizas y ácidos, entre otros compuestos. La lignina no se encuentra en las microalgas; y, por lo tanto, su biomasa tiene la ventaja de facilitar el procesamiento del tratamiento previo o, en otras palabras, facilitar la hidrólisis enzimática del almidón contenido.

Las microalgas son organismos complejos y se clasifican en un grupo muy diverso. Por ejemplo, según sus características estructurales, pueden ser rizoides o cocoides, pueden tener o no flagelos y vivir en colonias o agregados. Su pared celular está compuesta principalmente de celulosa, pero también puede incluir pectina y polisacáridos sulfatados. El almidón intracelular se encuentra en los plastos, que van del 20 al 50%. La mayoría de los lípidos se encuentran intracelularmente con concentraciones que van del 20 al 60%. Otros componentes, como las proteínas, también se pueden encontrar en concentraciones entre 20 y 50%. La concentración de estos compuestos bioquímicos depende de las condiciones de crecimiento y del medio de cultivo en que se cultivan los microorganismos. La Tabla 9 presenta una comparación de la composición de diferentes especies de microalgas (Rodríguez-Jasso et al, 2018).

La biomasa de microalgas se considera importante para producir una variedad de productos como

biocombustibles, vitaminas de compuestos bioactivos (por ejemplo, aminoácidos y vitaminas) para consumo humano y / o animal, etc., dentro del concepto de biorrefinería (Montes, S., María, A., González Arechavala, Y., & Martín Sastre, C. (2014)).

Por ejemplo, Cyanotech Corp. (EE. UU.) Es el principal productor de espirulina y posee aproximadamente 9 ha de producción en Hawaii, comercializando tabletas de espirulina con precios que van desde los USD 87.47-142.82 / Kg. La compañía japonesa Yaeyama Shokusan Co. Ltd. también distribuye diferentes productos de Chlorella en forma de tabletas, polvo, polvo fino y líquido. Tienen 10 ha de producción de microalgas, lo que los convierte en importantes productores de biomasa de microalgas, con precios de venta de alrededor de \$ 100.00 / Kg de microalgas en polvo. También hay otras empresas industriales en el mundo que producen microalgas, incluyendo Cyano Biofuels GmbH. (Alemania), AlgaFuel, S.A. (Portugal), Oil Fox (Argentina), así como Algae Food and Fuel (Países Bajos). Actualmente, hay más de cincuenta empresas que producen algunos tipos de biomasa acuática para su uso como suplemento, aditivos, colorantes, alimentos o bioenergía (Rodríguez-Jasso et al, 2018)

<b>Microalgas</b>	<b>Proteína (%)</b>	<b>Carbohidratos (%)</b>	<b>Lípidos (%)</b>	<b>Ácidos Nucleicos (%)</b>
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50 – 56	10 – 17	12 – 14	3 – 6
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	47	-	1.9	-
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	8 – 18	21 – 52	16 – 40	-
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21	-
<i>Chlorella vulgaris</i>	51 – 58	12 – 17	14 – 22	4 – 5
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	57	26	2	-
<i>Spirogyra</i> sp.	6 – 20	33 – 64	11 – 21	-
<i>Dunaliella bioculata</i>	49	4	8	-
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6	-
<i>Euglena gracilis</i>	39 – 61	14 – 18	14 – 20	-
<i>Prymnesium parvum</i>	28 – 45	25 – 33	22 – 38	1 – 2
<i>Tetraselmis maculata</i>	52	15	3	-
<i>Porphyridium cruentum</i>	28 – 39	40 – 57	9 – 14	-
<i>Spirulina platensis</i>	46 – 63	8 – 14	4 – 9	2 – 5
<i>Spirulina maxima</i>	60 – 71	13 – 16	6 – 7	3 – 4.5
<i>Synechococcus</i> sp.	63	15	11	5
<i>Anabaena cylindrica</i>	43 – 56	25 – 30	4 – 7	-

Tabla 9: Composición bioquímica de microalgas (% base materia seca)

Fuente: Villacorta, F., Eugenio, N., & Carrera Merlo, W. A. (2017).

Existen tres rutas para la producción de bioetanol a partir de microalgas. El primero es el proceso tradicional en el que la biomasa se somete a pasos de pretratamiento, hidrólisis enzimática y fermentación de levadura. La segunda ruta es el uso de vías metabólicas en condiciones de oscuridad, redirigiendo la fotosíntesis para producir hidrógeno, ácidos y alcoholes (como el etanol). La tercera vía es a través de la "fotofermentación", que es de naturaleza impracticable. La última ruta requiere el uso de ingeniería genética para redirigir las vías bioquímicas preexistentes de las microalgas para una producción más subjetiva y eficiente de bioetanol. Cada ruta tiene sus peculiaridades, como se muestran resumidas en la Figura 16 (de Farias Silva, C. E., & Bertucco, A. 2016)

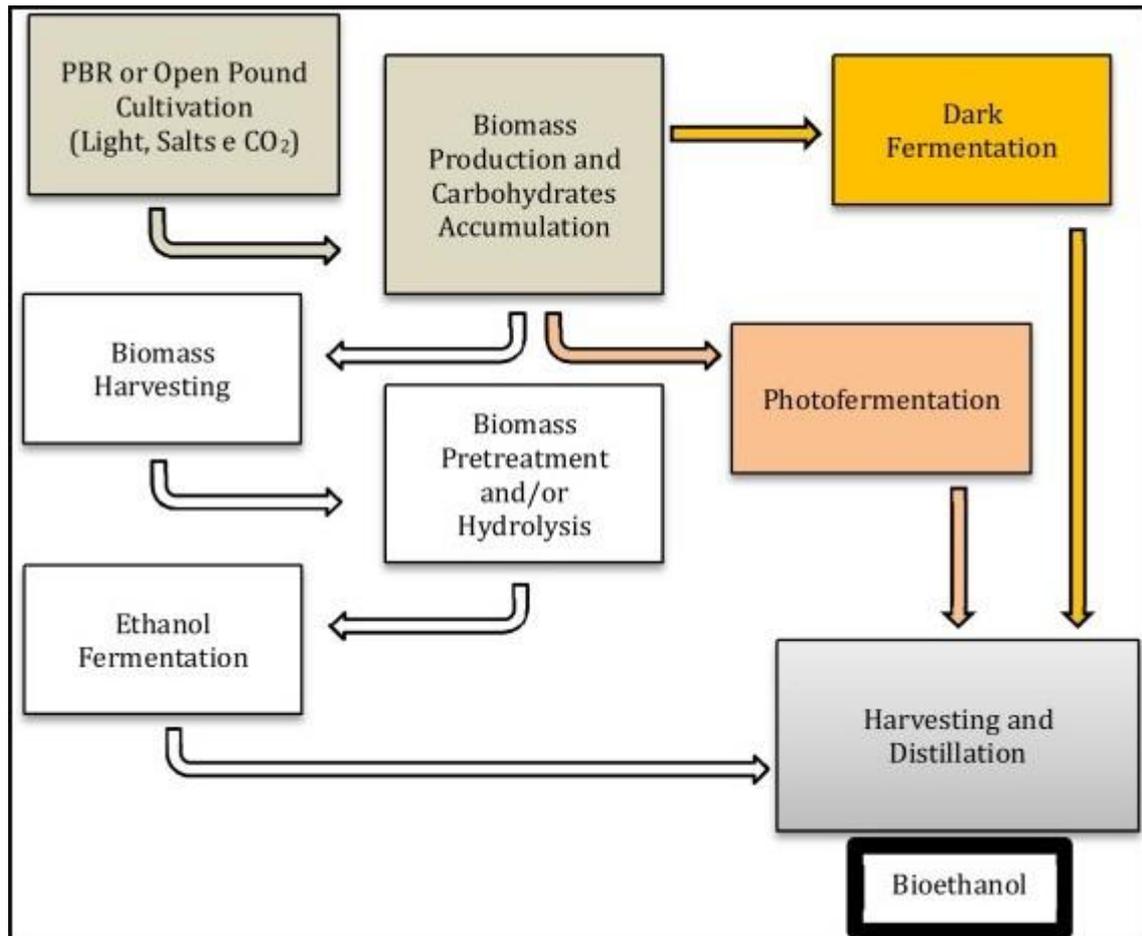


Figura 16: Rutas de la producción de etanol a partir de microalgas

Fuente: de Farias Silva, C. E., & Bertucco, A. (2016)

### 2.3.3 Microalgas y Cyanobacteria para Biocombustibles

Los biocombustibles de microalgas han sido objeto de intensas investigaciones centradas principalmente en la producción de biodiesel y biogás, aunque también se consideran el bioetanol y el biohidrógeno (Fig. 17). Las vías de producción y las condiciones de operación varían para cada biocombustible. Varios estudios ya han demostrado la viabilidad de los procesos industriales para la producción de biodiesel, algunos de los cuales sugieren la digestión anaeróbica después de la extracción de lípidos de la biomasa de algas. Sin embargo, los estudios dirigidos a consolidar un proceso adecuado para la producción de bioetanol aún están en curso (de Farias Silva, C. E., & Bertucco, A. 2016).

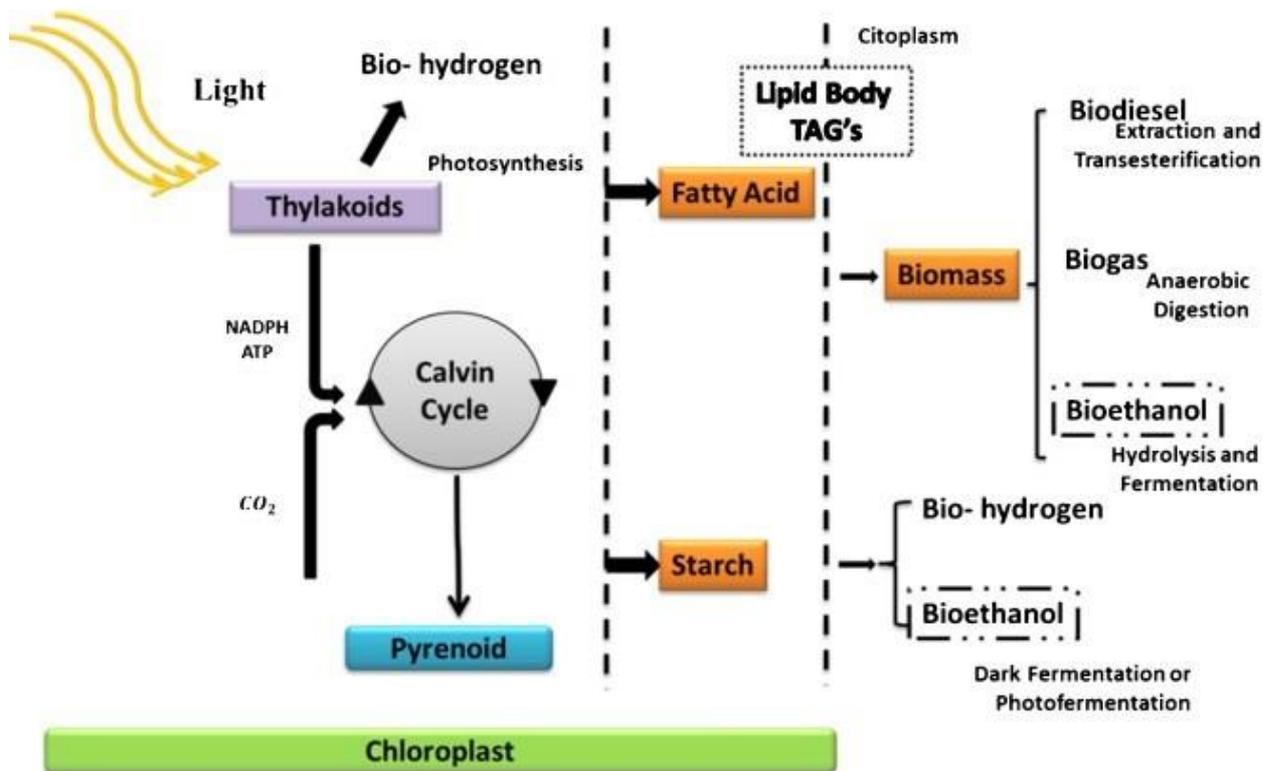


Figura 17: Producción de biocombustibles a partir de microalgas.

Fuente: (de Farias Silva, C. E., & Bertucco, A. 2016)

Por el contrario, se ha demostrado que las cepas de cianobacterias producen una cantidad relevante de bioetanol. El phylum Cianobacteria o división Cianophyta comprende un grupo de bacterias oxigenadas que permiten obtener energía por fotosíntesis. Se les conoce comúnmente como algas azul-verdes, aunque el término algas generalmente se asocia con organismos eucariotas (como las divisiones Chlorophyta, Rhodophyta y Heterokontophyta). Actualmente se sabe que estos microorganismos no están filogenéticamente relacionados con ningún grupo de algas eucarióticas. La mayoría de las especies de cianobacterias son terrestres, pero también hay algunas especies marinas. Spirulina, Chlorococcus, Gloeocapsa, Synechocystis y Synechococcus son algunos ejemplos de géneros agrupados en el phylum de las cianobacterias.

La producción de bioetanol a partir de microalgas y cianobacterias es un desarrollo tecnológico factible, ya que mostraron una mayor productividad que ciertos cultivos como la caña de azúcar y el maíz (ya consolidados como materias primas para la producción de bioetanol). Las microalgas y las cianobacterias pueden alcanzar el 50% de su peso seco (PS) en carbohidratos, que luego pueden hidrolizarse y fermentarse con altos rendimientos. También pueden concentrarse fácilmente, pero los costos de cultivo siguen siendo altos (de Farias Silva, C. E., & Bertucco, A. 2016)

### 2.3.4 Ciclo de Calvin y Tilacoides

Las Figuras 15, 16 y 17 nos definen de forma diversa todos los procesos posibles de producción de biocombustibles a partir de microalgas. En la Figura 17, se añaden términos como tilacoides o el Ciclo de Calvin que son importantes para entender cuál es el proceso, desde que las microalgas reciben la luz del sol hasta que se transforman en combustible.

Los tilacoides (Fig. 18) son sacos aplanados que son independientes de la membrana interna del cloroplasto, sitio de las reacciones captadoras de luz de la fotosíntesis y de la fotofosforilación. En ellas se produce hidrógeno de forma natural, que es lo que conocemos como tratamiento fotobiológico para obtener biohidrógeno como es mencionado en la Figura 15.

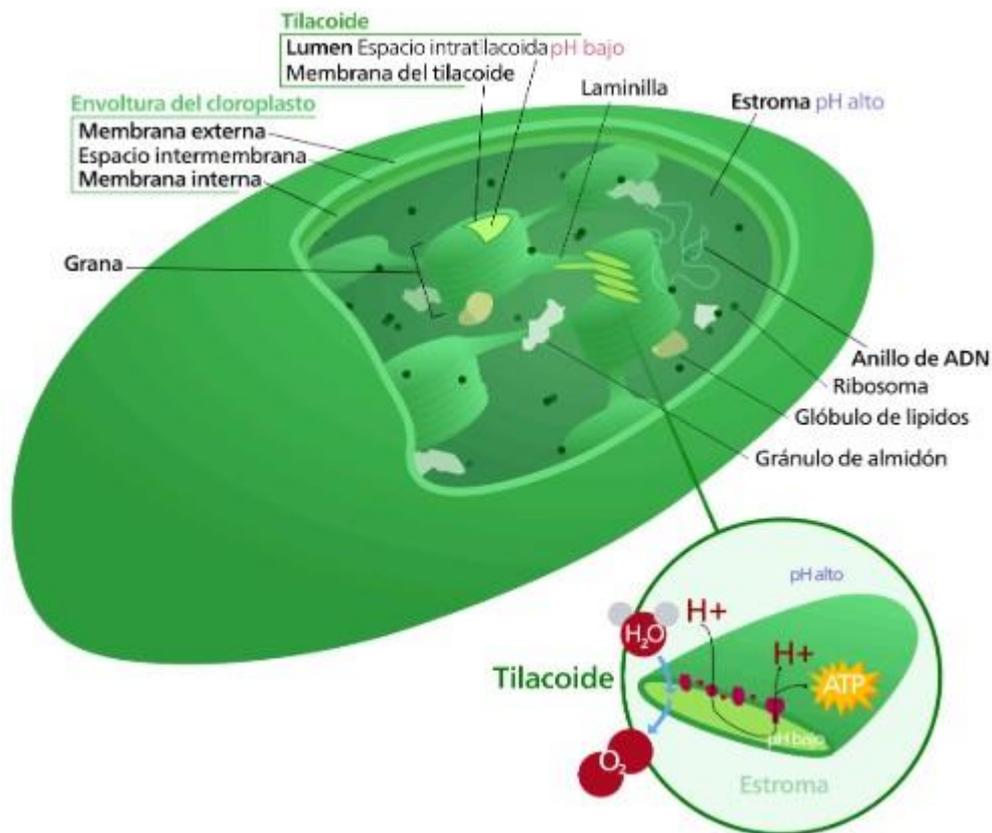


Figura 18: Esquema cloroplasto y tilacoides

Fuente: Curiosoando.com (2 noviembre, 2016). "¿Qué son los tilacoides?".

En cuanto al Ciclo de Calvin (Fig.19) son reacciones que se producen con la entrada del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en las plantas para sintetizar el azúcar. Hay tres reacciones:

- Fijación del carbono. Una molécula de CO<sub>2</sub> se combina con una molécula de cinco carbonos obteniendo 3-PGA
- Reducción. El ATP y NADPH se utilizan para convertir las moléculas de 3-PGA en moléculas de azúcar de 3 carbonos (G3P)
- Regeneración: Algunas moléculas de G3P se van para formar glucosa.

