

Libros de **Cátedra**

Química de la biomasa y los biocombustibles

Gustavo Pablo Romanelli, Diego Manuel Ruiz y
Gustavo Antonio Pasquale

n
naturales

FACULTAD DE
CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

QUÍMICA DE LA BIOMASA Y LOS BIOCOMBUSTIBLES

Gustavo Pablo Romanelli
Diego Manuel Ruiz
Gustavo Antonio Pasquale

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA



A Juan Carlos Autino, nuestro amigo, mentor y referente.

Agradecimientos

A la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata por su interés en este proyecto.

Al profesor Juan Carlos Autino, por darnos la posibilidad de llevar adelante el proyecto del curso optativo y este libro.

A todos los estudiantes con quienes hemos compartido el curso optativo de Química de los Biocombustibles, por el interés siempre presente, traducido en consultas, preguntas y conversaciones, las cuales ciertamente enriquecieron este texto.

Índice

Presentación	6
<i>José J. Martínez Zambrano</i>	
Capítulo 1	
La Química Verde. Su relación con la biomasa	7
Capítulo 2	
Energía y fuentes de energía	20
Capítulo 3	
Biomasa	39
Capítulo 4	
La biomasa como materia prima de compuestos químicos	48
Capítulo 5	
Biocombustibles	62
Capítulo 6	
Los combustibles fósiles	78
Capítulo 7	
Ensayos de control de combustibles líquidos	96
Capítulo 8	
Técnicas de preparación de biocombustibles	105
Bibliografía	109
Los Autores	112

Presentación

El concepto de biocombustibles abarca la posibilidad de reemplazar los recursos fósiles en los cuales nuestra sociedad moderna ha basado su desarrollo. Los problemas de la sociedad moderna pasan por el uso excesivo de estos recursos. El cambio climático, el uso inadecuado de las fuentes hídricas y los mercados cambiantes son la consecuencia del uso de tecnologías agresivas para su extracción y aprovechamiento de los recursos fósiles. Sin embargo, la alta dependencia a estos recursos se debe a que son la principal fuente de carbón estructurado y funcionalizado para la industria fina, así como para el calor y el transporte de energía. El uso eficiente de la biomasa recientemente ha recibido considerable atención como una alternativa potencial para su reemplazo. La temática es de actualidad e innumerables publicaciones de alto nivel se publican cada día, aunque al público en general y en especial a estudiantes universitarios de los primeros cursos, tales conceptos deberían presentárseles con mayor claridad. En este sentido, la experticia de los autores logra en este libro de divulgación simplificar conceptos de la química verde, así como de las distintas plataformas químicas derivadas de la biomasa y algunos de los métodos empleados en la obtención de biocombustibles, para lograr que el lector comprenda el valor de la biomasa y de procedimientos tecnológicos verdes haciendo que las próximas generaciones sean más críticas y comprometidas con lo que significa el uso de los combustibles.

José J. Martínez Zambrano
Químico en Alimentos, MsC en Química y Dr. En Ciencias Químicas
Profesor Asistente en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Tunja, Boyacá, Colombia. Noviembre de 2015.

CAPÍTULO 1

La Química Verde. Su relación con la biomasa.

Introducción

A pesar de todos los avances científicos y tecnológicos de nuestra civilización y en pleno siglo XXI, aún existen grandes problemas por resolver, muchos de los cuales han resultado ser de difícil solución. Entre ellos podemos destacar el cambio climático, la disminución de la capa de ozono, la posibilidad siempre latente de una gran crisis energética a causa del siempre anunciado agotamiento del petróleo, el aumento en los precios de los alimentos, el incremento en los niveles de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono, metano, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, todos hechos que muestran la necesidad imperiosa de actuar en consecuencia. De esta forma siempre se plantea la necesidad de reformular los combustibles que utilizamos, disminuir la contaminación del agua, del suelo y de los alimentos, causada por el uso indiscriminado de pesticidas y abonos sintéticos, entre muchos otros contaminantes. Debemos enfrentarnos, pues, a la resolución de todos y cada uno de estos problemas y, lógicamente, necesitamos de propuestas difíciles de llevar a cabo, pues no solo involucran transformaciones a escala global, sino que también implican cambios en los grandes intereses económicos y sociales.

Uno de esos problemas a solucionar es el relacionado con la industria Química, considerada por la sociedad como una de las grandes culpables de los desastres ambientales, y principal responsable de la contaminación del planeta. Sin embargo, a pesar de esto y aunque sea difícil de ver, esta industria ha contribuido en uno u otro modo al alto nivel de bienestar y comodidad que disfrutaban muchos miembros, no todos, de la sociedad actual. Prácticamente la totalidad de los objetos artificiales que nos rodean y que manejamos diariamente están contruidos total o parcialmente con sustancias y materiales elaborados por la industria Química.

Es un hecho que la mayoría de las manufacturas involucran procesos químicos, y debido a ello, aquellos que realizan desarrollos en dicha área, han comenzado a estudiar procesos de

fabricación que impliquen un menor riesgo ambiental y económico, repensando la manera de elaborar esos productos sin tener que usar materiales tóxicos ni generar desechos contaminantes, mediante el uso de nuevas tecnologías de menor costo, que consuman poca energía y a su vez contaminen menos, lo cual podrá volver rentables a las empresas y a los países que la utilizan con el correr de los años.

En este sentido, desde la década de 1990 ha comenzado a desarrollarse una nueva forma de hacer química que intenta ser rentable y disminuir los riesgos de los desastres ambientales a la que comúnmente se la llama "Química Verde". Este tipo de Química más benigna para el medio ambiente no trata de mejorar viejas tecnologías, sino que implica el desarrollo nuevas aplicaciones que funcionen más eficientemente, y que posibiliten otorgar mejores beneficios para la sociedad. La Química Verde por ejemplo ha sido capaz de convertir maíz en plástico biodegradable, desarrollar solventes no tóxicos y reducir de manera drástica los contaminantes derivados de la manufactura de fármacos, como la producción de ibuprofeno, por ejemplo.

A finales de los años 90 del siglo pasado, Paul Anastas y John Warner (1998) en su libro *Green Chemistry (Theory and Practice)* propusieron los fundamentos hacia una forma Química más sustentable, definiéndola y enunciando doce principios que sirven como una herramienta para llevarla a cabo.

De esta forma, la Química Verde involucra la invención, el diseño y la aplicación de productos y procesos químicos, con el objetivo de reducir o eliminar el uso o la producción de sustancias peligrosas, teniendo en cuenta los aspectos tecnológicos, económicos y sociales.

Se trata de una filosofía que consiste en el esfuerzo conjunto para reducir al mínimo, y de ser posible eliminar por completo, la contaminación desde su inicio, mediante el uso de procesos "limpios", evitando al máximo el residuo o el uso indiscriminado de materias primas no renovables, así como el empleo de materiales peligrosos o contaminantes en la elaboración de productos químicos "limpios", que no atenten contra la salud o el ambiente. De esta manera esta forma de hacer química representa los pilares que podrán mantener sostenible nuestro futuro.

Los doce principios de la Química Verde implican:

1-*Prevención*: evitar la formación de residuos en lugar de tratarlos una vez creados.

2-*Economía de átomos*: diseñar métodos que maximicen la utilización de todos los materiales desde el inicio hasta el final del proceso.

3-*Síntesis químicas menos peligrosas*: los métodos deben diseñarse de tal manera que se utilicen y generen sustancias con toxicidad baja o nula para la salud y el ambiente.

4-*Diseño de productos químicos seguros*: diseñar productos que funcionen y no sean tóxicos.

5-*Reducir el uso de sustancias auxiliares*: evitar, en lo posible, el uso de sustancias que no sean imprescindibles (disolventes, reactivos de separación) y en caso que se utilicen, que sean lo más inocuos posible.

6-*Diseño de procesos energéticos eficientes*: buscar métodos que involucren una reducción en la cantidad de energía involucrada en los procesos, tendiendo, dentro de lo posible a que se lleven a cabo a temperatura y presión normales.

7-*Uso de materiales renovables*: fomentar su utilización cuando sea técnica, ambiental y económicamente practicable.

8-*Reducción de derivados*: realizar modificaciones en los procesos con el fin de disminuir el empleo de reactivos adicionales.

9-*Catalizadores*: favorecer el empleo de catalizadores selectivos.

10-*Diseño de degradación de productos*: obtener productos se degraden y no contaminen una vez cumplida su función.

11-*Metodologías en tiempo real*: llevar a cabo el monitoreo del proceso y control de la formación de contaminantes en el momento en que éstos se generen.

12-*Química segura para prevenir accidentes*: seleccionar sustancias que disminuyan el riesgo de accidentes, explosiones e incendios.

Procesos orgánicos de bajo impacto ambiental

La Química Orgánica es una ciencia que aporta una incuestionable contribución a la mejora de la calidad de vida y al bienestar del hombre, ideando soluciones en campos tan diferentes como la salud, la higiene, la producción de alimentos, y la preparación de compuestos para todos los tipos de industria que conocemos.

Cada año la Química Orgánica sintetiza miles de compuestos nuevos, mediante diferentes rutas sintéticas. Debido a la preocupación por las cuestiones medioambientales en los últimos años surgió un nuevo enfoque dentro de la Química Orgánica en particular, que tiene por objetivo prevenir o minimizar la contaminación desde su origen, tanto a escala industrial como en los laboratorios de investigación o docencia e implica lo que hemos denominado justamente Química Verde. Esto supone ir más allá de lo que sería el mero hecho de un correcto tratamiento de los residuos potencialmente contaminantes que puedan generarse, sino algo mucho más importante: evitar la formación de esos desechos. Esta práctica involucra el rediseño de los procesos químicos mediante la aplicación de los doce principios de la Química Verde.

Uno de los pilares fundamentales de la mayoría de los procesos sintéticos es la catálisis. Los requerimientos de energía, cantidad de residuos y número de pasos en las etapas de aislamiento y purificación, pueden minimizarse al incrementar la selectividad de las reacciones. Se han propuesto varias maneras de cuantificar qué tan sostenible es un proceso, siendo uno de ellos la cuantificación de la economía atómica, una propuesta hecha en 1991 por Barry Trost de la Universidad de Stanford.

Todo proceso sintético debe ser atómicamente eficiente, es decir, debe incorporar la mayor parte de la masa de los reactivos en la masa de los productos. La economía atómica se define por la siguiente relación:

$$\text{Economía atómica (\%)} = \frac{\text{número de átomos del producto obtenido}}{\text{número de átomos de todos los productos}} \times 100$$

Un buen ejemplo de esto es la mencionada síntesis del ibuprofeno, cuyo proceso industrial hasta 1990 tenía una economía atómica de solo 40 %, y en la actualidad, obtenido mediante otra vía, alcanza el valor de 77 %. Otros parámetros utilizados para medir que la sostenibilidad de un proceso, son el rendimiento porcentual, la selectividad y el Factor E, definiéndose cada uno de la siguiente forma:

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{cantidad real obtenida de producto}}{\text{cantidad teóricamente obtenible del producto}} \times 100$$

$$\text{Selectividad (\%)} = \frac{\text{moles del producto obtenido}}{\text{moles de todos los productos generados}} \times 100$$

$$\text{Factor E} = \frac{\text{masa de residuos producidos}}{\text{masa del producto deseado obtenido}}$$

El Factor E, fue definido en 1992 por Roger Sheldon, y refiere al cociente entre la masa de residuo (todo lo producido en el proceso, excepto el producto deseado) y la masa de producto buscado para un proceso químico. Este concepto tiene gran importancia a nivel industrial, debido a que permite evaluar los diferentes procesos que se llevan a cabo en la industria para la obtención de productos. De esta forma se determinó que algunos procesos resultan poco eficientes, pues generan muy poca cantidad de producto útil y una gran cantidad de desechos, teniendo, como consecuencia factores E muy elevados; un buen ejemplo es el caso de las industrias farmacéutica y la Química Fina, en las cuales algunos procesos llegan a tener factores E de 100. Algunos datos sobre el Factor E, se pueden ver en la Tabla 1.

Tabla 1. Factor E según el tipo de industria

INDUSTRIA	PRODUCTOS (Ton/año)	FACTOR E Kg residuo/Kg producto
Petroquímica	106-108	< 0,1
Química Pesada	104-106	< 1-5
Química Fina	102-104	5-50
Farmacéutica	10-103	25-100

En base al planteo de los principios de la química verde, se han identificarse cinco grandes áreas de interés en Química Verde:

1. **Materias primas renovables:** uno de los objetivos de la Química Verde es la utilización de materias primas con efectos adversos mínimos, respecto de su toxicidad en humanos como de su impacto ambiental. Actualmente, los esfuerzos se encaminan a utilizar materiales renovables, como por ejemplo el uso de celulosa y almidón, dos productos procedente de la biomasa, en lugar de petróleo.

2. **Rutas sintéticas de bajo impacto ambiental:** otro de los objetivos de la Química Sustentable es proporcionar nuevas estrategias sintéticas que reduzcan, en su conjunto, el uso masivo de materias primas y energía y la generación de residuos, especialmente aquéllos que son más tóxicos o difíciles de eliminar.

3. **Sustitución/eliminación de los disolventes tradicionales:** es una de las áreas de mayor actividad en cuanto a la búsqueda de disolventes que no sean inflamables, ni tóxicos, ni produzcan emisiones de compuestos orgánicos volátiles.

4. **Reactivos “verdes”:** la sustitución de reactivos peligrosos por otros más benignos es un objetivo básico de la Química Verde. En este campo podemos mencionar el uso del carbonato de dimetilo como agente de metilación (sustituyendo a los halogenuros de metilo o al sulfato de dimetilo, que son productos muy tóxicos), o el uso de dióxido de carbono en lugar de fosgeno (un producto extremadamente tóxico usado como arma química durante la primera guerra mundial) en la preparación de isocianatos y ureas, compuestos que se utilizan en la manufactura de polímeros para resinas y plásticos.

5. **Productos químicos más seguros:** las innovaciones en esta área se orientan a reducir la toxicidad de una sustancia sin sacrificar la eficacia de su función.

En base a los expuesto, puede entenderse a la Química Verde como una nueva forma de hacer química que incide en los aspectos de la prevención de la contaminación durante un

proceso (es decir tendiente a una producción limpia), en contraste del viejo paradigma del uso de métodos de control de residuos y su posterior tratamiento al final del proceso. Además de trabajarse sobre el concepto de “las 3R”: recuperar, reciclar y reducir, una producción más limpia a nivel industrial implica otro concepto: rediseñar. El rediseño de productos y procesos químicos es y será una herramienta clave para evitar que los residuos se produzcan durante las etapas de fabricación, especialmente aquellos contaminantes más tóxicos para la salud humana y más agresivos para el medio natural. La Química Verde, en este sentido, representa una expresión fundamental de prevención y reducción de la contaminación en origen.

Química Verde y biomasa. Ejemplos.

A continuación veremos algunos ejemplos representativos, que muestran cómo es posible que la biomasa pueda ser considerada una materia prima de gran relevancia para el desarrollo de una Química con mayor grado de sustentabilidad:

Utilización de materias primas renovables

Unos de los principios enunciados por Anastas refiere al uso de materiales renovables, siendo estos aquellos productos de siembra y cosecha vegetal o animal, o productos naturales reciclables provenientes de la tierra, el agua o el aire; los primeros constituyen la biomasa, la cual se ha propuesto como alternativa por suministrar un gran volumen de material de bajo costo que puede ser utilizado como materia prima.

Se define la biomasa como la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, para usos energéticos y de nuevos materiales. De esta forma el uso de la biomasa para producir combustible, materiales novedosos y compuestos químicos tiene el potencial de reducir la dependencia del petróleo y las emisiones de gases de invernadero, valorizar los residuos, generar empleos en áreas rurales y crear nuevas industrias.

La biomasa lignocelulósica es virtualmente inagotable, siendo el material más abundante en el mundo; sus fuentes van desde los árboles hasta los residuos orgánicos. La composición química de la biomasa lignocelulósica depende en gran medida de su fuente, pero en general se compone de 38-50% de celulosa 23-32% de hemicelulosa y 15-25% de lignina.

Esta nueva industria basada en la biomasa es análoga a la destilería de petróleo, y podrá, si las condiciones lo permiten, generar múltiples combustibles y productos equivalentes a los obtenidos del petróleo. Este nuevo concepto, llamado biorefinería, integrará procesos de conversión de biomasa y equipamiento para producir biocombustibles (bioetanol, biometanol, biodiesel, biohidrógeno, biogás, biogasolinas, etc.), energía y productos químicos como disolventes, resinas, pinturas, plásticos y fertilizantes, por mencionar solo algunos.

La plataforma tecnológica basada en la hidrólisis de la celulosa para dar azúcares fermentables y su posterior fermentación pueden proporcionar muchos de los combustibles y productos químicos actuales. La industria Biofine, ha desarrollado un procedimiento de hidrólisis ácida a elevada temperatura, que permite transformar la biomasa rica en celulosa en ácido levulínico. Durante el proceso la celulosa se convierte inicialmente en monosacáridos solubles y posteriormente éstos son transformados en ácido levulínico (ácido 4-oxopentanoico, figura 1). El proceso resulta muy económico, y la celulosa se puede utilizar aun húmeda, lo que representa un ahorro de energía considerable.

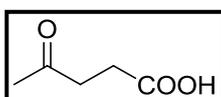


Figura 1. Estructura química del ácido levulínico

A partir de 1997, Biofine, junto a otras empresas y organismos estatales de los Estados Unidos, emprendieron la producción de ácido levulínico a partir de residuos de una fábrica de papel, logrando tratar aproximadamente una tonelada por día. El proceso desarrollado fue estudiado a escala más reducida empleando otros materiales que incluyen celulosa como por ejemplo el papel de desecho no reciclable, los desechos agrícolas y los provenientes de la industria de la madera. La producción de ácido levulínico constituye una excelente oportunidad para el trabajo a pequeña escala, aunque se estima que a medida que disminuya el precio de este producto podrán generarse emprendimientos a una escala mayor.

Dado que el ácido levulínico es utilizado como un precursor de muchas otras sustancias, no tiene que ser vendido como producto de gran consumo. La clave de su potencial comercial reside en sus derivados, y de hecho ya existen mercados para el uso de ácido levulínico: tetrahydrofurano, butanodiol, butirolactona, ácido succínico y ácido difenólico, se preparan a partir de procesos de conversión rentables.

En la actualidad, muchos laboratorios del mundo están desarrollando otras aplicaciones y métodos de producción para otros derivados del ácido levulínico, como por ejemplo el metiltetrahydrofurano, el levulinato de etilo (con potencial como aditivos de las naftas), el ácido δ -aminolevulínico (un pesticida biodegradable y no tóxico de amplio espectro) y nuevos polímeros biodegradables.

Los solventes renovables

Los solventes orgánicos constituyen la mayor fuente de compuestos volátiles en la atmósfera (27% del total), y su uso resulta ser uno de los problemas de mayor relevancia en Química. En 1994, cinco de los diez productos químicos más vertidos eran disolventes: metanol, tolueno, xileno, etilmetilcetona y diclorometano. Los compuestos orgánicos volátiles son los responsables, entre otras cosas, de la formación del smog fotoquímico urbano y son también la causa de afecciones como irritación ocular, molestias nasales y de garganta, dolor de cabeza, reacciones cutáneas alérgicas, náuseas, fatiga y mareos.

Como ya mencionamos, las estrategias dentro de la química sustentable apuntan a prescindir del uso de solventes en las llamadas reacciones *solvent-free*, lo que implica dentro de las ventajas una mayor reactividad, una concentración máxima de reactivos, la posibilidad de emplear activación por microondas convencional y una mayor productividad por la mayor cantidad de material en el mismo volumen del reactor. También se simplifican, o eventualmente se evitan, procesos de lavado y extracción.

En ocasiones en las que el empleo de un solvente orgánico es inevitable o presenta ventajas difíciles de superar, pueden utilizarse productos provenientes de la biomasa como por ejemplo etanol, ácido láctico y lactatos, terpenos, ésteres de ácidos grasos, glicoles y éteres de glicol. Se tiende de esta manera a reemplazar los disolventes derivados del petróleo por otros procedentes de la biomasa, que pueden obtenerse por procesos generalmente enzimáticos, o de esterificación a partir de alcoholes y/o ácidos procedentes de la biomasa. Tienen como ventajas ser biodegradables, presentar una toxicidad baja o nula, una volatilidad también baja, no son corrosivos, ni nocivos para la salud.

El lactato de etilo, es el solvente derivado de la biomasa que mayor repercusión ha tenido durante los últimos años. Se trata de una molécula orgánica perteneciente a la familia de los ésteres, de fórmula molecular $C_5H_{10}O_3$ que se obtiene por la reacción química entre ácido láctico y etanol, o de manera natural durante la fermentación del maíz o de otras materias primas renovables.

Debido a su elevada biodegradabilidad (100 %), se descompone finalmente en dióxido de carbono y agua. Se lo usa comúnmente como disolvente verde presentando así una excelente alternativa a muchos disolventes halogenados tóxicos, mucho más agresivos y contaminantes tanto para el medio ambiente como para la salud humana. Sin embargo, su uso aun no es masivo debido a su costo elevado. En la Tabla 2 se indican algunas de sus propiedades más relevantes:

Tabla 2. Algunas propiedades del lactato de etilo

Apariencia	Líquido incoloro
Olor	Afrutado
Fórmula molecular	C ₅ H ₁₀ O ₃
Masa molar	118,13 g/mol
Punto de fusión	-25°C
Punto de ebullición	154°C
Densidad (20°C)	1,03 g/cm ³
Solubilidad	Agua, hidrocarburos, cetonas y ésteres

Se estima que el uso de lactato de etilo como solvente renovable proporcionará grandes beneficios, propios del solvente, entre ellos el de ser fácilmente reciclable, no corrosivo, no resultar cancerígeno y no dañar considerablemente la capa de ozono. Sin embargo algunas de las propiedades que podrían resultar peligrosas son su ligera inflamabilidad, la generación de irritación de las mucosas nasales debida a su inhalación, así como ciertas dificultades respiratorias y la posibilidad de causar lesiones oculares. El lactato de etilo posee varias aplicaciones, entre ellas podemos destacar: es útil en recubrimientos, debido a su poder de solvatación; es adecuado para usarlo sobre maderas, metales, poliestireno, y como removedor de pinturas. En esta aplicación ha llegado a sustituir a disolventes industriales como el tolueno, la acetona, N- metilpirrolidona y el xileno; en la industria de poliuretanos, en la que tiene la habilidad de disolver una gran variedad de resinas de poliuretano debido a su alto poder de solvatación; en limpieza resulta adecuado para limpiar una gran variedad de superficies metálicas, eliminar grasas, aceites, adhesivos y combustibles sólidos. También se lo ha empleado como disolvente de celulosa y ésteres de celulosa (como el acetato de celulosa), y en la formulación de cosméticos y productos farmacéuticos. Su utilización como solvente de transformaciones químicas es más limitado debido a que posee un elevado punto de ebullición.

Diseño de productos químicos más seguros

Otro de los principios de la Química Verde menciona que los productos químicos deberán diseñarse para cumplir con la función deseada, reduciendo al mínimo su toxicidad. La industria

química genera numerosos productos útiles como medicamentos, plásticos, combustibles, productos agroquímicos (como fertilizantes y plaguicidas) y telas sintéticas como el nylon, el rayón, el poliéster y el kevlar. Pero debido a estos avances han ido apareciendo nuevos riesgos derivados de la fabricación, el transporte, la manipulación y la eliminación de estos productos.

Como consecuencia de estos nuevos riesgos, se generan problemas debidos a la contaminación y la toxicidad de las sustancias producidas por la industria química, perjudicando el ambiente y la salud humana. Se estima que se comercializan alrededor de 100.000 sustancias químicas y cerca de un millón de preparados solo en el mercado europeo y anualmente se suman a estos valores otras mil sustancias. De todas ellas, 1500 se han identificado y catalogado como muy peligrosas: 850 cancerígenas, mutágenas y/o tóxicas para la reproducción, 150 persistentes, bioacumulativas y tóxicas, mientras se estima que se agregarán otras 500 a esa categoría cuando se completen los análisis correspondientes.

Al respecto de los productos agroquímicos desarrollados por el hombre, no debe negarse que han producido enormes beneficios para la sociedad. Si bien en el mercado existen compuestos fitosanitarios que aumentan la producción de cultivos fundamentalmente para la alimentación del hombre y su ganado, y los protegen de plagas de muy diversa índole, no debe negarse que muchos de ellos suponen una amenaza tanto para la vida silvestre como para el hombre.

Muchísimos seres vivos se encuentran expuestos a un número elevado de sustancias agroquímicas, muchas de las cuales resultan cada vez más sospechosas de estar relacionada con el desarrollo de diferentes tipos de cáncer, alergias y problemas reproductivos.

Como ya mencionamos, la mayoría de los compuestos y materiales que intervienen en nuestra vida se preparan a través de procesos químicos industriales, los cuales durante décadas se diseñaron sin tener en cuenta su repercusión en el entorno. Debemos asumir el reto de que estos productos que hacen nuestra vida más cómoda puedan ser preparados a través de procesos no contaminantes y que los productos obtenidos sean cada vez más seguros.

El diseño de estos productos ambientalmente benignos debe guiarse por los doce principios de la Química Verde, y esto solamente se logrará con el esfuerzo de los químicos e ingenieros para desarrollar ese tipo de procesos y productos, previniendo la contaminación y resultando seguros para los seres humanos y el medio ambiente.

Plaguicidas y Química Verde

Las plagas han marcado la historia del mundo agrícola, y su intento por erradicarlas ha llevado al ser humano a utilizar distintos tipos de estrategias. Textos antiguos como *La Biblia* contienen infinidad de referencias sobre devastaciones causadas por insectos, o enfermedades de las plantas, e incluso se mencionan algunos principios agrícolas básicos tales como el dejar “descansar” la tierra. Homero mencionaba en *La Odisea* el uso de azufre para prevenir plagas. También los chinos usaban óxido de etileno para acelerar la maduración de las frutas,

los griegos trataban las uvas con cenizas debido a su alcalinidad antes de transformarlas en pasas de uvas, y los indios de América del Norte usaban peces muertos para fertilizar la tierra.

Como puede suponerse, resulta difícil precisar con exactitud la época en que los productos químicos comenzaron a ser aplicados en la agricultura; sin embargo se sabe que es muy probable que el tratamiento de las cosechas por adición de sustancias ajenas al medio se remonte muchos siglos en la historia. Puede verse entonces que, como resultado de ese esfuerzo histórico del ser humano por librarse de las plagas que invaden su producción, han surgido una gran variedad de sustancias que se utilizaron y se utilizan para combatir las plagas y enfermedades de las plantas, dichas sustancias son conocidas como plaguicidas o pesticidas.

Bajo el nombre de plaguicidas agrupamos cualquier sustancia o mezcla de sustancias dirigida a destruir, prevenir, repeler, o mitigar alguna plaga. El término se puede utilizar para designar compuestos que sean herbicidas, fungicidas, insecticidas, o alguna otra sustancia utilizada para controlar cualquier tipo de plagas. Puede tratarse de una o varias sustancias químicas, agentes biológicos, antimicrobianos, desinfectantes, que se aplican para disminuir la población o ahuyentar a las especies-plaga tales como insectos, hongos, virus, bacterias, patógenos vegetales u otros microorganismos. Muchos productos del hogar son plaguicidas, aerosol y cebo para cucarachas, repelentes de mosquitos para uso personal, venenos para ratas y otros roedores, aerosoles y pastillas para pulgas y garrapatas, productos que matan hongos y moho, productos químicos para el jardín, y algunos productos bactericidas para piscinas.

Por su propia naturaleza, el uso de la mayoría de los plaguicidas implica algún riesgo, pues al estar diseñados para matar o afectar negativamente ciertos organismos vivos, también pueden causar daños al medio ambiente, incluyendo otras especies a las que no están dirigidos, entre ellas los humanos.

Sin embargo los plaguicidas tienen un papel fundamental en nuestras vidas, no solo en la agricultura, para la protección de cultivos, sino también para evitar la propagación de plagas nocivas que causan enfermedades como la malaria.

El uso no restringido de plaguicidas altamente tóxicos durante varias décadas ha provocado efectos negativos sobre el medio ambiente y el envenenamiento de especies no buscadas. Por ello es necesario el desarrollo de pesticidas ideales, que son los que tienen una acción específica, restringida, de rápida descomposición química y biológica y difícil de desplazarse del sitio donde se los aplica.

Históricamente el control de plagas se basaba en el uso de agentes inorgánicos, tales como azufre, arsénico, cianuro de hidrógeno, algunos de los cuales se siguen utilizando a pesar de su alta toxicidad no solo para los insectos específicos, sino también para especies no buscadas, incluyendo los vertebrados. Pero sin los plaguicidas sintéticos ellos no se podría haber dado el gran aumento de producción de alimentos, llamada la "revolución verde", que ha permitido alimentar, cada vez mejor, a una población mundial que ha ido creciendo continuamente. Otra importante utilidad de esos plaguicidas ha sido la mencionada lucha contra epidemias que afectan a una elevada proporción de la población, como el tifus o la

malaria, transmitida por insectos y otros parásitos, cuyas poblaciones han disminuido considerablemente por el efecto de los plaguicidas.

Fue la Segunda Guerra Mundial que dio origen a esa era moderna del control químico de plagas, con la introducción de esos insecticidas orgánicos sintéticos. El término compuesto químico sintético se utiliza para describir sustancias que, generalmente, no ocurren en la naturaleza, sino que han sido sintetizadas por químicos a partir de sustancias más simples.

La gran mayoría de los compuestos químicos sintéticos comerciales son compuestos orgánicos, de los cuales la mayoría utilizan el petróleo o gas natural como fuente original de átomos de carbono. Los plaguicidas orgánicos fueron uno de los primeros en ser desarrollados, ya que resultaban muy apreciados, debido a su estabilidad química, a su baja solubilidad y a su elevada toxicidad para los insectos.

A pesar de haber sido sintetizado por primera vez en un laboratorio en el año 1874, el DDT (*p*-diclorodifeniltricloroetano), no empezó a aplicarse como insecticida hasta la década de 1940. A partir de ese momento contribuyó enormemente al aumento del rendimiento de las cosechas. Este tipo de insecticidas, herbicidas, fungicidas y muchos otros plaguicidas se aplican intensamente en muchos países, tanto desarrollados como en vías de desarrollo, lo cual provoca la contaminación del agua, aire, suelo y alimentos con compuestos que pueden llegar a afectar al ser humano y a muchas formas de vida silvestre.

Desde el punto de vista de la aplicación, la contaminación ambiental por plaguicidas se produce cuando éstos se utilizan en mayor cantidad de la que pueden absorber los cultivos generando además residuos de plaguicidas en los alimentos. Por otro lado también se produce cuando los residuos de estos tóxicos son arrastrados por el agua o el viento antes de que puedan ser absorbidos, o también cuando se arrojan envases de plaguicidas en el suelo o en fuentes de agua.

En el hombre pueden producir envenenamientos o intoxicaciones de dos tipos: la intoxicación crónica, aquella que se presenta después de días, meses o incluso años de haber estado en contacto con plaguicidas, y la intoxicación aguda, la cual se da a las pocas horas de haber estado en contacto con plaguicidas.

Desde el punto de vista de la búsqueda de potenciales pesticidas a partir de los principios de la Química Verde, en los últimos años se está retornando a las plantas como fuente de plaguicidas más seguros para el medio ambiente y la salud humana. Hoy en día se sabe que los metabolitos secundarios tienen un rol importante en el mecanismo defensivo de las plantas. Las plantas, en conjunto, producen más de 100.000 sustancias de bajo peso molecular conocidas también como metabolitos secundarios, que normalmente no resultan esenciales para el proceso metabólico básico de la planta. Entre ellos se encuentran terpenos, lignanos, chalconas, flavonoides, alcaloides, azúcares, esteroides, ácidos grasos, etc. Semejante diversidad de compuestos es consecuencia del proceso evolutivo que ha llevado a la selección de especies con mejores defensas contra el ataque microbiano, o la predación por parte de insectos y animales.

Durante los primeros años de la década de los 80, científicos del laboratorio Lilly en Estados Unidos, recogieron muestras de suelo de una isla del Mar Caribe que se caracterizada por poseer efectos insecticidas. Con el tiempo se demostró que el material con actividad se producía por el metabolismo de un microorganismo llamado *Saccharopolyspora spinosa*. El material activo estaba compuesto en más de un 95 % por una mezcla de espinosina A y espinosina D, cuyas estructuras se muestran en la Figura 2.

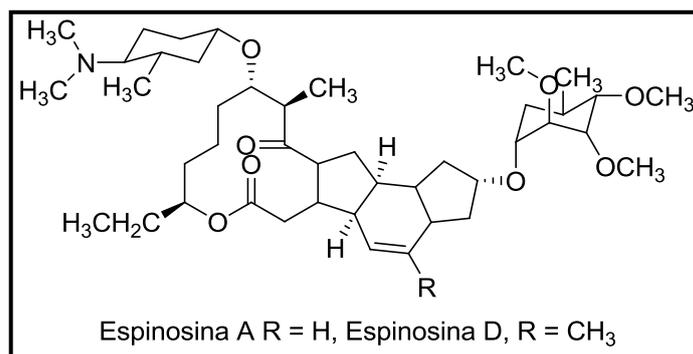


Figura 2. Estructuras moleculares de las espinosinas A y D

Estos dos compuestos se caracterizan por sus bajos niveles de toxicidad para mamíferos y el hombre, pero son letales como insecticidas pues se incorporan tanto por ingestión como por contacto y se caracterizan por poseer un amplio espectro para la destrucción de plagas de diversa índole. Presentan ventajas como la no acumulación, la no persistencia en el medio ambiente, no sufre lixiviación, y posee altos márgenes de seguridad para aves y peces.

La empresa Dow desarrolló un método de síntesis para la obtención de dichos compuestos para que pueda ser utilizada a gran escala para el control de cosechas en agricultura. En el año 1997, se aprobó el primer insecticida que contenía spinosad como principio activo, denominado Tracer®, el cual fue utilizado para el control de insectos en el cultivo de algodón. Posteriormente surgieron otros productos a base de spinosad que fueron denominados como Success® y SpinTor®.

Los ejemplos seleccionados aquí son solo algunas de las aplicaciones más recientes de los principios de la Química Verde; día a día surgen nuevos desafíos para llevar a cabo procesos eficientes, utilización de materiales de partida biodegradables y productos químicos más seguros que posibiliten reducir considerablemente la contaminación sobre nuestro planeta. Siguiendo este camino, los recursos renovables y en particular la biomasa son la principal fuente de productos y de energía para desarrollar una industria menos contaminante y respetuosa con el medio ambiente.

CAPÍTULO 2

Energía y fuentes de energía

El hombre y su relación con la energía

En la actualidad hablar de energía es un tema muy común en la sociedad actual, algo muy familiar y cercano a todos; sin embargo esto no siempre resultó así. En el presente apartado nos proponemos llevar a cabo una mirada histórica acerca del uso que ha hecho el hombre de los recursos energéticos que tiene a su disposición, desde la prehistoria hasta la actualidad.

El hombre primitivo

La aparición del hombre en la Tierra data, según teorías científicas, de unos 5 millones de años aproximadamente. Aquel hombre primitivo, el prehistórico, utilizaba únicamente sus fuerzas para poder alimentarse, divertirse, defenderse y comunicarse con sus semejantes. Esto significa que utilizaba su propia energía física (la energía muscular), la cual era obtenida a partir de los alimentos que consumía. Los alimentos de origen vegetal poseen energía acumulada en forma Química, la cual es producida gracias a la acción del sol mediante la fotosíntesis que transforma moléculas sencillas como el dióxido de carbono y el agua en hidratos de carbono que puede poseer millones de átomos de carbono en sus moléculas como por ejemplo el almidón y la celulosa. Lógicamente, cuanto más intensa era la actividad que el hombre primitivo desarrollaba, mayor era la cantidad de energía que necesitaba por unidad de tiempo. Durante miles de años la única fuente energética para el hombre fueron los productos comestibles de su entorno.

La conquista del fuego

Quizás uno de los mayores logros de la humanidad en cuanto al manejo de los recursos naturales sea la conquista del fuego. Con la generación y el manejo del fuego, inició el aprovechamiento de los recursos energéticos de la Tierra por parte del hombre, transformando la biomasa en energía calórica. De esta forma el hombre comienza a dominar la técnica de extraer la energía acumulada en la madera y los residuos vegetales secos al quemarlos y hacer fuego a voluntad.

De esta manera, la biomasa pasa a ser la principal fuente de energía del hombre, pues éste amplía las fuentes de biomasa, pasando de aquellas que utilizaba solamente para alimentarse, a un aprovechamiento mayor de cualquier otro tipo de biomasa vegetal, como pastos, leña, hojas secas, etc. Dicho aprovechamiento, además, resultó potenciado, pues el fuego no solo fue aprovechado para protegerse del frío, sino también como defensa, para alumbrarse en la oscuridad, y posteriormente para la cocción de los alimentos y de este modo, lograr hacerlos más digeribles y masticables. Para ese momento del desarrollo de la historia, el hombre ya cuenta con dos fuentes de energía: la de su propio organismo y el fuego, obtenido por combustión de la biomasa vegetal.

La aparición de las herramientas

Otro momento crucial en la vida del hombre fue la fabricación de instrumentos para el trabajo y la defensa. Esos instrumentos primitivos estaban fabricados con piedra, madera, hueso y cuernos. Aparecieron así las puntas de piedra, las hachas, el martillo para golpear con más fuerza, las trampas para cazar animales, el arco y la flecha, las piedras para romper nueces o huesos, o para pelar ciertos frutos.

La introducción de la herramienta, hizo mucho más fácil la vida del hombre, más cómoda, pues gracias a su uso éste se cansaba menos, ahorrando su propia energía; en esas condiciones fue aprendiendo poco a poco a usarlas cada vez más efectivamente, ampliando su espectro de usos y aprovechando otras formas de energía. El arco y la flecha, considerado hoy en día como una de los artefactos primitivos más simples, constituye un sistema mecánico en el que la energía se acumula en el arco en forma de energía potencial cuando se tensa y luego resulta transferida a la flecha, en el momento en que se lanza, en la forma de energía cinética.

Agricultura

El desarrollo de la agricultura fue otra de las grandes revoluciones de la humanidad; el hombre comienza a almacenar por su cuenta la energía del sol, transfiriéndola a los vegetales

que aprendió a cultivar, los cuales luego eran utilizados como alimentos, aprovechando la energía. El desarrollo de la agricultura también requirió de la utilización de nuevas herramientas como el arado, siendo los primeros inmensas ramas con forma de horquilla. También comenzó a aplicarse el riego de la tierra en forma artificial; Si bien inicialmente el agricultor hizo uso de su propia fuerza (su propia energía), la búsqueda de otras fuentes de energía mecánica condujo a la domesticación de animales que tiraran del arado, además de su aprovechamiento para el transporte, lo que permitió la expansión de sus dominios y por lo tanto la extensión de los terrenos cultivables y la cantidad de recursos energéticos de los que podía disponer.

El hombre moderno

Con el correr del tiempo el hombre fue aumentando notablemente su inteligencia, y esto condujo a incrementar en forma acelerada la necesidad y el consumo de energía. Todo ello gracias a haber modificado su forma de vida y su entorno, un progreso sustentado en dos pilares fundamentales: la invención de instrumentos para multiplicar el rendimiento del trabajo (herramientas y máquinas) y el descubrimiento de nuevas formas y fuentes de energía para aprovechar, sumándolas a las que ya conocía.

Además del pasaje, de su propia energía muscular y la de sus animales, a la energía acumulada en la biomasa, aprovechó con el correr de los siglos, otras de sus formas presentes en el entorno:

- el viento: para mover sus molinos, levantó velas para impulsar sus embarcaciones (energía eólica).

- las corrientes de agua: ya sea por caída o choques de chorros o corrientes de agua sobre los alabes de una rueda de madera, la cual se utilizó hacer girar las piedras de un molino de granos o más posteriormente para impulsar enormes represas (energía hidráulica).

- los combustibles fósiles: que les permitieron mover sus maquinarias cada vez más pesadas y complejas y a la vez genera electricidad.

- los materiales radiactivos: que permitieron dominar y aprovechar las reacciones nucleares de fisión para generar electricidad (energía nuclear).

De los hechos descriptos hasta aquí, salta a la vista la tendencia a un crecimiento exponencial del consumo energético *per cápita* necesario para el desarrollo de la sociedad, una realidad que se profundiza más a partir del comienzo de la revolución industrial a mediados del siglo XIX. El desarrollo de las sociedades actuales, totalmente consumistas convierten a dicha tendencia en algo que resulta insostenible, por lo que resulta necesario e imperativo llevarla a límites tolerables en beneficio de las próximas generaciones.

La importancia de la energía para la vida

No es necesario aclarar y ampliar demasiado al asegurar que el funcionamiento de todo el planeta (por no extenderlo a todo el universo) se debe a la existencia de la energía. Su importancia radica en que sin energía no sería posible ningún proceso físico, químico o biológico. Así como los seres vivos necesitan energía para mantenerse así, el hombre moderno la necesita para mantenerse y manejar su entorno. Sin energía no podrían funcionar los medios de transporte, no habría medios de comunicaciones como los actuales, o no podríamos calefaccionar nuestras casas, por mencionar solo algunos ejemplos relevantes. Todo esto significa que el desarrollo de una sociedad como la actual depende de manera vital de las fuentes de energía.

Como conclusión de este apartado podemos decir que la vida del hombre esta ligada a la energía; todas las actividades humanas implican fuentes de energía y su transformación, consumiendo cada vez más. Desde aquel hombre de la prehistoria hasta el actual, la energía siempre estuvo, está y estará presente la lo largo de su vida.

Definición del concepto de energía

La energía es un concepto físico invisible e intangible, hecho que hace que resulte difícil de definir y explicar. La forma más aproximada en que puede percibirse es en base a los efectos que aparecen como consecuencia de su puesta en juego. Es decir, la energía permite que las cosas sucedan, como por ejemplo, la que nos llega del Sol hace que las plantas crezcan, o aquella que esté almacenada en el petróleo hace que funcionen los motores de combustión, o la que se encuentra contenida en los alimentos nos permite hacer todas las cosas que hacemos diariamente.

Richard Feynman (1971) define la energía de la siguiente manera:

Hay un hecho, una ley, que gobierna todos los fenómenos naturales conocidos hasta la fecha. No hay excepción conocida a esta ley: es exacta hasta donde sabemos. Se denomina ley de conservación de la energía. Establece que hay cierta magnitud, que llamamos energía, que no cambia en los múltiples cambios que sufre la naturaleza. Esta es una idea muy abstracta, porque es un principio matemático, dice que hay una magnitud numérica que no cambia cuando algo sucede. No es la descripción de un mecanismo, o algo concreto, se trata solamente del extraño hecho de que podemos calcular ciertos números y que si lo volvemos a la naturaleza haciendo sus trucos, este número es el mismo.

En lo cotidiano es muy común hablar de energía en aspectos tan diferentes como pueden resultar los combustibles, los alimentos, las baterías y el Sol. En todos los casos se trata de

sistemas con la propiedad de producir transformaciones ya sea dentro de sí mismos como en otros sistemas; así los combustibles reaccionan dentro de un motor de combustión interna, produciendo el movimiento del automóvil, los alimentos entran en combustión dentro de las células de nuestro organismo y la energía liberada es usada para mantener la temperatura corporal y realizar movimientos. La batería, al conectarse a un circuito eléctrico puede hacer funcionar una linterna o un motor a partir de las reacciones químicas que suceden en su interior. El Sol, gracias a la inmensa cantidad de energía producida en su interior liberada por la fusión nuclear, influye sobre nuestro planeta, produciendo lo que conocemos como cambios climáticos, las estaciones del año, e incluso en los propios seres vivos que lo habitan. Esa capacidad que poseen estos sistemas para producir cambios en sí mismo o en otro sistema es justamente lo que se entiende como energía.

El principio de conservación de la energía

La energía no se crea ni se destruye, solamente puede transformarse. Dicho concepto, conocido como “principio de conservación de la energía” indica que la energía no puede crearse a partir de la nada, ni desaparecer sin dejar rastros; sólo puede cambiar transformándose de una forma en otra. En dichas transformaciones, la energía total siempre permanece constante; es decir, es la misma antes y después de cada transformación.

En base a lo anterior, puede asegurarse que no tiene sentido entonces hablar de energía consumida, debido a que siempre se transforma, pero nunca se pierde. Podríamos considerar que la energía “cambia de disfraz según la ocasión”, pero entonces ¿Qué significa cuando hablamos de energía consumida? Debe entenderse así a aquella transformada en otra forma de energía. Como el principio de conservación dice que la energía puede utilizarse pero no puede consumirse, la única opción aceptable es que se degrada, cambia de forma, usualmente a la forma de calor.

El nacimiento de la termodinámica

La búsqueda de una máquina de movimiento perpetuo, es decir, una máquina de funcionamiento cíclico continuo que cede energía al entorno en forma de trabajo mecánico sin consumir de éste ningún tipo de energía, ocupa un espacio notable en la historia de la ciencia. Los diseños realizados, los errores cometidos y los intentos por corregirlos contribuyeron en gran medida al desarrollo de la rama de la física que estudia las transformaciones de la energía: la termodinámica. Estas transformaciones de energía se refieren, por ejemplo, a la conversión parcial de calor en movimiento ordenado que tiene lugar en cualquier máquina que

consume algún tipo de combustible, lo que da idea de la enorme importancia práctica que tiene la termodinámica. Una vez establecidas las leyes de la termodinámica durante la segunda mitad del siglo XIX, quedó clara la imposibilidad de construir una máquina de movimiento perpetuo. Estas leyes están tan bien establecidas como lo está la ley de la gravedad, por lo tanto, esperar que no se cumplan es equivalente a esperar que una piedra al soltarla, permanezca quieta sin caer. En la figura 3 puede verse la portada de una revista del año 1920, en la que se muestra un inventor con una máquina de movimiento perpetuo.

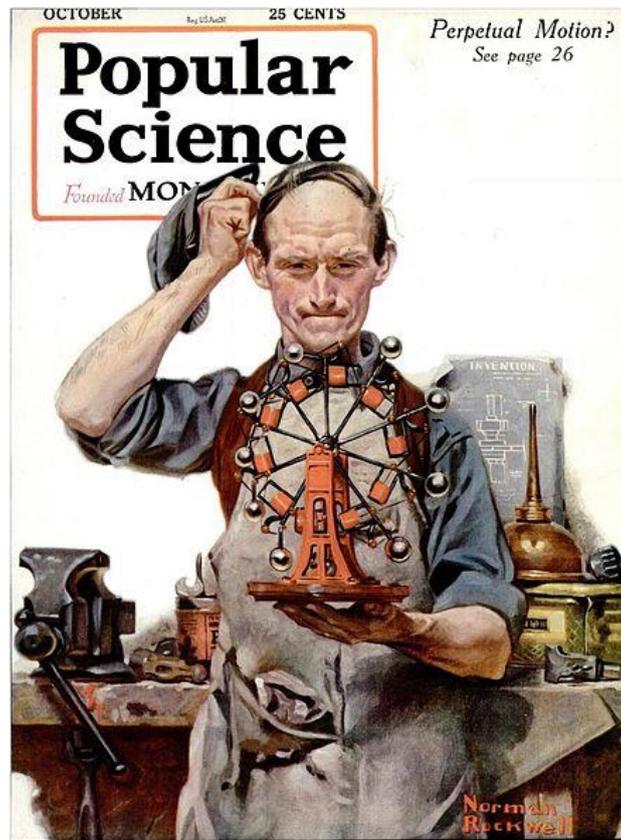


Figura 3. Portada de la Revista Popular Science del año 1920

Hoy sabemos por la segunda ley de la termodinámica que la construcción de dicho dispositivo resulta imposible. Veamos a continuación que nos dicen cada una de las leyes de la termodinámica:

Ley cero: implica que si se pone en contacto un objeto frío con otro caliente, ambos evolucionan hasta que sus temperaturas se igualan.

Primera ley de la termodinámica: la energía no se crea ni se destruye: sólo se transforma.

Segunda ley de la termodinámica: no es posible ningún proceso cuyo único resultado sea la extracción de calor de un recipiente a una cierta temperatura y la absorción de una cantidad igual de calor por un recipiente a temperatura más elevada.

Tercera ley de la termodinámica: es imposible alcanzar una temperatura igual al cero absoluto mediante un número finito de etapas.

Las leyes anteriores pueden interpretarse desde diversos enfoques; la forma en la que se presentan los enunciados son las más adecuadas a los fines de esta obra.

Formas de energía

A la energía se la puede dividir en dos grandes grupos: energía externa o macroscópica y energía interna. Un ejemplo de energía macroscópica sería la energía mecánica, la que contienen todos los cuerpos debido a su posición o a su movimiento. Se presenta en dos formas energía cinética y energía potencial. La energía cinética es la que posee un objeto debido a su movimiento, todo cuerpo que se mueve posee energía cinética y viene dada por la siguiente relación matemática:

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

En donde m es la masa del objeto y v la velocidad del mismo. En la misma se puede deducir que cuando más rápido se mueve un objeto, más energía cinética tiene éste, y cuando la velocidad es nula, la energía cinética también lo será.

La energía que posee un objeto situado a determinada altura sobre una superficie se denomina energía potencial. Un objeto puede tener la capacidad para realizar trabajo como consecuencia de su posición en un campo gravitacional (energía potencial gravitacional). Se define entonces como la energía determinada por la posición del cuerpo y depende de la altura y la masa del cuerpo y esta dada por la siguiente ecuación:

$$E = m g h$$

Donde un cuerpo de masa m situado a una altura h , posee una energía potencial E . De la misma se puede deducir que cuando h es cero, la energía que posee esa masa dentro del campo gravitacional es nula, es decir no posee energía potencial gravitatoria. Cuando un objeto

libera la energía potencial que tiene acumulada, la misma se convierte en otras formas diferentes de energía.

Entre las distintas formas de energía interna (antiguamente llamada microscópica; actualmente el término resulta incorrecto) podemos mencionar la **energía térmica** que es la energía que poseen los cuerpos en función de su temperatura, la **energía eléctrica**, debida a la presencia e interacción de cargas eléctricas, la **energía mecánica interna** la cuál corresponde a la energía cinética y, energía potencial de la moléculas y átomos que forman los cuerpos, la **energía química**, la energía que tienen las uniones químicas (iónicas y covalentes) que conforman las moléculas de los diferentes compuestos, y que es posible liberar por medio de una reacción química; y la **energía nuclear** que corresponde a la energía contenida en los núcleos atómicos debido a las interacciones nucleares fuerte y débil que mantienen unidas a las partículas de los núcleos (protones y neutrones).

Unidades

Gracias a la capacidad de inter convertirse, la energía posee las mismas unidades que el trabajo. Generalmente se mide en unidades como el **Ergio (Erg)** o el **Joule (J)**. Esta última es la unidad derivada del Sistema Internacional (SI), y es la más utilizada para cuantificar energía, trabajo y calor. Corresponde a la cantidad de trabajo realizado cuando una fuerza de un Newton actúa sobre una distancia de un metro. En relación con la energía cinética un Joule de energía corresponde a la que posee un cuerpo con una masa de un kilogramo, que se mueve con una velocidad de un metro por segundo (m/s) en el vacío. Otra unidad de energía muy utilizada es la **caloría (cal)**, que está basada en el calor específico del agua y su principal uso es para expresar el poder energético de los alimentos y en calefacción. Se la define como la cantidad de energía calorífica necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua pura, desde 14,5 °C a 15,5 °C, a presión normal de una atmósfera. La relación entre ambas unidades es la siguiente:

$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$$

También existen otras unidades de energía que resultan mas prácticas de utilizar en otros órdenes de magnitud, como el **electrónvolt (eV)**, una unidad pequeña utilizada principalmente en física de partículas, o los **Kilowatts hora (KWh)**, comúnmente utilizada en relación a grandes consumos de energéticos:

$$1 \text{ KWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$$

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Calidad de energía

Existen varios tipos de energía, pero en función de distintos aspectos como su utilidad o su capacidad de almacenamiento, entre otras, algunas son más importantes que otras; por ejemplo las reservas de petróleo, o la energía eléctrica, que son fuentes de gran importancia en la actualidad. Esto se debe a que algunas formas de energía tienen mayor facilidad de uso que otras, es decir que desde el punto de vista de su utilización, resultan de mayor calidad aquellas energías que ceden energía en menor tiempo. Desde ese punto de vista, puede considerarse al calor como la de menor calidad, además de la forma más común, pues se trata del estado energético más desordenado y, por lo tanto, el de menor utilidad.

Eficiencia energética (rendimiento)

El uso de una fuente de energía implica necesariamente un proceso de transformación de una forma de energía en otra. Como ya mencionamos, esta conversión no se consigue manera completa y esto fue justamente lo que dio origen a la segunda ley de la termodinámica. Como ya vimos, dicha ley establece la imposibilidad de transformar todo el calor en trabajo, ya que siempre una parte de la energía se degrada. Para determinar la magnitud en la cual se aprovecha la energía, se define la eficiencia o rendimiento energético de un proceso mediante la siguiente relación:

$$\eta = \text{energía útil producida} / \text{energía empleada o absorbida}$$

Esto significa que la eficiencia es una medida de la cantidad de la energía total consumida por una máquina que se convierte en trabajo útil. Así, el rendimiento de una máquina ideal es 1, aunque como ya mencionamos ninguna máquina puede convertir toda su energía en trabajo, sino que siempre se pierde cierta cantidad en el proceso. Los motores en los automóviles convierten la energía almacenada en el combustible en energía cinética, en calor irradiado por el motor y en calor que se escapa por el caño de escape; dicho calor no sirve para mover el automóvil. Es decir que para un automóvil si la energía por combustión es 100%, la pérdida por calor es 35%, el calor por el caño de escape 35% y el trabajo útil realizado es de 30%

En la Tabla 3, pueden observarse los rendimientos de algunos de los artefactos más comunes que utilizamos habitualmente:

Tabla 3. Rendimiento energético obtenido por distintas máquinas

Diseño	Rendimiento %
Motor del coche	30
Lámpara fluorescente	20
Lámpara eléctrica	5
Bicicleta	90
Cuerpo humano	25

Potencia

Si llamamos W a la cantidad de trabajo realizado durante un intervalo de tiempo Δt , la potencia media estará dada por la siguiente ecuación:

$$P = W / \Delta t$$

Así, las unidades de potencia son **Watt o vatio (W)** para el SI y el ergio/segundo (erg/s) para el cegesimal. Así, un erg/s equivale a 10^{-7} W.

Se dice que una máquina es más potente que otra cuando realiza la misma cantidad de trabajo más rápido, es decir, en un lapso menor de tiempo. Esto se debe a que la potencia se define como la cantidad de trabajo que se puede hacer en un tiempo determinado. Un ejemplo de fácil asimilación lo dan los automóviles "los coches con motores más grandes son más

potentes que los coches con motores chicos”, ya que recorren la misma distancia en menor tiempo, es decir igual trabajo pero en menor tiempo.

Fuentes de energía

Aunque parezca raro son pocas las fuentes de energía que se dispone en la naturaleza. El Sol es la mayor y principal fuente de energía, y por eso es que gran parte de la energía usada por el hombre proviene del mismo. Otra fuente de energía es la nuclear, aquella contenida en los núcleos de los átomos que conforman la materia. La fuente restante es la contenida en los mares, debido al movimiento de las mareas. La energía mareomotriz, así como la undimotriz deben su origen a la interacción gravitatoria existente entre la Luna y la Tierra.

La energía se produce de diferentes fuentes y se encuentra almacenada en distintas formas. Estas fuentes de energía pueden clasificarse en renovables y no renovables.

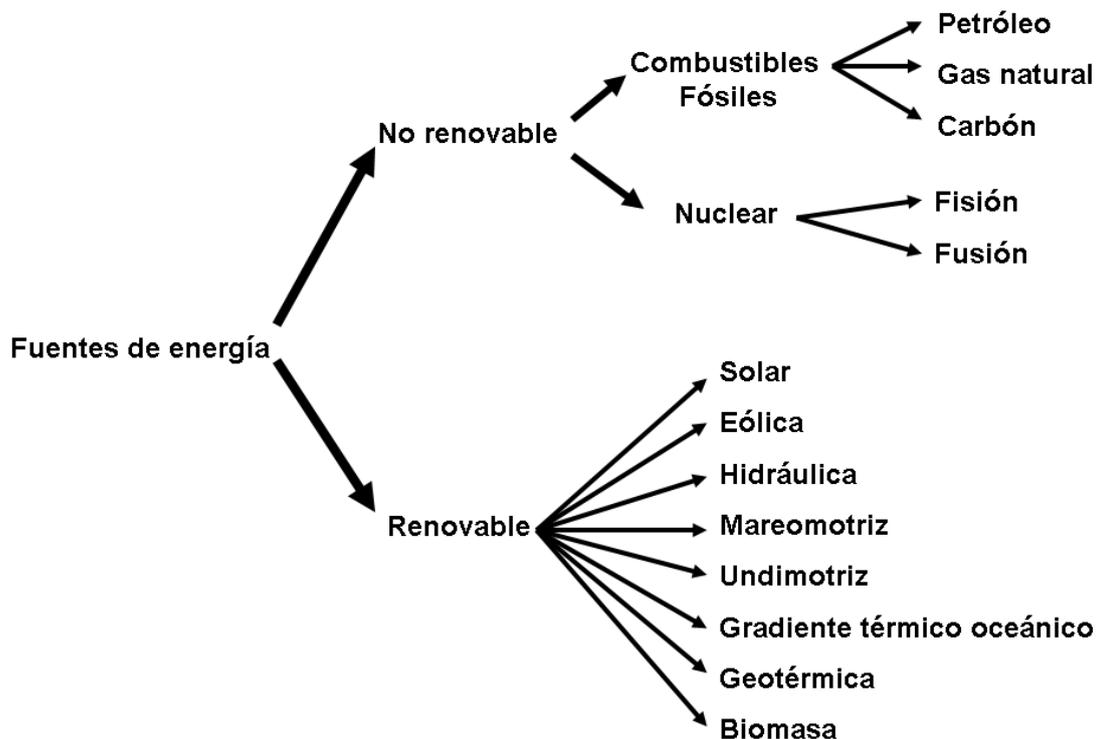


Figura 4. Diferentes tipos de energías renovables y no renovables.

Llamaremos renovables a aquellas que se siguen produciendo indefinidamente, aquellas que luego de su utilización, pueden regenerarse, considerándose virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o porque al ser recursos que al estar involucrados en ciclos naturales, suelen mantenerse más o menos constantes en la naturaleza. En cambio las no renovables son aquellas cuya velocidad de consumo suele ser mayor que la de su regeneración y como consecuencia de ello e irremediablemente conducirá a su eventual agotamiento.

Como ejemplo de energías renovables podemos mencionar a la energía solar, la hidráulica, la eólica, la mareomotriz, la undimotriz, la geotérmica y la proveniente de la biomasa. Ejemplos de formas de energía no renovables resultan ser las reservas fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón, o la energía nuclear. En la Figura 4 se muestra una clasificación completa de las diferentes formas de energía existentes:

Fuentes de energías renovables

Biomasa

Como ya habíamos comentado se trata de la fuente energética esencial para la humanidad desde el principio de su historia. Sin embargo, con el desarrollo y el crecimiento económico la biomasa fue perdiendo lugar en cuanto al uso y aprovechamiento, lugar que fueron ganando los combustibles fósiles. De esta manera el supuesto agotamiento de los combustibles fósiles, la inestabilidad de su valor monetario, la preocupación por sus efectos sobre el medioambiente y la seguridad de su suministro, conllevan la necesidad de la sustitución de los combustibles fósiles por otras opciones renovables entre las cuales se destaca la biomasa. Este tipo de energía es la forma principal que se discutirá en gran detalle en los capítulos siguientes del presente libro.