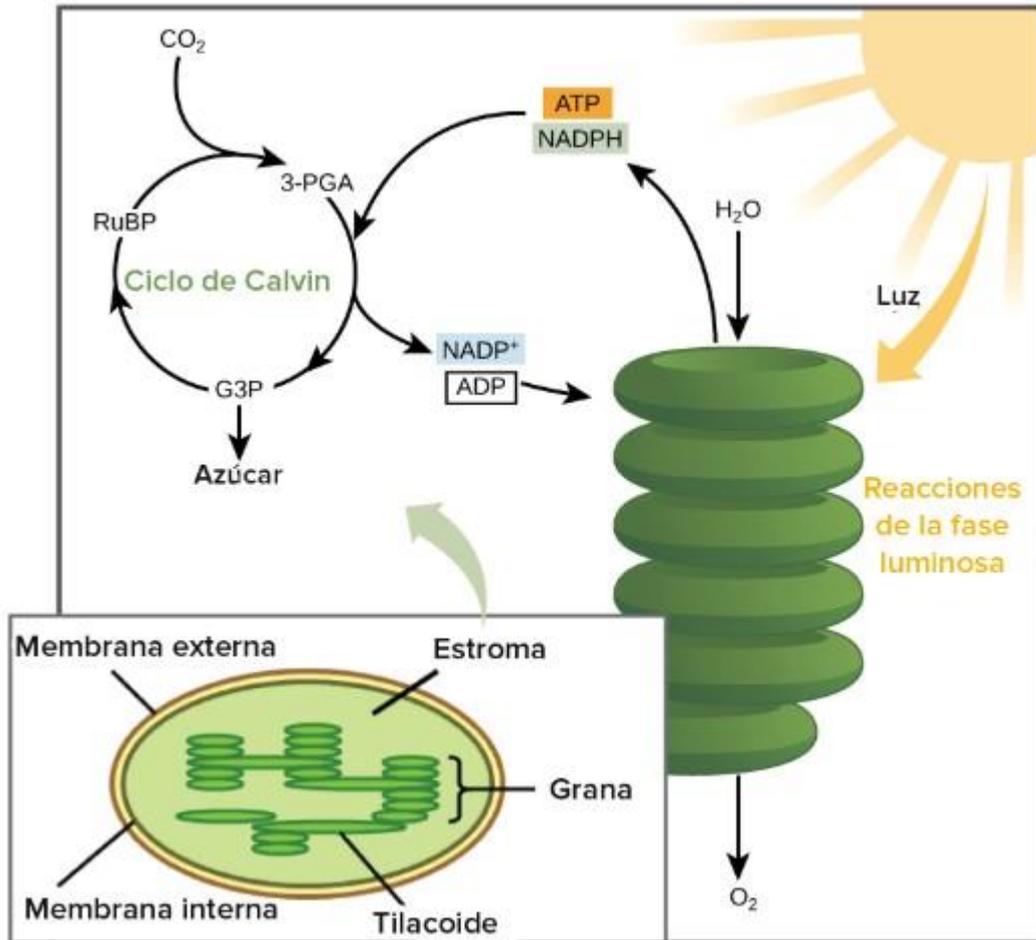


Figura 19: Ciclo de Calvin

Fuente: El ciclo de Calvin. <https://es.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/the-calvin-cycle-reactions/a/calvin-cycle>

### 2.3.5 Producción de Bioetanol a partir de Hidrólisis y Fermentación

Esta ruta está basada en la producción de biomasa de microalgas en fotobiorreactores sucedido por los pasos de pretratamiento, y frecuentemente por la suma de enzimas.

#### 2.3.5.1 Pretratamientos

Con el pretratamiento se pretende poner a disposición los componentes intracelulares como los carbohidratos, las proteínas, los lípidos y otros componentes de valor como las cadenas cortas de oligosacáridos, antioxidantes, pigmentos, etc.

Los dos objetivos principales para los cuales es necesario el tratamiento previo de la biomasa de las microalgas son la descomposición de la pared celular y la modificación de la estructura de los carbohidratos intracelulares. El carbohidrato de las microalgas se puede encontrar en la pared celular en forma de celulosa y en los plástidos en forma de almidón como la principal reserva de azúcar (Fig. 20). Dicha información es relevante para seleccionar la biomasa con el mayor contenido de azúcares para la producción de bioetanol.

Dependiendo de la composición, la pared celular puede dar como resultado una estructura más o menos rígida y, por lo tanto, puede ser más difícil de romper, como en el caso de *Chlorella* sp. que tiene una pared más dura contraria a la de *Scenedesmus* sp. y cianobacterias *Arthrospira* sp. (Rodríguez-Jasso et al, 2018).

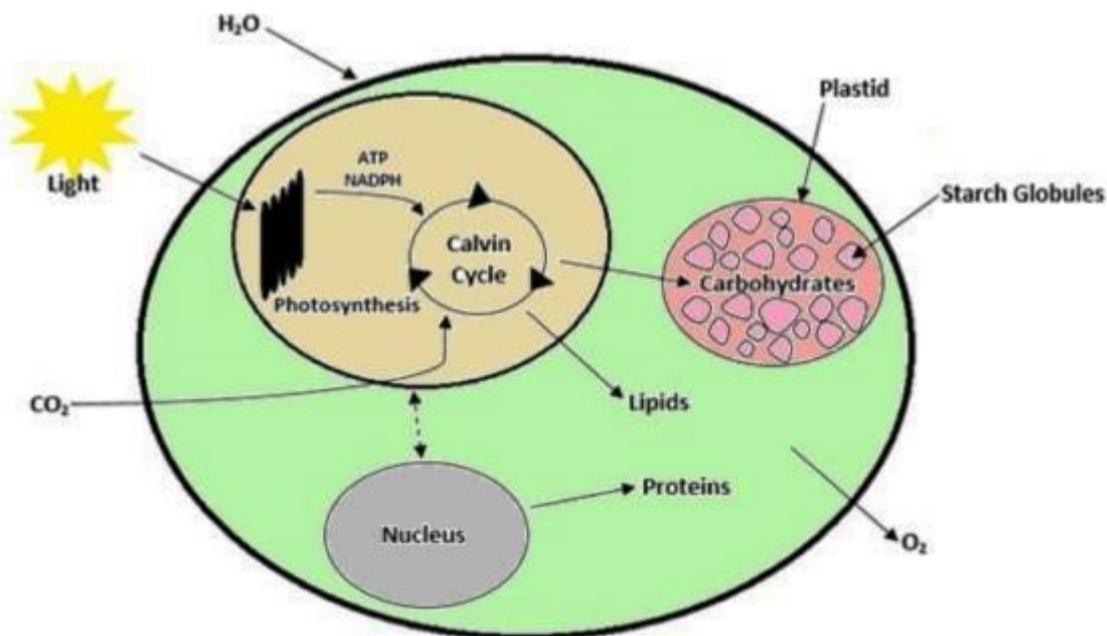


Figura 20: Esquema de la producción de almidón en microalgas.

Fuente: Rodríguez-Jasso et al, 2018

A continuación, se van a definir los métodos de pretratamiento más usuales, i) extracción hidrotérmica, uso de microondas como tipo de calentamiento no convencional, ii) proceso de ultrasonido, iii) hidrólisis enzimática, y iv) pulsos eléctricos, aunque hay una gran variedad de pretratamientos como se puede observar en la Fig.21 que muestra el esquema de la producción de bioetanol de tercera generación mediante la fermentación.

- i) Pretratamiento de microondas: Este tipo de pretratamiento también se usa en gran parte en la química orgánica para la aceleración de las reacciones y la extracción de compuestos, y ya se ha utilizado en el pretratamiento de residuos lignocelulósicos para producir bioetanol de segunda generación y compuestos de alto valor en un estudio realizado. Con la aplicación de la radiación de microondas en el almidón, se pierde la cristalinidad nativa de los gránulos de almidón y se crea un material completamente amorfo, es decir, el gránulo se destruye prácticamente. El tratamiento previo con microondas promueve la digestibilidad del almidón, lo que puede mejorar, dependiendo de las condiciones del tratamiento previo, la accesibilidad de las enzimas al sustrato tratado previamente. Según la revista *Boiofuel Research Journal*, un equipo de investigadores informaron que el uso de pretratamiento con microondas en *Chlorella sp.* biomasa utilizando 2.450 MHz; 530 W; durante 45 y 75 s como condiciones de pretratamiento, obtuvo hasta el 82% de rotura celular (Rodríguez-Jasso et al, 2018).
- ii) Pretratamiento de ultrasonidos: La tecnología de ultrasonido ha sido ampliamente utilizada en el campo de la química orgánica para la aceleración de las reacciones químicas y para la extracción de compuestos bioactivos de varias especies de plantas. El proceso de ultrasonido implica el uso de ondas de sonido que viajan a través de un medio líquido y crea áreas de compresión y rarefacción, donde ocurren cambios de presión que crean el fenómeno de cavitación que induce la formación de burbujas en el medio elástico. Este tipo de tecnología puede ayudar a romper la pared celular de las microalgas porque cuando las burbujas colapsan en la superficie de un sólido, la presión y la temperatura elevada crean microjets que permiten que el solvente penetre en la materia prima y se produce una ruptura de la pared celular (Rodríguez-Jasso et al, 2018).
- iii) Pretratamiento enzimático: Una de las ventajas del uso de la biomasa de microalgas es que, en este tipo de pretratamiento, se puede llevar a cabo la sacarificación seguida de la etapa de tratamiento previo sin tener que implementar ningún equipo diferente o un tratamiento excesivo de la muestra. En comparación con varios métodos de pretratamiento, la hidrólisis enzimática se

ha mostrado prometedora. Las principales ventajas de la hidrólisis enzimática son su alta especificidad, sin requisitos de condiciones severas y que es fácil de realizar a escala industrial, además de que el resto de pretratamientos requieren posteriormente una hidrólisis. La principal desventaja es el alto costo de las enzimas utilizadas. La hidrólisis enzimática se realiza utilizando diferentes enzimas, entre las cuales se pretende que las celulasas, amilasas y amiloglucosidasas hidrolicen los polisacáridos de la pared celular. Es importante mencionar que, dependiendo del tipo de microalgas, su pared celular puede o no ser permeable a otros compuestos, por lo que a menudo no se requieren enzimas específicas para romper la pared celular ya que estas (las enzimas) pueden alcanzar los carbohidratos intracelulares. La Tabla 10 tabula diferentes enzimas utilizadas en la degradación de la pared celular de las microalgas (Rodríguez-Jasso et al, 2018).

- iv) Pretratamiento de impulsos eléctricos: El método de tratamiento previo PEF es una técnica simple basada en la electricidad; no es térmico y se realiza en un corto periodo de tiempo que va desde los nanosegundos hasta los milisegundos, pero con una gran amplitud de 100 a 300 V cm<sup>-1</sup> a 300 kV cm<sup>-1</sup>. Este tratamiento previo funciona bien tanto en concentraciones de células bajas como altas en líquido y, por lo tanto, podría usarse directamente con el cultivo de microalgas. Sin embargo, la extracción de compuestos que utilizan esta tecnología no se ha estudiado a fondo, y esto representa una gran oportunidad para realizar estudios adicionales con un enfoque en el tratamiento previo basado en PEF no solo de biomasa de microalgas, sino también de otros. Tipos de biomasa renovable para extraer azúcares y compuestos de alto valor agregado sin dañar o degradar las materias primas utilizadas (Rodríguez-Jasso et al, 2018).

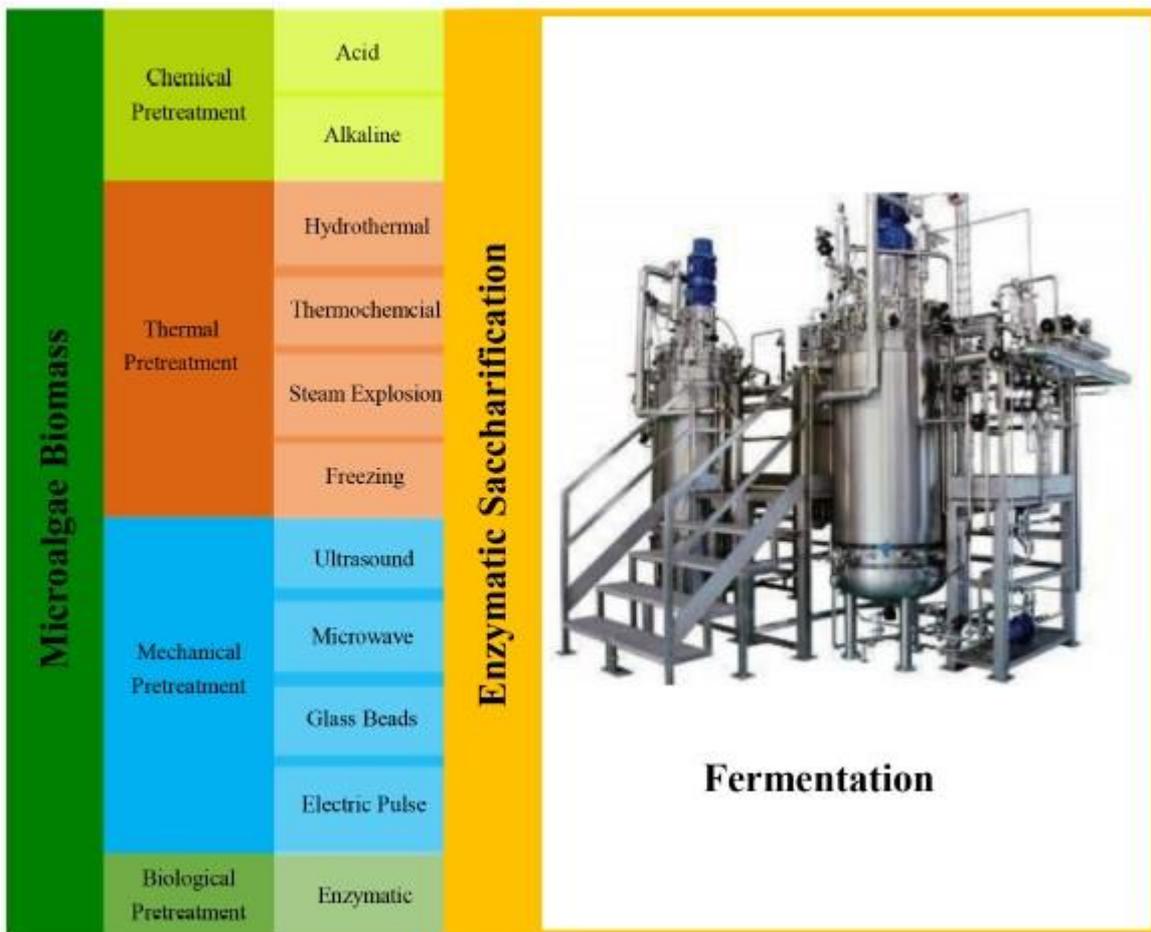


Figura 21: Esquema general para el pretratamiento de la tercera generación

Fuente: Rodríguez-Jasso et al, 2018

Microalgae species	Enzymes	Saccharification rate
<i>Chlorella vulgaris</i>	Celulase Pectinase Xylanase $\beta$ -glucosidase Amylase Chitinase Lysozyme Sulfatase	79 %
<i>Chlorella vulgaris</i> <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Glucanase Protease	86 - 96 %
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Celulasas Amylasas	100 %
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	Amyloglucosidase	80.9 %
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	$\alpha$ -amylase Amyloglucosidase	56 %

Tabla 10: Enzimas empleadas en la degradación de las paredes de las células de las microalgas

Fuente: Rodríguez-Jasso et al, 2018

### 2.3.5.2 Hidrólisis

La hidrólisis es fundamental para la producción de bioetanol, pues una vez despolimerizadas las paredes celulares de las algas, obteniendo así los polisacáridos, estos son hidrolizados en moléculas de monómeros libres que se pueden fermentar fácilmente en bioetanol. Nos podemos encontrar con la hidrólisis química, que hasta la fecha ha sido el método comúnmente utilizado para hidrolizar el polisacárido, o la enzimática que ha sido el enfoque reciente que ha sido destacado entre los investigadores de todo el mundo (Abdulla, R., Azhar, S. H. M., et al. (2016))

La hidrólisis enzimática de los azúcares presentes en la biomasa de las microalgas ofrece muchas ventajas sobre la hidrólisis química con ácidos ( $H_2SO_4$ ) o álcalis. No incluyen requisitos para equipos costosos (debido a que se llevan a cabo en condiciones suaves), no generan productos de degradación o compuestos tóxicos (que potencialmente puedan afectar la fermentación posterior) (Rodríguez-Jasso et al, 2018).

La conversión de azúcares complejos a su forma simple mediante el empleo de hidrólisis enzimática es una forma definitiva de reducir los impactos ambientales negativos en cierta medida. La capacidad de lograr una tasa de conversión de más del 80% también hace que el enfoque enzimático parezca más atractivo para la aplicación en la producción de bioetanol (Abdulla, R., Azhar, S. H. M., et al. (2016)).

En relación con las condiciones operativas del proceso, la biomasa de las microalgas parece requerir condiciones suaves para la hidrólisis, así como para la fermentación. Además, la hidrólisis ácida y enzimática de la biomasa de microalgas requiere una cantidad baja de reactivos, particularmente en el caso de la hidrólisis enzimática, para lograr altos rendimientos de conversión (de Farias Silva, C. E., & Bertucco, A. (2016)).

La Tabla 11 muestra la comparación entre la hidrólisis enzimática y la ácida.

Parámetros	Ácida	Enzimática
Tiempo	Corto	Largo
Coste	Bajo	Alto
Temperatura	Alta	Templada
Rendimiento Sacarificación	Bajo	Alto
Corrosión de los Equipos	Si	No
Subproductos Indeseables	Si	No

Tabla 11: Comparación hidrólisis ácida y enzimática

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos proporcionados por (Abdulla, R., Azhar, S. H. M., et al. (2016)).

### 2.3.5.3 Fermentación

Los azúcares simples liberados en la etapa de hidrólisis se pueden convertir fácilmente en bioetanol con la ayuda de pocos microorganismos (levaduras o bacterias). El bioetanol es el principal producto de la fermentación, junto con pocos subproductos como el CO<sub>2</sub> y el agua (Abdulla, R., Azhar, S. H. M., et al. (2016)).

Los microorganismos más comunes utilizados para la fermentación etanólica son levaduras del género *Saccharomyces* o bacterias del género *Zymomonas*. *Saccharomyces cerevisiae* es la cepa más comúnmente empleada en la fermentación de bioetanol debido a sus características tales como alta selectividad, baja acumulación de subproductos, alto rendimiento de etanol y alta tasa de fermentación (de Farias Silva, C. E., & Bertucco, A. (2016)).

Los principales inconvenientes de esta ruta son los procesos de varios pasos requeridos, así como de la inhibición del producto final por los azúcares que se forman durante la hidrólisis que requieren más energía, y el uso de enzimas y levaduras, que representan una proporción considerable de los costos. Por el contrario, el proceso de hidrólisis / fermentación convierte la biomasa a la tasa más alta, debido a la conocida alta eficiencia de las enzimas y levaduras para convertir la biomasa en productos (Abdulla, R., Azhar, S. H. M., et al. (2016)).

### 2.3.5.4 Purificación

La purificación es la última etapa, en la cual se separa el etanol del resto de componentes. La etapa de purificación en bioetanol involucra varios tipos de técnicas como la rectificación, destilación y deshidratación que influyen en gran medida en los productos finales. Entre estas técnicas, la destilación es la más utilizada en la etapa de purificación a pesar de su alto consumo de energía. Como el principio básico de la destilación es separar las mezclas en función de las volatilidades de los componentes, la concentración resultante del contenido debe ser bien observada. Para ser aceptado para su comercialización, el bioetanol debe cumplir con todos los estándares requeridos que han sido establecidos por los estándares internacionales tales como ASTM y ANP (Abdulla, R., Azhar, S. H. M., et al. (2016)).

### 2.3.6 Cultivo de microalgas y acumulación de carbohidratos

Los microorganismos con potencial para la producción de bioetanol de este método (hidrólisis y fermentación) se seleccionan principalmente de acuerdo con su capacidad para acumular carbohidratos, que depende de las condiciones ambientales y nutricionales. Los principales factores ambientales son la intensidad de la luz, el pH, la salinidad y la temperatura, mientras que los factores nutricionales incluyen la disponibilidad y el tipo de fuente de nitrógeno, carbono, fósforo, azufre y hierro. Los géneros *Scenedesmus*, *Chlorella*, *Chlorococcum* y *Tetraselmis* de la división *Clorophyta* y *Synechococcus* entre otras cianobacterias han sido ampliamente estudiados como materia prima para este tipo de producción de bioetanol. En general, el cultivo en una intensidad de luz alta varió de 150 a 450  $\mu\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  utilizando una mezcla de CO<sub>2</sub> en el aire entre 2% y 5% y las temperaturas mesofílicas (20–30 ° C) logran alrededor del 50% de carbohidratos en contenido en situación de inanición de nutrientes, principalmente nitrógeno. En la tabla 11 se puede observar el contenido de

carbohidratos que se obtienen en algunas microalgas y cianobacterias dependiendo de las condiciones de crecimiento de Farias Silva, C. E., & Bertucco, A. (2016).

Microorganismo	Condiciones de Crecimiento	Acumulación de Carbohidratos (%)
<b>Chlorella variabilis NC64A</b>	150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 25 °C, 2% CO <sub>2</sub>	43.5
<b>Chlorella vulgaris P12</b>	70 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 30 °C 2% CO <sub>2</sub>	37.8
<b>Chlorococcum humicola</b>	Aire libre y burbujeado de CO <sub>2</sub> 34.5 kPa	32
<b>Scenedesmus dimorphus</b>	50–1200, 25 °C 2% CO <sub>2</sub>	45-50
<b>Scenedesmus obliquus</b>	150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 25 °C Aire burbujeado	30
<b>Synechococcus bijugatus</b>	Aire libre	26
<b>Synechococcus elongatus PCC 7942</b>	200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 28 °C 5% CO <sub>2</sub>	28
<b>Tetraselmis subcordiformis</b>	200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 25 °C 3% CO <sub>2</sub>	45-50
<b>Tetraselmis subcordiformis FACHB-1751</b>	150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 25 °C 3% CO <sub>2</sub>	40

Tabla 12: Contenido de carbohidratos de algunas microalgas y cianobacterias

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos aportados por de Farias Silva, C. E., & Bertucco, A. (2016).

### 2.3.7 Simultánea sacarificación y fermentación (SSF)

En SSF, el proceso de hidrólisis y fermentación se lleva a cabo simultáneamente en una única etapa que involucra un solo reactor. Durante la reacción, la materia prima, la enzima y la levadura se juntan de manera ordenada para que los azúcares liberados se conviertan rápidamente en bioetanol. La SSF puede limitar la inhibición del producto final eliminando el azúcar residual. Se puede obtener un mayor rendimiento de bioetanol si las condiciones son apropiadas durante la reacción de SSF (Abdulla, R., Azhar, S. H. M., et al. (2016)).

### 2.3.8 Producción de etanol a partir de la fermentación oscura

La fermentación oscura se ha referido como la conversión de sustratos orgánicos en biohidrógeno. Los microorganismos fermentativos e hidrolíticos hidrolizan los polímeros orgánicos complejos en monómeros, que posteriormente se convierten en una mezcla de ácidos orgánicos de bajo peso molecular y alcoholes, principalmente ácido acético y etanol. Varias microalgas y cianobacterias que son capaces de expulsar etanol a través de la pared celular por medio de un proceso intracelular en ausencia de luz incluyen *C. reinhardtii*, *Chlamydomonas moewusii*, *C. vulgaris*, *Oscillatoria limnetica*, *Oscillatoria limosa*, *Gleocapsa alpícola*,

Cyanothece spica ., Chlorococcum littorale, y Spirulina sp. e Synechococcus sp. Sin embargo, la fermentación oscura es desventajosa en términos de productividad del hidrógeno, ya que aproximadamente el 80-90% de la demanda química inicial de oxígeno (DQO) permanece en forma de ácidos y alcoholes después del proceso. Incluso en condiciones operativas óptimas, los rendimientos típicos varían solo entre 1 y 2 mol de H<sub>2</sub> por mol de glucosa. La producción de etanol se ve favorecida por la acumulación de carbohidratos en las células de microalgas a través de la fotosíntesis, y luego las microalgas se ven obligadas a sintetizar etanol a través del metabolismo fermentativo directamente de sus reservas de carbohidratos y lípidos cuando cambian el crecimiento a condiciones de oscuridad. Sin embargo, se puede concluir que la fermentación oscura de microalgas no es un proceso eficiente para la producción de bioetanol (de Farias Silva, C. E., & Bertucco, A. (2016)).

### **2.3.9 Bioetanol a partir de fotofermentación**

La "fotofermentación" es un proceso de creciente interés principalmente después del anuncio de la instalación de plantas industriales donde se utilizan cianobacterias modificadas para producir bioetanol directamente.

La ruta "fotofermentativa" (simplemente, Fotanol) es un mecanismo natural de conversión de la luz solar en productos de fermentación a través de una vía metabólica altamente eficiente. El Fotanol, no solo se limita a la producción de etanol, sino que también se usa para una gran cantidad de productos naturales que resultan de la fermentación basada en la glucólisis. Por lo tanto, varias especies de cianobacterias pueden modificarse genéticamente mediante la introducción de casetes de fermentación específicos a través de procedimientos de ingeniería molecular, y luego se prueban como un organismo fermentativo (de Farias Silva, C. E., & Bertucco, A. (2016)).

El proceso de "fotofermentación" para obtener etanol incluye dos etapas: la fotosíntesis y la fermentación. Cada etapa tiene sus factores clave que determinan la eficiencia del proceso y las necesidades metabólicas de las cianobacterias. En cualquier caso, esta ruta requiere el uso de microorganismos genéticamente modificados (de Farias Silva, C. E., & Bertucco, A. (2016)).

El uso de cianobacterias modificadas aún requiere una investigación cuidadosa sobre las bases estructurales, metabólicas y genéticas para comprender no solo su uso en procesos de bioetanol industrial, sino también los riesgos ambientales latentes asociados con el uso de microorganismos modificados genéticamente (de Farias Silva, C. E., & Bertucco, A. (2016)).

### **2.3.10 Economía, viabilidad comercial y perspectivas de futuro de la tercera generación de bioetanol**

El bioetanol de tercera generación a partir de materia prima de algas actualmente ha atraído a muchos inversionistas de biocombustibles para proporcionar fondos sustanciales para proyectos de investigación. El objetivo básico de la investigación económica, especialmente en biocombustibles, es minimizar el costo de producción. Como la cadena de suministro representa el mayor costo en la producción de bioetanol, se debe centrar más esfuerzos en ello. Según (Abdulla, R., Azhar, S. H. M., et al. (2016)), el costo cubierto por la cadena de suministro incluye el costo de la materia prima, el transporte, el almacenamiento y también las tecnologías de conversión. En estos días, los investigadores están comprometidos en encontrar una forma económicamente viable para la producción sostenible de bioetanol. Por lo tanto, de esta manera, no se argumenta la viabilidad de las algas como materia prima para el bioetanol.

El beneficio económico de las algas en el bioetanol radica especialmente en su alto contenido de energía, que es mayor que la energía acumulada por los cultivos comestibles y la biomasa lignocelulósica. Según los datos aportados por Abdulla, R., Azhar, S. H. M., et al. las microalgas pueden producir aproximadamente 5000–15,000 galones de etanol por acre al año, lo que es más confiable que la primera y la segunda generación de materia prima de bioetanol. Además, a pesar de su contribución en la industria del bioetanol, el procesamiento de algas puede dar lugar a variedades de productos de alto valor como los productos bioquímicos, el cuidado de la salud y los cosméticos

Ayuda a la población costera al aumentar las oportunidades de empleo a través del cultivo de algas marinas o uno de los principales contribuyentes a la promoción económica en esa área. El rendimiento promedio mundial de algas marinas de 730,000 kg / ha por año muestra su sostenibilidad como fuente de energía renovable para la energía renovable (Abdulla, R., Azhar, S. H. M., et al. (2016)).

El coste de la tercera generación es alto, debido a la falta de eficiencia en la tecnología que actualmente se dispone para una posible comercialización de la TGB. Esto produce un desinterés en los inversores interesados en la comercialización, pues los ingresos están lejos de obtenerse. Sin embargo, debido a las perspectivas prometedoras en la industria de los biocombustibles, los científicos siguen atrayendo capital de investigación.

Por lo tanto, la mayoría de las investigaciones en la industria del bioetanol se centran principalmente en la optimización de diferentes factores para obtener resultados reproducibles, como la materia prima, enzimas, microorganismos y también parámetros de proceso (Abdulla, R., Azhar, S. H. M., et al. (2016)).

En términos de eficiencia de la materia prima, los investigadores deben evaluar los factores que inducen las tasas de crecimiento de algas, como la temperatura, la intensidad de la luz y los nutrientes para una productividad sostenible.

Las etapas de hidrólisis y fermentación son el foco principal para la evaluación de su viabilidad comercial. Las investigaciones se enfocan en las investigaciones de tecnologías basadas en enzimas, averiguando la regulación de la actividad de estas para poder obtener las condiciones óptimas durante el proceso. Con la fermentación ocurre de forma similar, se estudia el desarrollo de una cepa microbiana eficiente para la fermentación de bioetanol. Dichas ideas parecían fáciles de lograr, sin embargo, la tasa de éxito no se puede predecir (Abdulla, R., Azhar, S. H. M., et al. (2016)).

Al igual que otros biocombustibles líquidos, el bioetanol de algas también enfrenta los problemas de su comercialización. Aunque la investigación aún está en la fase de desarrollo, se espera que su comercialización se enfrente a muchos críticos de todo el mundo. Uno de los principales obstáculos es su alto costo de producción. Para superar esta limitación, la mayoría de las nuevas investigaciones se han desviado para implementar nuevas innovaciones técnicas y una ampliación integrada en las rutas de procesamiento. La falta de políticas de biocombustibles bien definidas, junto con un apoyo gubernamental insuficiente, también son algunos de los obstáculos en el proceso de comercialización.

A pesar de los desafíos económicos que limitan la comercialización de bioetanol de algas, sus perspectivas de futuro parecen prometedoras en mayor medida. Las tecnologías actuales pueden ser mejoradas eficientemente en el futuro. La barrera de costos en la producción de bioetanol se puede administrar de manera eficiente utilizando diferentes técnicas de análisis del ciclo de vida (Abdulla, R., Azhar, S. H. M., et al. (2016)).

### **2.3.11 Conclusión**

A partir de los datos que podemos encontrar en la literatura publicada, hemos podido clarificar que la extracción de carbohidratos de la biomasa de microalgas es esencial para producir bioetanol de tercera generación y que debe de verse aumentada. A pesar de los altos costes que supone esta generación, hemos conocido datos que nos hacen ser optimistas en cuanto a la posible comercialización de esta generación, debido a la gran diversidad de aplicaciones que tienen las microalgas, teniendo un abanico bastante amplio en cuanto ingresos y producción de empleo. Las actuales investigaciones que se están llevando a cabo son críticas, si en los próximos años los estudios relacionados con la cultivación de la materia prima, los procesos de hidrólisis y fermentación mediante enzimas y cepas microbianas, culminan en éxito, las perspectivas de producción de etanol se verán disparadas, disminuyendo los precios de los costes y haciendo viable una competición con los precios de los combustibles fósiles.

## **2.4 Conclusión Bioetanoles**

De las tres generaciones estudiadas en este trabajo, sólo la primera ha sido capaz de desarrollar una producción industrial económicamente viable y que aporte unos suministros de bioetanol relevantes. Sin embargo, esta generación trae consigo muchos dilemas, pues no consigue ser una energía alternativa ambientalmente sostenible, debido a sus grandes consumos de agua, de tierra y de productos alimentarios. Como solución a estos problemas, aparecen la segunda y tercera generación, que emplean materias primas ecológicas, ya sea mediante el empleo de desechos agroalimentarios o mediante algas y bacterias que necesitan CO<sub>2</sub> y pueden

obtener nutrientes de aguas contaminadas. A pesar de ello, estas generaciones no son rentables actualmente a nivel de producción industrial. A favor tienen un futuro muy prometedor, pues se prevé que las investigaciones de enzimas y levaduras necesarias en la hidrólisis y fermentación, permita que en los próximos años sea posible una producción industrial de estas generaciones, superando a la primera generación y posicionándose como una alternativa real más a los combustibles fósiles.

## 3 PRESTACIONES EN LOS MOTORES

---

En este capítulo, se llevará a cabo una revisión sobre los diferentes tipos de usos que tiene el bioetanol en los motores de ignición, tanto los encendidos por chispa como por compresión, concentraciones bajas de bioetanol (0-25 v/v%), altas concentraciones (85-100 v/v%) y algunos usos con motores diésel.

Además, se estudiará las diferentes características que aporta el bioetanol a los motores de ignición, potencia obtenida, producción de contaminantes, etc.

El bioetanol es considerado un combustible limpio y renovable, alternativo a los combustibles fósiles en los motores encendidos por chispa (MECH) y encendidos por compresión (MEC), por tanto, se intentará comprender realmente si estas propiedades que le son atribuidas son reales.

### 3.1 Introducción

La principal razón por la que las naciones están promoviendo el desarrollo de combustibles limpios alternativos en el sector transporte es por, el aumento de la demanda de energía y para reducir los niveles de emisión de los productos de combustión incompleta.

Los contaminantes del aire producidos por el transporte por carretera como el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), los hidrocarburos no quemados (HC) y las partículas (PM, contaminación por partículas, siglas en inglés) aumentan significativamente en todo el mundo. Tales contaminantes afectan en gran medida el estado de la calidad del aire en contextos urbanos (Iodice, P., Langella, G., & Amoresano, A. (2018)). Además, se estima que las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector del transporte por carretera aumentarán en un 92% en 2020, en comparación con 1990, con cerca de nueve mil millones de toneladas métricas de emisiones de CO<sub>2</sub> que se liberarán de 2020 a 2035, según lo declarado recientemente por la Agencia Internacional de Energía. (AIE) (Iodice, P., Langella, G., & Amoresano, A. (2018)).

Por todas estas razones, las naciones de todo el mundo se esfuerzan por desarrollar combustibles alternativos más limpios de fuentes renovables para reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos peligrosos y reducir la demanda de combustibles fósiles. Los motores de combustión interna con encendido por chispa pueden ser alimentados con varias mezclas de combustible de gasolina (por ejemplo, gas licuado del petróleo (GLP) y gasolina, gas natural comprimido (GNC) y gasolina) (Iodice, P., Langella, G., & Amoresano, A. (2018)).

Entre los combustibles renovables disponibles para el sector automotriz, el etanol es reconocido como un combustible alternativo esencial para los motores MECH cuando se mezcla con gasolina, gracias a sus costos de producción recientemente reducidos y también a sus propiedades físicas y químicas: menor efecto invernadero, menores emisiones de contaminantes, mayor octanaje, alta propagación de la llama laminar y la capacidad de mezclarse con la gasolina de manera homogénea (Iodice, P., Langella, G., & Amoresano, A. (2018)).