Solar

El Sol es la fuente de todas las formas de energía que el ser humano ha utilizado en toda su historia, además de ser la fuente energética que dio lugar al origen y desarrollo de la vida. Constantemente genera energía electromagnética, la cual recorre la distancia a la Tierra (casi 150 millones de kilómetros) en tan solo ocho minutos. Este tipo de radiación es la principal fuente de energía sobre la Tierra, y sin ella no podría ser posible la vida. La mayoría de la energía de la que disponemos procede del Sol en forma directa o indirecta. Esa energía solar puede transformarse, mediante el uso de células fotovoltaicas, en energía eléctrica. También

puede aprovecharse el calor que recibimos del Sol por medio de un colector térmico. Ambos procesos se caracterizan por poseer diferentes tecnologías y aplicaciones.

El aprovechamiento térmico es usado actualmente para obtener agua caliente para usos doméstico o industrial, o también para la calefacción de nuestros hogares. También posee aplicaciones agrícolas, siendo la principal su uso en invernaderos solares para obtener mayores y más tempranas cosechas.

Las células solares fotovoltaicas, dispuestas en paneles solares, tienen la ventaja de no poseer partes móviles, ni generar ningún tipo de ruido, no consumir combustible y no necesitar de demasiado mantenimiento. Entre las principales desventajas se encuentra el uso del gas trifluoruro de nitrógeno durante su fabricación, un gas que posee in efecto invernadero 17000 veces superior al dióxido de carbono, parte del cual resulta liberado a la atmósfera. Otro problema son los desechos de los paneles una vez agotados aproximadamente a los 25 años de uso, los cuales no solo no resultan ser biodegradables, sino que entre las sustancias que los constituyen como el telururo de cadmio, un compuesto cancerígeno, o el polvo de silicio cristalino, que puede generar graves problemas respiratorios.

La electricidad obtenida de esta forma se puede usar de manera directa, o bien se la puede almacenar en acumuladores. Esa electricidad fotovoltaica generada también se puede inyectar en una red, siendo una corriente de tipo continua. Veamos brevemente cual es la diferencia entre una corriente alterna de una continua: Cuando la energía eléctrica se genera desde un sistema giratorio impulsado por energía mecánica se genera en forma de ciclos, donde toma valores desde cero hasta un valor máximo, repitiendo de nuevo esta situación, hasta regresar al valor cero un determinado número de veces por minuto, un concepto que recibe el nombre de frecuencia. Este tipo de energía eléctrica es la que llamamos corriente alterna, en la cual no hay polo negativo ni positivo, y no puede acumularse.

Cuando la energía eléctrica es obtenida desde un panel fotovoltaico, acumulador (un proceso químico) los electrones se encuentran en bornes con diferente energía: uno posee carga positiva y el otro carga negativa, de tal forma que si se los pone en contacto por medio de un conductor, tiene lugar una corriente eléctrica, hasta que ambos bornes equilibren su potencial y ninguno de ellos sea más positivo o más negativo que el otro. En el caso de un acumulador es debido a su agotamiento y en el panel fotovoltaico significa la ausencia de luz. Estos sistemas generan un tipo de corriente llamada continua. A diferencia del caso de la energía alterna, la continua puede acumularse.

Eólica

La energía eólica es otra de las fuentes de energía llamadas renovables, para la cual se dispone de una tecnología que actualmente permite una explotación técnica y económicamente viable para la misma. El hombre siempre ha aprovechado la energía del viento, por ejemplo en

el uso de las velas para desplazar embarcaciones, o para mover molinos, los cuales ya eran utilizados desde la antigüedad. Dicha tecnología fue diversificándose y ha permitido la realización de diferentes actividades como la molienda de granos, el bombeo de agua y, actualmente, la generación de electricidad.

Los vientos también son generados por el Sol, ya que se originan por la diferencia de presión producida por las diferencias de temperatura que genera la radiación solar sobre la atmósfera. Esta corriente de aire, constituye el potencial eólico que el hombre ha utilizado inicialmente en la navegación y más tarde en otras actividades. Hoy en día se aprovecha para mover las aspas de los aerogeneradores, los cuales transforman la energía cinética del aire, en energía eléctrica.

Entre las ventajas de este tipo de energía, pueden mencionarse la ausencia de emisiones de residuos sólidos, líquidos y gases contaminantes; tampoco necesita del uso de agua, ahorra combustibles fósiles, y no implica riesgos ambientales de gran impacto, diversificando el suministro energético.

Entre las desventajas de este tipo de energía podemos citar la escasez geográfica de vientos, lo que hace que no todos los lugares sean adecuados para su explotación, tener un impacto ambiental local debido al ruido generado, su impacto visual sobre la fauna, en especial las aves, la ocupación del suelo, y las interferencias con algunas fuentes de transmisión electromagnética (telefonía, radio, etc.).

Hidráulica

Al igual que sucede con el viento, la energía del agua en movimiento puede aprovecharse para generar energía, en este caso la hidráulica. Del movimiento del agua puede extraerse una forma renovable de energía, la cual se aprovecha desde la antigüedad para accionar el movimiento de molinos para procesar cereales y transportar mercancías por medio de barcas. Esta forma de energía contribuyó fuertemente al desarrollo industrial y económico de los países, y durante el último siglo se la utiliza para obtener energía eléctrica.

Se origina en la energía potencial que contiene el agua debido a su posición dentro del campo gravitatorio de la Tierra y se la representa por la siguiente forma:

$$E_p = mgh = \delta_w vgh$$

donde m es la masa de agua, δ_w es la densidad del agua, V es el volumen de agua almacenada, g es la aceleración de la gravedad, h es la altura a la cual se encuentra el agua. Dicha energía también puede presentarse como energía cinética, pues cuando la masa de

agua a cierto nivel pierde altura, gana en velocidad, es decir transforma la energía potencial en cinética, perdiéndose parte como calor, a causa del rozamiento. La obtención de energía hidráulica se logra llevando esa corriente de agua hacia una turbina transformando esa energía cinética en energía eléctrica.

Mareomotriz

Las mareas se definen como el cambio periódico del nivel del mar producido principalmente, por las fuerzas gravitacionales que ejercen la Luna y el Sol sobre la Tierra. Estas variaciones en el nivel del mar son usadas para extraer otra forma de energía renovable, conocida como energía mareomotriz y también puede convertirse en energía eléctrica.

Las centrales mareomotrices consisten en grandes diques provistos de compuertas que aprovechan el ascenso y descenso de las aguas de mar: Cuando la marea sube se abren las compuertas y el agua pasa de un lado al otro del dique. Este paso de agua hace mover las turbinas generando una corriente eléctrica. Cuando la marea baja el movimiento del agua es en sentido contrario y también es aprovechado para la generación de electricidad. Hay regiones donde la diferencia entre la marea alta y la baja es superior a los doce metros, posibilitando la generación de grandes cantidades de energía eléctrica.

Undimotriz

Otra variante de generación energética a partir del movimiento de las aguas es la energía undimotriz. La misma aprovecha el movimiento del oleaje, permitiendo así que diferentes generadores cercanos se desplacen relativamente entre sí gracias al movimiento de las olas, generando una diferencia de presión que hace desplazar aire encerrado en el generador, el cual moverá una turbina, produciendo energía eléctrica. Tiene la ventaja de depender de un movimiento natural como el oleaje, mucho más predecible que los vientos.

Gradiente térmico oceánico

Es un tipo de energía renovable que aprovecha la diferencia de temperatura que existe entre el agua de la superficie del océano (20-25°C) y la que existe a una mayor profundidad (4°C a 1000 metros). De esta forma se aprovecha un circuito en el que se evapora un líquido de bajo punto de ebullición gracias al calor que reaporta el agua de la superficie, el cual circulará hacia abajo, condensándose en la parte inferior debido a las bajas temperaturas. Durante el recorrido por ese circuito de refrigeración el gas se aprovecha para mover una

turbina y así genera energía eléctrica. Las principales desventajas que conlleva este tipo de generación de energía, aún en desarrollo, sería su impacto sobre los ecosistemas costeros y los arrecifes coralinos, y su elevado costo en relación a otras fuentes energéticas.

Geotérmica

La existencia de manantiales termales, volcanes, géiseres, etc., son evidencias que la temperatura imperante en el interior de la Tierra es mucho más elevada que en la superficie. Varios estudios han demostrado que la temperatura de la Tierra aumenta gradualmente con la profundidad en todo el planeta, recibiendo el nombre de gradiente geotérmico, que tiene un valor medio aproximado de 25-30 °C/ Km.

Se estima que el origen de esa energía se debe en parte al calor procedente de la desintegración de isótopos radioactivos, al calor inicial que corresponde a la energía generada durante la formación de la Tierra, el movimiento diferencial entre las distintas placas que forman la Tierra, y el calor latente de cristalización del núcleo externo fluido. Se llama energía geotérmica al aprovechamiento del calor del interior de la Tierra; dicha energía es una de las pocas que no proviene del sol, sino del interior del planeta.

Para aprovecharla se realizan perforaciones en el suelo hasta encontrar agua caliente o vapor. Cuando el agua caliente se encuentra a temperaturas entre 60°-150 °C, es utilizada para calefacción, o para hacer uso de las aguas termales como sucede por ejemplo en la ciudad de Río Hondo, en Santiago del Estero. Cuando el agua supera esos valores de temperatura, el vapor es conducido hasta una turbina para lograr la generación de energía eléctrica.

Fuentes de energía no renovables

Combustibles fósiles

Los combustibles fósiles, cuya formación comenzó hace millones de años, constituyen una fuente de energía química obtenida a partir de materiales cuyo proceso de formación ha tenido lugar debido a la acumulación de materia orgánica en el subsuelo en cantidades de tiempo enormes. Existen tres tipos principales de combustibles de origen fósil: el petróleo, carbón y el gas natural. La industrialización vino acompañada de un uso sistemático de este tipo de combustibles, siendo toda nuestra sociedad moderna el resultado del uso de esa energía heredada de los organismos que existieron en la antigüedad.

Estos tipos de combustibles suelen encontrarse generalmente en cuencas sedimentarias, formadas por áreas deprimidas de la corteza terrestre, que alguna vez fueron el fondo de

antiguos mares, lagos y pantanos. En estos sitios se fueron acumulando y mezclando con los sedimentos, los restos de microorganismos, animales y plantas, y tuvo lugar la formación de una mezcla rica en compuestos orgánicos, compuestos que poseen principalmente carbono e hidrógeno, y en menor cantidad azufre, nitrógeno y fósforo, entre otros elementos.

Esa mezcla, fue quedando sepultada por capas crecientes de sedimentos que fueron depositándose durante millones de años, soportando así altas presiones y temperaturas causadas por las capas sedimentarias superiores. De esta forma, las condiciones físicas alcanzadas dieron origen a transformaciones químicas en el material orgánico, llegando a una composición rica en hidrocarburos, para los cuales la combustión resulta ser exotérmica debido a la ruptura de los enlaces C-C y C-H y por lo tanto aprovechable a gran escala. Al llevarse a cabo la combustión, el material combustible reacciona frente al oxígeno, combinándose éste con el carbono para dar dióxido de carbono; el hidrógeno también se combina con el oxígeno formando vapor de agua, y liberando una gran cantidad de energía en el proceso.

La liberación del vapor de agua no genera ningún tipo de problemas ambientales; sin embargo el problema es totalmente diferente en lo que respecta al dióxido de carbono liberado, ya que al tratarse de un gas de invernadero que se libera en cantidades enormes, resulta ser uno de los responsables del calentamiento global. La combustión de estos combustibles fósiles también es la responsable de la generación de compuestos que favorecen las lluvias ácidas y del smog urbano, que degradan continuamente los ecosistemas y la calidad de vida.

Si bien mencionamos brevemente a los combustibles fósiles dentro del contexto energético general del presente capítulo, ampliaremos su explotación con mucho mayor detalle en el capítulo 6.

Energía nuclear

El término nuclear proviene del núcleo atómico, y cuando se habla de la energía nuclear se hace referencia a la energía liberada cuando ocurren cambios en el núcleo de los átomos (llamadas reacciones nucleares). Estas pueden ser de dos tipos: las que liberan energía al dividir el núcleo atómico de un átomo pesado (fisión nuclear), o aquellas en las se unen dos átomos pequeños para convertirse en un átomo individual de mayor masa (fusión nuclear).

Cuando se produce una reacción nuclear (sea de fisión o de fusión) los átomos experimentan una ligera pérdida de masa. Esta masa que se pierde se convierte en una gran cantidad de energía, según la ecuación de Einstein:

$$E = mc^2.$$

Donde E es la energía liberada, m la masa perdida y c la velocidad de la luz en el vacío que se corresponde con 300000 km/seg.

El principal uso que se da actualmente a la energía nuclear es la producción de energía eléctrica. Las centrales nucleares son instalaciones encargadas de realizar y controlar esa conversión. En todos los casos las centrales nucleares utilizan la fisión nuclear de materiales como el uranio-235 y el plutonio-239, por lo que en el reactor nuclear se produce y controla la fisión, la cual genera gran cantidad de calor. Ese calor es usado para calentar agua, transformándola en vapor a alta presión y temperatura, el cual es llevado hacia una turbina, haciéndola girar y transformando la energía calorífica en energía mecánica. Finalmente la turbina, conectada a un generador eléctrico, transformará la energía cinética en energía eléctrica.

Por otra parte, la fusión nuclear es la que dos núcleos de átomos ligeros se unen para formar otros núcleos más pesados, es la que tiene lugar en el Sol, donde núcleos de hidrógeno se unen para formar núcleos de helio y liberar una gran cantidad de energía en forma de radiación electromagnética, una pequeña parte de la cual es la que llega a la Tierra. En la actualidad esta reacción no puede llevarse a cabo en condiciones controladas por lo que su aplicación para la generación controlada de energía aún se encuentra en desarrollo.

Si bien cada vez que se hace referencia a la energía nuclear, se refiere a la generación de electricidad, también existen muchas otras aplicaciones para la misma, por ejemplo en el campo de la medicina como en el bélico (en donde resultan igualmente aplicables tanto la fisión como la fusión pues no se necesita que la reacción esté controlada pues tiene una finalidad mayoritariamente destructiva).

La energía en el contexto mundial actual

Presentadas las distintas posibilidades energéticas que aprovechamos de los recursos de nuestro mundo, puede verse el global en función del aporte actual de cada una de las formas vistas (*Renewables 2010 Global Status Report*, 2010), un concepto conocido como "matriz energética":

- Petróleo 37%
- Carbón 25%
- Gas natural 23%
- Nuclear 6%
- Biomasa 4%
- Hidroeléctrica 3%
- Solar 0,5%
- Eólica 0,3%
- Otras 0,2%

El panorama es bastante claro, el predominio del consumo energético del planeta por parte de la humanidad es de las formas no renovables de energía, constituyendo el 85% del aporte. Queda claro que el consumo energético mundial, en cualquiera de las formas vistas, aumenta sin cesar, impulsado tanto por el aumento de la población mundial como el crecimiento socioeconómico de las naciones. Se evidencia un gran aumento en el consumo de energía proveniente de combustibles fósiles y las abundantes reservas mundiales de este tipo de combustible hacen suponer que este recurso seguirá siendo utilizado durante muchos años. Pero existe un límite al uso de estos combustibles no renovables y resulta ser no tanto la evidente merma de las reservas (cuyas previsiones de agotamiento poseen una gran imprecisión), sino la protección del medio ambiente ante la amenaza evidente del calentamiento global.

Ya hemos desarrollado históricamente el hecho de que la actividad industrial necesaria para el desarrollo de la humanidad, implicó e implica el consumo de grandes cantidades de energía. También vimos en el capítulo anterior que la energía presente sobre la tierra procede en última instancia del sol y que el innegable desarrollo científico y tecnológico acaecido durante los últimos dos siglos, no ha podido aún aprovechar la mayor parte del potencial de esta fuente inagotable de energía y por consiguiente, prácticamente toda la energía que utilizamos proviene de los recursos naturales que se hallan presentes en el planeta tierra.

Siendo el carbón el gas natural y fundamentalmente el petróleo representa las mayores fuentes de energía empleadas en la actualidad, podemos visualizar dos tipos de recursos utilizables para la generación de la energía que necesitamos, los recursos no renovables y los renovables. Las estimaciones (hay muchas) más promisorias señalan que la disponibilidad de las fuentes no renovables alcanzarán aún para varios cientos de años; en consecuencia no debería producirse en muchos años una crisis energética ante la ausencia de estos productos, aunque la extracción de esta energía es y será cada vez más costosa; por ejemplo las perforaciones de petróleo deben realizarse más profundamente o mediante otros métodos no convencionales, haciendo más costoso el proceso. Estos problemas han impulsado a los gobiernos a poner en marcha diferentes proyectos de investigación sobre otras fuentes de energía que puedan resultar rentables a largo plazo. Son justamente las denominadas energías alternativas, las renovables, de las cuales, una de ellas, la biomasa, es la que nos ocuparemos en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 3

Biomasa

El concepto de biomasa

Ya hemos desarrollado históricamente el hecho de que la actividad industrial necesaria para el desarrollo de la humanidad, implicó e implica el consumo de grandes cantidades de energía. También vimos en el capítulo anterior que la energía presente sobre la tierra procede en última instancia del sol y que el innegable desarrollo científico y tecnológico acaecido durante los últimos dos siglos, no ha podido aún aprovechar la mayor parte del potencial de esta fuente inagotable de energía y por consiguiente, prácticamente toda la energía que utilizamos proviene de los recursos naturales que se hallan presentes en el planeta Tierra.

Si bien el concepto de **biomasa** suele escucharse corrientemente en las últimas décadas, no todos sabemos precisamente que connotaciones trae aparejadas y por tal motivo es importante ser capaces de definirla y entender dicho concepto antes de abordar los diferentes aspectos relacionados con los biocombustibles. Para ello recurriremos a dar su definición a través de la perspectiva de distintas entidades y autores especialistas en el tema.

El diccionario de la Real Academia Española (2001), nos menciona dos definiciones: por un lado dice que la biomasa representa la materia total de los seres que viven en un lugar determinado y se expresa como el peso por unidad de área y unidad de volumen. Esta definición es la que suele emplearse en ecología. Sin embargo una segunda acepción nos dice que la biomasa es la materia orgánica originada en un proceso biológico, ya sea natural o provocada, y que habitualmente suele utilizarse como fuente de energía. Esta segunda definición se refiere fundamentalmente a la biomasa que se aprovecha con fines energéticos.

Podemos considerar que los vegetales transforman la energía proveniente del sol y a través del proceso denominado fotosíntesis convirtiéndola en energía química, la cual puede recuperarse de varias formas: obteniendo otros productos químicos valiosos, transformándola en un combustible o simplemente quemándola.

Por otra parte, Camps Michelena y Marcos Martín en su libro *Los Biocombustibles* (2008) nos proporcionan otra definición, también formulada por la Organización Mundial para la Alimentación (FAO), que establece que la biomasa es el conjunto de plantas terrestres y acuáticas, junto con sus derivados, subproductos y residuos producidos durante su transformación; Otro autor, Jiménez Gómez (2009), la define como las materias primas no fósiles, en las cuales se ha producido la reducción y fijación del dióxido de carbono mediante el proceso de fotosíntesis.

Un informe desarrollado por el Centro de Desarrollo Tecnológico de España y titulado *Industria Química basada en biomasa: implicaciones tecnológicas* (2007) establece que la biomasa es cualquier material orgánico que esté disponible de manera renovable y que puede usarse en lugar de las fuentes basadas en combustibles fósiles, para desarrollar productos de valor añadido tales como energía, calor, productos químicos, materiales y bienes de consumo.

Por su parte la Especificación Técnica Europea para biocombustibles (CEN/TS-14588) define a la biomasa como todo material biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización.

Existen otras definiciones para el término que resultan más acotadas y específicas, como por ejemplo la que menciona Ángel Vian Ortuño en su libro *Introducción a la Química Industrial* (2006), que habla de biomasa vegetal o biomasa primaria, definida como el conjunto de plantas terrestres y acuáticas, junto a sus derivados, subproductos y residuos producidos en su transformación. El término incluye a las materias hidrocarbonadas, no fósiles, producidas mediante el proceso de la fotosíntesis.

Por último, Eduardo Tolosana establece una visión de la biomasa desde una perspectiva de las Ciencias Forestales. Su *Manual Técnico para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal* (2009) la define, al igual que la Sociedad Española de Ciencias Forestales, dentro del campo temático de la ecología como el conjunto de sustancias orgánicas de los seres vivos presentes en un determinado lugar, la *biomasa primaria* como toda materia orgánica correspondiente a la energía fijada a partir del proceso fotosintético de los vegetales y la *biomasa residual* la derivada de algún tipo de actividad humana. Asimismo establece que la biomasa forestal primaria sería la producida directamente como consecuencia de procesos fotosintéticos por vegetales leñosos, que forman las masas forestales.

Clasificación de la biomasa

La biomasa está constituida principalmente por los siguientes elementos: carbono (50%), oxígeno (43%), hidrógeno (6%) y otros elementos en forma minoritaria como nitrógeno, azufre y otros. Estos elementos están organizados en moléculas biológicas como por ejemplo celulosa, hemicelulosa, lignina, lípidos, proteínas, azúcares simples, almidón, y otros hidratos de carbono, por mencionar solo algunos.

Al intentar llevar a cabo una descripción acerca de la clasificación de los distintos tipos de biomasa, nos encontramos con una variedad muy amplia de criterios utilizados por cada uno de los autores que abordan dicha temática. Dichas clasificaciones pueden abordarse ya sea en base a las características del material, o a su procedencia, o también en función del destino final que se le dará.

Considerando la forma en que la biomasa puede obtenerse, puede clasificársela como primaria, secundaria o terciaria. La **biomasa primaria** representa aquella que se obtiene en forma directa a partir de un ecosistema natural para su utilización energética. En su obtención no hay intervención del hombre, como por ejemplo la caída de ramas en un bosque.

Por otra parte la **biomasa secundaria**, también denominada residual, es la obtenida como residuo o subproducto de la actividad humana. Algunos ejemplos son los residuos agrícolas generados por la poda de plantas, residuos silvícolas y ganaderos, así como residuos de la industria agroalimentaria como bagazos, cáscaras, vinazas, etc., industria de transformación de la madera como por ejemplo aserraderos, fábricas de papel y muebles, por mencionar solo los más representativos.

Recientemente se ha incorporado en la clasificación, un tercer tipo de biomasa, la **biomasa terciaria**, considerada como un producto procesado previamente antes de su utilización energética. Algunos ejemplos de este tipo de biomasa son: el biogás obtenido de la digestión de la biomasa residual húmeda, el biodiesel, el bioetanol, las briquetas y los pellets. Todos ellos y como describiremos en los capítulos precedentes son combustibles obtenidos de biomasa primaria o secundaria. Los cultivos con que se los obtiene se los suele denominar cultivos energéticos; así los cereales y la remolacha suelen emplearse en la producción de bioetanol y las oleaginosas en la producción de biodiesel.

Una segunda forma de clasificar los diferentes tipos de biomasa es en relación al sector en el que la actividad humana puede obtenerla. Así y de acuerdo al modo de obtención podríamos hablar de biomasa agrícola y forestal, las cuales pueden ser tanto primarias, secundarias como terciarias y la biomasa industrial o ganadera que tan solo puede ser secundaria o terciaria.

Fernando Nogués y sus coautores reportan en su libro *Energía de la Biomasa* (2010), una tercera clasificación estableciendo que la biomasa puede clasificarse según el tipo de biocombustible que genere: biocombustibles sólidos o biomasa sólida. En estas fuentes la materia orgánica se encuentra en estado sólido por ejemplos restos generados en la actividad

agrícola o residuos de la industria de la madera, y la energía se obtiene a partir de ellos a través de procesos térmicos como la pirólisis, la gasificación o la combustión.

El segundo tipo, es la biomasa residual húmeda, la misma y dado el alto contenido de humedad que presenta, es fácilmente degradada mediante procesos bioquímicos. En general son líquidos, aunque en menor extensión pueden ser sólidos o semisólidos. Algunos ejemplos pueden ser: residuos ganaderos, residuos de tomate, aguas residuales con alto contenido de materia orgánica y la parte orgánica de la basura doméstica.

Los biocarburos son combustibles líquidos con alto poder calórico. Pueden considerarse biomasa terciaria ya que no se obtienen a partir de ecosistemas naturales o subproductos de actividades humanas. Si la biomasa presenta un alto contenido de aceites, estos se extraen por procesos de prensado o extracción y se los emplea en la producción de biodiesel, en cambio si la biomasa de origen contiene un alto contenido de azúcar puede obtenerse bioetanol. Ambos tipos de combustibles suelen llamarse de primera generación, para diferenciarlos de aquellos cuyo origen proviene de biomasa lignocelulósica, biocarburos o combustibles de segunda generación. Éstos últimos se obtienen por procesos de hidrólisis a alta temperatura o por pirólisis.

Por último una clasificación interesante de biomasa nos indica que la misma puede ser seca o húmeda. La biomasa seca podrá ser de procedencia forestal, agroindustrial, desechos de plantaciones, desechos de poda y malezas, residuos de matadero, grasas y aceites, lodos, residuos sólidos urbanos, estiércol de la producción agrícola, por su parte la biomasa húmeda tiene como ejemplos: los residuos industriales líquidos, aguas residuales domésticas y estiércol vacuno o porcino.

Fotosíntesis y producción de biomasa

La producción de biomasa se realiza a partir de la luz del sol a través del proceso conocido como fotosíntesis, procedimiento por el cual se producen moléculas de peso molecular elevado con alto contenido de energía química. La fotosíntesis consiste en la conversión de materia inorgánica en materia orgánica gracias a la energía que aporta la luz solar. En este proceso la energía luminosa se transforma en energía química estable, siendo el adenosintrifosfato (ATP) la primera molécula en la que queda almacenada esa energía química. Con posterioridad, el ATP se usa para sintetizar moléculas orgánicas de mayor tamaño y estabilidad. La vida en nuestro planeta se mantiene gracias al aporte del proceso biosintético que realizan los vegetales en el medio terrestre y las algas en el medio acuático. Los organismos del reino vegetal tienen la capacidad de producir materia orgánica, necesaria para la constitución de los seres vivos, partiendo de la luz. Los organismos que realizan fotosíntesis fijan en forma de materia orgánica en torno a 100.000 millones de toneladas de carbono.

Lo interesante del proceso de fotosíntesis es que utiliza energía proveniente del medio ambiente (luz solar) y materias primas ya consumidas, que proporcionan elementos como

carbono, hidrógeno, nitrógeno, potasio y fósforo). A partir de ello es posible construir macromoléculas formadas por glucosa, y si bien el proceso requiere de grandes cantidades de energía de las cuales la mayor parte es eliminada en la atmósfera (el rendimiento energético del proceso fotosintético es bajo), el proceso resulta rentable ya que la luz solar es gratuita y los productos finales que obtenemos son muy importantes, pues por ejemplo pueden emplearse para producir alimentos.

Procedimientos de conversión de biomasa

La biomasa puede transformarse en productos de mayor valor agregado, un concepto que en la actualidad suele llamarse “valorización de biomasa”, mediante transformaciones químicas de mayor o menor grado de complejidad. Con relación a este tópico, se describirán numerosos ejemplos en el capítulo siguiente.

La otra aplicación relevante de la biomasa es la utilización de la misma para la producción de energía. Dichos procesos de conversión son dependientes de los materiales de partida, pudiéndose dividirlos en cuatro grandes grupos: biomasa sólida (madera y paja), biomasa húmeda (desechos orgánicos y domiciliarios), plantas de almidón y azúcar (cereales y remolacha) y cultivos de oleaginosas (soja). La biomasa sólida puede convertirse en fuentes de energía a través de los procesos de combustión, gasificación, pirólisis e hidrólisis y fermentación; la biomasa húmeda mediante un proceso de digestión anaeróbica; las plantas a base de almidón y azúcar son transformadas mediante procesos de hidrólisis y fermentación, mientras que los cultivos de oleaginosas por procesos de extracción y transesterificación. A continuación describiremos brevemente cada uno de éstos procedimientos:

Métodos térmicos: basados en la utilización del calor como fuente de transformación de la biomasa. Generalmente se los emplea para biomasa seca, por ejemplo madera o paja. Los métodos más representativos son: la combustión, la pirólisis y la gasificación:

- *Combustión:* la combustión consiste simplemente en la oxidación de la biomasa por la presencia del oxígeno del aire, libera agua y dióxido de carbono, y se la emplea para la calefacción doméstica y para la producción de calor a nivel industrial.

- *Pirólisis:* se denomina también combustión incompleta de la biomasa y se produce en ausencia de oxígeno, a aproximadamente 500°C. Es el método empleado para la producción de carbón vegetal.

- *Gasificación*: es un proceso termoquímico en el cual la biomasa resulta transformada en un gas combustible mediante una serie de transformaciones que ocurren en la presencia de un gas gasificante (aire, vapor de agua, o hidrógeno).

Métodos biológicos: Dentro de los métodos biológicos para la producción de energía a partir de biomasa se destacan los procesos de fermentación metánica y alcohólica:

- *Fermentación metánica*: consiste en la digestión anaerobia de la biomasa por la acción de bacterias. Es de gran utilidad para la transformación de biomasa con un contenido de humedad superior al 75%. Se lo ha comenzado a utilizar en las explotaciones agrícolas, con el objetivo de lograr la autonomía energética. Se emplean las deyecciones y camas del ganado, como sustratos a descomponer por la acción de las bacterias.
- *Fermentación alcohólica*: la fermentación alcohólica es un proceso biológico de fermentación en ausencia de aire, que se origina por la actividad de algunos microorganismos que procesan hidratos de carbono como por ejemplo glucosa, fructosa, sacarosa, o almidón, para obtener como productos finales etanol, dióxido de carbono en forma de gas y moléculas de ATP que consumen los propios microorganismos en su metabolismo celular energético anaeróbico. El etanol producto del proceso] se utiliza en la elaboración de algunas bebidas alcohólicas.