Actualmente, el papel de los biocombustibles tiene un pequeño porcentaje en el consumo final de energía en el sector transporte. Sin embargo, su importancia va creciendo progresivamente, como quedó reflejado en la Figura 5, mostrando que en el último periodo registrado (2016-2017) se alcanzó el récord de 15.5 Megatoneladas de petróleo equivalente.

Mientras que la demanda de servicios de transportes se prevé que se duplique de aquí al año 2060, los biocombustibles complementan la eficiencia del uso final y el fuerte crecimiento de la electricidad, suministrando casi el 30% de la demanda de energía final en el transporte en el año 2060, como se puede observar en la Figura 22.

Dependiendo de los escenarios pronosticados para el futuro, debido a las emisiones de CO<sub>2</sub>, podemos encontrarnos con tres de ellos diferentes, que son:

- El primero, es el futuro que nos espera si seguimos emitiendo las mismas cantidades de CO<sub>2</sub>
- El segundo, es aquél que nos espera si reducimos las emisiones para tener un incremento de temperatura de dos grados (2DS) (considerado el más cercano a la realidad)
- El tercero, es el beyond 2 degrees, el cuál es el más utópico ya que vas a ser muy difícil de alcanzar, y sería reducir las emisiones para tener menos de 2 grados de incremento de temperatura, alrededor de 1.5 grados

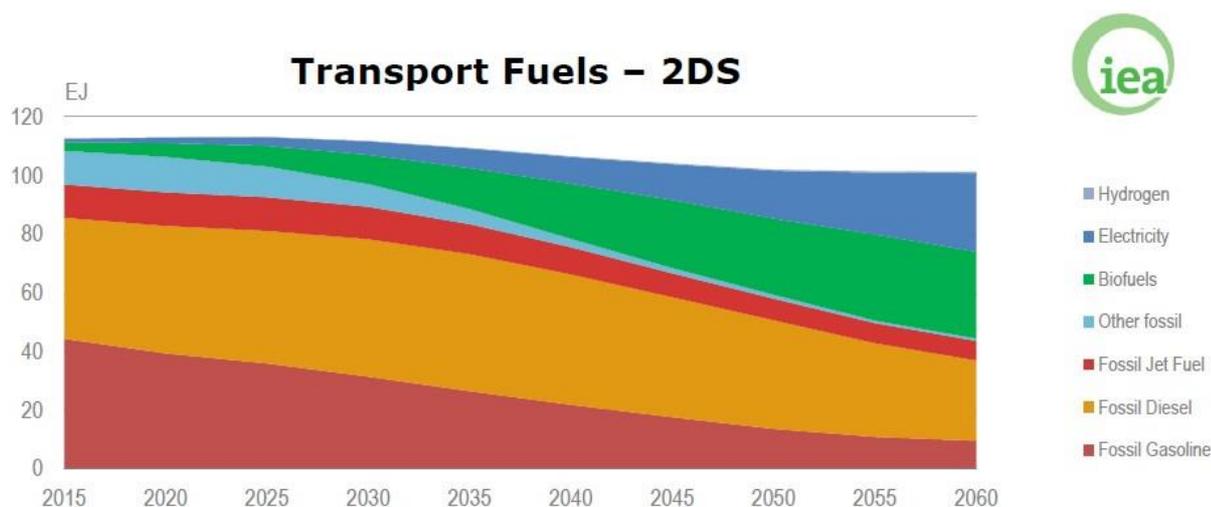


Figura 22: Demanda energía final del transporte según el escenario 2DS

Fuente: Iea.org. Technology Roadmap Delivering Sustainable Bioenergy (2017).

Las tendencias cambiantes que propician este aumento en el consumo de biocombustibles son:

- El cambio a transporte de larga distancia (aviación, transporte marítimo, transporte por carretera). Los biocombustibles aportarán el 40% del combustible en aviación y el 30% del transporte marítimo. (Iea.org. Technology Roadmap Delivering Sustainable Bioenergy (2017)).
- El mercado también define el tipo de combustible.

Alcanzar los niveles presentados de producción y uso de la figura anterior requerirán una considerable aceleración en el crecimiento del despliegue de biocombustibles.

El patrón de producción de biocombustibles también cambia notablemente para cumplir con estos usos finales específicos (Figura 23), con un crecimiento concentrado en los biocombustibles que tienen un mejor desempeño general en el Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GEI), y que tienen propiedades adecuadas para el uso en sectores donde se concentrará la demanda de combustibles líquidos. Estos incluyen etanol avanzado, combustible para aviones (biojet) y biodiesel avanzado. Es probable que los biocombustibles convencionales, como el bioetanol o el éster metílico del ácido graso (FAME), no sean adecuados para algunas de estas aplicaciones (como la aviación y el transporte marítimo). Solo aquellos biocombustibles con emisiones de ciclo de vida asociadas muy bajas serán compatibles con los escenarios de bajas emisiones de carbono. Los biocombustibles adecuados para el grupo diésel incluyen aquellos producidos a partir de procesos de biomasa a líquido, así como HVO a partir de residuos y materias primas para residuos (Iea.org. Technology Roadmap Delivering Sustainable Bioenergy (2017)).

La producción de etanol combustible convencional tendrá un papel continuo donde los costos de producción sean bajos y donde se puedan proporcionar las reducciones de GEI más fuertes, que es probable que favorezcan la materia prima de la caña de azúcar. Es probable que el papel del biometano se expanda, especialmente en aplicaciones como flotas cautivas y camiones pesados de carga, donde están disponibles los vehículos de gas natural comprimido fósil (GNC) y gas natural licuado (GNL). Pero el biodiesel convencional a base de cultivos oleaginosos se elimina gradualmente en favor de los combustibles que ofrecen una mayor reducción de las emisiones de GEI (Iea.org. Technology Roadmap Delivering Sustainable Bioenergy (2017)).

## Biofuels final transport energy demand by fuel type in the 2DS, up to 2060

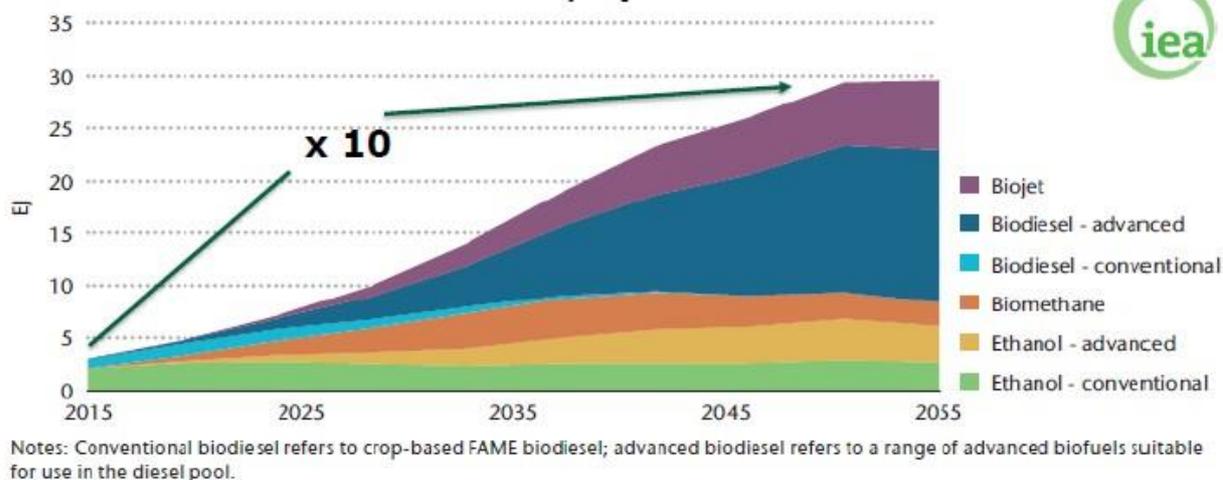


Figura 23: Demanda de energía final en el transporte por biocombustible (2DS)

Fuente: Iea.org. Technology Roadmap Delivering Sustainable Bioenergy (2017).

### 3.1.1 Coches de Gasolina

Los coches de gasolina equipados con motores de carburador estuvieron disponibles hasta finales de los años ochenta.

Hoy en día, los motores de encendido por chispa son motores de inyección en puertos, en su mayoría equipados con inyección de combustible multipunto (MPFI). En la década de 1990, aparecieron en el mercado motores de encendido por chispa con inyección directa y menor consumo de combustible. (Päivi Aakko-Saksa, et al (2011)).

Los modelos que utilizan combustión pobre con exceso de aire también se introdujeron en la década de 1990, pero prácticamente han desaparecido del mercado. Motores de encendido por chispa, ya sean inyección directa o indirecta, se basan ahora en una relación estequiométrica aire / combustible. Las emisiones de escape de los motores de encendido por chispa que utilizan una relación estequiométrica aire / combustible se puede controlar de manera eficiente con un catalizador de tres vías (TWC, por sus siglas en ingles), en el que el monóxido de carbono y los hidrocarburos no quemados se oxidan simultáneamente con la reducción de los óxidos de nitrógeno. Los TWC operan eficientemente solo en una ventana lambda ( $\lambda$ ) muy estrecha cerca de la relación estequiométrica aire / combustible. Por lo tanto, los TWC no se pueden usar en motores que funcionan con una mezcla pobre, como los motores diésel. El beneficio de una mezcla austera sería un mejor consumo de combustible, pero a costa del aumento de las emisiones de NO<sub>x</sub>. (Päivi Aakko-Saksa, et al (2011)) (Biogasoline options for conventional spark-ignition cars)

La recirculación de los gases de escape (EGR, por sus siglas en ingles) es una de las tecnologías comunes para reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> de los motores diésel, y también se utiliza en motores de encendido por chispa. Las emisiones de NO<sub>x</sub> se forman a partir de nitrógeno en el aire a alta temperatura. La EGR es una tecnología de motor interno, no un dispositivo de postratamiento de escape. Con la EGR, parte del gas de escape se devuelve a los cilindros del motor, lo que reduce la temperatura de combustión y, por consiguiente, las emisiones de NO<sub>x</sub>. Las altas tasas de EGR pueden aumentar las emisiones de partículas.

Muchos automóviles convencionales de encendido por chispa están equipados con un sensor lambda ( $\lambda$ ) de "tipo de conmutación", que funciona correctamente solo cuando lambda ( $\lambda$ ) está cerca de 1.0. El sensor lambda ( $\lambda$ ) controla la relación aire / combustible de los gases de escape como respuesta a un sistema de control de circuito cerrado que mantiene la relación estequiométrica aire / combustible. Esto es esencial para el correcto funcionamiento del TWC. Si el contenido de oxígeno del combustible excede un cierto límite, se modifica para mantener el ratio aire/combustible adecuado. En Europa, el contenido máximo de oxígeno en gasolina está limitada en 3.7 m/m%. (Päivi Aakko-Saksa, et al (2011)).

### 3.1.2 Propiedades de la Gasolina

Actualmente, debido a la tecnología empleada en los motores de encendido por chispa, el combustible requiere e impone unos requisitos en términos de calidad. Análisis del combustible básico (gasolina sin aditivos) fueron desarrollados para evaluar el rendimiento y la operabilidad de los combustibles en motores de combustión interna.

Se han definido propiedades del combustible importantes en contexto ambientales, como la compatibilidad con dispositivos de control de emisiones. La funcionalidad y el rendimiento general de la gasolina se puede definir en términos de índice de octano, volatilidad, contenido de olefinas y aditivos, por ejemplo. El desempeño ambiental puede ser definidos en términos de compuestos aromáticos, olefinas, contenido de benceno, compuestos oxigenados, volatilidad y azufre, por ejemplo. Las propiedades del combustible están controladas por la legislación y por los estándares de combustible (BOE-A-2006-2779)

Las especificaciones técnicas para las gasolinas destinadas a ser utilizadas en vehículos equipados con un motor de encendido por chispa son las que figuran en la Tabla 13 de este real decreto con las particularidades que a continuación se indican (BOE-A-2006-2779)

La volatilidad de la gasolina también es un problema en el contexto de la seguridad. La mezcla aire / vapor, en el tanque es demasiado rico para encenderse en el rango de temperatura ambiente normal con gasolina, y demasiado austero con el combustible diésel. Si la volatilidad de la gasolina es demasiado baja, la mezcla puede volverse inflamable. La volatilidad de la gasolina cae cuando baja la temperatura ambiente.

El contenido de olefinas de la gasolina afecta a la limpieza del motor, que es un parámetro cada vez más importante a medida que los nuevos motores sofisticados y los dispositivos de postratamiento penetran en el mercado. Las olefinas en la gasolina también pueden llevar a un aumento en la concentración de olefinas reactivas, como el 1,3-butadieno, en los gases de escape. Los aromáticos afectan la limpieza del motor y pueden incluir compuestos cancerígenos como el benceno. Es posible que se necesiten aditivos para garantizar que la gasolina tenga propiedades de detergencia adecuadas (Päivi Aakko-Saksa, et al (2011)).

Características	Unidad de Medida	Límite Mínimo	Límite Máximo
Densidad a 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	720	775
Índice de octano research		95	—
Índice de octano motor		85	—
Presión de vapor	kPa		
Verano		45	60
Invierno		50	80
Destilación			
Evaporado a 70 °C verano	%v/v	20	54
Invierno	%v/v	22	56
Evaporado a 100 °C	%v/v	46	74
Evaporado a 150 °C	%v/v	75	—
Punto final	°C	—	210
Residuo	%v/v	—	2
Análisis de hidrocarburos			
Oleofinas	%v/v	—	18
Aromáticos	%v/v	—	35
Benceno	%v/v	—	1
Contenido de oxígeno	%m/m	—	3.7
Oxigenados	%v/v	—	
Metanol		—	3
Etanol		—	10
Alcohol isopropílico		—	12
Alcohol tert-butílico		—	15
Éteres que contengan 5 átomos o más de carbono por molécula		—	22
Contenido de azufre	mg/kg	—	10
Contenido de plomo	g/l	—	0.005
Aspecto		Claro y brillante	

Tabla 13: Especificaciones Gasolinas

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos proporcionado por el BOE-A-2006-2779

### 3.1.3 Aplicación de los Biocombustibles en el Transporte

Según el tipo de combustión realizado en el motor, nos encontramos con diferentes tipos de biocombustibles empleados:

<b>Motores Encendido por Chispa</b>	<b>Etanol / ETBE</b>
	Metanol / MTBE
	Butanol
	Bio-gasoline (a partir de co-producción en refinerías)
	Bio-metano / SNG
	Bio-H <sub>2</sub>
<b>Motores Encendido por Compresión</b>	Biodiesel (FAME)
	Puro aceite vegetal (PAV / PVO)
	Aceite vegetal hidrotratado (AVH / HVO)
	Diesel sintético
	Di-methyl éter
	<b>Etanol (ED95)</b>
<b>Turbinas de Gas (Motores de Aviación)</b>	<b>Keroseno Parafínico Sintético</b>
	<b>Iso-Parafina Sintético</b>

### 3.1.4 Propiedades típicas de los combustibles

Combustible	Densidad (kg/litro)	Poder Calorífico Inferior (PCI) (MJ/kg)	Poder Calorífico Inferior (PCI) (MJ/litro)
<b>Gasolina</b>	<b>0.745</b>	<b>43.2</b>	<b>32.2</b>
Etanol	0.794	26.8	21.3
Metanol	0.793	19.9	15.8
n-butanol	0.810	33.4	27.1
MTBE	0.745	35.1	26.1
ETBE	0.750	36.3	27.2
<b>Diésel</b>	<b>0.832</b>	<b>43.1</b>	<b>35.9</b>

Biodiesel (FAME)	0.890	36.8	32.8
Diésel sintético	0.780	44	34.3
PVO	0.916	37.4	34.3
Hidrógeno	0.09 kg/Nm <sup>3</sup>	120.1	10.8 MJ/Nm <sup>3</sup>

Tabla 14: Propiedades típicas de los combustibles

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos proporcionados por JRC/CONCAWE/EUCAR TTW report, version 3, Oct 2008

### 3.1.5 Bioalcoholes: Metanol, Etanol, Butanol

	Gasolina	Metanol	Etanol	Butanol
		CH <sub>3</sub> OH	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OH
PCI (MJ/litro)	<b>32.2</b>	15.8	<b>21.3</b>	27.1
Ratio Estequi. Aire/comb	<b>14.6</b>	6.4	<b>9.0</b>	11.1
Calor de vaporización (MJ/kg)	<b>0.36</b>	1.2	<b>0.92</b>	0.43
Octanaje	<b>91-99</b>	106	<b>107</b>	96
Contenido de oxígeno (% másico)	<b>0</b>	50	<b>35</b>	27

Tabla 15: Propiedades Bioalcoholes

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos proporcionados por (Luc Pelkmans, 2019)

De la tabla 15 se pueden sacar las siguientes conclusiones sobre el etanol:

- Bajo PCI: esto implica, en primer lugar, que se necesita un mayor consumo de combustible volumétrico y por tanto un menor radio con el mismo volumen de depósito. En segundo lugar, un PCI bajo suele estar conectado con contenido de oxígeno. (Luc Pelkmans, 2019)
- Bajo ratio estequiométrico aire/combustible: más inyección de combustible por ciclo y por tanto incremento de potencia. (Luc Pelkmans, 2019)
- Número de octanaje mayor: mayor relación de compresión posible, adecuado para MECH (Luc Pelkmans, 2019)
- Alto calor de vaporización: esto implica problemas de encendido con bajas temperaturas, temperatura de entrada del cilindro menor y mejor carga, mayor potencia. (Luc Pelkmans, 2019)

Consecuencias de estos cuatro puntos:

En los MECH el aumento de la relación de compresión para aumentar la eficiencia térmica y la potencia de salida del motor, causan una presión y temperatura más altas de la mezcla de aire / combustible dentro del cilindro, provocando por tanto problemas de detonación del motor. Gracias al etanol que contiene un octanaje mayor, estos problemas se ven reducidos (Luc Pelkmans, 2019)

El alto contenido de oxígeno del etanol es el parámetro que más influye en la oxidación dentro de los cilindros del motor, oxidando los productos de la combustión incompleta de la mezcla etanol/gasolina. En estas condiciones, las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos inquemados en los MECH pueden ser reducidos con las mezclas de etanol / gasolina, conectado con el incremento de contenido de oxígeno. Esta

mezcla contiene más oxígeno que la gasolina por sí sola, las moléculas de oxígeno del etanol promueven la oxidación del CO y de los HC en las regiones ricas de combustible, asegurando una combustión más completa (Luc Pelkmans, 2019)

Debido a que el etanol tiene un calor de vaporización y una llama de propagación mayor, asegura una mayor eficiencia volumétrica y una combustión mayor (Luc Pelkmans, 2019)

El etanol, al tener una menor volatilidad comparada con la gasolina, propicia problemas de encendido. El límite de encendido sin problemas del etanol ronda los 12 °C (Päivi Aakko-Saksa, et al (2011)).