Uso de residuos como fuente de biomasa

Todo el mundo es consciente que continuamente en nuestro planeta se producen diariamente enormes cantidades de residuos, en las zonas rurales y principalmente en las grandes ciudades. La mayoría de ellos son residuos de carácter orgánico, es decir, constituyen la denominada biomasa residual. En vista de esta perspectiva resulta necesario aprovechar este tipo de residuos, los cuales habitualmente no se aprovechan y en consecuencia contaminan el ambiente, para la generación de energía.

En general, el tratamiento de los residuos es una actividad costosa, y tanto las instituciones públicas como las empresas privadas no la han llevado a cabo con eficacia; por un lado esto se debe a la falta de una legislación adecuada, y por el otro debido a la falta de recursos económicos disponibles para tal fin. Todo ello contribuye, lógicamente, al deterioro medioambiental en numerosos países.

Considerando la naturaleza de su origen, los residuos que actualmente pueden generar biomasa residual pueden clasificarse en: agrícolas, forestales, ganaderos, industriales, y urbanos. A continuación se detallan características de cada uno de ellos:

Residuos agrícolas: se denomina residuo agrícola a una planta o a la porción de ella que fue cultivada y es preciso separar para obtener su fruto o para facilitar el cultivo posterior propio. Existe una gran cantidad de residuos con potencial interés industrial y energético, algunos ejemplos representativos son los cereales de grano, que generan pajas, los frutales y viñedos, cuya poda anual es una fuente de material combustible, o los cultivos industriales como las oleaginosas y textiles, que producen tallos como residuos.

Residuos forestales: son los provenientes de los bosques, pudiéndose ser ramas y cortezas o de las industrias de transformación primaria de la madera, como por ejemplo el aserrín. Durante siglos fueron la principal fuente de energía para la humanidad, sin embargo con la aparición del petróleo y sus derivados y debido a la comodidad de uso y precios accesibles se ha producido un descenso en el consumo de este tipo de residuos de la madera.

Residuos ganaderos: los residuos ganaderos fueron utilizados durante muchos años como fertilizantes de suelos para la agricultura. Con la aparición de los fertilizantes artificiales, lamentablemente los estiércoles dejaron de utilizarse en gran número de explotaciones, pues comenzó a discriminarse entre agricultura y ganadería. Al tratarse de residuos de alto contenido en humedad no resulta conveniente utilizar procesos térmicos para su tratamiento debido a su bajísimo rendimiento. Sin embargo, la mencionada tecnología de la digestión anaeróbica, podría ser una buena alternativa.

Residuos industriales: solo se tienen en cuenta los residuos provenientes de industrias que por su propia naturaleza, generan gran cantidad de desechos de naturaleza orgánica; entre ellas pueden considerarse la industria de los aceites, la producción de vinos, la de conservas vegetales y la producción de frutos secos.

Residuos urbanos: las ciudades producen a diario grandes cantidades de residuos que podemos clasificar en residuos sólidos y aguas residuales. Su tratamiento y disposición se vuelve cada día más complejo con el aumento de la población, así como su nivel de vida. Al ubicarse localmente, se los considera como los más aptos para su tratamiento a gran escala, dado que su transporte representa un costo insignificante.

Los residuos sólidos son los materiales resultantes de un proceso de fabricación, transformación, utilización, consumo o limpieza. La composición de estos residuos es función de varios factores, entre los que destacan el nivel de vida de la población, el período estacional, tipo de hábitat y clima; por su parte, se denominan aguas residuales a los líquidos procedentes de la actividad humana que llevan en su composición gran parte de agua y cuya composición es tanto inorgánica como orgánica, por lo que su fracción sólida contiene una apreciable cantidad de biomasa residual.

Algunos aspectos económicos del uso de biomasa

La biomasa tanto agrícola como forestal supone grandes posibilidades económicas, principalmente en las zonas tropicales y subtropicales, dado que en ellas las condiciones para la producción de vegetales resultan óptimas. Los organismos que realizan la fotosíntesis pueden considerarse como transformadores continuos de la energía solar. Las plantas fijan anualmente mediante la fotosíntesis una cantidad de carbono equivalente a 10 veces la energía que se consume en el planeta. El gran interés de la utilización de la biomasa reside, en que siempre que se pueda obtener a partir de una forma renovable y sostenible, es la única fuente de energía aporta un balance positivo de dióxido de carbono, es decir la materia orgánica puede retener durante su crecimiento mayor cantidad de dióxido de carbono del que pueda liberar por combustión.

Como hemos visto a lo largo del capítulo, la biomasa podría considerarse una alternativa interesante para su utilización como fuente de energía y para la generación de productos sustitutos obtenidos por vía petroquímica, cuya descripción se abordará en el capítulo siguiente. Puede decirse que es una forma renovable de energía, la única que aporta un balance de dióxido de carbono positivo, no resulta dependiente de ninguna fuerza macroscópica como es el caso de la energía eólica, y los combustibles generados a partir su uso tienen una gran variedad de aplicaciones; también podría tratarse una muy buena manera de crear infraestructura rural, ya que la construcción de una central de biomasa resulta en principio una tarea no muy compleja, a la vez que se evita la contaminación del medio mediante el aprovechamiento de residuos orgánicos para la obtención de energía. Además tiene un mínimo contenido de azufre (cantidades menores al 1%) con lo que se evita la formación de lluvia ácida, y además permitirá la fabricación de productos que resulten biodegradables.

Por otra parte, aún existen importantes limitaciones en lo que respecta al uso de la biomasa:

- Solo es posible la utilización de residuos orgánicos.
- Para conseguir un aporte energético importante, es necesario una gran cantidad de biomasa que requeriría de grandes extensiones.
- El costo de producción de energía por vía petroquímica es aun mucho menos costoso.
- El rendimiento de los combustibles fósiles es aún mayor que los derivados de la biomasa.

Si bien el poder energético de la biomasa podría ser suficiente para cubrir las necesidades del planeta, hay aún circunstancias que limitan su uso; por un lado está el hecho de que cerca del 40% de la biomasa es acuática y de difícil recuperación. En cuanto a la biomasa de origen terrestre, la mayoría se encuentra muy dispersa y su uso en forma eficaz es difícil de lograr; a su vez, el aprovechamiento directo podría conducir a un agotamiento de dichos recursos,

mientras que el aprovechamiento de la parte útil de la biomasa implica un importante gasto de energía para la recolección, el transporte y la transformación de la misma. La mayor parte de la biomasa que se produce con fines energéticos es explotada a través de medios tan poco productivos como eficaces, que determinan el aprovechamiento de una pequeña cantidad del total de su potencial energético.

CAPÍTULO 4

La biomasa como materia prima de compuestos químicos

Introducción

El máximo aprovechamiento de cualquier subproducto o residuo generado durante un proceso industrial o actividad humana se presenta hoy en día como algo totalmente necesario. La práctica más apropiada para reciclar y reutilizar residuos consiste en la búsqueda de aplicaciones concretas de uso que sean factibles, y para lograrlo deben evaluarse las características de dichos materiales.

Con el correr de los años ha surgido en distintos países normativas que establecen marcos jurídicos en relación a la reutilización de los residuos. Por ejemplo la directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo establece lineamientos concretos para el tratamiento de residuos; este tipo de normativas apuntan a la protección del medio ambiente y la salud humana mediante la prevención de los efectos tóxicos asociados a la producción de los residuos.

Analizando dicha normativa se observa que la misma expresa concretamente que los países miembros de la comunidad deberán adoptar en sus propias legislaciones las medidas necesarias para la gestión de residuos teniendo en cuenta varios aspectos como la prevención, la reutilización, el reciclado, la valorización y la eliminación.

Puede definirse el concepto de valorización como cualquier operación cuyo resultado determine que el residuo tratado adquiera una finalidad útil. La valorización incluye todos aquellos ciclos que posibilitan el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos, que pueden clasificarse en materiales o energéticos. En el capítulo 2 ya hemos mencionado el aprovechamiento de la biomasa y su uso como fuente de energía, mientras que su valorización desde el punto de vista material se considerará a continuación.

Valorización de la biomasa

Los diferentes elementos que utilizamos a diario, así como todo lo que nos rodea es producido mediante transformaciones químicas, muchas de las cuales han sido llevadas a cabo por el ser humano y otras por la propia Naturaleza. La disponibilidad de recursos fósiles a muy bajo costo y la factibilidad de transformarlos de una manera eficiente en la mayoría de los productos que necesitamos (tema que abordaremos en el capítulo 6) ha logrado aumentar la calidad de vida de muchos individuos, principalmente en los países desarrollados. Esto se manifiesta concretamente en el aumento promedio de la esperanza de vida de una persona que, según la Organización Mundial de la Salud, en solo un siglo se ha incrementado casi 40 años (Thomson, 2006).

Desde hace varios años se tienen datos concretos que indican que más del 95% de los productos que disponemos a diario, son derivados de productos fósiles, como por ejemplo el petróleo o el carbón; asimismo la mayoría requiere de transformaciones químicas que emplean catalizadores para poder llevarse a cabo.

Sin embargo, dicha tendencia se está revirtiendo profundamente en la actualidad: la época de obtención a bajo costo de recursos fósiles ya no es tan evidente, por lo que el petróleo resulta más costoso y los recursos son cada vez más limitados debido al crecimiento en su demanda. Asimismo, el uso desmedido de combustibles fósiles durante el siglo XX ha incrementado notablemente las emisiones de dióxido de carbono, uno de los responsables del aumento de la temperatura media del planeta. Estos dos factores hacen más viable el desarrollo de una industria química basada en el aprovechamiento de recursos renovables para la fabricación de productos que puedan reemplazar a los existentes que se obtienen a partir de recursos fósiles (Egeblad *et al.*, 2008).

Esta nueva tendencia plantea dos oportunidades: por un lado permite el desarrollo de procedimientos para generar combustibles de bajo impacto ambiental a un precio comparable a los combustibles fósiles; un buen ejemplo es la utilización de biodiesel y bioetanol como aditivo de combustibles se está empleando actualmente según la denominada ley de combustibles (26093/07). Por otra parte, el desarrollo de productos químicos de alto valor agregado que reemplacen a los productos obtenidos a partir de los combustibles fósiles, puede llevarse a cabo a través de dos fuentes de carbono: la biomasa y, en menor medida, el dióxido de carbono. La transformación de dióxido de carbono en sustancias químicas de mayor valor agregado requiere de una gran cantidad de energía resultando no rentable en la actualidad; sin embargo la utilización de biomasa actualmente resulta más viable.

El profesor Avelino Corma ha llevado a cabo un estudio muy pormenorizado relacionado con la aplicación de la biomasa como fuente de producción de compuestos químicos en el Tecnología Química de Valencia, España, y considera que si se tiene en cuenta que la mayoría de los componentes presentes en la biomasa son hidratos de carbono, lípidos y en menor

proporción proteínas, es posible obtener directamente compuestos que actúen como bloques de construcción renovables de productos químicos de alto valor unitario (Corma *et al.*, 2007).

Por ejemplo, el etanol puede ser obtenido por fermentación de los hidratos de carbono, el glicerol por transesterificación de triglicéridos (o por fermentación de la glucosa), la xilosa por hidrólisis de la hemicelulosa, la fructosa por hidrólisis de la sacarosa (y por isomerización de la glucosa), el ácido láctico se produce por la fermentación de la glucosa, y el furfural se puede obtener a partir de la deshidratación de la fructosa. Estos compuestos, a su vez, pueden convertirse en materiales de partida para otros productos deseables. Además, los hidratos de carbono pueden convertirse en maltosa y sacarosa, y estos a su vez en moléculas más pequeñas. La reacción de hidrólisis de algunos de los componentes de la biomasa es una reacción clave ya que permite la despolimerización de los polisacáridos, generando monosacáridos más simples, tales como fructosa, glucosa y xilosa. Una de las reacciones de este tipo destacadas es la de la celulosa; la misma fue ensayada en presencia de ácidos diluidos (como el ácido sulfúrico) y se ha practicado durante mucho tiempo, pero el problema asociado a los residuos y a la corrosión que generan, dio origen al estudio de otras posibilidades como por ejemplo enzimas, agua en condiciones supercríticas, e incluso el uso de líquidos iónicos. También la catálisis heterogénea puede proporcionar grandes soluciones, con procesos más simples y ambientalmente más amigables, debido a la facilidad de separación y recuperación de materiales. Así, ácidos sólidos como resinas de intercambio iónico, zeolitas y polímeros con heteropoliácidos, pueden reemplazar los ácidos que actúan en fase homogénea (Lai *et al.*, 2011).

Productos químicos a partir de materias primas renovables

Como ya se ha mencionado, el uso de materias primas renovables en general y la biomasa en particular como una alternativa a las fuentes fósiles (agotables) es uno de los principales objetivos planteados explícitamente por la Química Verde. Las materias primas renovables son consideradas aquellas que pueden regenerarse desde el punto de vista temporal útil para la humanidad, es decir, describe el uso de materias primas biológicas como materiales base para la producción a nivel industrial.

Si bien la biomasa es la principal fuente de energías renovables, en dicho grupo también pueden incluirse el metano y el dióxido de carbono pues ambos pueden generarse desde numerosas fuentes naturales. El metano se produce naturalmente a partir de la putrefacción anaeróbica de la materia orgánica, resultando el producto final de dicho proceso. El mismo puede aprovecharse para la producción de biogás, cuya composición contiene un porcentaje elevado de metano, el cual también se produce naturalmente en la minas de carbón donde se le ha dado el nombre de *gas grisú* o, o también se produce en zonas constantemente anegadas por lo que también se lo conoce como *gas de los pantanos*; se trata de un material

muy inflamable y explosivo. El metano es un gas de efecto invernadero y por consiguiente contribuye al calentamiento global, ya que posee un potencial de calentamiento global del orden de 23. Este parámetro expresa que en un período de tiempo de 100 años cada kilogramo de metano puede calentar la tierra unas 23 veces más que la misma cantidad de dióxido de carbono. A pesar de ello como la relación entre dióxido de carbono y metano en la atmósfera es muy alta (1:220), el metano contribuye al efecto invernadero en una proporción muchísimo menor (Camps Michelena & Marcos Martín, 2008). En los últimos años la generación de biogás ha comenzado a explotarse industrialmente como fuente de energía.

Por su parte, respecto del dióxido de carbono, existen varias fuentes naturales principales:

Respiración: los seres vivos obtenemos energía necesaria para vivir mediante reacciones de oxidación, transformando moléculas de carbono que extraemos de los alimentos que consumimos, y eliminando el dióxido de carbono que producimos.

Descomposición aeróbica de materia orgánica: cuando se descompone la materia orgánica (troncos, ramas y hojas de los árboles, excrementos de animales, muertos, etc.), las bacterias que descomponen esta materia en presencia de oxígeno liberan dióxido de carbono. Esta es una de las fuentes de mayor relevancia de dióxido de carbono si tenemos en cuenta la gran cantidad de vegetación que existe en el planeta.

Volcanes: además de otros gases tóxicos como los óxidos de azufre u óxidos de nitrógeno, emiten también grandes cantidades de dióxido de carbono. Actualmente sobre el planeta tierra, hay numerosos volcanes que aunque no se encuentren en erupción expulsando lava, están permanentemente eliminando gases en cantidades muy superiores al conjunto de las industrias presentes.

Difusión oceánica: más que una fuente de dióxido de carbono, los océanos se puede considerar como un reservorio. Esto quiere significar que en determinadas condiciones los océanos, absorbe dióxido de la atmósfera y lo almacenan disuelto. En determinadas circunstancias y al disminuir su capacidad para disolver este gas, lo emite a la atmósfera.

Volviendo a la relación entre fuentes agotables y renovables de energía, el consumo intensivo de las fuentes agotables, basado fundamentalmente en petróleo, carbón y gas natural, conducirá lógicamente a su extinción, produciendo la ruptura del principio de sostenibilidad, tanto en el aspecto medioambiental como en el económico. Resulta necesario recordar que una de las tantas definiciones del desarrollo sustentable señala que es necesario: “lograr un desarrollo equilibrado con crecimiento económico, equidad social y utilización racional de los recursos naturales con el fin de satisfacer las necesidades de las presentes generaciones sin comprometer la capacidad de futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades”.

En relación al consumo de las materias primas renovables, la biomasa pasará a ser la única fuente de materias primas básicas una vez que se agoten las fuentes fósiles. Sin embargo una economía basada en biomasa como fuente de materias primas requiere de una modificación prácticamente total de la mayor parte de los procesos de producción. Esto es consecuencia de la gran diferencia de composición elemental entre las fuentes fósiles y la biomasa. Si bien la composición química del petróleo varía según la región de explotación, podemos indicar que contiene en promedio aproximadamente un 85 % carbono, 12 % de hidrógeno y un 3% de azufre, nitrógeno y oxígeno. Por su parte la biomasa, a pesar de que según el origen tendrá una composición muy variada, está constituida fundamentalmente por 46 % de carbono, 6 % de hidrógeno, 46% de oxígeno y 0,3% de nitrógeno. Como puede observarse, si se lo compara con la transformación del petróleo, existe una gran diferencia en lo que respecta a la composición química, atribuible a la cantidad de oxígeno presente en la biomasa, y que hace necesaria una modificación de todos los procesos de transformación en productos de alto valor agregado (Corma *et al.*, 2007).

Sin embargo, se han producido avances notables en lo que respecta a la producción de productos derivados de la biomasa, que incluyen compuestos con muchísimas aplicaciones como lubricantes, fibras, polímeros, disolventes, surfactantes, agroquímicos y fármacos, entre otras. Algunas de las materias primas actuales para la industria química provienen directamente de biomasa, y se obtienen por medio de una simple extracción; sin embargo también existe un gran número de productos básicos que requerirá de una transformación de la biomasa, por vías tanto químicas como bioquímicas, para lograr su conversión en productos monoméricos de menor peso molecular. Muchas de ellas se encuentran actualmente en fase experimental o todavía requieren de una investigación mucho mayor.

Para poder evaluar el tipo de productos que pueden obtenerse a partir de la biomasa es necesario conocer previamente su composición química. Las principales macromoléculas presentes en la biomasa son los hidratos de carbono o carbohidratos, los lípidos, las proteínas y numerosos metabolitos secundarios como por ejemplo los terpenos, los colorantes, los alcaloides, etc. aunque la cantidad de cada uno dependerá de la procedencia del material. De todos ellos, los hidratos de carbono resultan ser los más abundantes, constituyendo casi el 80% de toda la materia orgánica presente. Las paredes celulares de la plantas están constituidas por hidratos de carbono llamados polisacáridos, compuestos fenólicos y compuestos minoritarios, como por ejemplo minerales, lípidos y proteínas, por mencionar solo algunos de ellos. Los polisacáridos presentes en la biomasa suelen pertenecer a tres grandes grupos: celulosa, hemicelulosas y lignina (Prensen, 2010).

Veamos a continuación el aprovechamiento másico que suele darse a los distintos grupos de macromoléculas:

Hidratos de carbono

La celulosa es el biopolímero más abundante en nuestro planeta. Está formado por cadenas lineales de celobiosa (D-glucopiranosil- α -1,4-D-glucopiranososa) de aproximadamente 10.000 unidades glicosídicas en la celulosa nativa de fibras de madera donde representa más de 50 % del peso.

Las hemicelulosas poseen una estructura más variada y resultan más difíciles de clasificar, ya que se trata de polisacáridos que poseen grupos más heterogéneos. Tienen un grado de polimerización entre 100 y 200 unidades en las fibras de madera. Las pajas de cereales, por ejemplo trigo y arroz, suelen contener entre 30 y 40 % de hemicelulosas. Si bien existen discrepancias en cuanto a su clasificación, suelen subdividirse de acuerdo a la composición de la cadena principal pudiendo, de esta forma, ser: xilanos, glucuronoxilanos, arabinoxilanos, mananos, glucomananos y galactoglucomananos (Prensen, 2010).

La lignina representa entre 25 y 33 % de la biomasa en madera de especies tipo coníferas y entre 18 y 34 % de especies frondosas. Este polímero se encuentra principalmente en la lámina media y en las capas de la pared celular. La lignina es de vital importancia para el organismo vegetal, pues desempeña una función importante en el transporte de agua, nutrientes y metabolitos en el sistema vascular, facilitado por sus propiedades como estructura macromolecular; también juega un papel importante en el sistema de defensa de las plantas frente a patógenos y protegen los polisacáridos de la pared celular de una posible despolimerización. La composición química de lignina consiste principalmente en tres tipos de unidades repetitivas: cumaril (H), guaiacil (G) y siringil (S). Estas unidades derivan de los denominados monolignoles, los alcoholes p-cumárico (4-hidroxicinamílico), coniferílico (4-hidroxi-3-metoxicinamílico) y sinapílico (4-hidroxi-3,5-dimetoxicinamílico) respectivamente (Prensen, 2010).

Los polisacáridos presentados aquí muestran aplicaciones interesantes; por ejemplo en materiales poliméricos con ligeras transformaciones químicas, o en la obtención de combustibles; sin embargo la principal utilidad es sin duda, la gran potencialidad para generar diferentes especies monoméricas que podrían sustentar una nueva economía basada en la obtención de materiales a partir de los hidratos de carbono.

La glucosa es la principal especie monomérica que podemos obtener de fuentes naturales y puede obtenerse a partir de almidón, celulosa, sacarosa o lactosa. A escala industrial la glucosa se produce por hidrólisis enzimática del almidón, obteniéndose 590 kg de glucosa a partir de una tonelada de maíz. La otra importante fuente de glucosa es la biomasa leñosa, materia prima que permitiría la obtención de glucosa de una manera económicamente viable y sustentable ya que podrían utilizarse residuos ricos en polisacáridos. Se están desarrollando programas de investigación que tienen como objetivo identificar los principales productos químicos a partir de los azúcares que contiene la biomasa, y que económica y técnicamente resulten más interesantes. Se han identificado compuestos llamados bloques de construcción o

building blocks que poseen estructuras de gran versatilidad para su transformación posterior en compuestos intermedios y derivados de alto valor agregado. Entre ellos pueden destacarse los siguientes: ácido láctico, ácido succínico, ácido fumárico, ácido 2,5-furandicarboxílico, ácido 3-hidroxipropiónico, ácido aspártico, ácido glucárico, ácido glutámico, ácido itacónico, ácido levulínico, 3-hidroxibutirilactona, glicerol, sorbitol, y xilitol (Corma *et al.*, 2007).

Veamos a continuación el ejemplo del aprovechamiento de uno de ellos, el ácido láctico, a partir del cual pueden sintetizarse compuestos de alto valor agregado. En la figura 5 se indican los diferentes productos que pueden obtener mediante transformaciones orgánicas sencillas del mismo. Dicho esquema se suele denominar “plataforma” del ácido láctico. Entre sus productos se encuentran: ácido acrílico, 1,2-propanodiol, ésteres del ácido láctico, ácido pirúvico y ácido poliláctico, por mencionar solo algunos de ellos

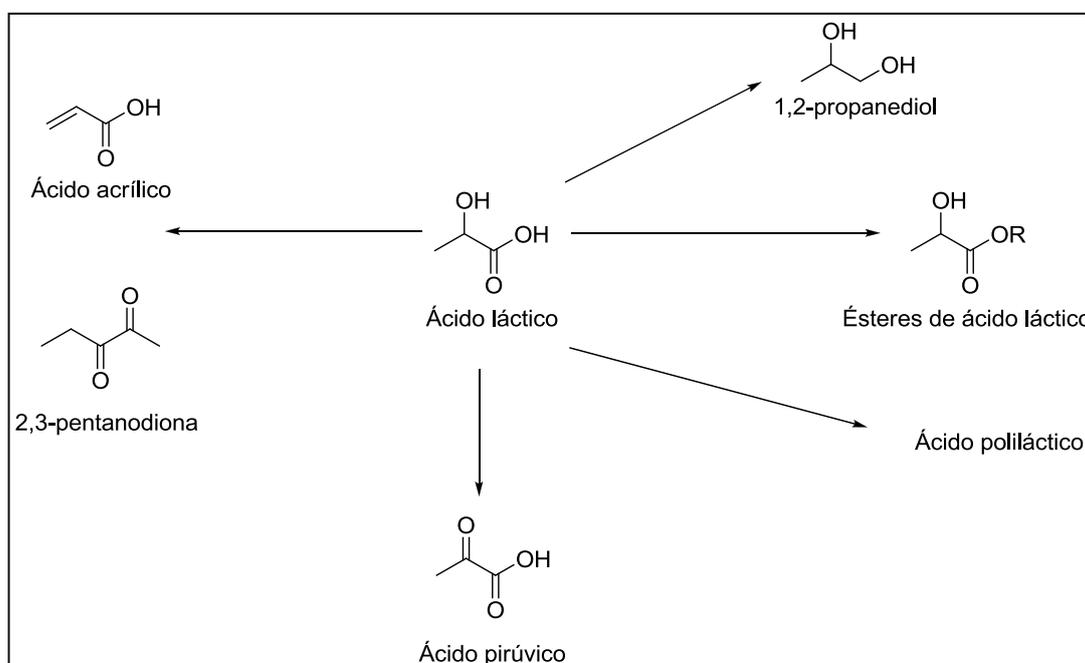


Figura 5. Productos principales que pueden obtenerse a partir del ácido láctico

Por su parte, el ácido acrílico y sus ésteres son de gran importancia en la industria de la fabricación de polímeros. Se combinan rápidamente entre sí de para formar ácido poliacrílico, o con otros monómeros como acrilamida, acrilonitrilo, vinilo, estireno y butadieno por reacción con sus dobles enlaces, formando homopolímeros o copolímeros que se utilizan en la fabricación de plásticos, adhesivos y pinturas.

También el lactato de etilo encuentra día a día importantes aplicaciones; debido a su gran poder de solvatación y baja presión de vapor, está comenzando a utilizarse en la industria de recubrimientos. Debido a su alto poder de solvatación tiene la habilidad de disolver una gran

variedad de resinas, por lo que es de gran aplicación en la industria del poliuretano. Además su excelente poder removedor lo hace adecuado para limpiar una gran variedad de superficies metálicas, maderas y materiales poliméricos como el poliestireno, eliminando grasas, aceites, adhesivos y combustibles sólidos.

Otro de sus derivados, el ácido poliláctico, es un polímero constituido por moléculas de ácido láctico que se utiliza para construir envases plásticos, que se caracterizan por ser biodegradables. Se trata de un material termoplástico, que puede prepararse a partir de almidón de maíz y cuya estructura se degrada muy fácilmente formando agua y dióxido de carbono como productos.

El propilenglicol (1,2-propanodiol) es un compuesto incoloro, insípido e inodoro. Es un líquido aceitoso claro, muy higroscópico y miscible con agua, acetona, y cloroformo. Se obtiene por hidratación del óxido de propileno (obtenido por vía petroquímica) y posee innumerables aplicaciones: como humectante en productos farmacéuticos, cosmética, alimentos y tabaco, en alimentos se usa como solvente para su coloración y saborización, y como anticongelante, como desinfectante en cremas para manos, lociones antibacterianas, y en solución salina se lo utiliza como fluido hidráulico para máquinas, entre otras.

Por otra parte, la deshidratación térmica en medio ácido de pentosas y hexosas conduce a la formación de tres productos químicos básicos, no derivados del petróleo y con excelente potencial: furfural (furfuraldehído) derivado de la deshidratación de pentosas, 5-hidroximetil-furfural (HMF) derivado de la deshidratación de hexosas y el ácido levulínico (ácido 4-oxopentanoico), derivado de la deshidratación del HMF (Figura 6).

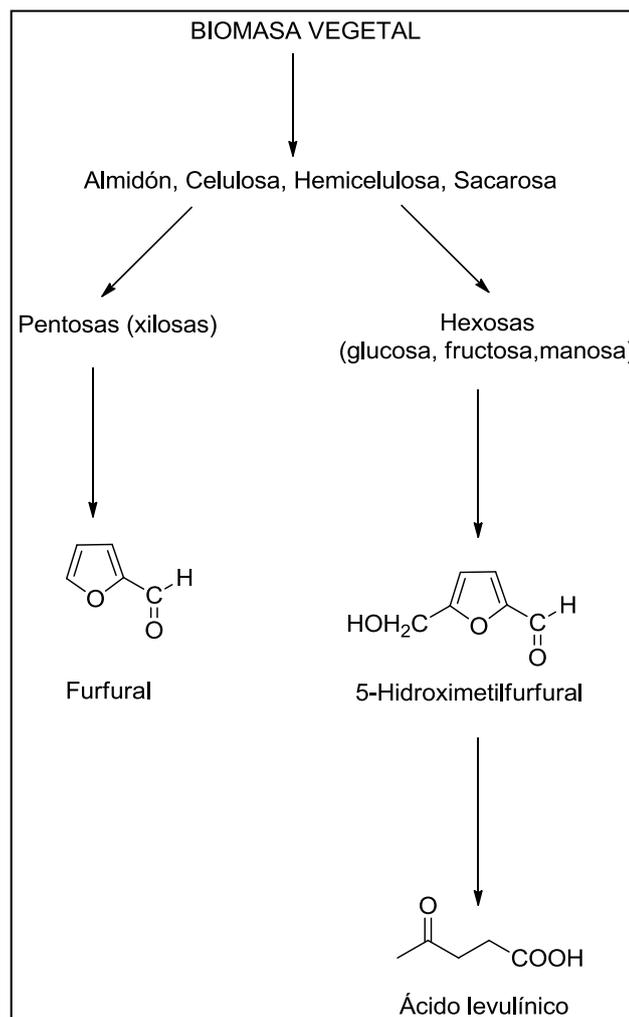


Figura 6. Obtención de furfural, 5-hidroximetilfurfural y ácido levulínico a partir de biomasa

El furfural es una sustancia química importante que puede ser obtenida con facilidad a partir de la biomasa. Es el principal producto orgánico insaturado obtenido en gran volumen a partir de hidratos de carbono y resulta ser un reactivo clave para la producción de compuestos no derivados del petróleo. La producción anual de furfural es de aproximadamente 300.000 toneladas. Se produce a partir de materia prima agrícola o residuos de dicha industria, rica en polímeros de tipo pentosanos (fracción de hemicelulosa) por medio de una degradación ácida. La reacción consiste en la hidrólisis de pentosanos a pentosas (principalmente xilosa), que en condiciones de alta temperatura (200-250 °C) y en presencia de catalizadores ácidos, como el ácido sulfúrico, sufre una reacción de deshidratación.

El furfural tiene numerosas aplicaciones en muchos sectores de la química. Además de ser un disolvente en sí mismo, también es utilizado como materia prima en la producción de varios compuestos furánicos. En una economía de base biológica el furfural también puede reemplazar o sustituir algunos derivados del petróleo y resultar un excelente material de

partida para la producción de combustibles líquidos. En la figura 7 se muestran algunos de los productos que pueden prepararse a partir del furfural, muchos de los cuales también son intermediarios de síntesis en diferentes industrias, mientras que otros se utilizan como solventes o tienen otras aplicaciones específicas.

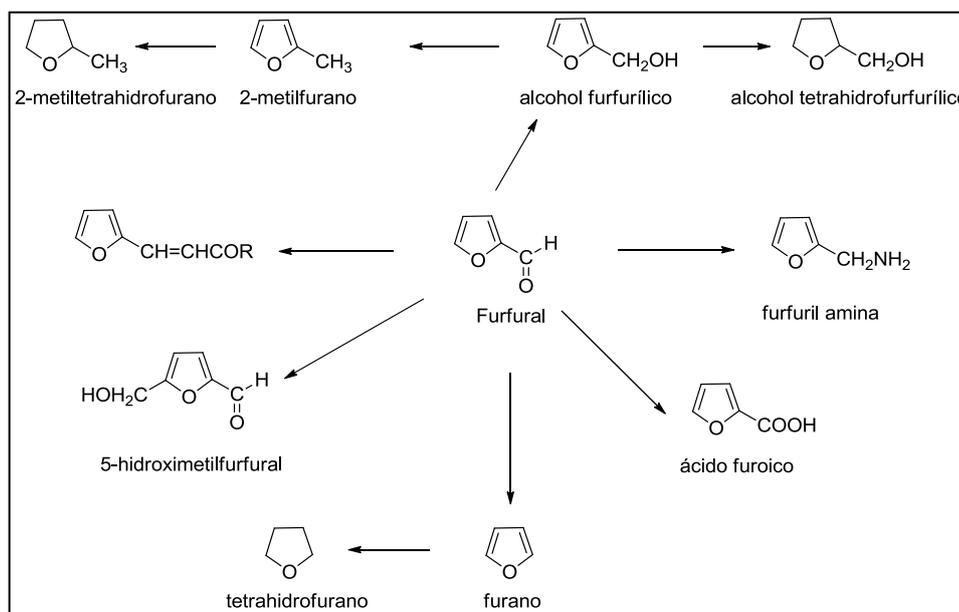


Figura 7. Algunos derivados destacados del furfural

De manera análoga, el HMF es considerado un producto químico de la biomasa bastante versátil, ya que puede utilizarse como precursor para sintetizar gran variedad de compuestos que actualmente derivan del petróleo. El procedimiento involucra la deshidratación de la fructosa mediante el tratamiento con ácidos minerales. El HMF puede convertirse en 2,5-dimetilfuranos, un líquido que puede emplearse como aditivo para combustibles y con capacidad superior al etanol. Asimismo la oxidación de HMF conduce a la formación de ácido 2,5-furanodicarboxílico, el cual ha sido propuesto como un monómero sustituto de ácido terftálico (producido por vía petroquímica), ampliamente utilizado en la producción de poliésteres, poliamidas y poliuretanos (Corma *et al.*, 2007).

Para finalizar el ácido levulínico, un cetoácido que tradicionalmente se prepara a partir del almidón, también puede prepararse por transformación del HMF por hidrólisis ácida. La compañía Biofine ha desarrollado un proceso hidrolítico de alta temperatura en medio ácido diluido, que transforma directamente la biomasa celulósica en ácido levulínico y sus derivados. El proceso ya había sido ensayado previamente a una escala más pequeña con una variedad de materias celulósicas que incluyeron desechos sólidos como papel de desecho no reciclable, desechos de madera y residuos agrícolas. El ácido levulínico puede transformarse en

productos químicos de gran consumo y que resultan la clave de su potencial comercial, como tetrahydrofurano, butanodiol, γ -butirolactona, ácido succínico y ácido difenólico. También se encuentran en desarrollo otras aplicaciones en mercados importantes para otros derivados como el metil-tetrahydrofurano, un aditivo para naftas, o también el ácido δ -aminolevulínico, con gran capacidad como pesticida biodegradable y no tóxico de amplio espectro, además de nuevos polímeros biodegradables.

Lípidos

La otra gran familia de productos naturales que pueden obtenerse a partir de la biomasa son los lípidos. Los aceites y las grasas son las materias primas renovables más utilizadas por la industria química en la actualidad. Poseen grandes beneficios por sobre los aceites minerales, entre ellos se destaca su completa biodegradabilidad y la capacidad de reducir considerablemente las emisiones de compuestos orgánicos volátiles al usárselos en pinturas y recubrimientos. Solo el 14% de su producción se emplea en la industria de alimentos y un porcentaje muy bajo en otras industrias, por lo cual se presentan como candidatos potenciales para el estudio de nuevas aplicaciones y usos.

Estos lípidos son mezclas de compuestos ricos en ésteres de glicerol. Éstos se forman por la condensación de una molécula de glicerol y ácidos grasos saturados o insaturados, conteniendo además otros componentes muy minoritarios. Presentan cierta diversidad en su composición, dependiendo de la naturaleza de los ácidos grasos unidos al glicerol, de la proporción en que se encuentran los mismos y del grado de esterificación del glicerol. Generalmente pueden obtenerse los aceites a partir de de las semillas de los vegetales por simple prensado o extracción con solventes; para posteriores aplicaciones también pueden someterse a hidrólisis, o separar posteriormente sus componentes mediante procesos físicos como la destilación, extracción convencional o supercrítica, cristalización, etc.

Las reacciones de los glicéridos son relativamente simples e involucran a las funciones presentes en su estructura: hidrólisis de ésteres o adición a los dobles enlaces. Las reacciones de hidrólisis pueden producir jabones en medio alcalino o ácidos grasos en medio ácido. Estos últimos podrán utilizarse posteriormente como intermediarios en la fabricación de ésteres y amidas con funciones específicas. Las transformaciones que involucran a los dobles enlaces, son las reacciones típicas de éstos: epoxidación, ozonolisis, metátesis o dimerización; las mismas están adquiriendo importancia industrial para la preparación de productos de alto valor agregado. Existen innumerables aplicaciones para los glicéridos como la preparación de surfactantes, lubricantes, adhesivos, materiales poliméricos, pinturas, recubrimientos, disolventes y productos farmacéuticos, entre muchas otras.

Un ejemplo de gran interés en la utilización de lípidos lo representa la producción de surfactantes basados en materias primas renovables. Los surfactantes, también llamados

tensoactivos, son sustancias que influyen en la superficie de contacto entre dos fases (por ejemplo dos fases líquidas inmiscibles), modificando la tensión superficial. Entre los tensoactivos se encuentran las sustancias sintéticas que se utilizan regularmente en el lavado, entre las que se incluyen productos como detergentes para ropa, lavavajillas, productos para eliminar el polvo de superficie, champú, etc. Se desarrollaron durante la primera mitad del siglo XX, y actualmente han suplantado ampliamente al jabón tradicional.

Estructuralmente los surfactantes están constituidos por un grupo polar hidrofílico, que puede ser iónico o no iónico, y una cadena hidrocarbonada hidrofóbica. Un ejemplo de un nuevo grupo de surfactantes son los alquilpoliglucósidos, compuestos formados por la condensación de glicéridos e hidratos de carbono, obteniéndose un producto basado exclusivamente en fuentes renovables. En la Figura 8 puede observarse un ejemplo.

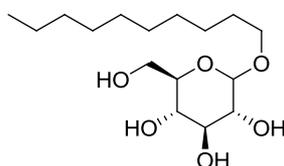


Figura 8. Ejemplo de un surfactante alquilpoliglucósido biodegradable

En varios países se está implementando desde hace unos años el uso de este tipo de surfactantes biodegradables. Por ejemplo en Estados Unidos, antes de 2010 el solo el 49 % de la producción de correspondía a surfactantes oleoquímicos y dicho valor aumento a un 61% en ese año. Ese reemplazo redujo más del 8% las emisiones de dióxido de carbono para esa industria.

La hidrolisis ácida o alcalina de los esteres del glicerol conduce a la liberación de ese alcohol. Como veremos en el capítulo siguiente el glicerol se genera también en grandes cantidades como co-producto del proceso de fabricación de biodiesel. Actualmente, uno de los retos más importantes es dar salida a este subproducto que está causando un gran impacto a nivel económico y medioambiental.

El glicerol es un compuesto de muy baja toxicidad, no resulta irritante, es biodegradable y reciclable y presenta una serie de propiedades físicas y químicas que pueden convertirlo en un disolvente alternativo a los solventes orgánicos convencionales. Se caracteriza por poseer propiedades como alto punto de ebullición, escasa presión de vapor, elevada capacidad para disolver compuestos orgánicos e inorgánicos y estabilidad en condiciones normales de presión y temperatura.

Además, el glicerol puede convertirse fácilmente en productos como metanol, etanol, 1-propanol y 1,2-propanodiol, mediante reacciones de hidrogenación catalítica; de esta manera también resulta una materia prima excelente para la preparación de otros disolventes. Por

todas estas características puede utilizárselo como humectante, plastificante, emoliente, espesante, dispersante, lubricante, endulzante y anticongelante. También se lo puede utilizar como ingrediente en cosmética, artículos de aseo, medicamentos y productos alimenticios. El glicerol puede utilizarse como disolvente verde en reacciones orgánicas tanto catalíticas como no catalíticas, produciendo buenos rendimientos de conversión y gran selectividad. Se trata de un disolvente que respeta el medio ambiente, que puede actuar como medio de reacción, que posibilita la solubilidad de reactivos y catalizadores, que permite llevar a cabo reacciones en microondas, que ofrece una separación sencilla del producto y que permite el reciclado de complejos de metales de transición (Aresta *et al.*, 2009).

Proteínas

Las proteínas son moléculas complejas formadas a partir de la unión de aminoácidos. Se caracterizan por presentar propiedades particulares que resultan fuertemente dependientes de su estructura. Las fuentes habituales de proteínas son la soja, el maíz, la colza y el gluten de trigo. En la actualidad más del 90% de la producción anual de proteína se destina a la industria alimentaria, sin embargo se ha comenzado investigar su potencial en otros ámbitos de la industria.

Las proteínas se caracterizan por poseer propiedades adhesivas, cohesivas, de viscoelásticas, insolubilidad en agua y biodegradabilidad que las hacen únicas frente a los polímeros sintéticos. Por ejemplo, las proteínas de la colza poseen importantes propiedades plásticas, mientras que las de soja proporcionan características excelentes de adherencia, siendo una posible alternativa a los adhesivos de formaldehído usados en enchapados y aglomerados. En general, las proteínas tienen una buena proyección a futuro en diferentes industrias, entre ellas farmacia, cosmética y agroquímica.

Biopolímeros

Los biopolímeros pueden definirse como macromoléculas presentes en los seres vivos. Se trata de materiales poliméricos sintetizados por los seres vivos. Con el auge de las nuevas disciplinas médicas como la ingeniería de tejidos, se incluyen en este grupo los materiales sintéticos que poseen la característica de ser compatibles con el desarrollo y funcionamiento de un ser vivo (biocompatibles).

Existen tres familias de biopolímeros naturales: las proteínas como las globulinas, los polisacáridos como la celulosa y los ácidos nucleicos como el ADN y el ARN. También existen otros derivados de metabolitos secundarios como los politerpenos entre los que se incluye

el caucho natural, los polifenoles como la lignina, u otros como la quitina (presente en el exoesqueleto de muchos arácnidos, crustáceos e insectos).

El mercado de biopolímeros más representativo en la actualidad es el europeo; la producción en 2003 fue de 40.000 toneladas, un valor bajísimo si se lo compara con las 30 millones de toneladas de polímeros producidos por la industria petroquímica en el mismo período. Sin embargo, mientras los plásticos convencionales han incrementado su valor entre un 30 y un 70% debido al aumento en el precio del petróleo, el precio de los bioplásticos ha disminuido. Los principales fabricantes de biopolímeros están incrementando considerablemente su producción. Muchas empresas han desarrollado y patentado algunos ejemplos de biopolímeros como por ejemplo Novamont (Polímeros de almidón), Cargill-Dow (ácido poliláctico), Procter & Gamble (Polihidroxialcanoatos).

Estos compuestos se están empleando con variadas aplicaciones: films biodegradables empleados en agricultura, bolsas para residuos y empaquetado de alimentos, o también en ropa deportiva. Estas biofibras resulta una alternativa viable al uso de compuestos reforzados con fibra de vidrio, especialmente en las industrias automotriz y de materiales para la construcción.

Los métodos de producción actuales, ya sea generación de energía o fabricación productos químicos, a partir de materias primas renovables, no pueden competir con las rutas clásicas. Sin embargo, a medida que aumenten los precios del petróleo y que la biotecnología avance, dichas materias primas resultarán más atractivas comercialmente, en especial para la industria de la química fina. La tendencia esperable de la legislación a nivel mundial de favorecer la sustentabilidad de una economía que fomente el respeto al medio ambiente contribuirá a la competitividad de los procesos basados en materias primas renovables.

CAPÍTULO 5

Biocombustibles

El concepto de biocombustible

Como ya se mencionó, la dependencia casi exclusiva de los combustibles fósiles nos acerca a un punto sin retorno, ya sea por lo nocivo que resulta hacia el medioambiente, como por su inevitable agotamiento. Es por ello que la necesidad de otro tipo de energías ha llevado a varias alternativas, entre ellas los biocombustibles.

Formalmente se llama biocombustible a aquel que se obtiene mediante un tratamiento físico o químico a partir de materia vegetal o restos orgánicos (es decir biomasa o residuos de la misma) no fosilizados. Si bien su preparación y uso no puede generalizarse en un único método, tienen en común el hecho de que se parte de biomasa como materia prima principal, siendo una fuente importante la de origen agrícola, que es a la que suele referirse, quizás incorrectamente, con el prefijo “bio”, resultando más adecuado para éstos el uso del término “agrocombustibles”. El mismo criterio puede aplicarse a los derivados de la industria forestal bajo el término “dendrocombustibles”.

Usualmente se asume por hábito que los biocombustibles son líquidos, sin considerar otras fuentes de biomasa que usualmente se consumen por combustión en mayor cantidad; es el caso de los biocombustibles sólidos, que incluyen leña, astilla, paja, carbón vegetal, pellets o briquetas, etc. y resultan ser en la actualidad la principal fuente de energía a partir de biomasa. También existen biocombustibles gaseosos como el biogás, que puede obtenerse a partir de fuentes muy variadas.

Biocombustibles y biocarburantes

Sin embargo, dentro de las varias posibilidades de materiales biocombustibles, existe un grupo más reducido, pero no por ello menos importante, que incluye aquellos que pueden utilizarse con éxito en los motores de combustión interna ya existentes. Los mismos reciben el nombre de biocarburantes, término que indica dicha particularidad. Es justamente eso lo que hace ventajoso el uso de los mismos para la generación de energía, pues implica que no se modifique ni el diseño, ni el modo de operación de los motores. El actual auge de los biocombustibles no radica en el uso de la leña, el carbón vegetal u otros productos leñosos usados desde los albores de la humanidad, sino que se debe principalmente a fuerte impulso que tiene la producción de biocarburantes, considerando que el mundo literalmente “se mueve” en función de los vehículos con motores de combustión interna.

Es justamente dentro de este grupo que se destacan los dos biocombustibles más conocidos, el bioetanol y el biodiesel. Sus características físicas y químicas les permiten ser utilizados en los motores de combustión interna con un rendimiento similar a la de los combustibles originales para los que fueron diseñados. De esta manera el uso de bioetanol resulta adecuado para los motores tipo Otto, aquellos diseñados para funcionar a partir del corte de petróleo conocido como naftas o gasolinas. Similarmente, en el caso de los motores que funcionan con el derivado del petróleo denominado gasoil, combustible utilizado en los motores del tipo Diesel, puede utilizarse con éxito la mezcla denominada biodiesel.

El uso, y la producción, cada vez mayor de biocarburantes responde a varias premisas del mercado, aunque la bandera enarbolada que suele destacarse es la del cuidado del medioambiente visto que su uso en motores reduce las emisiones de muchos de los gases contaminantes que genera la combustión de los derivados del petróleo, un hecho ciertamente ventajoso, aunque debe considerarse que también, desde el mismo punto de vista ambiental, posee muchos puntos importantes en contra.

Bioetanol

La premisa principal para la obtención de alcoholes como el etanol a partir de materia prima vegetal es la transformación de los polisacáridos que la constituyen mediante un proceso de fermentación que dará lugar a la obtención del alcohol. Todos los vegetales poseen una elevada proporción de celulosa, el polisacárido responsable de aportar la estructura rígida a la planta, gracias a sus largas cadenas lineales formadas por unidades de glucosa (figura 9); sin embargo, algunos de ellos también tienen una importante cantidad de otro polisacárido dentro de sus semillas, el almidón, un compuesto conformado por unidades de glucosa de manera ramificada y que sirve como reserva de energía para sustento del vegetal (figura 9).

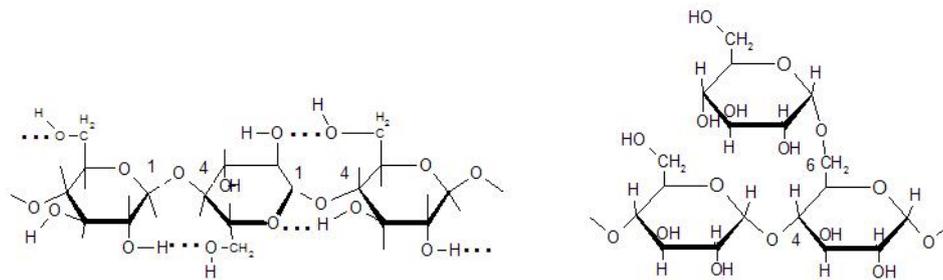


Figura 9. Conformación de las uniones entre unidades de glucosa en la celulosa (izq.) y el almidón (der.)

Debido a ello las principales materias primas para la obtención de bioetanol, la constituyen muchos cereales, ricos en almidón, como el maíz o el trigo, o también otros productos agrícolas ricos en azúcares más sencillos como la caña de azúcar o la remolacha.

De esta manera la conversión de los hidratos de carbono en etanol debería ocurrir por el simple agregado de levaduras, pero el proceso necesita en muchos casos de un par de etapas previas: la delignificación y la hidrólisis.

El primer proceso consiste en la eliminación de los materiales sólidos insolubles llamados ligninas. Se trata de compuestos polifenólicos que recubren las paredes de las células vegetales (en donde se encuentra la celulosa) y son las que aportan el carácter leñoso a las maderas (figura 10). Estos polímeros cumplen la función de proteger el interior de la célula de la acción de las diversas enzimas de los microorganismos que puedan intentar atacarla, y justamente por esa razón deben eliminarse, pues para la etapa siguiente resulta necesaria la acción de ciertas enzimas para comenzar a romper las largas cadenas de las moléculas de celulosa.

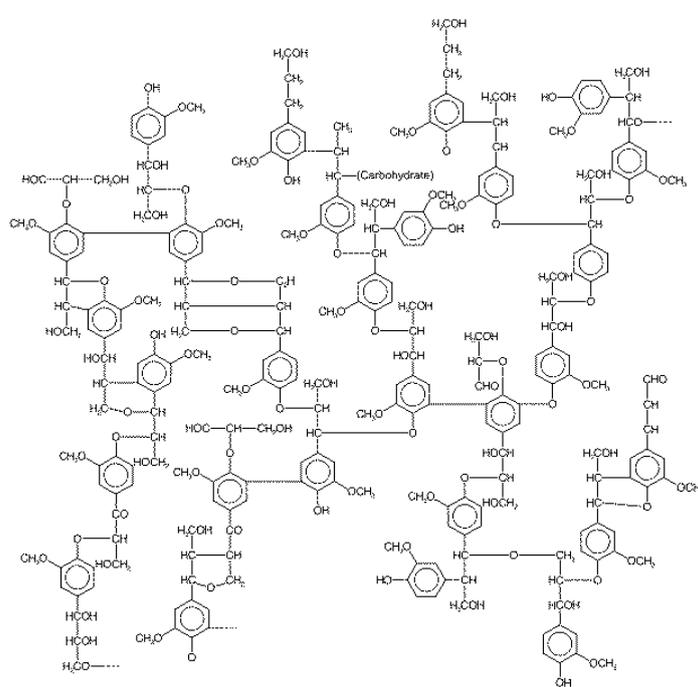
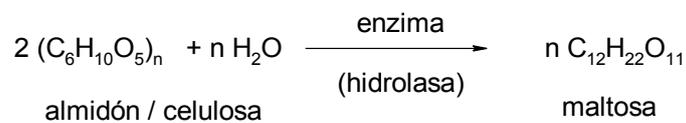
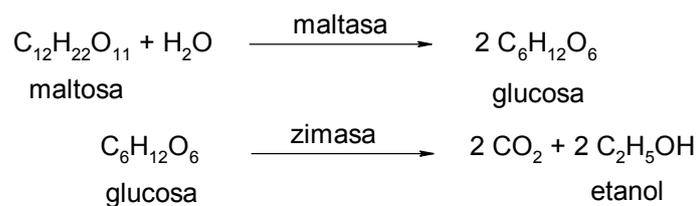


Figura 10. Estructura de las ligninas

La etapa siguiente, la hidrólisis, tiene la finalidad de romper químicamente las uniones glicosídicas entre las moléculas de glucosa mediante la acción del agua, catalizándola por medio de las enzimas adecuadas (como la diastasa), para de esta forma obtener una solución rica en azúcares más sencillos y, por ende, resultan más fáciles de ser transformados en el producto.



Recién obtenida la mezcla rica en azúcares sencillos (principalmente el disacárido maltosa) se procede al agregado de levaduras como la de cerveza (*Saccharomyces cerevisiae*), las cuales en su acción producen dos enzimas: la maltasa y la zimasa. La primera convierte la maltosa en glucosa, y la segunda es la que transforma a este monosacárido en etanol, liberando dióxido de carbono:



Finalmente, una vez obtenido el mosto rico en etanol, se procede a su purificación mediante dos vías: la destilación que produce un etanol al crudo, denominado vinaza, y su posterior deshidratación, que arroja el producto puro por medio de una destilación azeotrópica con benceno. A fines de evitar la ingesta del producto, suelen agregarse concentraciones mínimas de sustancias que le otorgan un sabor amargo y desagradable como benzoato de denatonio (figura 11), octacetato de sacarosa (figura 12), metilisobutilcetona o ftalato de dietilo.

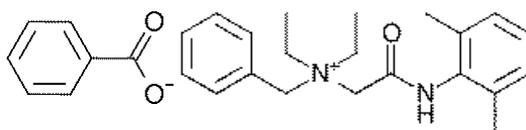


Figura 11. Estructura del benzoato de denatonio

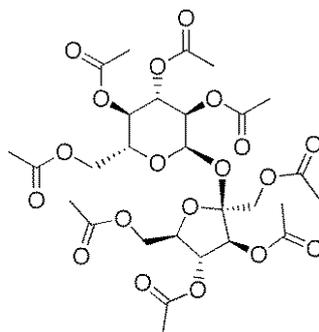


Figura 12. Estructura del octaacetato de sacarosa

El producto final de este proceso, etanol puro, tiene una variedad de propiedades que lo hacen apto para su uso en motores a explosión del ciclo de Otto. En general, lo más destacado de este producto es una mejora sustancial en el índice de octanos, pues cuando las naftas de mayor calidad (las llamadas *premium*) tienen índices del orden de los 98 octanos (RON), el etanol puro puede alcanzar valores de hasta 140 octanos en igualdad de condiciones mecánicas. La otra gran ventaja es la que dio origen a su implementación en motores de combustión interna, o sea la reducción de emisiones de dióxido de carbono y material particulado, a lo que se le suma el hecho de que al no poseer átomos de azufre y nitrógeno en sus moléculas, no emitirán absolutamente nada de los óxidos de ambos elementos (los NOx y SOx, dos de los contaminantes atmosféricos más comunes).

De la misma manera, su uso en estado puro presenta desventajas en comparación de las naftas, como su mayor volatilidad (el punto de ebullición de etanol es 78°C, mientras que las naftas tienen un rango que llega hasta 200°C); un punto de inflamación más bajo, lo que lo hace más fácilmente inflamable; una capacidad mayor de corrosión de los materiales metálicos

del motor, pues por un lado posee oxígeno en su composición y por el otro tiene la capacidad de absorber moléculas de agua que aceleran muchos procesos de corrosión. También tiene un importante efecto como disolvente que puede llegar a afectar a algunos tipos de elastómeros (gomas) en distintas partes del motor.

Debido a ello, la opción para minimizar las modificaciones al motor naftero original del automóvil es el uso de mezclas nafta-bioetanol, que usualmente reciben una denominación basada en la letra E, seguida por un número que indica el porcentaje de etanol en la solución; así pues pueden tenerse distintas mezclas; por ejemplo:

E100: etanol puro

E25: Limite sin modificaciones al motor.

E10: Limite máximo legal en Argentina (Ley 26.093)

E5: Límite mínimo legal en Argentina (Ley 26.093)

En cuanto a la reducción de emisiones de las mezclas, sigue siendo efectiva; valga como ejemplo el uso de la mezcla E10, la cual con solo un 10% de etanol reduce la emisión de dióxido de carbono en un 30%.

La producción de bioetanol es muy variada dependiendo de la materia prima, así pues los materiales de partida, ya sean ricos en almidón como en lignocelulósicos, poseen un rendimiento bastante diferente: la caña de azúcar rinde unos 84,5 litros por tonelada de producto, el maíz unos 409 litros por tonelada y la remolacha unos 200 litros.

También existen otros bioalcoholes que pueden obtenerse por la misma vía, como el biometanol, biopropanol y biobutanol, que pueden usarse con idéntico fin. Otros derivados de estos son algunos éteres que suelen usarse como aditivos para mejorar el índice de octanos de las naftas como son el etil-terbutil éter (ETBE) y el MTBE (metil-terbutil éter).

Biodiesel

A diferencia del bioetanol, el llamado biodiesel no es un compuesto puro, sino que se trata de una mezcla de compuestos. Se trata de ésteres alquílicos de ácidos grasos obtenida a partir de la transesterificación de glicéridos presentes en aceites vegetales y grasas; de hecho el biodiesel suele denominarse con la sigla FAME, correspondiente al término inglés *Fatty Acids Methyl Esthers*, referido específicamente a los ésteres metílicos de ácidos grasos.

Tanto las grasas animales como los aceites vegetales son ricos en una mezcla de lípidos entre los que se incluyen los glicéridos (acilglicerolos), conformados por ésteres entre ácidos grasos y el

glicerol, existiendo pues varias posibilidades como los monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos según se encuentre esterificado, uno, dos o los tres grupos hidroxilo del glicerol (figura 13).

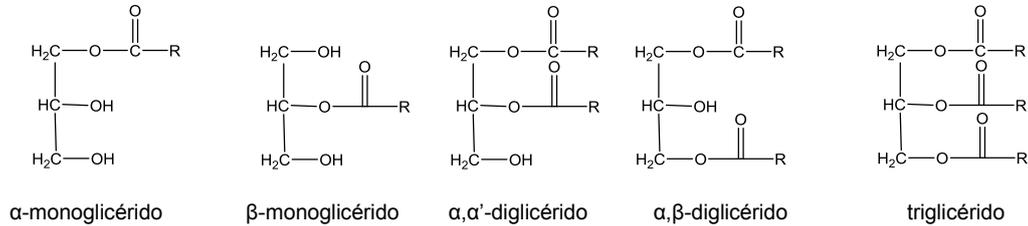


Figura 13. Estructuras de los glicéridos

En el caso de un triglicérido cuyas cadenas alquílicas corresponden a las de ácidos grasos, la longitud importante de las mismas hace que dichas moléculas resulten voluminosas y muy poco polares (figura 14)

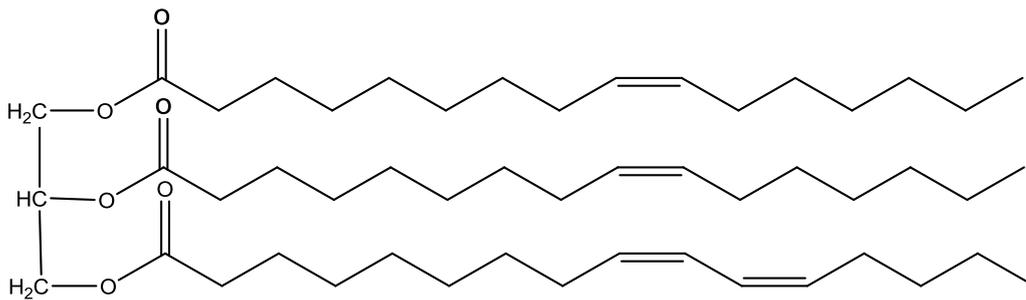


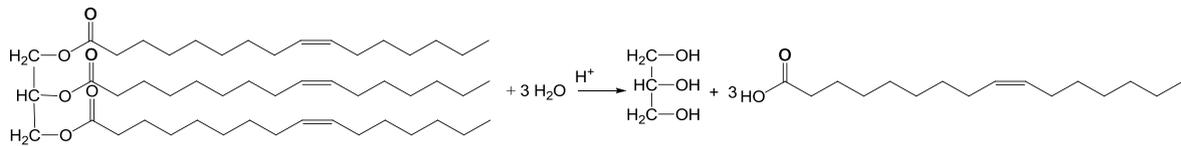
Figura 14. Ejemplo de la estructura de un triglicérido presente en un aceite

Como se mencionó, la materia prima más común de lípidos ricos en glicéridos son los aceites y las grasas de origen natural. Los más utilizados a nivel mundial son el aceite de girasol o el de soja aunque también se utilizan en menor cantidad otros aceites vegetales como la *Jathropa*, o incluso los que tienen otros orígenes como los de pescado o los extraídos a partir de algas.