Resumen butanol y metanol:

- El butanol, por legislación, está permitido mezclarlo con gasolina en un 15 v/v%. Con respecto a los aspectos de uso final, el butanol ofrece bastantes beneficios con respecto al etanol como componente en la gasolina: mayor energía contenida (unidad de volumen específico menor), presión de vapor más baja (emisiones evaporativas más bajas), mayor ratio de mezcla, menor afinidad con el agua (menor riesgo de fase-separación), menos agresivo hacia los materiales y adecuado para la actual infraestructura. Los inconvenientes del butanol comparado con el etanol es el menor número de octanaje y los mayores costes de producción, aunque los procesos son los mismos. (Päivi Aakko-Saksa, et al (2011))
- En cuanto al metanol, un contenido de mezcla con la gasolina sobre el 3 v/v% está permitido por legislación. Metanol es extremadamente agresivo hacia los materiales, y por ejemplo tiene un alto riesgo de fase de separación. En Europa, en raras ocasiones se emplea. Sin embargo, el metanol es un combustible de competición, y en China es muy usado como mezcla (Päivi Aakko-Saksa, et al (2011))

## 3.2 Aplicaciones del Etanol como Combustible en Vehículos

El etanol como combustible para vehículos puede dividirse en 4 categorías:

- Como componente de mezcla (Mezcla directa y ETBE)
- Alta concentración de etanol
- Mezcla de etanol en diésel
- Motores diésel con alta concentración de etanol

### 3.2.1 Mezcla Directa de Etanol y Gasolina

La legislación europea permite mezclar el etanol con la gasolina hasta un máximo de 10 v/v%. Sin embargo, en este apartado estudiaremos mezclas de etanol / gasolina en un 0%, 5%, 10%, 15% y 20% (v/v %)

Los motores de encendido por chispa pueden funcionar con mezclas de hasta el 25% de alcohol deshidratado sin que sean necesarias modificaciones en el motor (J. Manuel Gacía Camús y J. Ángel García Laborda, 2006)).

Las prestaciones que otorgar a un MECH la mezcla de gasolina / etanol varía tanto como en número de motores diferentes que existen. Dependiendo del motor y de sus reglajes, los resultados obtenidos son tantos como las infinitas posibilidades de los reglajes de un motor. A día de hoy, se han realizado una gran variedad de trabajos experimentales relacionados con este tema, debido a ello, me centraré principalmente en el trabajo realizado por Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009) "Performance and exhaust emissions of a gasoline engine with ethanol blended gasoline fuels using artificial neural network", puesto que emplea unas condiciones estándar y se acerca más a la realidad de los coches personales de la población.

En este estudio, los experimentos se realizaron en un motor de gasolina KIA 1.3 SOHC, cuatro cilindros, cuatro tiempos y encendido por chispa (SI). La especificación del motor se da en la Tabla 16:

Engine type	8 Valves – 4 cylinder-inline-SOHC
Combustion order	1-3-4-2
Bore × stroke (mm)	71 × 83.6
Displacement volume (cc)	1323
Compression ratio	9.7
Maximum torque (N m/rpm)	103/2750
Maximum power (kW/rpm)	47/5200
Maximum speed (rpm)	6200
Cooling system	Liquid, enclosed with forced circulation of a cooling fluid

Tabla 16: Especificaciones técnicas del motor y dispositivos de prueba

Fuente: Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)

En los experimentos se utilizó un dinamómetro de corrientes de Foucault SCHENCK-WT190 de 190 kW. La tasa de consumo de combustible se midió en el rango de 0,4 a 45 kg / h utilizando un medidor de flujo de tipo laminar, modelo Pierburg. El consumo de aire se midió utilizando un medidor de flujo de aire. Se registraron la relación relativa aire-combustible, los parámetros de emisión y la temperatura de los gases de escape de un analizador de gases de escape en línea y calibrado con precisión DIGAS 4000. Se instalaron cinco tanques de combustible separados en el motor de gasolina, que contenían gasolina y las mezclas de bioetanol y gasolina.

La unidad de control del motor (ECU) que se utilizó en este motor fue una Johnson Controls JCAE S2000. La función de la ECU es controlar la cantidad de combustible, el tiempo de inyección, el tiempo de encendido y la velocidad del motor al recibir señales de siete sensores. Estos sensores son: sensor de oxígeno, sensor de detonación, sensor de presión de aire del colector, sensor de temperatura del aire de admisión, sensor de posición del acelerador, sensor de temperatura del agua y sensor de velocidad del motor. Se utiliza un sistema de inyección de combustible multipunto (MPFI) con inyectores de alimentación superior para inyectar el combustible en la cámara de combustión. Un diagrama esquemático de la configuración experimental se muestra en la Figura 24.

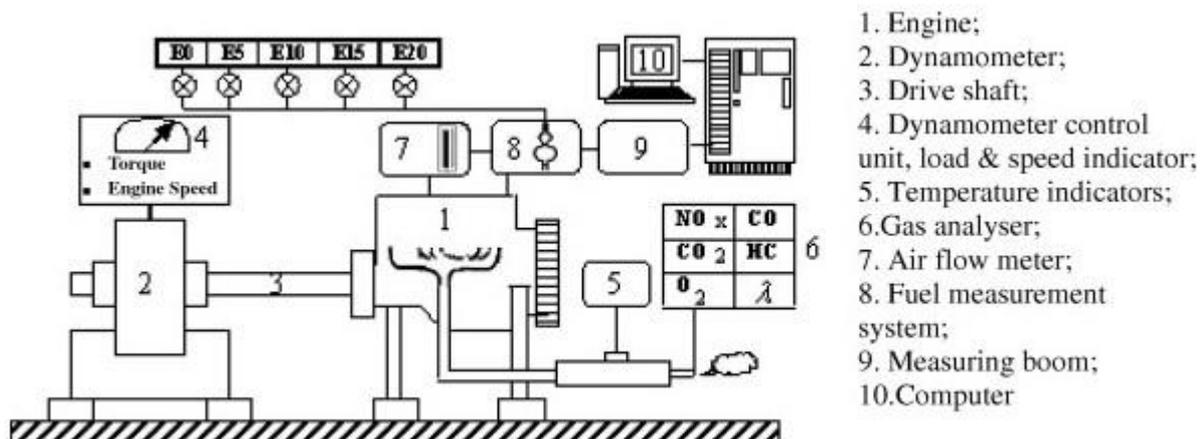


Figura 24: Diagrama esquemático de la instalación

Fuente: Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)

Se empleó un etanol obtenido a partir de residuos de patatas, cuyas propiedades son las mostrada en la Tabla 17:

Property	Ethanol (E100)
Density (kg/m <sup>3</sup> )	785
Viscosity (cSt)	1.1
Calorific value (kJ/kg)	27,000
Research octane number	108.6
Pour point (°C)	<<-50
Flash point (°C)	14
Ash content (mass%)	0

Tabla 17: Propiedades del etanol

Fuente: Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)

Los combustibles son: gasolina pura (E0), gasolina con 5% de etanol (E5), gasolina con 10% de etanol (E10), gasolina con 15% de etanol (E15), gasolina con 20% de etanol (E20).

Los resultados a los que llegaron son los que se van a exponer a continuación.

### 3.2.1.1 Par Motor

El par motor es definido como el momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje de transmisión de potencia o, dicho de otro modo, la tendencia de una fuerza para girar un objeto alrededor de un eje, punto de apoyo, o de pivote.

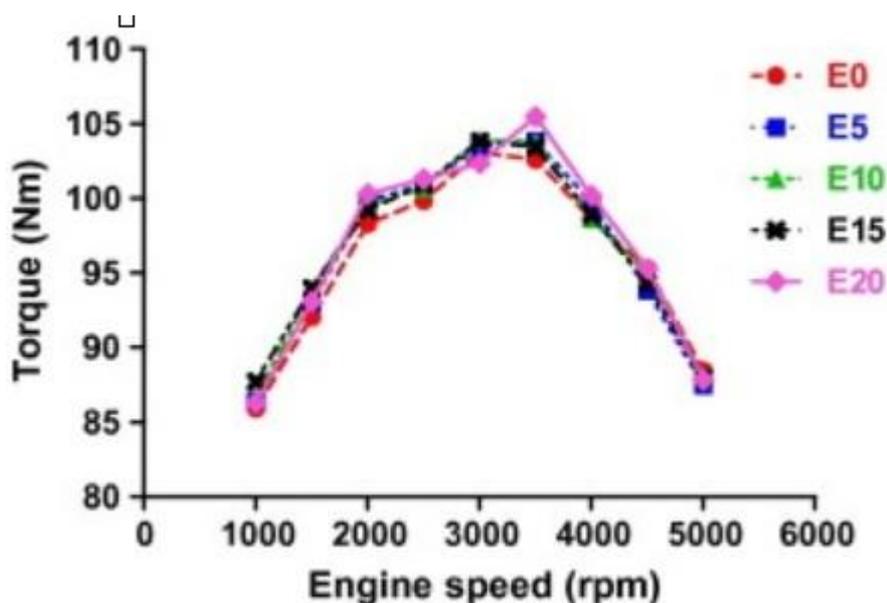


Figura 25: Par frente a revoluciones por minuto

Fuente: Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)

En la Figura 25, se puede observar el par motor que se obtiene con cada combustible al variar las revoluciones por minuto (rpm).

El aumento del contenido de etanol aumenta el par del motor. El etanol agregado produce mezclas que aumentan la relación relativa aire-combustible ( $\lambda$ ) a un valor más alto y hacen que la combustión sea más eficiente. El mejor comportamiento anti-golpe (debido a la adición de etanol, que aumenta el octanaje) permitió una sincronización más avanzada que resulta en una mayor presión de combustión y, por lo tanto, un mayor par motor (Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)).

### 3.2.1.2 Potencia

Cuando aumenta el contenido de etanol en el combustible mezclado, la potencia del freno del motor aumenta ligeramente para todas las velocidades del motor. La ganancia de la potencia del motor se puede atribuir al aumento de la presión efectiva media indicada para mezclas de mayor contenido de etanol. El calor de evaporación del etanol es más alto que el de la gasolina, esto proporciona enfriamiento de la carga de aire y combustible y aumenta la densidad de la carga, por lo que se obtiene una mayor potencia de salida. Con el aumento del porcentaje de etanol, aumenta la densidad de la mezcla y la eficiencia volumétrica del motor, lo que provoca un aumento de la potencia (Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)).

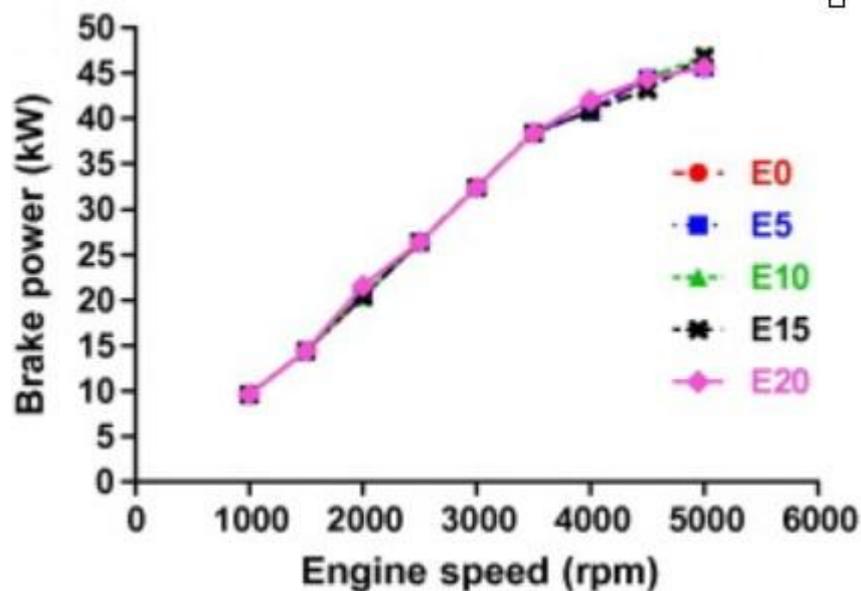


Figura 26: Potencia frente a velocidad (rpm)

Fuente: Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)

### 3.2.1.3 Consumo Especifico

La variación del consume específico según el combustible y las rpm se dan en la Figura 27.

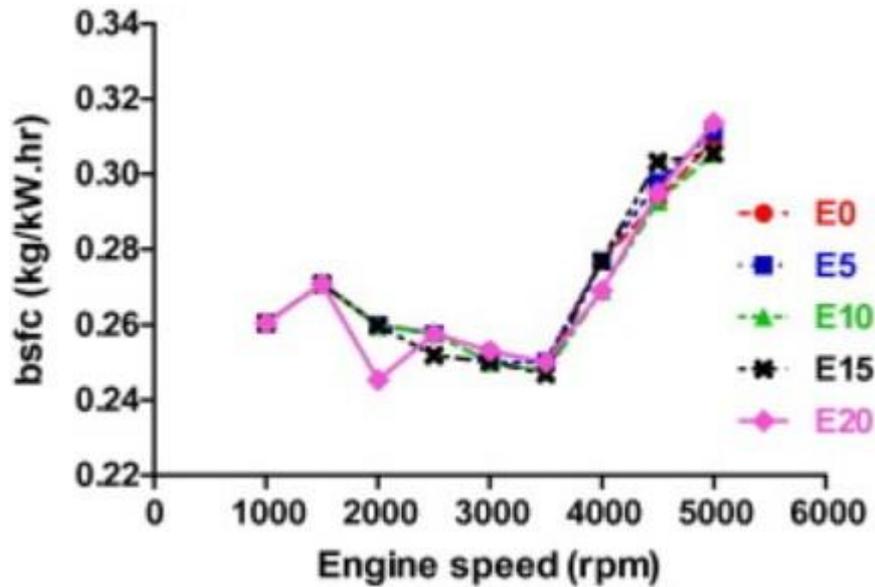


Figura 27: Consumo específico frente a rpm

Como se muestra en esta figura, el consumo específico disminuye a medida que aumenta el porcentaje de etanol. A medida que la velocidad del motor aumenta a 3500 rpm, el consumo específico disminuye alcanzando sus valores mínimos. Esto se debe al aumento de la eficiencia térmica de los frenos.

Fuente: Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)

### 3.2.1.4 Eficiencia Efectiva

En los motores de combustión interna, la eficiencia efectiva es la tasa de conversión de la energía térmica obtenida al quemar el combustible en energía útil.

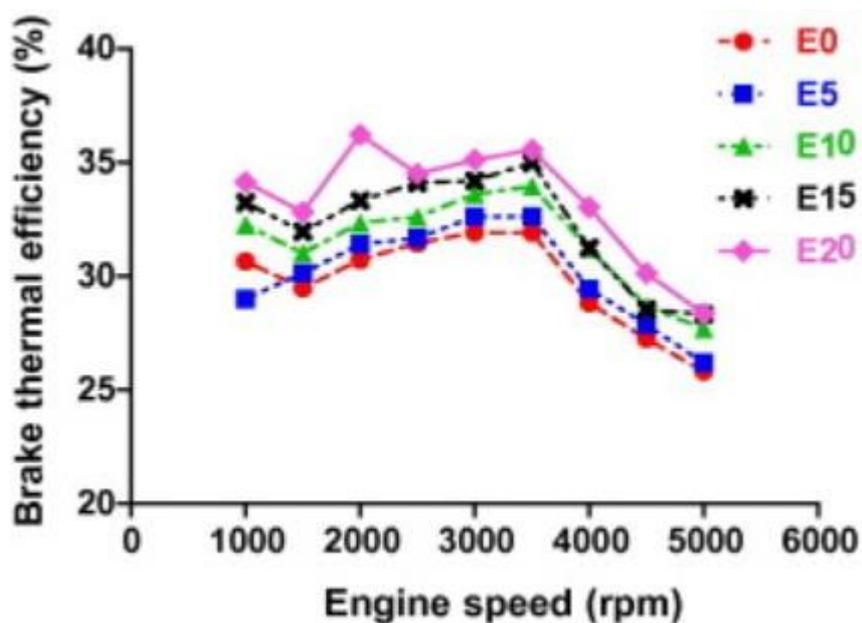


Figura 28: Eficiencia efectiva frente a rpm

Fuente: Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)

Como se muestra en esta figura, la eficiencia térmica del freno aumenta a medida que aumenta el porcentaje de etanol. La eficiencia térmica máxima del freno ( $\eta_{b.th.}$ ) fue aproximadamente del 35% cuando el 20% de etanol estaba en la mezcla de combustible. A medida que aumenta el E% en la mezcla de combustible, aumenta el trabajo indicado (es decir, aumenta la eficiencia indicada  $\eta_i$ ). La relación entre las velocidades del motor y la eficiencia térmica del freno se da en la Figura 28. A medida que la velocidad del motor aumenta a 3000 rpm, la eficiencia térmica aumenta hasta alcanzar sus valores máximos.