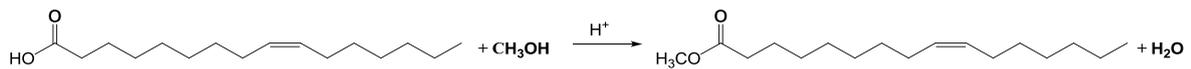
La reacción involucrada en la transformación de los glicéridos presentes en los aceites en el biodiesel es la transesterificación, una reacción que involucra el intercambio de grupos alquilo esterificados en presencia de metanol. La misma puede llevarse a cabo tanto en medio ácido como alcalino, aunque involucra etapas diferentes, lo que da lugar a dos métodos de preparación:

1) *Obtención en medio ácido:*

Involucra dos etapas (figura 15): en la primera de ellas se hidrolizan en medio ácido los glicéridos, obteniéndose los ácidos grasos y el glicerol. La segunda etapa consiste en la esterificación de esos ácidos grasos con el metanol para formar los ésteres metílicos:



Etapas 1 - Hidrólisis ácida



Etapas 2 - Esterificación

Figura 15. Reacciones de obtención de biodiesel en medio ácido

2) Obtención en medio alcalino:

Esta reacción ocurre en una sola etapa en la cual se utiliza hidróxido de sodio, el cual frente al metanol formará metóxido de sodio que favorecerá la esterificación de los ácidos grasos que forman parte del glicérido (figura 16). Las condiciones de esta reacción no son muy difíciles de lograr: Un medio libre de agua, una temperatura aproximada a los 45 °C y una agitación no muy violenta son suficientes para obtener dicho producto:

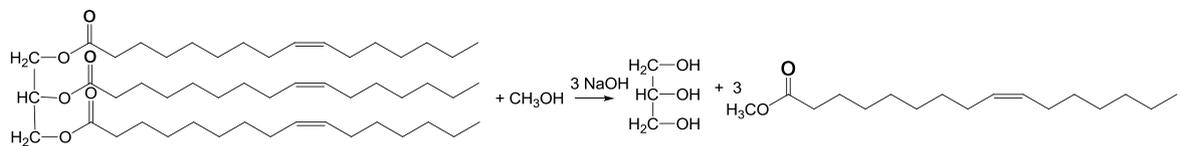


Figura 16. Transesterificación alcalina de aceites para obtener biodiesel

El proceso finaliza con la separación del glicerol por decantación y con etapas de lavado y secado del biodiesel crudo obtenido.

El producto es un combustible compatible con los motores Diesel y, al igual que en el caso del bioetanol, también posee ventaja de reducir las emisiones de dióxido de carbono, material particulado, sin emitir NO_x y SO_x . Las emisiones de dióxido de carbono son entre un 20 y 80% menores que las producidas por los combustibles derivados del petróleo tanto en su producción como en su uso. Además su combustión disminuye en 90% la cantidad de hidrocarburos totales no quemados, y entre 75-90% en los hidrocarburos aromáticos. Al ser de origen vegetal, el biodiesel no contiene ninguna sustancia nociva ni perjudicial para la salud, a diferencia de los hidrocarburos, que tienen componentes aromáticos y bencenos (cancerígenos). Esto disminuye el riesgo de enfermedades respiratorias y alergias.

La performance de esta mezcla en el motor dependen del grado de saturación de las cadenas de los ácidos grasos; por ejemplo los que poseen ácidos saturados aumentan el número de cetanos pero disminuyen el comportamiento en frío a causa de que solidifican a mayor temperatura. Para el caso de los ácidos grasos insaturados se observa la situación inversa.

El uso de biodiesel puede extender la vida útil de motores debido a que posee un alto poder lubricante y protege el motor, reduciendo su desgaste así como los costos para su mantenimiento. También es importante destacar el poder detergente del biodiesel, que mantiene limpios los sistemas de conducción e inyección del circuito de combustible en los motores.

Debido a que también es biodegradable, el transporte de biodiesel es más seguro; en caso de existir un derrame de este combustible en aguas de ríos o mares, la contaminación resultante será menor a la provocada por combustibles fósiles. También su almacenamiento y manipulación es segura, pues no se trata de un material peligroso debido a que su punto de inflamación es superior a 110°C . Eso permite almacenarlo y manipularlo de la misma forma que cualquier combustible diesel convencional.

Quizás la principal desventaja del biodiesel es su dificultad para el arranque del motor en frío con el uso de biocombustible puro. Es por ello que en este caso también sucede que para minimizar las modificaciones al motor se utilizan mezclas gasoil-biodiesel, que usualmente reciben una denominación basada en la letra B, seguida por un número que indica el porcentaje de biodiesel en la solución; por ejemplo:

B100: biodiesel (FAME)

B20: Límite sin modificaciones al motor.

B10: Límite máximo legal en Argentina (Ley 26.093)

B5: Límite mínimo legal en Argentina (Ley 26.093)

Hidrobiodiesel y derivados

Otro producto obtenido a partir de aceites vegetales que puede utilizarse en motores Diesel es el llamado hidrobiodiesel, una mezcla que resulta de la hidrogenación de los glicéridos presentes en el aceite (figura 17):

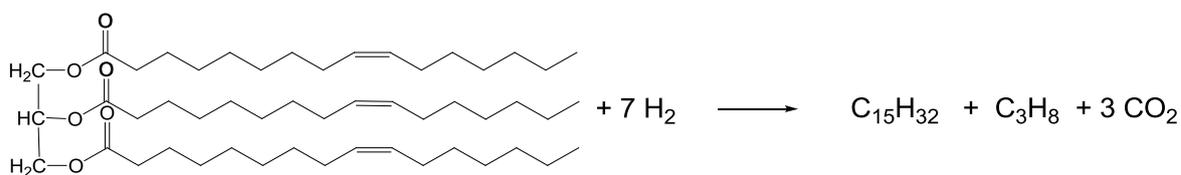


Figura 17. Reacción de obtención de hidrobiodiesel

El resultado de este proceso es una mezcla de alcanos de entre 15 y 18 átomos de carbono, muy similar en composición y en propiedades al gasoil derivado del petróleo. El proceso tiene la ventaja de hidrogenar la materia orgánica insaponificable, por lo que el resultado es una mayor cantidad de hidrocarburos.

La mezcla resultante puede ser utilizada para motores diesel, aunque al tratarse de hidrocarburos, también puede someterse a un proceso de cracking catalítico que dé lugar a la formación de mezclas de hidrocarburos de menor peso molecular, obteniéndose así los productos llamados hidrobionafta (o hidrobiogasolina) e hidrobiokerosene:

Biogás

Es el producto de la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos de origen vegetal o animal. Está compuesto por cantidades variable de metano (50-75%), dióxido de carbono (30-50 %); sulfuro de hidrógeno (0,1-1%), hidrógeno (0-1%) y nitrógeno (0-10%) de los cuales es el metano el que define la pureza como la calidad del biogás como combustible. Se lo utiliza generalmente como material combustible de alimentación de motores generadores de electricidad, o para su quema directa en sistemas de calefacción.

Su obtención se logra mediante la descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno (anaeróbica), un proceso denominado digestión. La misma se desarrolla a causa de la acción de enzimas. En una etapa inicial, actúan las aeróbicas, que utilizan el oxígeno del aire para inicial la descomposición liberando dióxido de carbono y produciendo ácidos orgánicos, los cuales también se descompondrán gracias a bacterias acetogénicas en acetatos e hidrógeno. Una vez que se agotó el oxígeno del digestor (el espacio dentro del cual se

desarrolla la digestión) comienzan a actuar las bacterias anaeróbicas metanogénicas, convirtiendo a esos productos en metano, dióxido de carbono y agua.

Para que proceso de digestión sea efectivo en la preparación de una proporción importante de metano, deben cuidarse varios factores como la temperatura, el tiempo, la materia orgánica de partida y la acidez, a fin de llegar a obtener un producto de calidad.

Si bien pueden usarse temperaturas de hasta 54°C sin inactivar la actividad enzimática, suele trabajarse dentro del rango 15-35°C. Esto suele requerir de tiempos mayores que si se utilizaran temperaturas mayores, pero resulta ventajoso desde el punto de vista de los costos, pues no requieren de sistemas complejos para mantener y aumentar la temperatura. Para trabajar dentro del rango mencionado, los digestores suelen construirse bajo tierra, debido a que el suelo actúa como aislante natural y el proceso de digestión resulta ser muy sensible a la variación de temperatura.

En lo que respecta al tiempo, suele considerarse como parámetro el “tiempo de retención”, que se define como el número de días que una cantidad determinada de desechos debe permanecer en el digestor. Como mencionamos anteriormente, ese factor varía con la temperatura; por ejemplo una digestión a 10°C necesita de un tiempo de retención de 90 días, mientras que el trabajo a 15°C reduce el valor a 60 días; también puede mejorarse hasta un período de 28 días cuando la digestión se mantiene a 35°C. Transcurrido ese período todo el material liberó la totalidad de gas que era capaz de producir.

Otro factor importante resulta el sustrato, es decir el material que se procesa en el digestor. En general puede emplearse una variada gama de desechos orgánicos, tanto de origen animal como vegetal diluidos en agua para producir la mezcla adecuada. Entre la materia prima de origen animal se utilizan los diferentes estiércoles de origen vacuno, porcino, avícola y a veces humano; en este último caso debe eliminarse la posible presencia de jabones y detergentes que puedan estar presentes debido al aseo, que interfieren con el desarrollo de las bacterias, atentando contra el proceso de digestión. En cuanto al material vegetal, suelen usarse restos como tallos, hojas, raíces, cáscaras, etc.

En este sentido, para favorecer una buena producción de metano, es necesaria una buena relación entre la cantidad de átomos de carbono y de nitrógeno presentes en el sustrato (C/N). Tanto el carbono como el nitrógeno resultan indispensables para la descomposición, pero se necesita de una proporción adecuada para que el digestor funcione adecuadamente y no se formen mayores proporciones de gases que atenten con la cantidad de metano que se genera.

En general suele trabajarse con valores para la relación C/N entre 9 y 25. Esto implica que la composición del material de partida determinará la relación C/N. Por ejemplo el estiércol de cerdo y de vaca posee C/N en valores entre 2 y 16, mientras que el de gallina oscila entre 6 y 7 y el de caballo se encuentra en el orden de 25. Las materias primas de origen vegetal, al contener una proporción muchísimo más elevada de hidratos de carbono, poseen valores de C/N mucho mayores; por ejemplo en los tallos de trigo es del orden de 128, o para el caso del aserrín su C/N puede alcanzar hasta 500. Eso significa que si se utiliza un estiércol de vaca,

debe mezclársele con cierta cantidad de materia vegetal, de manera que el resultado de C/N de la mezcla se encuentre dentro de los valores óptimos para la digestión.

El otro factor que debe cuidarse en el sustrato es el pH, pues las bacterias involucradas en el proceso son extremadamente sensibles al mismo. En general se aconseja trabajar en el rango de la neutralidad, con valores de pH entre 6 y 8. De tratarse de valores fuera de ese rango debe acidificarse o alcalinizarse el sustrato para adecuarlo a dicho rango y de esta forma permitir el proceso de digestión.

Otra característica destacada del proceso de digestión es que los residuos sólidos y líquidos del mismo poseen un elevado potencial como fertilizantes, por lo que dichos productos, llamados Biol (el desecho líquido) y Biosol (el sólido), dan un valor agregado a la generación de biogás.

El digestor suele estar adaptado en la boca de salida del gas con una trampa de condensación para eliminar el agua que pueda acompañarlo, y con otra que posee virutas de hierro que actúan como trampa para el sulfuro de hidrógeno (el cual debe eliminarse si el biogás alimenta un motor de combustión interna para evitar la corrosión).

Si bien es mayoritaria la presencia de metano en el biogás, esto no permite equipararlo al gas natural en lo que respecta a su uso en un motor (como biocarburante). Para poder lograrlo es necesaria la eliminación de todo resto de impurezas hasta lograr un gas con contenido exclusivo de metano. Dicho producto, denominado biometano, sí puede usarse en un motor de combustión si se lo comprime previamente como sucede con el GNC.

Pirólisis

Se denomina pirólisis (aunque también se la suele llamar termólisis) al proceso de descomposición térmica de un material sin el agregado de oxígeno o aire. Para ello se requiere un recinto confinado, es decir sin renovación de aire.

A diferencia de la combustión, la cual necesita de la presencia constante de oxígeno, en la pirólisis ocurren transformaciones diferentes que suelen tener lugar justamente cuando dicho gas no está presente; veamos en la figura 18 el caso de la pirólisis de la celulosa:

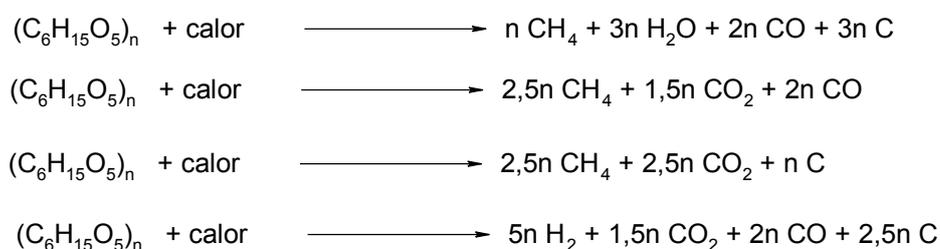


Figura 18. Reacciones involucradas en la pirólisis de la celulosa

Como puede verse el proceso genera una mezcla de gases como metano e hidrógeno, que pueden utilizarse como combustibles. El aprovechamiento de biomasa de desechos como insumo para la pirolisis puede resultar una buena opción.

Todo el proceso es endotérmico, por lo que debe mantenerse constantemente una fuente de calor para que funcione. Una de las formas más habituales de trabajo es a 400-500°C en períodos breves, una técnica denominada pirolisis rápida o flash.

Otra particularidad de este tipo de procesos es la obtención de carbón como producto sólido, un hecho que se ha aprovechado históricamente para la fabricación de carbón vegetal a partir de la pirolisis de la madera. En dicho proceso se distinguen tres etapas:

1.- Deshidratación de la madera y destilación de algunos aceites esenciales (a temperaturas entre 30 y 170°C) entre los cuales se destaca la mezcla llamada "ácido piroleñoso" o "vinagre de madera", constituida principalmente por ácido acético y metanol.

2.- Desprendimiento de gases y destilación de líquidos acuosos (170-270°C).

3.- Inicio de la pirolisis propiamente dicha, con gran desprendimiento de materiales volátiles y generación de carbón vegetal como residuo.

El carbón vegetal posee un poder calorífico que casi duplica al de la madera original, razón por la cual suele ser mucho más utilizado para la combustión. La cantidad de carbón que se logra en el proceso es muy variable, dependiendo del tipo de madera, del contenido inicial de agua y de las condiciones en que se haya realizado la pirolisis. El contenido de agua es importante, pues debe ser inferior al 20% para que ocurra la reacción. Como la madera recién cortada posee un porcentaje superior (entre 40 y 60% de agua), debe secarse previamente por otra vía, como por ejemplo el secado al aire.

Gasificación

Gasificación es la descomposición térmica rápida de un material (entre muchos otros la biomasa) por oxidación parcial, mediante la adición de cantidades limitadas de oxígeno o aire. De esta forma, y mediante el mismo tipo de reacciones vistas en la pirolisis, combinadas con otras reacciones simultáneas de combustión, se obtiene, además de cenizas, una mezcla gaseosa de variado poder calorífico compuesta principalmente por hidrógeno y monóxido de carbono.

La composición del gas es fuertemente dependiente de las condiciones en que se realiza la gasificación, sin embargo los gases generados suelen ser ricos en monóxido de carbono, hidrógeno y contenidos menores de dióxido de carbono, metano y otros hidrocarburos. Para el caso de la biomasa los parámetros del agente gasificante son los que determinan el mayor o menor poder calorífico del gas. La energía del gas de gasificación aumenta al utilizar diferentes

gasificantes y el aumento del poder calorífico sigue el orden de los siguientes agentes gasificantes: oxígeno, vapor de agua e hidrógeno.

Veamos a continuación y dependiendo del gasificante los gases principales presentes en la mezcla gaseosa: empleando oxígeno, se forma monóxido de carbono; con oxígeno y agua se forma monóxido de carbono e hidrógeno; con aire y agua se forma monóxido de carbono, hidrógeno y nitrógeno; y por último a presión y con el empleo de catalizadores puede formarse metano. El aprovechamiento energético de este gas de gasificación puede realizarse por combustión en calderas o en sistemas de co-combustión indirecta, introduciéndolo en una turbina de gas, un motor de combustión interna o en una pila de combustible.

Existen dos clases de productos de gasificación dependiendo del material comburente que se utilice: cuando se agrega aire (siempre en cantidades limitadas) el producto se llama "gas productor" o "gas pobre" y tiene un bajo poder calorífico.

Sin embargo, cuando en lugar de aire se utilizan cantidades limitadas de oxígeno puro el producto posee un contenido calorífico superior y se denomina "gas de síntesis" o *syngas*, que posee gran capacidad como combustible.

Biocombustibles sólidos

Aunque su concepto se origina en el descubrimiento y manipulación del fuego por parte de los primeros humanos, en la actualidad existen varios combustibles sólidos a base de biomasa. Partiendo de la combustión de la madera y el material celulósico en general, puede y se ha obtenido energía para calefacción prácticamente desde siempre; sin embargo hay otras variantes de sólidos que puede usarse como biocombustible.

En primer lugar tenemos al ya mencionado carbón vegetal. Como vimos, se obtiene a partir de la pirolisis de la madera y tiene un poder calorífico netamente superior a ésta, una propiedad que ha convertido al carbón (tanto el vegetal como el mineral) en el pilar de los inicios de la Revolución Industrial, tanto para generar vapor como electricidad. Sin embargo la liberación de inmensas cantidades de dióxido de carbono y hollín, junto a la posibilidad de formación del venenoso monóxido de carbono, llevaron al reemplazo de este tipo de combustibles.

En la actualidad se ha vuelto a las bases, pues se vuelve a aprovechar el material lignocelulósico como insumo para la quema directa. Los desechos de las industrias de la madera y agropecuaria pueden transformarse mediante procedimientos mecánicos en materiales con suficiente poder calorífico como para que resulte aprovechable y redituable. En general los materiales sólidos suelen compactarse hasta obtener pastillas con una densidad importante de material que según su forma y tamaño se denominan briquetas o pellets.

Estos materiales liberan una cantidad de calor importante al entrar en combustión a causa de su elevado grado de compactación. Se los suele administrar en la forma de pequeñas pastillas

cilíndricas que se queman directamente en una estufa u horno llamadas pellets, o, de otra forma igualmente compacta en la forma de ladrillos o bloques de mayor tamaño llamados briquetas.

La otra cara de los biocombustibles

Hemos visto en las ventajas que presentan actualmente la preparación y el uso de los biocombustibles. La mayoría se encuadran dentro de un marco de sustentabilidad tendiente a la disminución del uso de combustibles fósiles y la merma en las emisiones de dióxido de carbono y otros contaminantes en los motores de combustión interna. Sin embargo se han levantado varias voces que discuten el hecho de que las ventajas superen realmente a las desventajas, y postulan que los biocombustibles se han convertido en una nueva problemática desde el punto de vista ambiental. Veamos los diferentes puntos que resultan discutidos y a los que debe darse una solución si es que esta industria pretende ser realmente sustentable:

La estimación de los combustibles fósiles que se queman a lo largo de un año equivale a más de 400 veces la productividad de la vida vegetal actual del planeta. Eso significa que anualmente se utiliza una cantidad de material que equivale a las especies vegetales que se han desarrollado en el planeta durante cuatro siglos. Ese nivel de consumo implica el hecho que de ninguna manera podría remplazarse con biocombustibles a la totalidad de los combustibles fósiles que actualmente se utilizan. Los biocombustibles de origen vegetal resultan ser una alternativa más o un paliativo, pero nunca un sustituto.

A su vez, al poseer materia prima de origen vegetal, la industria de los biocombustibles establece una competencia por la tierra cultivable, desembocando de esta manera en una competencia con las industrias de alimentos, afectando los precios de los mismos. Esto significa que parte de la tierra que antes se utilizaba para el cultivo de alimentos, ahora se utiliza para el cultivo de especies destinadas a la fabricación de biocombustibles. Además la necesidad de tierra para los cultivos de vegetales clave para su producción, conduciría a una deforestación indiscriminada.

Este mismo factor también favorece la expansión de los monocultivos destinados a la obtención biocombustibles, una práctica que a mediano plazo agota los nutrientes del terreno volviéndolo improductivo para cualquier cultivo, incluso al límite de llegar a la desertificación del mismo.

Otro aspecto son las elevadas cantidades de agua que requiere tanto el cultivo y la producción de productos como la caña de azúcar o el maíz, sin sumar el volumen importante que debe usarse en las etapas de preparación del biocombustible en sí mismo. También se debe considerar, a la hora de hacer un balance comparativo con el petróleo, que en dichas prácticas agrícolas se utilizan diferentes derivados del petróleo en diferentes etapas del proceso, por ejemplo como fertilizantes o como insumos de la maquinaria agrícola. A pesar de que el balance de carbono en el uso y preparación de los biocombustibles como el bioetanol o el

biodiesel resulta favorable, el análisis no considera otros aspectos como la conexión del ciclo del carbono con el del agua y con los nutrientes.

También hay voces encontradas respecto al uso de los residuos de materia orgánica que pueden aprovecharse para prepara biocombustibles de segunda generación, pues en varios casos se trata de materia orgánica que suele utilizarse como fertilizante natural para nutrir y recuperar el suelo, la cual debería reemplazarse por otros métodos no necesariamente sustentables. Incluso el uso de aceite de fritura usado es discutible pues habitualmente no existe una infraestructura para su recolección y su procesamiento aumenta los costos hasta el punto de no llegar a ser rentable la preparación del biocombustible.

Respecto a las otras tecnologías de biocombustibles basadas en la termólisis, debemos considerar que tampoco es posible utilizar procesos térmicos como la pirólisis o la gasificación sobre la base de cualquier tipo de desecho a la hora de utilizarlo como combustible. Al igual que sucede con la incineración de materia orgánica, tienen lugar reacciones complejas, diferentes a las descomposiciones deseadas, que provocan la liberación de materiales muy tóxicos como ciertos metales pesados, dioxinas y furanos entre otros.

La Química Verde y los biocombustibles

En el marco de lo expuesto anteriormente, resulta válido preguntarse por la relación entre los biocombustibles y la Química Verde, visto que ésta tiende a la sustentabilidad, en tanto que la producción de los combustibles a partir de biomasa no siempre resulta de impacto favorable sobre medio ambiente y el desarrollo sustentable.

En primer lugar, podemos ver que la preparación de biocombustibles cumple con algunos de los principios de la Química Verde, pues generan productos eficaces pero no tóxicos, utilizan materias primas renovables, generan productos biodegradables, y en algunos casos enfatizan en el uso de la catálisis.

Sin embargo, también existen otros principios de cumplimentación más ambigua, que pueden o no efectivizarse dependiendo de el producto o el proceso de obtención, como los referidos a lograr economía atómica, evitar la derivatización, usar metodologías que impliquen una toxicidad reducida, el uso de sustancias auxiliares, y la reducción del consumo energético. Tampoco se evita, en la mayoría de los casos, la generación de desechos, aunque como vimos, éstos muchas veces pueden resultar la materia prima para obtener otros productos de gran valor agregado.

CAPÍTULO 6

Los combustibles fósiles

Introducción

A fin de poder hacer una mejor comparación de las tecnologías de biocombustibles en relación a los procesos químicos que los involucran, y para poder tener un mejor panorama del impacto ambiental y económico que implican ambas industrias, resulta necesario comprender los procesos que involucran la obtención de este tipo de combustibles no renovables.

De esta forma describiremos los distintos tipos de combustibles fósiles, haciendo mayor hincapié en la industria del petróleo, describiendo todos los procesos que resultan necesarios para obtener los diferentes productos combustibles, así como el tratamiento de los mismos para su mejor funcionamiento en un motor. A su vez describiremos los diferentes análisis físicos, químicos y mecánicos que se realizan para caracterizar adecuadamente a cualquier combustible.

El proceso que engloba la formación de los combustibles llamados fósiles, es la descomposición anaeróbica de materia orgánica, la cual conduce, luego de millones de años, a la formación de materiales que, al poseer átomos de carbono en gran proporción, resultan muy efectivos para la liberación (y el aprovechamiento) de energía por medio de su combustión. El material resultante depende de las condiciones en que las transformaciones han tenido lugar, y suele darse en tres formas: gas natural, carbón mineral y petróleo.

Petróleo

El petróleo consiste en una mezcla constituida por una emulsión que al romperse separa una fase acuosa y otra orgánica. Si bien su composición y su aspecto son muy variados,

pueden encontrarse varios puntos en común. En la tabla 4 se comparan las composiciones de un promedio de los petróleos mundiales y los nacionales:

Tabla 4. Composición elemental del petróleo

Elemento	Porcentaje Mundial	Porcentaje Nacional
C	80 - 89 %	85-86 %
H	10 - 15 %	13-14%
S	0,01 - 5 %	0,05-0,18%
O	0 - 7 %	0,02-0,26%
N	0 - 2 %	0-2%

Puede verse claramente que casi la totalidad corresponde a la presencia de átomos de carbono e hidrógeno, los cuales forman parte de una cantidad mayúscula de hidrocarburos. Sin embargo también existe un porcentaje menor de otros elementos oxigenados, nitrogenados y sulfurados que también forman parte del petróleo. Del análisis pormenorizado se encuentra que la mezcla que constituye el petróleo posee los siguientes constituyentes:

Constituyentes principales:

- Hidrocarburos: sólidos, líquidos y gases parcialmente disueltos entre sí.

”Impurezas” más importantes:

- Oxigenadas: ácidos grasos, ácidos nafténicos, fenoles, asfaltos, resinas.

- Sulfuradas: sulfuro de hidrógeno, mercaptanos, tiofeno, ácidos sulfónicos

- Nitrogenadas: quinoleínas, piridinas.

- Inorgánicas: silicatos (de calcio, magnesio, sodio, hierro y/o vanadio), agua salada, arena, arcilla.

Es de destacarse la presencia de azufre, el cual resulta muy corrosivo para los motores que utilizan derivados del petróleo, por lo que debe eliminarse posteriormente. Tan importante resulta este factor, que uno de los criterios para clasificar a los petróleos de diferente origen es en base a su contenido de azufre. Si un petróleo posee menos del 0,5% de azufre se lo denomina “petróleo dulce” y resulta mucho más limpio y de mejor calidad para

obtener combustibles. Por el contrario, el petróleo se denomina “agrio” cuando posee un porcentaje de azufre superior a dicho valor, necesitando de un procesamiento más exhaustivo para eliminar el contenido de azufre, hecho que implica un costo mayor del proceso. En base a los datos de la tabla merece destacarse que el petróleo de nuestro país es bastante dulce en comparación a la media mundial.

Yacimientos

El petróleo se origina en capas sedimentarias constituidas por rocas arcillosas denominadas *rocas madre*; Sin embargo, para que su explotación sea factible la mezcla suele migrar a rocas porosas y permeables denominadas *rocas almacén o recipientes* y quedar atrapados por algún material que impida que la migración los lleva hasta la superficie, en general se trata de rocas o arcillas impermeables denominadas *rocas protectoras*. De esta manera quedan establecidas reservas de petróleo llamadas comúnmente **trampas petrolíferas** en donde éste se acumula y conserva. Estas pueden ser de varios tipos, aunque las más comunes corresponden a pliegues anticlinales (elementos de terreno levantados a causa de movimientos geológicos en las capas sedimentarias).

Puede verse en la figura 19 que dentro de la trampa aparecen, en función de sus densidades, tres capas definidas: en la parte superior el gas natural, cuya capa no necesariamente existe en todos los yacimientos de petróleo; la fase intermedia la conforma el petróleo en sí mismo y, finalmente, la capa inferior que está formada por agua que contiene habitualmente una alta concentración de las sales minerales presentes en las región.

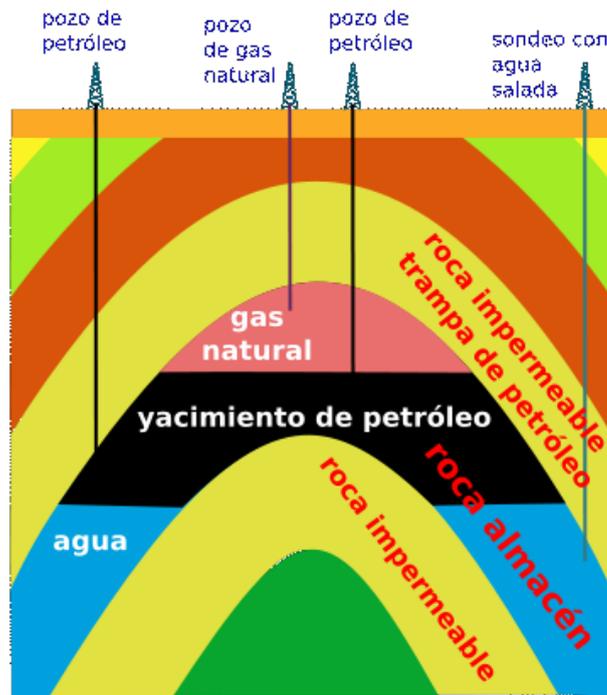


Figura 19. Esquema de una trampa petrolífera en un anticlinal

En cuanto a la distribución de las reservas de petróleo conocidas, en el mapa que muestra la figura 20 se muestra y comparan las mismas en todos los continentes. Puede verse que la zona con mayor cantidad de reservas conocidas es la de Medio Oriente.

En lo que respecta a nuestro país, existen diferentes cuencas petroleras, de las cuales se explotan las siguientes: Austral; Golfo de San Jorge, Neuquina, Cuyana y la del Noroeste. Todas ellas, mas otras consideradas no productivas se muestran en la figura 20.

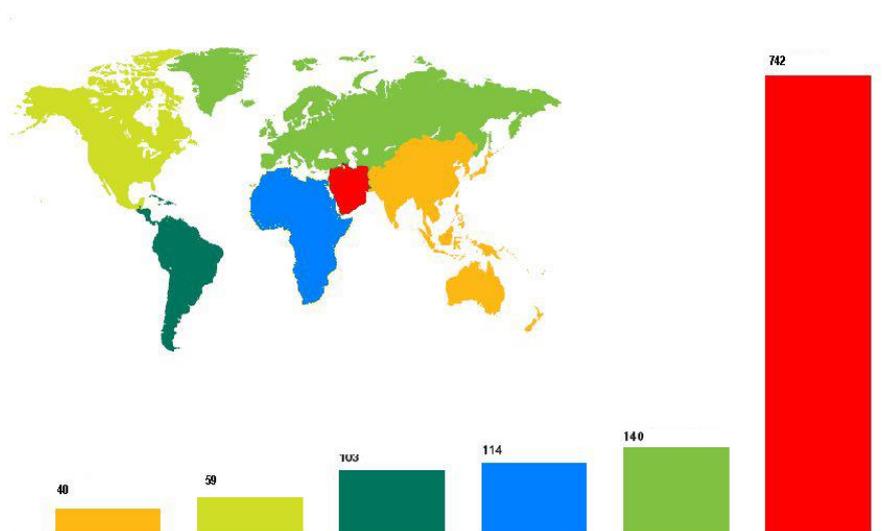


Figura 20. Distribución continental de yacimientos de petróleo en 2005, expresadas en miles de millones de barriles

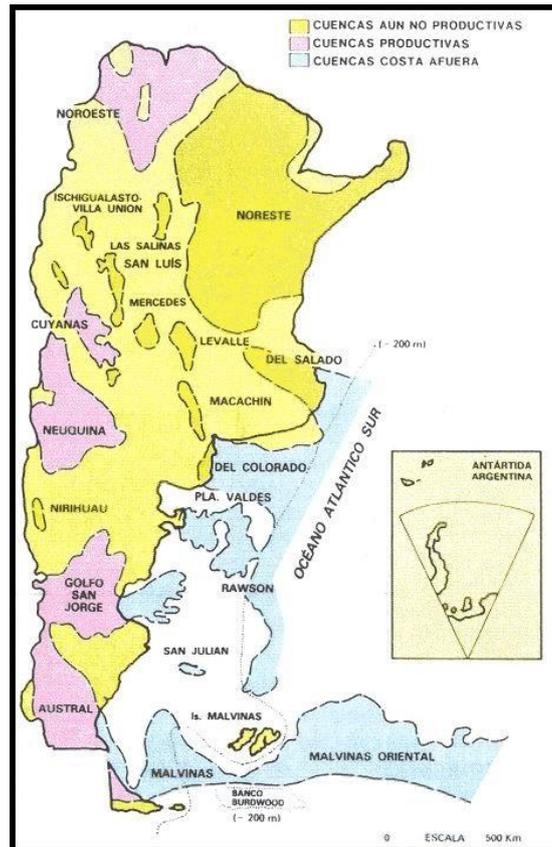


Figura 21. Cuencas petrolíferas de nuestro país

Prospección y exploración

Para tener una idea de la inversión y la logística que la industria del petróleo tiene implícita, veremos un panorama breve de las diferentes etapas de búsqueda. Las primeras etapas de investigación radican en la búsqueda de estructuras geológicas capaces de albergar petróleo, por lo que normalmente se orienta a la búsqueda de anticlinales, lo que implica:

1) Investigación en zonas de afloración:

- Acanilados en zonas costeras.
- Barrancas de ríos.
- Bordes de lagos y lagunas.
- Lechos de ríos secos.

2) Estudio de capas sedimentarias (se investigan las posibles deformaciones) y restos fósiles.

3) De esta manera se establecen "zonas favorables" en las que se seleccionan los lugares de mayor probabilidad en base a evidencias geográficas:

- Estado del terreno.
- Fotografía aérea.
- Imágenes satelitales.

4) Luego se procede a los métodos de exploración:

Métodos Geoquímicos:

- Análisis fisicoquímico de suelos.
- Análisis de hidrocarburos.

Métodos Geofísicos:

- Gravimétricos: Detectando las variaciones de la fuerza de gravedad en función de la composición del terreno en las diferentes zonas recorridas.
- Magnetométricos: Detectando variaciones en el campo magnético terrestre en función de las diferentes zonas recorridas.
- Sismográficos: Por reflexión y por refracción de ondas generadas por una detonación subterránea de explosivos.
- Resistividad/Conductividad eléctrica: La presencia de hidrocarburos suele modificar la conductividad eléctrica del suelo.
- Perfil de Rayos gamma: La radiación de ciertos isótopos presentes en algunas trampas petrolíferas suelen ser un indicio de las mismas.

En todos los casos lo que se obtiene es un indicio de la presencia de petróleo, no una certeza. Si la totalidad o la mayoría de estos estudios sugieren la presencia de un yacimiento factible de ser explotado, se procede a la perforación.

Extracción

Una vez definida la ubicación del yacimiento se procede a realizar la extracción del petróleo. Básicamente existen dos métodos:

- *Percusión:* Mediante un martillo o percutor (una varilla con una pieza de metal pesado en la base) se va golpeando la roca, deshaciéndola. Tiene un ciclo de elevación y caída que se repite una y otra vez para ir haciendo cada vez más profunda la perforación.
- *Rotación:* Mediante un trépano que va deshaciendo la roca a medida que avanza la rotación del mismo. Como la roca desgasta rápidamente el acero, suelen estar cubiertos con insertos, o con una capa exterior completa de carburo de tungsteno que posee una mayor resistencia a la erosión. En casos de mayor exigencia se agregan diamantes sintéticos y para rocas más duras se pueden utilizar diamantes reales.

En ambos casos existen conductos internos en el que circulan barros constituidos por una suspensión de bentonita (arcilla con la adhesividad adecuada) que cumple una función doble: Por un lado refrigerar la punta del trépano y por el otro arrastrar el material desmenuzado. De ambos métodos el más utilizado en la actualidad es el de rotación (un 90% de los casos).

El uso de barras articuladas permite perforar en cualquier dirección, lo que permite realizar extracciones que de otra manera resultarían dificultosas; por ejemplo en Comodoro Rivadavia se pueden realizar extracciones de yacimientos que se encuentran bajo la ciudad.

Otra etapa importante es el "cementado" del pozo, que se logra mediante el agregado de caños de acero y cemento a medida que la perforación avanza.

Con el fin de sostener el pesado equipamiento utilizado para realizar la perforación se construyen las clásicas torres asociadas usualmente a los yacimientos petrolíferos (figura 22).

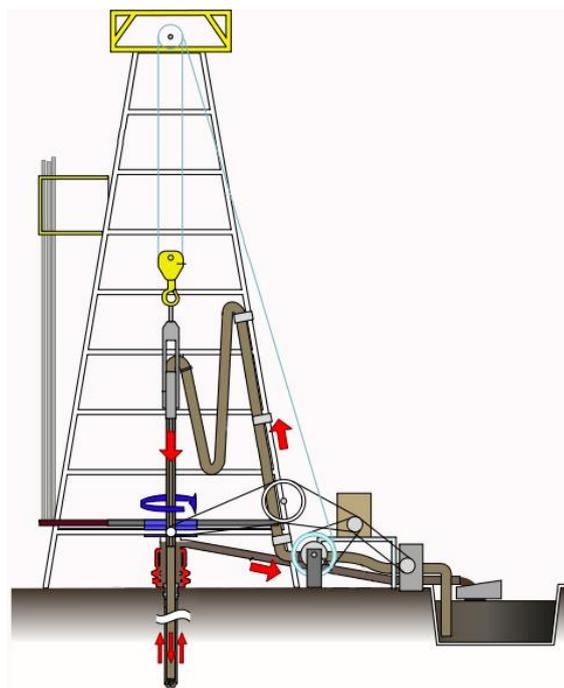


Figura 22. Esquema de una torre de extracción

Una vez accedido al yacimiento, tiene lugar una etapa de surgencia natural (espontánea) del petróleo, ayudado por el gas y la elevada presión a la que se encuentra en el yacimiento. El flujo se regula con válvulas. Luego de eso debe recurrirse al bombeo mecánico mediante las también clásicas bombas de balancín (figura 23).

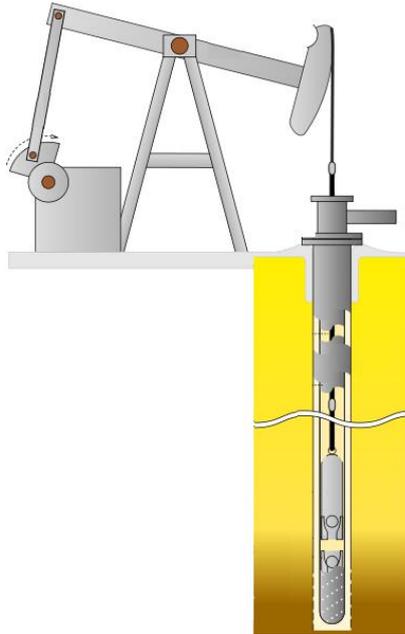


Figura 23. Esquema de una bomba de balancín

De esta forma se obtiene el petróleo denominado "crudo". La unidad más usual para la cuantificación del volumen de petróleo es el "barril", que corresponde a unos 162 litros.

$$1 \text{ barril} = 36 \text{ galones} = 0,162 \text{ m}^3 = 162 \text{ litros}$$

Tratamiento del crudo

Ya extraído el crudo, deben realizarse ciertas operaciones sobre el mismo a fin de facilitar su tratamiento posterior, las mismas suelen realizarse en las cercanías del pozo:

1) Separación de gases: Se separa parte de los hidrocarburos gaseosos que componen al petróleo; dentro de los mismos se clasifican en dos tipos:

- *Gas seco*: Se trata de aquellos gases que no resultan compresibles; se trata de los hidrocarburos de menos peso molecular: metano y etano. En general se lo utiliza como combustible en el yacimiento o se los suele derivar hacia los gasoductos.

- *Gas húmedo*: Son aquellos que pueden comprimirse y por ende envasarse en tubos (42-45 Kg) y garrafas (10-15 Kg). Se trata principalmente de los gases propano y butano en una mezcla llamada Gas Licuado de Petróleo (GLP).

2) Decantación: Se realiza en grandes depósitos decantadores a fin de separar la arena y parte del agua emulsionada (a menudo suele llamarse a esta etapa con el nombre de "deshidratación", aunque el término no resulta del todo adecuado).

Transporte y almacenamiento

El transporte del crudo hacia las refinerías o los puertos de exportación suele realizarse por diferentes medios, dependiendo de las vías de acceso.

- Oleoductos.
- Vagones-tanque ferroviarios.
- Buques petroleros.

También, aunque para una escala menor, se utilizan camiones-tanque con acoplado, aunque su uso suele darse para el transporte de los diferentes productos desde la destilería hacia los diferentes destinos.

En cuanto al almacenamiento se realiza en tanques que poseen las siguientes características generales:

- Son de forma cilíndrica y están contruidos de hormigón.
- Poseen un volumen de $1-1,5 \times 10^4 \text{ m}^3$.
- En su parte inferior poseen un serpentín por el que circula vapor y permite el calentamiento del petróleo, de manera de disminuir su viscosidad y facilitar su bombeo posterior.
- Para contener derrames o pérdidas se encuentran rodeados por terraplenes que tienen una capacidad igual a una vez y media el volumen del tanque.
- Están separados entre sí por distancias superiores al diámetro para minimizar, en caso de un posible incendio, el transporte del fuego de un tanque a otro vecino.
- En general están pintados de color blanco en su exterior para reflejar la luz solar para reducir la incidencia de calor por radiación.

- Poseen techos estancos con bocas con tubos con tejidos de alambre para derivar la carga estática.

Carbón mineral

Se trata de un tipo de roca de origen fósil de color negro, compuesta principalmente por carbono y con cantidades variables de otros elementos como hidrógeno, azufre, oxígeno y nitrógeno, por lo que resulta muy útil como combustible.

Su formación se debe a la descomposición de materia vegetal en zonas pantanosas, hecho que favoreció el desarrollo de reacciones anaeróbicas. La mayor parte de este material procede del período denominado carbonífero (hace unos 300 a 360 millones de años).

Según la presión recibida a lo largo del tiempo de formación, se logran carbones con diferente grado de carbonificación. De esta manera se encuentra una mayor proporción de carbono al más antiguo, que se encuentra a mayor profundidad, constituyendo la antracita el tipo de carbón con mayor porcentaje de carbono (un 95%), y por ende el energéticamente más eficiente en su combustión. Encima de las capas de antracita se encuentra la hulla (85% de C) y encima de ésta la lignita (60% de C). La capa más superficial la constituye la turba, una masa esponjosa de tono marrón grisácea que posee apenas un 10% de C. De manera inversa aumenta la proporción de agua presente en el carbón según sea menos antiguo y se encuentre más cerca de la superficie.

Las principales zonas de extracción de carbón mineral son China y los Estados Unidos. En nuestro país la zona donde existen los yacimientos más importantes se encuentran en la zona de la precordillera, siendo el lugar más destacado la zona de Río Turbio en la provincia de Santa Cruz y el área rica en turba en Tierra del Fuego.

El carbón mineral es la principal fuente del mundo para la generación de energía eléctrica, constituyendo el 40% de la producción mundial en centrales térmicas en las que se quema el carbón pulverizado. También se lo utiliza para la producción de coque, otra forma de carbón obtenida a partir de la pirolisis del carbón, ampliamente utilizado en la industria química.

El carbón no suele ser actualmente un buen combustible para motores de uso vehicular, pero sí pueden obtenerse combustibles líquidos sintéticos a partir de este a partir de dos procesos industriales:

Proceso Bergius: Consiste en una hidrogenación catalítica del carbón a alta presión. A temperaturas del orden de 400°C y a una presión de 700 atm, se produce, en presencia de óxidos y sulfuros de hierro, molibdeno o wolframio como catalizadores, la formación de hidrocarburos saturados con cadenas carbonadas que oscilan entre los 6 y los 18 átomos de carbono. Los productos que se separan por destilación corresponden a naftas, kerosene y gasoil sintéticos. Durante la Segunda Guerra Mundial, y ante la escasez de petróleo, el 70% de los combustibles, se produjo por esta vía.

Proceso Fischer-Tropsch: En este caso se lleva a cabo una etapa inicial de gasificación del carbón para producir gas de síntesis (recuérdese que se trata de una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono), el cual se convierte dentro de un horno de contacto a 10 atm y 280°C y en presencia de catalizadores como óxido de torio u óxido de magnesio, en una mezcla variada de hidrocarburos, la cual puede separarse tras una destilación fraccionada y una etapa de isomerización (reformado) en gas, naftas, kerosene y gasoil sintéticos. De hecho la mezcla obtenida mediante el proceso Fischer-Tropsch es tan rica y variada en hidrocarburos que a menudo suele llamársela “petróleo sintético”. Si bien la materia prima del proceso original de 1925 es el carbón, hemos visto que hoy en día el gas de síntesis puede obtenerse a partir de biomasa.

En ambos casos la producción sintética de las mezclas combustibles resulta económicamente mucho más costosa que la obtención de los mismos a partir de la destilación del petróleo.

Gas natural

El origen del gas natural es similar al del petróleo (de hecho llegan a formarse juntos en yacimientos llamados “asociados”), aunque su composición está conformada principalmente por hidrocarburos de bajo peso molecular, como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Composición del gas natural

Compuesto	Porcentaje
Metano	90-95%
Etano	3-4 %
Propano	0,4-2 %
Butanos	0,1-0,6%

También se encuentra acompañado por trazas de otros gases como helio, nitrógeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, agua y mercaptanos. En general su procesamiento es sencillo e implican etapas de secado para eliminar las trazas de agua, un proceso de eliminación del sulfuro de hidrógeno (llamada *endulzamiento*) y dióxido de carbono mediante su

absorción con aminas, y un proceso en el que se separa la posible presencia de hidrocarburos de mayor peso molecular como los pentanos, denominada desgasolinado.

Además de su administración directa, el gas natural puede expendirse en varias formas:

- **Gas Natural Comprimido (GNC)**: Gas natural almacenado a una presión de 200-245 atm, a la cual aún se encuentra en estado gaseoso. Suele aplicárselo casi exclusivamente como combustible en vehículos con motores del ciclo de Otto (nafteros), por lo que también suele llamárselo GNV (Gas Natural Vehicular).

- **Gas Natural Licuado (GNL)**: Gas natural licuado criogénicamente a -161°C y presión normal. En general suele trabajarse de esta forma cuando se lo desea transportar en vehículos, pues en esas condiciones su volumen se reduce unas 600 veces.

Los países con mayor producción de gas natural son los estados Unidos, Canadá y Rusia.

Los derivados del petróleo

Si bien puede realizarse su combustión, el petróleo en sí mismo es mucho más útil y efectivo en función de la gran variedad de productos que se obtienen a partir del mismo. Es por ello que el crudo es sometido a un proceso de destilación fraccionada que tiene la finalidad de separarlos, razón por la que la planta industrial en la que se lleva a cabo dicho proceso suele llamarse destilería o refinería. Al tratarse de una mezcla con infinidad de compuestos, resulta dificultoso separarlos individualmente, entonces lo que se obtiene es una serie de mezclas acotadas por un rango de punto de ebullición, llamadas a menudo "cortes" del petróleo.

La primera etapa consiste en llevar a cabo una destilación a presión atmosférica normal, denominada destilación primaria o *topping*, en la cual se calienta a temperaturas del orden de los 350°C , ingresando los vapores a una columna de fraccionamiento por la parte inferior, ascendiendo y condensando los vapores en función de su punto de ebullición; de esta manera, los vapores de menor punto de ebullición se separan en la parte superior, mientras que el resto de los diferentes cortes irán condensando en alturas inferiores, quedando en la parte inferior una fracción que no logra destilar en esas condiciones, denominada crudo reducido, que resulta ser la base para el producto denominado fuel-oil.

En la destilación primaria se obtienen los siguientes cortes, correspondientes a diferentes rangos de temperaturas de ebullición y con una composición de mayor cantidad de átomos de carbono en las cadenas hidrocarbonadas:

- Gas ligero ($T < 20^{\circ}\text{C}$).
- Eter de petróleo ($30\text{-}60^{\circ}\text{C}$)
- Ligroina (kerosene blanco) ($60\text{-}100^{\circ}\text{C}$)
- Naftas (gasolinas) ($100\text{-}200^{\circ}\text{C}$).
- Kerosene ($200\text{-}300^{\circ}\text{C}$).
- Gasoil ($275\text{-}350^{\circ}\text{C}$).

La fracción no destilable se somete a una segunda destilación en la cual, para no consumir demasiados recursos en aumentar aun más la temperatura, se trabaja a una presión reducida hasta valores del orden de 0,1 atm y temperaturas idénticas a las del *topping* (hasta 350°C). En esta nueva destilación fraccionada, llamada destilación secundaria, se obtienen nuevos cortes:

- Gasoil pesado
- Aceites lubricantes base
- Vaselina
- Parafinas

El residuo que no destila aún en estas condiciones se denomina crudo reducido al vacío y es la fuente de material para los asfaltos y el coque de petróleo.

Todos los productos de ambas destilaciones pueden, a su vez, purificarse aún más para dar lugar a sustancias puras de gran valor como solventes o reactivos químicos de una inmensa cantidad de industrias. Es tan grande la dependencia del petróleo en la actualidad que se estima que de todos los materiales sintéticos que nos rodean, cerca del 90% proviene del petróleo.

Si bien todos los productos de las destilaciones son orgánicos (y por tanto poseen carbono en su estructura, solo algunos cortes suelen utilizarse específicamente como combustibles en motores de combustión interna: la nafta (que posee hidrocarburos con cadenas de entre 8 y 11 átomos de carbono), el kerosene (con hidrocarburos entre C12 y C16) y el gasoil (el corte más “pesado” de los tres, pues posee cadenas hidrocarbonadas entre C16 y C20). El aumento en la longitud de las cadenas carbonadas explica la lógica diferencia en los puntos de ebullición de las mezclas, resultando más volátiles las naftas por el hecho de poseer hidrocarburos más de cadenas más cortas y menor peso molecular.

Naftas

Esta mezcla funciona adecuadamente en motores de cuatro tiempos que operan según el ciclo térmico de Otto (posee cuatro etapas de funcionamiento: admisión, compresión, explosión y escape). Debido a la forma de operación de dicho motor, en el cual el combustible debe ingresar en estado líquido en la forma de pequeñas gotas mezcladas con aire, cualquier combustible que opere en el mismo, debe poseer las siguientes características:

Volatilidad adecuada: para producir la ignición de la mezcla con una presencia mínima de hidrocarburos en estado gaseoso. Cuanta mayor proporción de combustible gaseoso posea la mezcla, menor potencia tendrá el impulso de su explosión. Debido a esto también debe controlarse la presencia de compuestos volátiles en una nafta, pues una proporción elevada de éstos provocaría un mal impulso y la parada del motor, mientras que un contenido excesivamente bajo podría causar dificultades en el arranque, el cual depende del encendido inicial de esa pequeña cantidad de gas.

Bajo contenido de alquenos: La presencia de alquenos en una nafta favorece, en las condiciones de funcionamiento del motor, la tendencia a la formación de gomas debidas a la polimerización de los compuestos insaturados. Debido a ellos suele realizarse a las naftas un tratamiento con ácido sulfúrico concentrado y un filtrado posterior con arcillas activadas o una hidrogenación catalítica para eliminar los alquenos y mejorar el comportamiento en el motor del combustible.

Bajo contenido de azufre: Como ya mencionamos, la presencia de compuestos sulfurados favorece la corrosión de las partes metálicas del motor. En general se realiza un tratamiento de hidrogenación catalítica tendiente a eliminar el contenido de azufre, proceso denominado hidrodesulfuración.

Antidetronancia adecuada: para que la explosión del combustible le otorgue un impulso suave al pistón, la misma debe ocurrir en el momento justo; si ocurre antes o después el pistón se encontrará en una posición diferente, lo que por un lado disminuye la potencia del motor (porque no aprovecha al máximo las posibilidades del pistón) y por el otro la explosión a destiempo genera un repiqueteo sonoro denominado "pistoneo". Debido a ellos, las naftas deben poseer la característica de explotar en el momento adecuado, propiedad que se denomina antidetronancia.

Dicha propiedad se cuantifica en función de un valor denominado *índice de antidetronancia*, el cual se basa en una escala numérica que otorga el valor 0 a un compuesto que explota muy a destiempo como es el *n*-heptano, y le asigna el valor 100 a otro hidrocarburo que se comporta perfectamente respecto al momento de la detonación, el *iso*-octano (2,2,4-trimetilpentano), al cual se le asigna el valor 100 de la escala.

En función de ello, el índice de antidetronancia también es llamado índice de octanos, o simplemente "octanaje", e indica el comportamiento que tiene una nafta en comparación con la mezcla de heptano e isoctano que se comporta de forma idéntica en un motor.

Este índice no se trata de una propiedad química o física puntual del combustible, sino que es un parámetro que indica cual es el comportamiento del mismo en un motor a explosión. De hecho el índice de octanos es el criterio con el que se clasifica generalmente a las naftas de diferente calidad (y precio):

- Nafta de grado 1 o “normal”: entre 90 y 95 octanos.
- Nafta de grado 2 o “súper”: entre 96 y 97 octanos.
- Nafta de grado 3 o “premium”: superior a 98 octanos.

Igualmente puede hacerse una relación entre la estructura de los hidrocarburos que conforman una nafta y su índice de octanos. Se observa que en general los hidrocarburos lineales presentan una baja antidetonancia, mientras que aquellos con muchas ramificaciones explotan de manera adecuada.

El octanaje de una nafta puede mejorarse por un proceso de isomerización llamado *reforming*, en el cual mediante un calentamiento en presencia de cloruro de aluminio se favorece la generación de isómeros con mayor cantidad de ramificaciones a partir de los respectivos hidrocarburos lineales. El proceso se inicia con la inyección de un haluro de alquilo, el cual en presencia del cloruro de aluminio promueve la formación de carbocationes, promoviendo así una reacción en cadena en la que, al estabilizarse más fácilmente los carbocationes terciarios, se favorece la formación de los isómeros *iso*, *neo* y *ter* (figura 24).

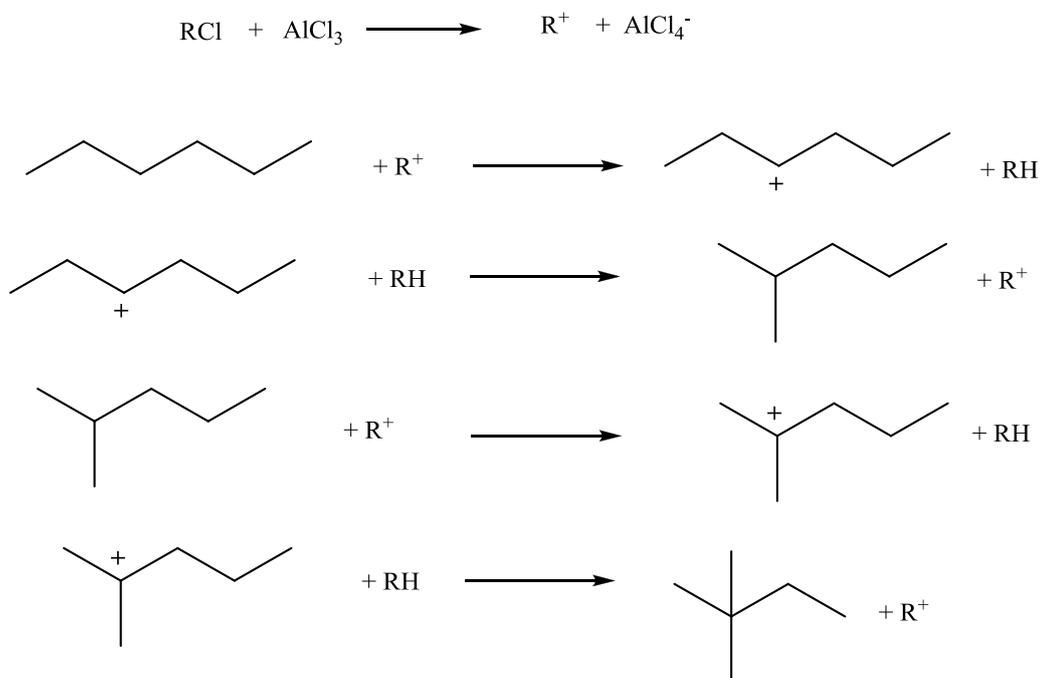


Figura 24. Reforming de un alcano presente en una nafta

Otra forma de mejorar el octanaje de una nafta es mediante aditivos, entre los cuales los más efectivos son éteres como metil-ter-butil éter (MTBE), etil-ter-butil éter (ETBE), ter-amilmetil éter (TAME), diisopropiléter (DIPE); también la mezcla con etanol mejora la antidetonancia de este tipo de combustible. Otro compuesto muy efectivo en la mejora del octanaje, el predominante durante casi todo el siglo XX, es el plomotetraetilo; la limitación en su uso dio lugar a la aparición de las naftas “sin plomo”, en las cuales no se utiliza este aditivo.

Gasoil

Esta mezcla funciona adecuadamente en motores de cuatro tiempos que operan según el ciclo térmico de Diesel (posee cuatro etapas de funcionamiento: admisión, compresión, inyección y escape). Debido a la forma de operación de dicho motor, en el cual ingresa el aire, que resulta comprimido por el propio pistón, aumentando su temperatura hasta valores en los cuales al inyectarse el combustible mediante un inyector, se logra la ignición del combustible con el comburente. Cualquier combustible que opere en el mismo, debe poseer las siguientes características:

Temperatura de ignición baja: resulta necesario para lograr que la mezcla combustible reacciones frente al oxígeno del aire en las condiciones de presión y temperatura habituales del motor. De poseer la mezcla una temperatura de ignición mayor, la mezcla no encenderá adecuadamente y el motor perderá potencia.

Ausencia de compuestos pesados: Este requisito es indispensable para evitar que se tapen las boquillas de los inyectores por solidificación de algún compuesto o por condensación de microgotas. En general esto se logra con una composición mayoritaria de hidrocarburos lineales; hasta tal punto este factor es importante que se le asigna una escala similar a la de octanos para describir este comportamiento de un combustible diesel: el llamado índice de autoignición o índice de cetanos otorga el valor 0 al 1-metilnaftaleno, un compuesto que enciende lentamente en estos motores, mientras que se le asigna el valor 100 a n-hexadecano, también llamado “cetano” debido a su comportamiento óptimo en un motor. Al contrario que en el caso de las naftas, el gasoil tiene una mejor performance cuanto más cadenas lineales posee la mezcla.