### 3.2.1.5 Eficiencia Volumétrica

La Figura 29 muestra la relación entre la eficiencia volumétrica ( $\eta_v$ ) y el porcentaje de etanol en las mezclas de combustible. Como se muestra en la Figura 29, la eficiencia volumétrica aumenta a medida que aumenta el porcentaje de etanol para todas las velocidades del motor.

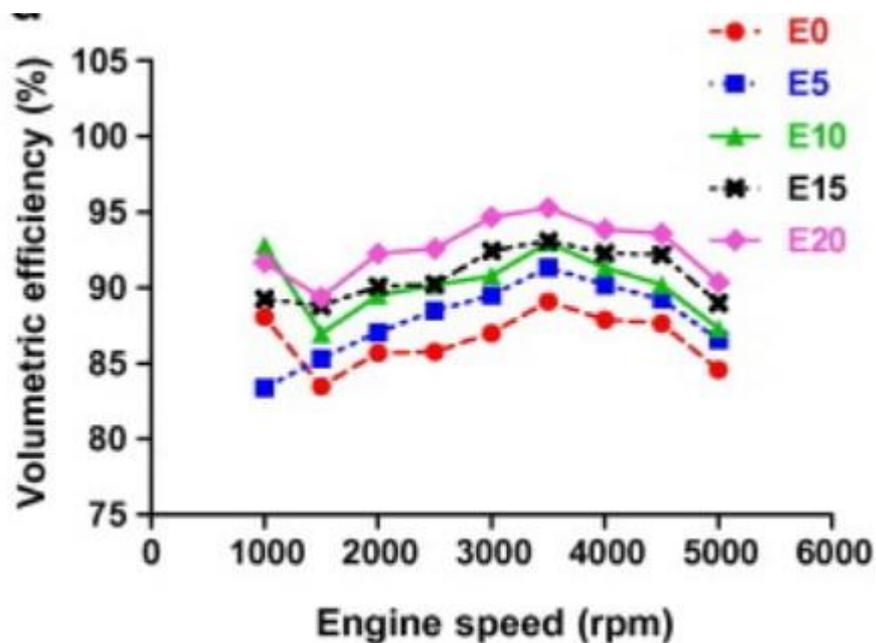


Figura 29: Eficiencia volumétrica frente a rpm

Fuente: Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)

### 3.2.1.6 Relación Equivalencia Combustible-Aire ( $\Phi$ )

La relación de equivalencia combustible-aire ( $\phi$ ) es uno de los parámetros más importantes que afectan los parámetros de rendimiento del motor. El etanol es un combustible oxigenado, y por esta razón, agregar etanol a la gasolina conduce a una operación más pobre y mejora la combustión. Los resultados experimentales muestran que la relación de equivalencia combustible-aire disminuye a medida que aumenta el porcentaje de etanol (en volumen) en el combustible mezclado (Figura 30). Los parámetros de rendimiento del motor, como la potencia, el par, la eficiencia volumétrica y la eficiencia efectiva aumentan cuando se aumenta la cantidad de etanol en el combustible mezclado. Esto se debe a la reducción en los valores de  $\phi$ . Como se mencionó anteriormente, el aumento de la proporción de la mezcla de etanol conduce a una combustión pobre y completa y, por lo tanto, el consumo específico se redujo ligeramente como se muestra en la Fig. 27.

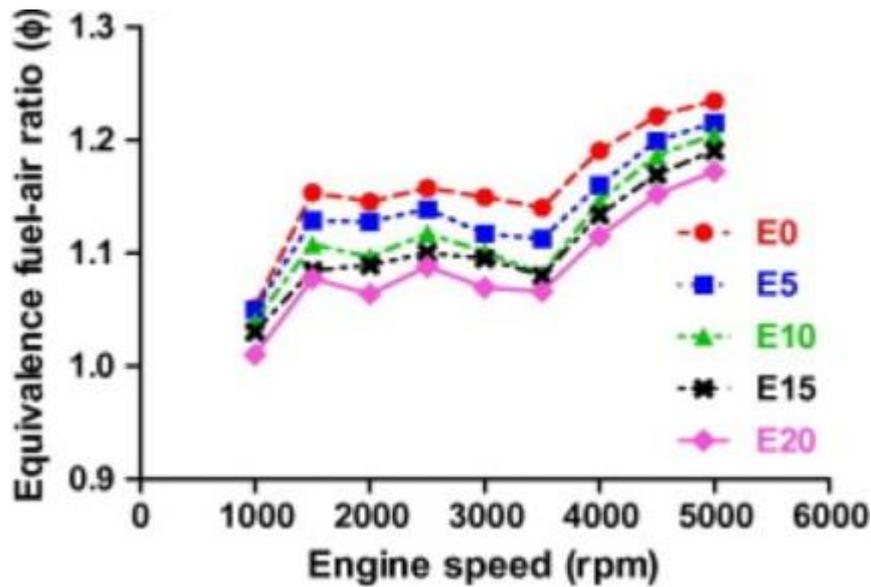


Figura 30: Equivalencia Combustible-Aire ( $\Phi$ ) frente a rpm

Fuente: Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)

### 3.2.1.7 Emisiones de CO

La figura 1 muestra las concentraciones de emisión de CO para diferentes velocidades del motor. Se puede ver en esta figura que cuando aumenta el porcentaje de etanol, la concentración de CO disminuye, debido a la mejor evaporación del etanol que la gasolina y su contenido de oxígeno en su estructura química, garantizando una combustión más limpia (Doğan, B., Erol, D., Yaman, H., & Kodanli, E. (2017)).

La concentración de CO en la emisión de gases de escape a 3000 rpm para el combustible de gasolina fue de 4.69 (% V), mientras que la concentración de CO de E5, E10, E15 y E20 a 3000 rpm fue de 4.05, 3.55, 3.38 y 2.56 (% V), respectivamente. Las concentraciones de CO a 3000 rpm utilizando E5, E10, E15 y E20 se redujeron en un 13.7%, 24.31%, 27.93% y 45.42%, respectivamente en comparación con la gasolina. La reducción en la concentración de CO usando combustibles mezclados se debe al hecho de que el etanol ( $C_2H_5OH$ ) tiene menos carbono que la gasolina ( $C_8H_{18}$ ). Otra razón importante de esta reducción es que el contenido de oxígeno en los combustibles mezclados aumenta la relación de oxígeno a combustible en las regiones ricas en combustible. El parámetro más significativo que afecta la concentración de CO es la relación relativa aire-combustible ( $\lambda$ ). La relación relativa aire-combustible ( $\lambda$ ) se aproxima a 1 a medida que aumenta el contenido de etanol del combustible mezclado y, en consecuencia, la combustión se completa (Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)).

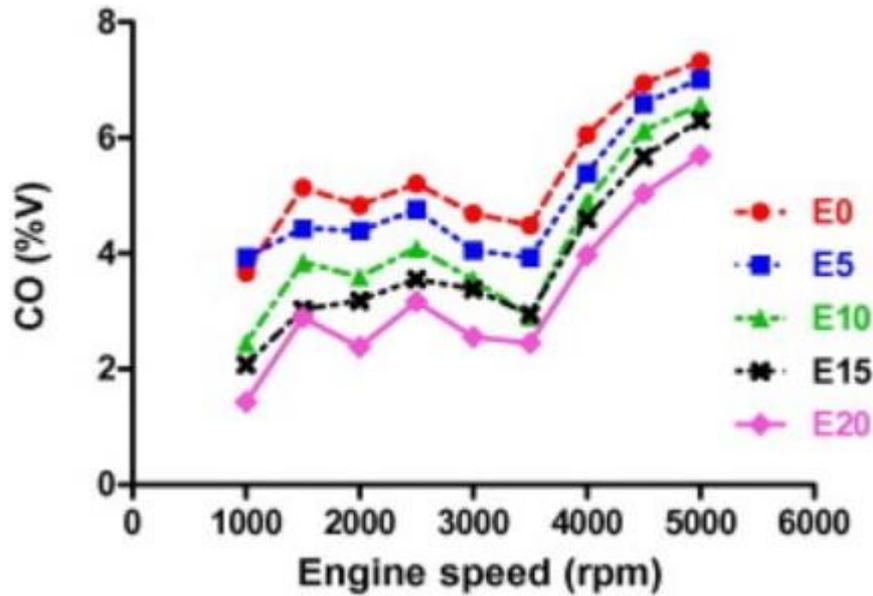


Figura 31: Emisiones de CO frente a rpm

### 3.2.1.8 Emisiones de CO<sub>2</sub>

La Fig. 31 muestra la relación entre las concentraciones de CO<sub>2</sub> y las velocidades del motor para diferentes porcentajes de mezclas. La Fig. 31 indica que la concentración de CO<sub>2</sub> aumenta a medida que aumenta el porcentaje de etanol. La emisión de CO<sub>2</sub> depende de la relación relativa aire-combustible y la concentración de emisión de CO (Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)). La concentración de CO<sub>2</sub> en la emisión de gases de escape a 3000 rpm para el combustible de gasolina fue de 12.4 (% V), mientras que la concentración de CO<sub>2</sub> de E5, E10, E15 y E20 a 3000 rpm fue de 12.9, 13.2, 13.3 y 13.8 (% V), respectivamente. Las concentraciones de CO<sub>2</sub> a 3000 rpm utilizando E5, E10, E15 y E20 se incrementaron en 3.87%, 6.06%, 6.76% y 10.14%, respectivamente en comparación con la gasolina. Como resultado de la combustión pobre asociada con el aumento de los porcentajes de etanol, la emisión de CO<sub>2</sub> aumentó debido a la combustión mejorada (Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)).

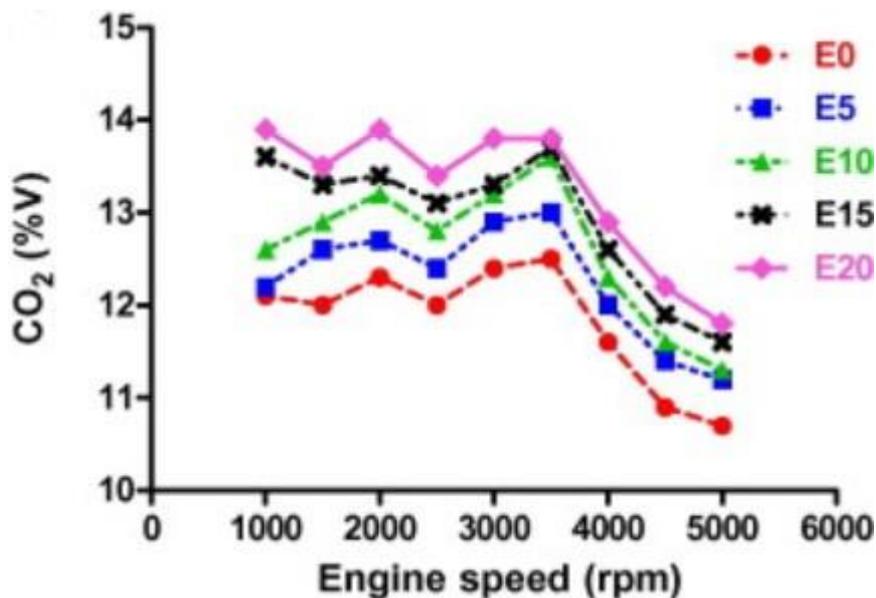


Figura 32: Emisiones de CO<sub>2</sub> frente a rpm

Fuente: Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)

### 3.2.1.9 Emisiones de HC

La emisión de hidrocarburos consiste en combustible no consumido expulsado a través del escape. Las emisiones de HC para diferentes velocidades se ilustran en la Fig. 32. La concentración de HC en la emisión de gases de escape a 3000 rpm para el combustible de gasolina fue de 183 ppm, mientras que la concentración de HC de E5, E10, E15 y E20 a 3000 rpm fue de 152, 139, 137 y 125 ppm, respectivamente. La concentración de HC a 3000 rpm utilizando E5, E10, E15 y E20 se redujo en un 16.94%, 24.04%, 25.14% y 31.69% a 3000 rpm, respectivamente en comparación con la gasolina. Este resultado indica que el etanol puede reducir significativamente las emisiones de HC. La concentración de emisión de HC disminuye con el aumento de la relación relativa aire-combustible.

La emisión de HC también disminuye al aumentar la velocidad del motor para todos los combustibles, como se muestra en la Fig. 32. Debido a que se obtiene una mezcla más homogénea dentro del cilindro al aumentar la velocidad del motor, la emisión de HC muestra una tendencia decreciente (Doğan, B., Erol, D., Yaman, H., & Kodanlı, E. (2017)).

En las pruebas, la menor emisión de HC se observó en 4000 rpm con E0 y la mayor en 2000 rpm con E30

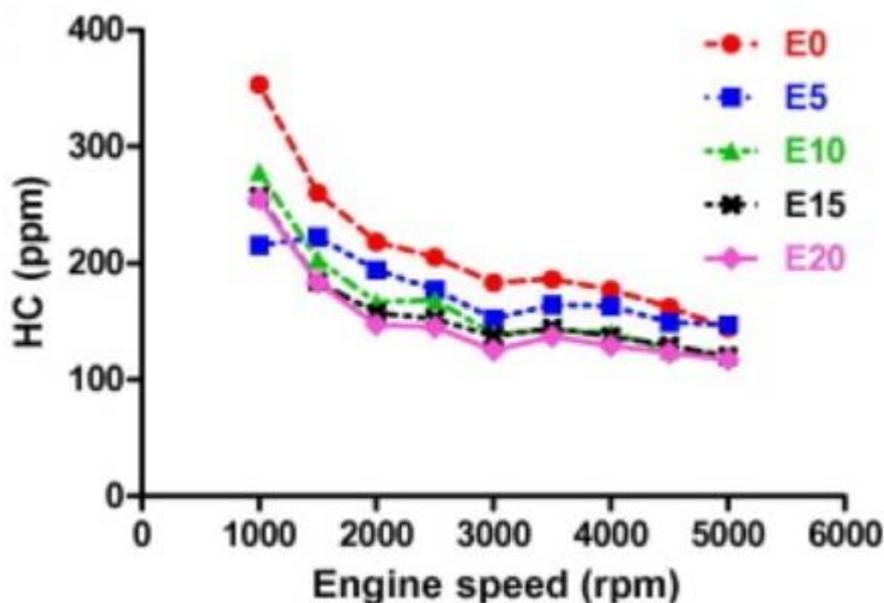


Figura 33: Emisiones de hidrocarburos frente a rpm

Fuente: Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)

### 3.2.1.10 Emisiones de NO<sub>x</sub>

En el cilindro, el óxido nítrico se crea debido a que el nitrógeno entra en una reacción con el oxígeno debido a la alta temperatura (Doğan, B., Erol, D., Yaman, H., & Kodanlı, E. (2017)).

Teniendo en cuenta la emisión de NO<sub>x</sub>, la figura 34 muestra que la concentración de NO<sub>x</sub> es mayor cuando aumenta el porcentaje de etanol. Muestra que a medida que aumenta el porcentaje de etanol en las mezclas, aumenta la emisión de NO<sub>x</sub>. La concentración de NO<sub>x</sub> en la emisión de gases de escape a 3000 rpm para el combustible de gasolina fue de 876 ppm, mientras que la concentración de NO<sub>x</sub> de E5, E10, E15 y E20 a 3000 rpm fue de 1002, 1326, 1319 y 1609 ppm, respectivamente. Las concentraciones de NO<sub>x</sub> a 3000 rpm usando E5, E10, E15 y E20 se incrementaron en un 12.57%, 33.94%, 33.6% y 45.55%, respectivamente en comparación con la gasolina. Cuando el proceso de combustión está más cerca del estequiométrico, la temperatura de la llama aumenta, por lo tanto, la emisión de NO<sub>x</sub> aumenta, particularmente por el aumento de NO térmico (Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)).

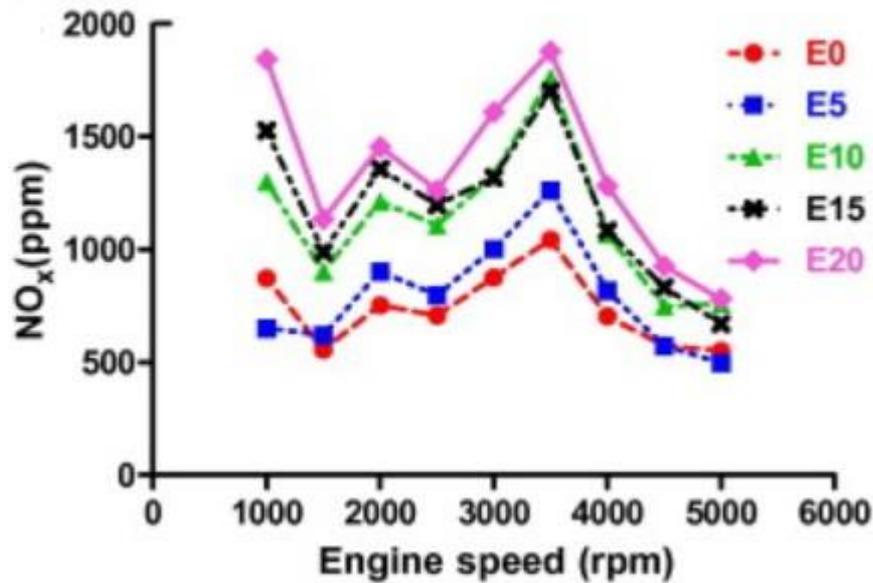


Figura 34: Emisiones de NO<sub>x</sub> frente a rpm

Fuente: Najafi, G., Ghobadian, B., et al (2009)

### 3.2.2 Como Aditivo en las Gasolinas: ETBE

Las gasolinas sin plomo, fueron introducidas para el empleo de catalizadores, cuyo fin es disminuir las emisiones nocivas, afectando el número de octano de la gasolina. Los aditivos oxigenantes tales como el metanol, etanol, tercbutil alcohol (TBA) o el metil-tercbutil éter (MTBE) fueron añadidos para recuperar el octanaje y reducir las emisiones contaminantes (Juan Manuel García y Camús José Ángel García ).

El etil-tercbutil éter se ha impuesto sobre los otros aditivos por ser sus emisiones de hidrocarburos menos tóxicas, debido a que el acetaldehído es mucho menos tóxico que el formaldehído, pudiéndose obtener de fuentes renovable en lugar del petróleo, como el MTBE. La solubilidad del ETBE en agua es mucho menor que la del MTBE, disminuyendo las posibilidades de contaminar las aguas (J. Manuel Gacía Camús y J. Ángel García Laborda, 2006).

La menor afinidad con el agua y la presión de vapor más adecuada con el alcohol, son las principales ventajas que el ETBE presenta frente al bioetanol, añadiendo que no se debe requerir modificaciones en los motores actuales.

El ETBE se obtiene por reacción catalítica de isobuteno y etanol, en una proporción de 1:0,8, resultando un compuesto con unas cualidades superiores al MTBE y los alcoholes. A continuación, se relacionan algunas de sus ventajas (J. Manuel Gacía Camús y J. Ángel García Laborda, 2006):

- Menor poder corrosivo que los alcoholes
- Mayor poder calorífico
- Mayor resistencia a la “separación de fase” que el MTBE
- Mayor rendimiento de fabricación que el MTBE, a partir de isobuteno
- Baja solubilidad en el agua, menor que el MTBE
- Menor contenido de oxígeno (15,7%) que el MTBE (18,2%), por lo que no se necesita modificar el carburador
- Menor RVP (Reid vapor pressure) (0,27 bar) que el MTBE (0,54 bar) y el etanol (1,22 bar)
- Reducción en la emisión de monóxido de carbono e hidrocarburos inquemados

### 3.2.3 Alta Concentración de Etanol (E85)

Los vehículos que emplean una alta concentración de etanol, son los Flexible-Fuel Vehicles (FFV), los cuales emplean un combustible con una concentración aproximada al 85% de etanol (E85), en ocasiones un 100% de etanol (E100) pero esto se da exclusivamente en Brasil, donde su gran extensión y su gran dependencia al petróleo mediante países terceros hizo que se impulsara la tecnología FFV, permitiendo la posibilidad a sus ciudadanos de elegir dependiendo de los precios entre el etanol y la gasolina común (Bastian-Pinto, C. L., BRANDÃO, L. E. T., ALVES, M. D. L., & SA, T. P. (2008)).

#### 3.2.3.1 ¿Qué Son los Flexible-Fuel Vehicles?

Un vehículo de combustible flexible, como su nombre lo indica, tiene la flexibilidad de funcionar con más de un tipo de combustible. Los FFV se pueden cargar con gasolina sin plomo, E85 (E100 Brasil) o una combinación de ambos. De la misma manera que los vehículos de gasolina convencionales, los FFV tienen un solo tanque, sistema de combustible y motor. Y se ofrecen en una amplia gama de modelos, como sedanes, camionetas y minivans. Los FFV están equipados con componentes modificados, diseñados especialmente para ser compatibles con las propiedades químicas del etanol (es más agresivo que la gasolina con los materiales). Las modificaciones principales que se realizan en los FFV se ilustran al reverso. Estas modificaciones garantizan un funcionamiento uniforme y una larga vida con diversas mezclas de etanol. (DE VEHÍCULOS, P. D. T. Vehículos de combustible flexible: brindando opciones en combustible renovable (2010)).

Están equipados con sensores lambda lineales que pueden ajustar la relación aire / combustible a la estequiométrica, incluso si el contenido de oxígeno del combustible es alto. Los inyectores de combustible en los automóviles FFV están diseñados para flujos de combustible más altos que en los automóviles con gasolina convencionales, debido al bajo valor calorífico del combustible E85. El control de retroalimentación en los automóviles FFV ajusta el suministro de combustible y el tiempo de encendido (Päivi Aakko-Saksa, et al (2011)). Esto conduce a un mayor consumo de combustible, que se puede compensar parcialmente si se utiliza la mejor tasa de octano del etanol aumentando la relación de compresión para lograr una mejor eficiencia energética. Según exponen en su trabajo Päivi Aakko-Saksa, el consumo de combustible es un 33% más alto con el combustible E85 que con la gasolina. Los autos FFV que usan combustible E85 deben inyectar el exceso de combustible (es decir, un 15% de gasolina) en los arranques en frío para lograr un desempeño similar al de los automóviles a gasolina. Esto lleva a un aumento de las emisiones de escape hasta que el TWC (catalizador de tres vías) se calienta. Se espera que la tecnología mejorada de control de motor y emisiones reduzca las emisiones de escape de los automóviles FFV en arranques en frío.

Las modificaciones principales que se realizan en los FFV se muestran en la siguiente ilustración:



Ilustración 1: Adaptaciones necesarias para el uso de combustibles flexibles

Fuente:(DE VEHÍCULOS, P. D. T. Vehículos de combustible flexible: brindando opciones en combustible renovable (2010)).

### 3.2.3.2 Combustible E85

El combustible E85 es empleado en Brasil, Norte América y algunos países de Europa. Las propiedades del etanol puro han sido expuestas en las secciones 1.3 y 3.1.5. Con respecto a las mezclas de combustible E85, las propiedades más significantes están relacionadas con la baja volatilidad y el bajo contenido de energía del etanol. La ignición del etanol es pobre, al menos se necesita añadir el 15 vol-% de gasolina para el encendido, e incluso más en condiciones de inviernos duros. El etanol es inflamable sobre un amplio rango de temperaturas, lo que incrementa los riesgos de seguridad. El bajo contenido de energía del etanol conlleva a un alto consumo volumétrico de combustible (Päivi Aakko-Saksa, et al (2011)).

A diferencia del etanol puro, el E85 no es muy sensible al agua por lo que se puede emplear etanol hidratado en la producción de combustible E85. Sin embargo, en este caso, se debe considerar un posible riesgo de separación de fases al repostar vehículos FFV con etanol de bajo nivel E10. Se deben tener en cuenta varios aspectos cuando se consideran aspectos de infraestructura y seguridad. Vehículos especiales, materiales, sistemas de distribución y medidas de seguridad son necesarias (Päivi Aakko-Saksa, et al (2011)).

Si el tanque está entre el 10-20% del total, o ha sido calentado, el etanol quizás determine la inflamabilidad de la mezcla, lo cual incrementa los riesgos de seguridad.

El Comité de Estandarización Europeo (CEN) estableció una propuesta para la estandarización del E85, expuesta en la Tabla 18:

	E85 prEN 15293:2009
Octane number (RON)	min. 104.0
Octane number (MON)	min. 88.0
Density at 15 °C, kg/m <sup>3</sup>	760.0–800.0
Oxidation stability, minutes	min. 360
Existent gum, mg/100 ml	max. 5
Copper strip corrosion (3h at 50°C)	Class 1
Total acidity (as acetic acid), % m/m	max. 0.005
pHe	6.5–9
Electrical conductivity, µS/cm	max. 2.5
Methanol, % v/v	max. 1.0
Higher alcohols (C3-C5), % v/v	max. 6.0
Ethers (C5 +), % v/v	max. 7.7
Water content, % m/m	max. 0.400
Inorganic chlorides, mg/kg	max. 6.0
Copper, mg/kg	max. 0.10
Phosphorus, mg/l	max. 0.15
Sulphur content, mg/kg	max. 10.0
Sulphate content, mg/kg	max. 4
Appearance	Clear and colourless

Tabla 18: Propiedades propuestas por el CEN

Fuente: Päivi Aakko-Saksa, et al (2011)

### 3.2.3.3 Prestaciones Generales

En el estudio realizado por Aakko-Saksa, P., et al. “Biogasoline options for conventional spark-ignition cars. VTT Technical Research Centre of Finland, Finland” se recogen a partir de una gran variedad de estudios las prestaciones obtenidas en motores empleando E85

El consumo de combustible es substancialmente mayor con el E85 que con la gasolina. El consumo medio de los FFV empleando gasolina es de 6.7 l/100 km y 8.9 l/ 100 km con E85, lo que supone un 33% más de consumo volumétrico de combustible con E85 en lugar de gasolina. Päivi Aakko-Saksa, et al (2011)

El mejor octanaje del etanol permite una mayor relación de compresión, lo que puede mejorar la eficiencia y el

consumo de combustible en cierta medida. Los automóviles FFV deben inyectar el exceso de combustible en los arranques en frío con combustible E85 para lograr un desempeño similar al de un automóvil a gasolina. Los sensores en un automóvil FFV se estabilizan lentamente después de cambiar entre E85 y los combustibles de gasolina, lo cual es un problema difícil para los programas de prueba (Päivi Aakko-Saksa, et al (2011)).

En cuanto a las emisiones, en “Biogasoline options for conventional spark-ignition cars. VTT Technical Research Centre of Finland, Finland” se destaca varios resultados de emisiones comparando el E85 con el E0. Como por ejemplo que las emisiones evaporativas son más bajas para el E85 que para la gasolina. Además, las emisiones por permeación son menores que el E0. También se informa que las características de evaporación del combustible E85 conducen a la condensación de alcohol no quemado en la cámara de combustión. El alcohol condensado se libera en los arranques en frío.

Las emisiones de CO son algo menores o insignificantes con E85 que con E0. Se observó que las emisiones de CO se ven aumentadas en los encendidos fríos o durante el cambio de combustible de E0 a E85. Aunque, en autovía con el motor caliente, las emisiones de CO se ven claramente reducidas (Päivi Aakko-Saksa, et al (2011)).

Las emisiones de NO<sub>x</sub> generalmente son menores con el E85, llegando incluso a alcanzarse un 20% menos que con el E0 (Päivi Aakko-Saksa, et al (2011)).

Las emisiones de metano tienden a ser más altas para el combustible E85 que para la gasolina. Las emisiones de 1,3-butadieno y benceno son más bajas para el combustible E85 que para la gasolina.

Las emisiones de acetaldehído y etanol aumentan sustancialmente con E85 en comparación con la gasolina, particularmente a bajas temperaturas. Las emisiones de formaldehído aumentan en cierta medida con el combustible E85. Se ha informado que el potencial de formación de ozono con el combustible E85 es mayor que el de la gasolina, pero no siempre. Cuando el catalizador se calienta por completo, las diferencias entre los combustibles se reducen. Destacar que, la tecnología de motor y control de emisiones de los automóviles FFV está mejorando (Päivi Aakko-Saksa, et al (2011)).

Para resumir todos los datos obtenidos en cuanto a emisiones, se recoge una tabla con las diferentes conclusiones, la cual se expone en la Tabla 19:

<b>Beneficios en Emisiones</b>	
CO	Reduce (Aumenta en frío)
Hidrocarburos	Reduce (Aumenta en frío)
NO <sub>x</sub>	Reduce
1,3-Butadieno	Reduce
Benceno	Reduce
Ethene	Reduce
<b>Perjuicios en Emisiones</b>	
Acetaldehído	Gran incremento
Formaldehído	Incremento
PAH y emisiones cancerígenas	Gran incremento a bajas temperaturas
Metano	Incremento

Tabla 19: Comparación emisiones con E85 y E0 combustibles

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos proporcionados por (Päivi Aakko-Saksa, et al (2011)).

### 3.2.4 Mezcla de Etanol con Diésel (“E-Diesel”)

Numerosas técnicas han sido evaluadas para permitir el uso de diésel y etanol en los motores de encendido por compresión (MEC). De las diversas técnicas, la más destacada es la del empleo del combustible E-Diesel, que es básicamente una mezcla de diésel y etanol, debido a que es compatible con la mayoría de los motores diésel comerciales. Además, las mezclas son estables y se pueden usar en motores con ninguna modificación relativa.

El diésel se mezcla normalmente con hasta un 15 v/v% de etanol empleando para ello un paquete de aditivos que ayuda a mantener la estabilidad de la mezcla y otras propiedades, lo que es más importante, la cantidad de cetano y la lubricidad. El conjunto de aditivos puede comprender de 0,2% a 5,0% de la mezcla (Hannu Jääskeläinen (2016)).

El uso de E-diésel puede traer algunas reducciones en las emisiones por partículas (PM) del diésel, mientras contradictoriamente algunos estudios alertan de sus efectos en las emisiones de NO<sub>x</sub>, CO y HC. Quizás la mayor ventaja del E-diésel es su particular aspecto renovable, si se emplea bioetanol en la mezcla. Teniendo en cuenta sus problemas operacionales y de seguridad potencialmente importantes, la más destacable es que tiene un punto de inflamación muy bajo, es probable que el e-diésel siga siendo un combustible de nicho de mercado de aplicación limitada (Hannu Jääskeläinen (2016)).

La fumigación con etanol en el puerto de admisión del motor es una forma alternativa de usar etanol en el motor diésel. Como este método requiere modificaciones en el motor, su aplicación sigue siendo aún más limitada. Se han desarrollado kits de combustible dual de posventa que permiten la inyección de combustible de etanol en los puertos. Algunos kits también incorporan un intercambiador de calor para precalentar el etanol a una temperatura de 50-80 ° C para mejorar la vaporización del combustible en el puerto de admisión. Hannu Jääskeläinen recoge un estudio en el que se fumigó etanol hidratado (90% por volumen) en el puerto de admisión de un motor diésel John Deere 4045 HF475 Tier 2. El motor fue operado con tasas de sustitución de etanol de hasta el 37%, según la fracción de energía del fumigante (FEF), pero el efecto sobre las emisiones fue marginal. A medida que aumentaba la FEF, las emisiones de NO disminuían, pero la reducción de NO se compensaba con un aumento de las emisiones de NO<sub>2</sub>. Las emisiones de CO, THC y etanol aumentaron con la FEF, mientras que las emisiones de hollín generalmente disminuyeron (Hannu Jääskeläinen (2016)).

### 3.2.5 Motores Diésel con Alta Concentración de Etanol

Hay tres formas diferentes en las que los MEC emplean grandes concentraciones de etanol como combustible, en los tres casos se requieren modificaciones del motor

1. Etanol con mejoradores de ignición. El etanol no es un combustible natural para los motores MEC pero Scania ha empleado lo que se conoce como ED95 por más de 20 años en sus autobuses y camiones. El ED95 normalmente, contiene un 92% de etanol mojado (máx 6.8% agua), un 3% de MTBE (metano con hansi sorrounds), alrededor de un 5% de mejorador de ignición (Beraid 3555) y niveles de partes por millón (ppm) de un inhibidor de corrosión. Para conseguir la autoignición, la relación de compresión es aumentada de 17:1 a 28: 1. La potencia de salida y el rendimiento son similares al obtenido en los MEC estándar, mientras que las emisiones son reducidas a la mitad en algunos casos (Tuner, M. (2016)). La 4ª generación ED95 de Scania reduce hasta un 90% las emisiones de CO<sub>2</sub> (Scania (2018)), también reduce de forma considerable las emisiones de NO<sub>x</sub> y partículas como se muestra en las figuras 35 y 36.
2. Dual – Fuel. Se encuentran dos sistemas de combustibles, en este caso diésel y etanol (Luc Pelkmans (2019))
3. Conversion del MEC a un ciclo Otto. Para ello es necesario bujías, aditivos lubricantes y una relación compresión más bajo Luc Pelkmans (2019)

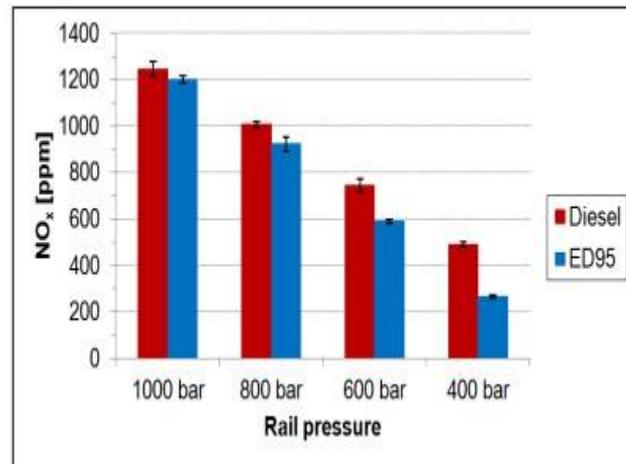


Figura 35: Emisiones de NO<sub>x</sub> del diésel convencional y ED95

Fuente: Per Stålhammar “Scania CV AB Head of advance combustion development” (2015)

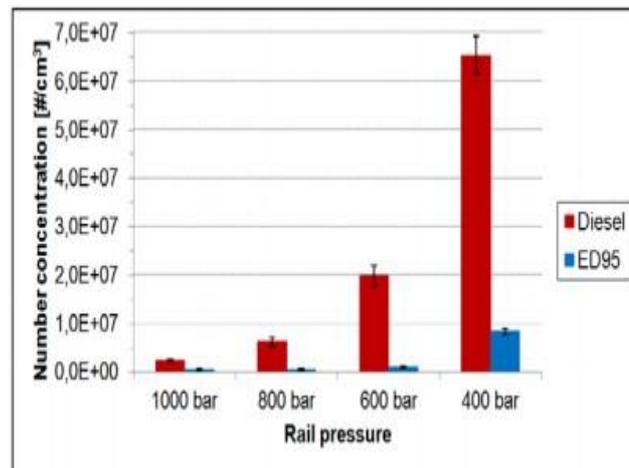


Figura 36: Emisiones de partículas del diésel convencional y ED95

Fuente: Per Stålhammar “Scania CV AB Head of advance combustion development” (2015)

### 3.2.6 Conclusión

El sector transporte es uno de los principales consumidores de combustibles fósiles y, por tanto, uno de los que más influencia tienen en la contaminación ambiental. Los pronósticos de cara al futuro, auguran un mayor consumo de energía en este sector. El papel de los biocombustibles como energía complementaria irá en aumento de la mano de este sector. Los biocombustibles se irán adaptando al uso que se les dé, dependiendo del medio de transporte. En el transporte por carretera los bioetanoles que conocemos a día de hoy seguirán siendo empleados como fuente de energía complementaria.

El etanol tiene buenos argumentos para seguir conservando su título de combustible renovable. Países como Brasil, han demostrado que es viable un sector automovilístico alimentado por etanol. Dependiendo de sus concentraciones, el etanol otorga mejores prestaciones a los motores MECH que aquellos vehículos alimentados por gasolina exclusivamente, como por ejemplo la posibilidad de aumentar la relación de compresión gracias al mayor octanaje, permitiendo una mayor eficiencia térmica y potencia de salida del motor. Además, se consiguen reducir las emisiones de CO y HC con las mezclas de etanol / gasolina.

Hay una gran variedad de tecnologías en cuanto al empleo del etanol en coches MECH (ETBE, FFV, etc), todas ellas con sus respectivas ventajas y desventajas. Incluso, se han desarrollado tecnologías en motores diésel, capaces de emplear etanol en sus motores y con grandes reducciones de emisiones como es el caso de los motores Scania ED95. Por todo ello, el futuro del etanol en los motores actuales parece clave para desprenderse de la dependencia de los combustibles fósiles.

## 4 CONCLUSIÓN GLOBAL

---

A lo largo de la revisión que se ha realizado en este trabajo, se ha demostrado que el creciente consumo de los combustibles fósiles y la alta dependencia a ellos supone una gran preocupación a nivel político, económico y sobre todo, medio ambiental. La necesidad de encontrar alternativas a estos combustibles, ha generado nuevas tecnologías como son los biocombustibles.

En el caso del biocombustible estudiado en este trabajo, el bioetanol, las investigaciones encargadas de obtener un etanol lo más limpio y renovable posible son varias. Sin embargo, hasta ahora la única generación de etanol capaz de producir cantidades industriales y que sea factible desde el punto de vista económico es la primera generación, la cual conlleva numerosos problemas éticos y se cuestiona su real capacidad de disminuir las emisiones contaminantes. La segunda y tercera generación son 100% renovables, pero actualmente los costos de producción son muy altos y aún se deben realizar varios años de investigaciones. A pesar de esto, se prevé un alto desarrollo de estas dos tecnologías en los próximos años para que, finalmente, reemplacen a la primera generación.

Las prestaciones que el bioetanol puede otorgar a los motores empleados por la mayoría de los ciudadanos son bastantes positivas. El empleo del etanol en los motores es algo conocido desde la invención del primer automóvil. Las actuales tecnologías disponibles tanto para motores MECH como para MEC han demostrado que las mezclas etanol / gasolina y etanol / diésel son factibles y conllevan mejoras en los resultados de obtención de potencia y reducción de contaminantes. El etanol, por tanto, se establece como un combustible necesario en la transición del empleo de energías contaminantes a energías más generosas con el medio ambiente.

## BIBLIOGRAFÍA

- International Monetary Fund. 2018. World Economic Outlook: Challenges to Steady Growth. Washington, DC, October.
- World Energy Outlook. (2018). International Energy Agency. Disponible en: <https://webstore.iea.org/download/summary/190?filename=spanish-weo-2018-es.pdf>
- Laura Benítez Casanova “Caracterización de las principales enzimas celulolíticas de *Myceliophthora thermophila* implicadas en la degradación de biomasa lignocelulósica y mejora de la hidrólisis de hemicelulosa para la producción de bioetanol de segunda generación” (Tesis doctoral) Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- Celia Hernández Galán “Obtención de bioetanol a partir de hidrolizados de residuos de fruta” (Tesis de pregrado) Universidad de Oviedo, Oviedo, España
- Hausfather, Z. H. (2018, 10 diciembre). Analysis: Fossil-fuel emissions in 2018 increasing at fastest rate for seven years | Carbon Brief. Recuperado de <https://www.carbonbrief.org/analysis-fossil-fuel-emissions-in-2018-increasing-at-fastest-rate-for-seven-years>
- Hannah Ritchie and Max Roser (2019) - "Air Pollution". Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/air-pollution>' [Online Resource]
- Producción Nacional y Autoabastecimiento. (s.f.-b). Recuperado de <https://www.appa.es/la-energia-en-espana/energia-primaria-y-produccion-electrica/>
- Energía primaria y producción eléctrica. (s.f.-b). Recuperado 6 junio, 2019, de <https://www.appa.es/la-energia-en-espana/produccion-nacional-y-autoabastecimiento/>
- Dermirbas, A(2009). “biofuels securing the planet’s future energy needs”. Energy conversion and Management. Vol. 50,pp. 2239-2249.
- Orlando A. y Chaparro-Giraldo A. (2009). “Biocombustibles, seguridad alimentaria y cultivos transgénicos” Salud pública. 11(2), pp. 290-300
- García Camús, J. M., & García Laborda, J. A. (2006). Biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol. CITME y CIEMAT. Madrid.
- Markets and Statistics – Renewable Fuels Association. (2019, 13 marzo). Recuperado 6 junio, 2019, de <https://ethanolrfa.org/statistics/>
- Cardona, C. A., & Sánchez, Ó. J. (2007). Fuel ethanol production: process design trends and integration opportunities. Bioresource technology, 98(12), 2415-2457.
- 2030 Energy Strategy - Energy - European Commission. Recuperado de <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2030-energy-strategy>
- OCDE/FAO (2016). “OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2016-2025”. OCDE Publishing, París
- EurObservER. (2018). Biofuels Barometer. Recuperado de <https://www.eurobserv-er.org/biofuels-barometer-2018/>
- EcuRed. (s.f.). Etanol - EcuRed. Recuperadode <https://www.ecured.cu/Etanol>
- Bertrand, E., Vandenberghe, L. P., Soccol, C. R., Sigoillot, J. C., & Faulds, C. (2016). First generation bioethanol. In Green fuels technology (pp. 175-212). Springer, Cham.

- Serna, F., & Barrera, L., & Montiel, H. (2011). Impacto Social y Económico en el uso de Biocombustibles. *Journal of Technology Management & Innovation*, 6 (1), 100-114.
- Rulli, M. C., Bellomi, D., Cazzoli, A., De Carolis, G., & D'Odorico, P. (2016). The water-land-food nexus of first-generation biofuels. *Scientific reports*, 6, 22521.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Gobierno de España (2014). Remolacha azucarera. p. <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/cultivos-herbaceos/remolacha-azucarera/>.
- UNICA. (s.f.). UNICA - UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - Histórico de produção e moagem por produto. Recuperado de <http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31>
- Wang, L., Quiceno, R., Price, C., Malpas, R., & Woods, J. (2014). Economic and GHG emissions analyses for sugarcane ethanol in Brazil: Looking forward. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 571-582.
- Haankuku, C., Epplin, F. M., & Kakani, V. G. (2015). Industrial sugar beets to biofuel: field to fuel production system and cost estimates. *Biomass and Bioenergy*, 80, 267-277.
- Salazar-Ordóñez, M., Pérez-Hernández, P. P., & Martín-Lozano, J. M. (2013). Sugar beet for bioethanol production: An approach based on environmental agricultural outputs. *Energy Policy*, 55, 662-668.
- Ruan, Q., Chen, W. B., Huang, S. H., & Ye, C. S. (2001). The mathematics model and matrix method of complex cocurrent multi-effect evaporation. *Eng Sci*, 3, 36-41.
- Zhou, G., Jiang, Z., Dong, X., Cui, Y., Geng, J., & Li, S. (2011). Recycling and refining of alcohol derived from waste beer separated from spent yeast. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 69(3), 158-162.
- McAloon, A., Taylor, F., Yee, W., Ibsen, K., & Wooley, R. (2000). Determining the cost of producing ethanol from corn starch and lignocellulosic feedstocks (No. NREL/TP-580-28893). National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US).
- Alejos, C., & Calvo, E. (2015). Biocombustibles de primera generación. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 18(2), 19-30.
- Quintero, J. A., Montoya, M. I., Sánchez, O. J., Giraldo, O. H., & Cardona, C. A. (2008). Fuel ethanol production from sugarcane and corn: comparative analysis for a Colombian case. *Energy*, 33(3), 385-399.
- Gerbens-Leenes, P. W., Van Lienden, A. R., Hoekstra, A. Y., & Van der Meer, T. H. (2012). Biofuel scenarios in a water perspective: The global blue and green water footprint of road transport in 2030. *Global Environmental Change*, 22(3), 764-775.
- Balat, M., Balat, H., & Öz, C. (2008). Progress in bioethanol processing. *Progress in energy and combustion science*, 34(5), 551-573.
- Rueda, J. S. M., Velandia, Z. E. A., Acosta, L. N. F., Sánchez, C. G., Puente, N. P. L., Briceño, P. G. D., ... & Corro, F. F. F. (2017). Producción de etanol carburante de segunda generación a partir de residuos como cáscaras de banano, maracuyá y naranja (eficiencia en obtención de melazas) utilizando la levadura *Candida utilis* en fermentación. *Revista Senova: Revista del Sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación*, 2(1), 14-29.
- Celia Hernández Galán “Obtención de bioetanol a partir de hidrolizados de residuos de fruta” (Tesis de pregrado) Universidad de Oviedo, Oviedo, España
- Loreto Alejandra Martínez Bocaz: “Estudio del proceso productivo de bioetanol a partir de residuos de eucaliptus pre-tratados con distintos líquidos iónicos” (Tesis pregrado) Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Laura Benítez Casanova “Caracterización de las principales enzimas celulolíticas de *Myceliophthora thermophila* implicadas en la degradación de biomasa lignocelulósica y mejora de la hidrólisis de hemicelulosa para la producción de bioetanol de segunda generación” (Tesis doctoral) Universidad de Sevilla, Sevilla, España.

- Rocío Abascal Fernández “ESTUDIO DE LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE DIFERENTES TIPOS DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA. MATRIZ DE REACCIONES Y OPTIMIZACIÓN” (Tesis pregrado) Universidad de Cantabria, España
- Dashtban, M., Schraft, H., & Qin, W. (2009). Fungal bioconversion of lignocellulosic residues; opportunities & perspectives. *Int J Biol Sci*, 5(6), 578-595.
- Barroso M, (2010). “Pretratamiento de biomasa celulósica para la obtención de etanol en el marco de una biorrefinería” Tesis en la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal de la Universidad Politécnica de Madrid
- Sun, Y., & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource technology*, 83(1), 1-11.
- Martínez-Anaya, C., Balcázar-López, E., Dantán-González, E., & Folch-Mallol, J. L. (2008). Celulasas fúngicas: Aspectos biológicos y aplicaciones en la industria energética. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 50(3), 119-131.
- Chen, H., & Fu, X. (2016). Industrial technologies for bioethanol production from lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 468-478.
- Aditya, H. B., Mahlia, T. M. I., Chong, W. T., Nur, H., & Sebayang, A. H. (2016). Second generation bioethanol production: A critical review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 66, 631-653.
- Carvalho, M., & Ishikawa, L. (2019). The Economic Viability of Second-Generation Ethanol in Coming Years. In *New Global Perspectives on Industrial Engineering and Management* (pp. 101-108). Springer, Cham.
- Rastogi, M., & Shrivastava, S. (2017). Recent advances in second generation bioethanol production: an insight to pretreatment, saccharification and fermentation processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 330-340.
- Montes, S., María, A., González Arechavala, Y., & Martín Sastre, C. (2014). Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas.
- Velazquez-Lucio, J., Rodríguez-Jasso, R. M., Colla, L. M., Sáenz-Galindo, A., Cervantes-Cisneros, D. E., Aguilar, C. N., ... & Ruiz, H. A. (2018). Microalgal biomass pretreatment for bioethanol production: a review. *Biofuel Research Journal*, 5(1), 780-791.
- Fernández-Linares, L. C., Montiel-Montoya, J., Millán-Oropeza, A., & Badillo-Corona, J. A. (2012). Producción de biocombustibles a partir de microalgas. *Ra Ximhai*, 8(3), 101-115.
- Villacorta, F., Eugenio, N., & Carrera Merlo, W. A. (2017). Diseño y modelamiento de una planta para la producción de bioetanol a partir de la biomasa de microalga chlorella.
- de Farias Silva, C. E., & Bertucco, A. (2016). Bioethanol from microalgae and cyanobacteria: a review and technological outlook. *Process Biochemistry*, 51(11), 1833-1842.
- Jambo, S. A., Abdulla, R., Azhar, S. H. M., Marbawi, H., Gansau, J. A., & Ravindra, P. (2016). A review on third generation bioethanol feedstock. *Renewable and sustainable energy reviews*, 65, 756-769.
- Curiosoando.com (2 noviembre, 2016). "¿Qué son los tilacoides?". Recuperado de <https://curiosoando.com/que-son-los-tilacoides>
- El ciclo de Calvin. Recuperado de <https://es.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/the-calvin-cycle-reactions/a/calvin-cycle>
- BOE-A-2006-2779
- Iea.org. (2017). Technology Roadmap Delivering Sustainable Bioenergy. Available at: [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Technology\\_Roadmap\\_Delivering\\_Sustainable\\_Bioenergy.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Technology_Roadmap_Delivering_Sustainable_Bioenergy.pdf)
- JRC/CONCAWE/EUCAR TTW report, version 3, Oct 2008
- Aakko-Saksa, P., Koponen, P., Kihlman, J., Reinikainen, M., Skyttä, E., Rantanen-Kolehmainen, L., &

- Engman, A. (2011). Biogasoline options for conventional spark-ignition cars. VTT Technical Research Centre of Finland, Finland.
- Luc Pelkmans, “Biofuels for transport” Universidad de Lovaina, Lovaina, Bélgica (2019)
- Iodice, P., Langella, G., & Amoresano, A. (2018). Ethanol in gasoline fuel blends: Effect on fuel consumption and engine out emissions of SI engines in cold operating conditions. *Applied Thermal Engineering*, 130, 1081-1089.
- Doğan, B., Erol, D., Yaman, H., & Kodanli, E. (2017). The effect of ethanol-gasoline blends on performance and exhaust emissions of a spark ignition engine through exergy analysis. *Applied Thermal Engineering*, 120, 433-443.
- Najafi, G., Ghobadian, B., Tavakoli, T., Buttsworth, D. R., Yusaf, T. F., & Faizollahnejad, M. (2009). Performance and exhaust emissions of a gasoline engine with ethanol blended gasoline fuels using artificial neural network. *Applied Energy*, 86(5), 630-639.
- Bastian-Pinto, C. L., BRANDÃO, L. E. T., ALVES, M. D. L., & SA, T. P. (2008). The ethanol-gas flex fuel car: What is the option value of choosing your own fuel. In *ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON REAL OPTIONS* (Vol. 12).
- DE VEHÍCULOS, P. D. T. Vehículos de combustible flexible: brindando opciones en combustible renovable. (APA de Google escolar)
- Hannu Jääskeläinen (2016). Ethanol diesel-blends [https://www.dieselnet.com/tech/fuel\\_ediesel.php#prop](https://www.dieselnet.com/tech/fuel_ediesel.php#prop)
- Tuner, M. (2016). Review and benchmarking of alternative fuels in conventional and advanced engine concepts with emphasis on efficiency, CO<sub>2</sub>, and regulated emissions (No. 2016-01-0882). SAE Technical Paper
- <https://www.scania.com/es/es/home/experience-scania/news-and-events/News/archive/2018/05/bioethanolScania13litros.html>
- Per Stålhammar “Scania CV AB Head of advance combustion development” (2015)

## GLOSARIO

---

PIB: Producto Interior Bruto  
GDP: Gross Domestic Product  
WEO: World Energy Outlook  
AIE: Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en Inglés)  
OMS: Organización Mundial de la Salud  
RFA: Renewable Fuels Association  
USDA: departamento de agricultura de los Estados Unidos  
USD: Dólar Americano  
TBA: tercbutil alcohol  
ETBE: etil-tercbutil éter  
MTBE: metil-tercbutil éter  
FHS: Fermentación e Hidrólisis Separadas  
SSF: Simultánea Sacarificación y Fermentación  
SCFS: Sacarificación y Co-Fermentación Simultáneas  
BPC: Bioprocesamiento Consolidado  
CMD: Conversión Microbiana Directa  
PS: Peso seco  
PEF: Método de tratamiento por impulsos eléctricos  
DQO: Demanda química de oxígeno  
MECH: Motores de encendido por chispa  
MEC: Motores de encendido por compresión  
GNL: Gas natural licuado  
GLP: Gas licuado del petróleo  
GNC: Gas natural comprimido  
GEI: Gases de efecto invernadero  
FAME: éster metílico del ácido graso  
MPFI: Inyección de combustible multipunto en el puerto de admisión  
HVO: Aceite vegetal hidrotratado  
TWC: Catalizador de tres vías  
EGR: Recirculación de los gases de escape  
PCI: Poder calorífico inferior

ECU: Unidad de control del motor

E%: Porcentaje de etanol en el combustible, desde 0% a 100%

FFV: Flexible-fuel vehicles

CEN: Comité estandarización europeo

CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: Ácido sulfúrico

H<sub>2</sub>: Hidrógeno

NO<sub>x</sub>: Monóxido de nitrógeno

HC: Hidrocarburos no quemados

PM: Contaminación por partículas

CO: Monóxido de carbono