Bajo contenido de azufre: En este caso también sucede que la presencia de compuestos sulfurados favorece la corrosión de las partes metálicas del motor y también suele realizarse un tratamiento de hidrogenación catalítica para disminuir su contenido. Para el caso del gasoil, el criterio para dividirlo según su calidad se basa en este factor y no en el índice de cetanos:

- Gasoil de grado 1: Hasta 3000 ppm de azufre.
- Gasoil de grado 2: hasta 1500 ppm de azufre.
- Gasoil de grado 3: hasta 150 ppm de azufre.

Kerosene

Se trata de un combustible que antiguamente se aprovechaba para calefacción e iluminación. Dado que su punto de congelación es -40°C , suele aprovecharse en una forma refinada como combustible de motores que trabajan a temperaturas muy bajas, siendo el principal ejemplo los motores de turbina de los aviones. En ese sentido suele comercializarse y clasificarse a este tipo de cortes con el nombre de *Jet Propellants* (JP), utilizándose en la actualidad los denominados JP-5 y JP-8 (también denominados Jet-A). En cuanto a su rendimiento en motores a pistón, el kerosene funciona en motores tipo Diesel, aunque los gases que se producen en su combustión son bastante más sucios. En general suelen realizarse tratamientos para reducir el contenido de azufre y eliminar la presencia de hidrocarburos aromáticos.

Fueloil

La mezcla que conforma el residuo de la destilación primaria, también resulta efectiva como combustible; sin embargo, al poseer una cantidad mucho más amplia de componentes no resulta adecuada para ser usada en motores de combustión interna. En general está compuesto por moléculas que poseen cadenas con más de 20 átomos de carbono y por lo tanto posee tanto sólidos como líquidos presentes en su conformación. Su uso como combustible suele estar acotado a calderas, hornos o en generadores de energía termoeléctrica.

Parafinas

Se trata de una mezcla de alcanos que es sólida a temperatura ambiente, con puntos de fusión entre 47°C y 70°C . Su uso como combustible es bastante restringido, siendo popular su uso en la fabricación de las velas, en las cuales se queman los gases que se liberan al producirse el craqueo de las moléculas largas que posee la parafina generando hidrocarburos gaseosos, los cuales generan la llama al quemarse. Al depender la producción de esos gases de la quema de la parafina, la llama de una vela logra tener una duración extensa.

A pesar de ser poco útiles como combustibles, las parafinas constituyen la materia prima para la obtención de un mayor volumen de naftas, un combustible con cadenas de hidrocarburos más cortas. Para eso se las somete a un proceso de fractura de cadenas, denominado *cracking*, o “craqueo”, en el cual se somete a las parafinas térmicas (*cracking térmico*) o catalíticamente (*cracking catalítico*) a temperaturas elevadas (hasta 490°C) en presencia de partículas de óxido de aluminio y sílice y platino como catalizadores. De esta manera se obtiene una mezcla rica en hidrocarburos de menor peso molecular, lográndose mediante este proceso que una destilería obtenga una fracción de naftas mucho mayor a la inicialmente obtenida en la destilación primaria.

CAPÍTULO 7

Ensayos de control de combustibles líquidos

Introducción

Los combustibles líquidos (tanto los obtenidos a partir del petróleo como los procedentes de biomasa) deben cumplir ciertos requisitos de calidad a la hora de su uso en motores, por lo que resulta necesario el control permanente de los mismos para garantizar su calidad; es por ello que se realizan diferentes ensayos de propiedades físicas, químicas y mecánicas a fin de evaluar tres características generales: volatilidad, comportamiento durante la explosión y la composición química. En todos los casos se utilizan las normas internacionales estandarizadas ASTM (*American Society for Testing Materials*).

Evaluación de la volatilidad

Destilación

La destilación simple de un líquido constituido por una mezcla de componentes resulta de gran información a la hora de analizar su contenido de componentes volátiles. Este análisis se basa en el registro de una curva de destilación de 100 mililitros de combustible, construida en base a la temperatura de los vapores en la salida de la columna en función al volumen de líquido destilado.

La forma que presenta la curva registrada (figura 25), arroja información sobre el comportamiento de dicho combustible en el motor.

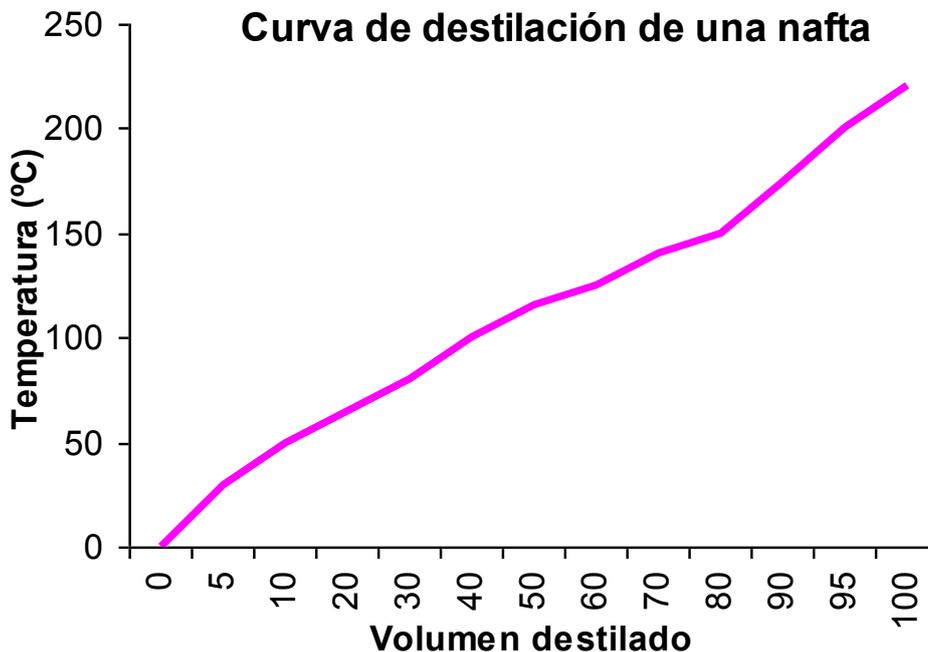


Figura 25. Curva de destilación de una nafta

Cualquier desviación a la forma de la curva de una nafta óptima, implicará la presencia de mayor o menor proporción de componentes que modificarán la volatilidad de la nafta, y por lo tanto cambiarán el rendimiento de la misma dentro del motor, generando diferentes problemas.

Por ejemplo en la curva a de la figura 26, vemos un combustible que posee un contenido bajo de componentes muy volátiles, pues ya a poco volumen destilan componentes con puntos de ebullición mayores a los de una nafta promedio. Eso significa que durante el arranque en frío habrá una cantidad insuficiente compuestos volátiles y por lo tanto no se logrará la explosión de la mezcla.

La curva b, presenta un caso opuesto, en el que hay demasiada proporción de compuestos muy volátiles, cuya presencia en el combustible traerá el problemas de un exceso de los mismos que atentará con la explosión de la mezcla en caliente.

La combustión de los componentes de la nafta que destilan como parte de la mitad del volumen del combustible, suele estar asociada al comportamiento del motor en los esfuerzos que realiza para acelerar durante recorridos cortos, o “piques” (curvas c y d).

La fracción destilada final, la que posee los componentes menos volátiles de la nafta, es la que hace su aporte en los recorridos largos del motor, como puede verse en las curvas e y f.

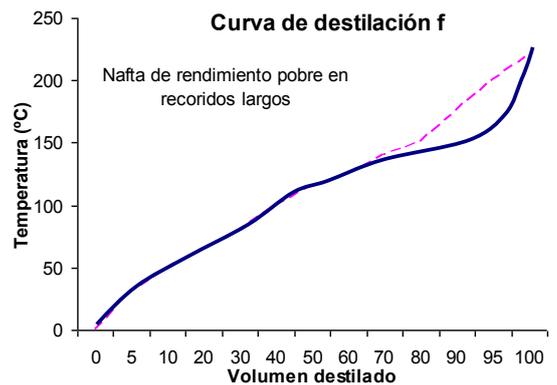
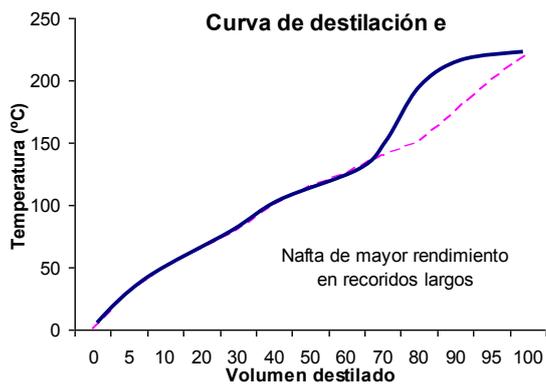
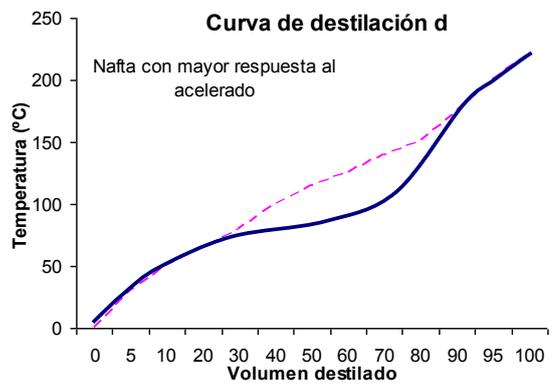
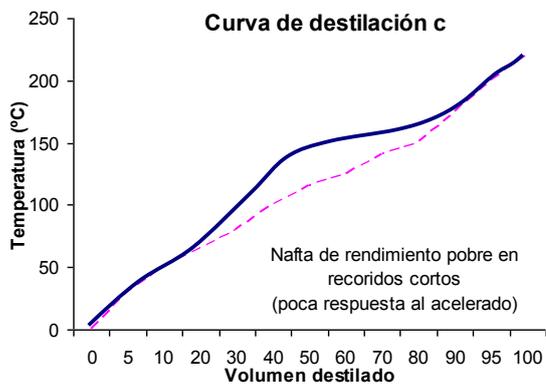
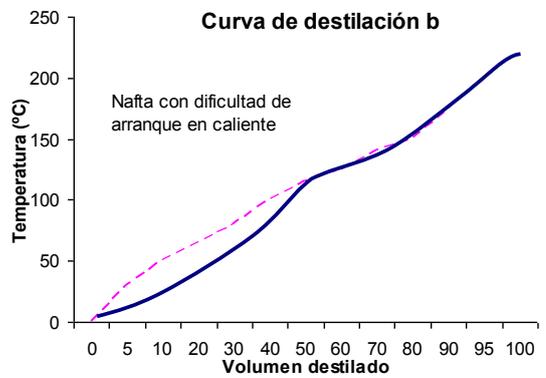
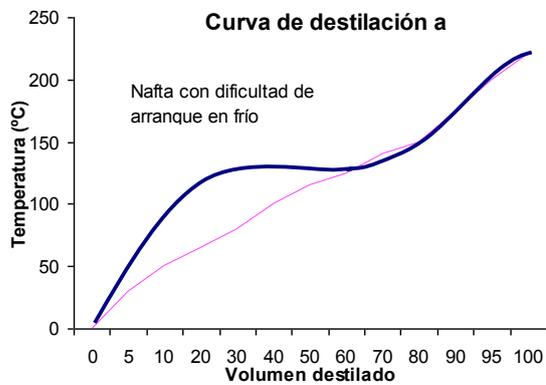


Figura 26. Diferentes curvas de destilación de una nafta

Para el caso del gasoil también puede construirse la misma curva (figura 27), aunque en este caso las temperaturas registradas son mayores debido a que se trata de hidrocarburos de mayor peso molecular y por ende de mayor punto de ebullición:

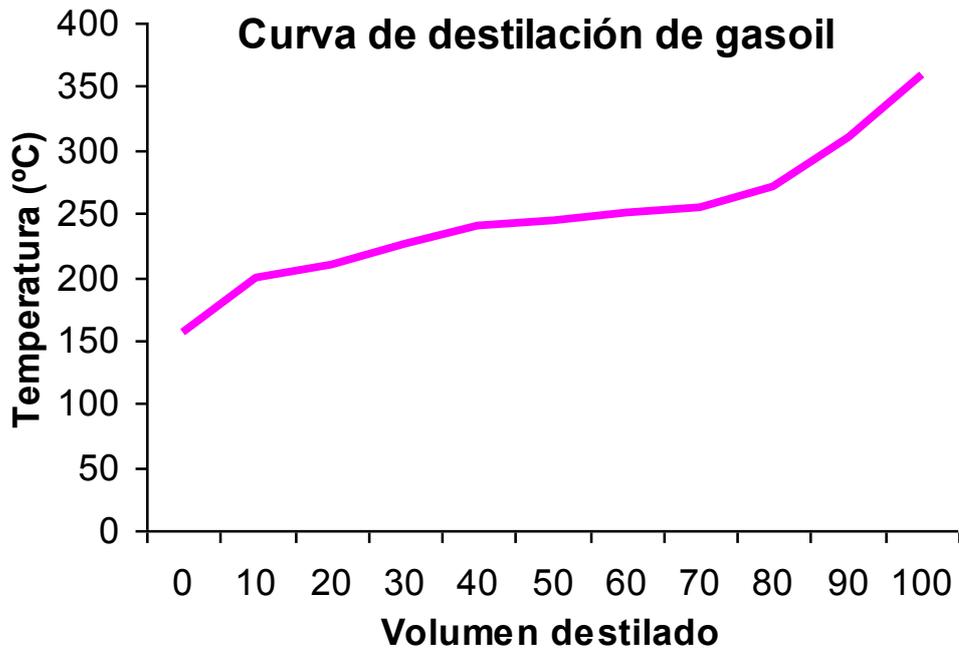


Figura 27. Curva de destilación de un gasoil

Presión de vapor

Otro ensayo relativo a la volatilidad es la medición de la presión de vapor. En general se utiliza la técnica de Reid, en la que se determina dicha presión a 37,8 °C (que es el equivalente a 100°F, pues se trata de una norma de estandarización de EE.UU.), siendo el resultado una aproximación directa al contenido de volátiles que el combustible posee.

Evaluación del comportamiento durante la explosión

Índice de octanos

Como se trata de una propiedad que remite específicamente al comportamiento del combustible durante la explosión dentro del cilindro, la determinación del índice de

antidetonancia de una nafta, necesariamente debe realizarse en un motor. Básicamente se compara el comportamiento de la nafta con el de mezclas de *n*-heptano e *iso*-octano con diferente proporción (y por lo tanto distinto octanaje). Aquella mezcla que tenga una potencia explosiva idéntica al del combustible ensayado será la que defina su índice de octanos.

Existen dos condiciones estandarizadas para realizar esta determinación: una que emula la situación del manejo en ciudad (con varias etapas de aceleración y frenado), y otra que simula un comportamiento más adecuado al de manejo en la ruta (con pocas aceleraciones y por lo tanto un comportamiento explosivo más regular). El resultado obtenido en el primero de esos ensayos se denomina RON (*Research Octan Number*) y es el que se utiliza para clasificar a las naftas; el valor obtenido en el segundo ensayo, denominado MON (*Motor Octan Number*) no será exactamente igual debido a que el motor tiene una exigencia diferente en cuanto al flujo de combustible.

En general el MON, debido a las condiciones menos exigidas, arroja valores menores que el RON. Incluso a veces suele utilizarse otro índice, denominado “sensibilidad del combustible”, que es el resultado de la diferencia RON-MON.

Debe recordarse que el índice de octanos se basa en una escala definida en base al comportamiento de sustancias químicas, por lo que existen algunas sustancias que presentan un comportamiento mejor que el *iso*-octano, por lo que su octanaje superaría el valor 100. Uno de estos ejemplos es el etanol, por lo que el bioetanol puro posee un índice de antidetonancia superior al de cualquier nafta, y por esa misma razón se lo suele utilizar como aditivo para mejorar el octanaje.

Índice de cetanos

A diferencia del octanaje de una nafta, para el caso del gasoil, el índice de cetanos se calcula indirectamente en base a varias propiedades del combustible, como su densidad y la temperatura a la que destila el 10%, el 50% y el 90% del gasoil.

Evaluación de la composición

Humedad

La humedad no suele ser un problema en los combustibles derivados del petróleo, debido a que al ser polar no resulta afín a los hidrocarburos; sin embargo, suele ser un problema importante la acumulación de agua en los depósitos antiguos de combustible. Además, en el caso de los biocombustibles resulta mucho más factible la presencia de agua, no solo por

cuestiones de polaridad, sino por la presencia de ésta en la preparación de bioetanol y biodiesel. Incluso la presencia de agua, y la determinación de su contenido, también es importante para el caso del petróleo crudo en que se encuentra formando una emulsión con los hidrocarburos.

La cantidad de agua en sustancias insolubles suele determinarse mediante un ensayo de ebullición a reflujo, adaptando al equipo una trampa de Dean-Stark, en la cual el agua que condensa quedará retenida debido a que se trata del líquido más denso de la mezcla y por lo tanto permitirá medir su volumen.

Densidad

La densidad de los líquidos puede determinarse tanto por picnometría como por densimetría. Para el caso del petróleo crudo, la densidad suele describirse en base a la escala API (*American Petroleum Institute*), lográndose un cambio de escala a valores en los que se suele clasificar a los distintos tipos de petróleo:

$$\text{Densidad API} = (141,5 / \bar{\rho}_{60^{\circ}\text{F}}) - 131,5$$

($\bar{\rho}_{60^{\circ}\text{F}}$:densidad relativa a 60°F)

Con esta escala se clasifica a los distintos tipos de crudo en base a su densidad:

- Crudos livianos > 31,1 °API
- Crudos medianos > 22,3 °API
- Crudos pesados > 10 °API
- Crudos extrapesados < 10 °API (serían más densos que el agua)

Factor de Kuop

Es un parámetro que permite caracterizar al petróleo o sus derivados líquidos en base a su composición química. Se define a partir de valores obtenidos en la destilación estandarizada y a su densidad relativa:

$$K = (T_{\text{vol medio}})^{1/3} / \bar{\rho}_{60^{\circ}\text{F}}$$

El valor del factor de Kuop también permite hacer una clasificación de los petróleos crudos basada en su composición:

- Crudos de base aromática K = 10
- Crudos de base nafténica K = 11
- Crudos de base mixta K = 12
- Crudos de base parafínica K = 13

Viscosidad

En general suelen usarse viscosímetros de vidrio como por ejemplo el de Ostwald, y resulta ser un parámetro muy importante a la hora de evaluar la fluidez del líquido (parámetro inverso a la viscosidad).

Poder calorífico

Es la energía liberada cuando se somete el combustible a un proceso de oxidación rápido, de manera que el combustible se oxida totalmente desprendiendo calor. Se trata del calor de combustión. Generalmente suelen usarse calorímetros de mezclas diseñados específicamente para ensayos de combustión.

Punto de inflamación (*flash-point*)

Se define así a la temperatura mínima a la cual los vapores de un líquido combustible se inflaman al entrar en contacto con una llama. Existen dos técnicas diferentes para realizar la determinación de este parámetro, conocidas como técnica del vaso abierto de Cleveland, y la técnica del vaso cerrado de Perski-Martens.

Punto de autoignición

Se define como la temperatura a la cual la mezcla del combustible con aire se inflama espontáneamente.

En la tabla 6 se resumen los puntos de inflamación y de autoignición de diferentes combustibles:

Tabla 6. Puntos de inflamación y autoignición de combustibles de distinto tipo.

Combustible	Flash-point	Temperatura de autoignición
Etanol	16.6 °C	363 °C
Nafta	- 43 °C	246 °C
Diesel	>62 °C	210 °C
Kerosene	>38°-72 °C	220 °C
Biodiesel	>130 °C	>300°C

Punto de anilina

Es la temperatura mínima a la cual resultan miscibles una mezcla de volúmenes iguales del combustible con anilina. El resultado de ello es un indicio del contenido de hidrocarburos aromáticos que posee el combustible; a mayor contenido de hidrocarburos aromáticos, más soluble será en anilina y por ende la temperatura a la que ello suceda (el punto de anilina) será menor.

Para el caso del gasoil, el punto de anilina (PA) se relaciona con la posibilidad de autoinflamación, existiendo el *índice Diesel* (ID), definido en base al PA y a la densidad API:

$$ID = PA \times API / 100$$

Ensayos de congelación

En general se basan en el registro de la temperatura de solidificación del líquido, o algunos de sus componentes, debida al enfriamiento del mismo. Existen diversos parámetros y ensayos basados en dicho concepto:

- **Punto de enturbiamiento, punto de neblina o punto nube** (*cloud point*): Es la temperatura mínima a la que comienzan a formarse los primeros cristales de parafina en el combustible debido al enfriamiento del mismo.

- **Punto de congelación**: Es la temperatura mínima a la que solidifica la totalidad del combustible debido al enfriamiento del mismo.

- **Punto de escurrimiento**: Temperatura mínima por debajo de la cual un líquido tiende a no fluir libremente.

- **Punto de obstrucción de filtro frío (POFF)**: Es la temperatura mínima a la que se obstruye totalmente un filtro de papel debido a la formación de parafinas.

CAPÍTULO 8

Técnicas de preparación de biocombustibles

En el presente apartado se presentan algunas técnicas de laboratorio relacionadas con la preparación de biocombustibles. Se describe la preparación de bioetanol y biodiesel, así como un ensayo de pirólisis de la madera.

Preparación de bioetanol

Moler el grano de maíz (con o sin el germen) y cocinar hasta dar una pasta. Agregar la enzima diastasa en forma de malta (cebada germinada, secada y molida) y mantener la mezcla a 40 °C hasta que todo el almidón se halla convertido en el azúcar maltosa (esto puede verificarse con el agregado de reactivo de Lugol). La solución obtenida se conoce con el nombre de mosto.

Enfría a 20 °C, diluir a un 10 % de maltosa y agregar un cultivo puro de levadura de cerveza (*Saccharomyces cerevisiae*). La levadura produce dos enzimas, maltasa, que convierte la maltosa en glucosa y Zimasa, que convierte la glucosa en dióxido de carbono y alcohol. La temperatura debe mantenerse por debajo de los 32 °C para evitar la destrucción de las enzimas.

Después de 40-60 horas la fermentación estará completa. Separar por filtración el líquido del material sólido y destilarlo mediante destilación fraccionada. Primero destilará una pequeña cantidad de acetaldehído (p.eb 21 °C) y a continuación alcohol de 95 %.

Una mayor purificación puede hacerse mediante una destilación fraccionada del producto de la destilación anterior.

Preparación de biodiesel

Los reactivos de partida van a ser aceite vegetal o grasa animal, alcohol metílico e hidróxido de sodio.

1) Reacción

- *A partir de aceite nuevo*

Disolver 3,5 g de hidróxido de sodio en 200 cm³ de metanol (se formará metóxido de sodio). Agregar esa solución a 1 litro de aceite vegetal contenido en un balón y calentar la mezcla entre 45°C y 50°C agitando durante una hora. Dejar reposar.

Se observará la formación de dos fases: la superior es el biodiesel y la inferior la glicerina. Separarlas utilizando una ampolla de decantación.

- *A partir de aceite usado*

Si bien la técnica de preparación es similar, deben llevarse a cabo algunas operaciones previas:

- Filtrar el aceite para separar posibles restos de sólido.
- Debe titulárselo tomando 1 cm³ de aceite disuelto en 10 cm³ de iso-propanol y agregando solución de hidróxido de sodio 0,1% P/V gota a gota hasta viraje del indicador fenolftaleína.
- La cantidad de hidróxido de sodio a usar se basa en el resultado de la titulación anterior. Se usará 1 gramo de NaOH por cada cm³ gastado en la titulación, sumado a la cantidad mencionada en la técnica anterior (3,5 gramos por cada litro de aceite).
- Calentar el aceite a 100°C durante unos minutos para secarlo y luego enfriar hasta 45-50°C. En ese punto agregar la solución de metóxido de sodio y continuar como en el caso anterior.

Una vez terminada la reacción se la deja reposar, al cabo de una hora la glicerina se deposita en el fondo del recipiente, mientras que en la parte superior se encuentra el biodiesel. La soda cáustica y el alcohol en exceso (en cualquiera de los casos el metanol se agrega en exceso) se encuentra en la fase de la glicerina, pero muy poco queda en el biodiesel, por lo que es necesario lavar el combustible.

2) Lavado

El lavado tiene como objetivo eliminar todos aquellos compuestos disueltos en el biodiesel, estos pueden ser la soda cáustica, la glicerina, el alcohol, y el jabón que se pudo haber formado en la reacción. Todos ellos presentan una buena solubilidad en agua y mala en biodiesel; así, sabiendo que el biodiesel es insoluble en agua, el lavado consiste simplemente en agregarle agua al combustible y agitarlo bruscamente por un tiempo de cinco minutos. Al dejar reposando para separar las fases, el agua con las impurezas irá al fondo del recipiente y el biodiesel quedará en la parte superior. El lavado se debe repetir hasta que el agua se observe limpia (libre de jabón), generalmente con dos lavados es suficiente.

El lavado es la primer prueba de calidad del biocombustible, si al agitarlo con agua, el biodiesel posee mucho jabón, la emulsión que se forma no se separa o tarda mucho en separarse, si el biodiesel obtenido es de buena calidad la separación se logra en unos minutos.

3) Secado

Antes de utilizar el biodiesel en el motor, es vital extraer toda el agua del combustible, pues el agua puede resultar muy dañina para el motor. El secado con burbuja consiste en conectar un compresor de aire a un trozo enrollado de tubería de cobre con pequeños agujeros. Aquí es importante tener un recipiente ancho para crear la mayor superficie de contacto posible entre el aire y el biodiesel. También es importante tener un sistema de burbujeo que pueda transmitir burbujas a través de todo el biodiesel. Este método se basa en crear una interfase entre el biodiesel y el agua para contribuir a que esta se evapore del biodiesel.

4) Almacenamiento

El biodiesel obtenido de esta forma no requiere un almacenaje especial. Ya puro o en mezcla con gasoil puede ser almacenado igual que este último, excepto en tanques de concreto. En niveles altos de mezcla puede deteriorar gomas o materiales de poliuretano. Al tener una temperatura de autoignición elevada, resulta seguro para el transporte y se manipula como el gasoil.

Pirólisis de la madera

Llenar un tubo de ensayo con viruta de madera y poner un tapón de corcho con una salida conectada a un tubo de vidrio, que se sumerge dentro de un erlenmeyer conteniendo agua, el tapón del erlenmeyer debe tener una salida a la atmósfera como se muestra en la figura 28.

Calentar el tubo de ensayo con mechero, hasta que no se observe más burbujeo en el erlenmeyer. El producto principal será ácido piroleñoso, mientras que el residuo del tubo será carbón vegetal.

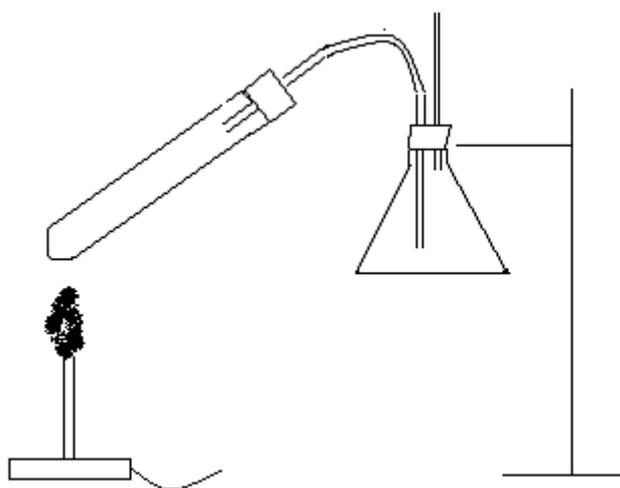


Figura 28. Equipo para destilación seca de la madera

Bibliografía

- Anastas, P.T., Warner, J.C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford: Oxford Science Publications.
- Aresta. M., Dibenedetto. A., Nocito. F., Ferragina. C. (2009). "Valorization of bio-glycerol: New catalytic materials for the synthesis of glycerol carbonate via glycerolysis of urea". *Journal of Catalysis*, 268, 106-114.
- Camps Michelena, M. y Márcos Martín, F. (2008). *Los Biocombustibles*. Barcelona: Ediciones Mundi-Prensa.
- Corma, A.; Iborra, S.; Velty, A. (2007). "Chemical Routes for the Transformation of Biomass into Chemicals". *Chemical Reviews*, 107, 2411-2502.
- Egeblad, K.; Rass-Hansen, J.; Marsden, C. C.; Taarning, E.; Hviid Christensen, C. (2008) "Heterogeneous catalysis for production of value-added chemicals from biomasa". *Catalysis*, 21, 13-50.
- Feynman, R., Leighton, R., Sands, M. (1971). *Física - Volumen 1*. Bogotá: Fondo Educativo Interamericano.
- Jiménez Gomez, R. (2009). *Políticas y Acciones del ICE para Integrar la Biomasa a la Generación Eléctrica: Retos y Oportunidades*. [en línea] Consultado en noviembre de 2015 en <http://www.laica.co.cr/biblioteca/servlet/DownloadServlet?c=443&s=2521&d=8994>
- Lai, D., Deng, L., Li, J., Liao, B., Guo, Q.-x., Fu, Y. (2011). "Hydrolysis of Cellulose into Glucose by Magnetic Solid Acid". *Chemistry and Sustainability*, 4, 55-58.
- Nogués, F, García-Galindo, D. y Rezeau, A. (2010). *Energía de la biomasa - Volumen I*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Prinsen, P. (2010). *Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas*. Tesis. [en línea] Consultado en noviembre de 2015 en <http://www.irnase.csic.es/users/delrio/repository%20theses/2010-Prinsen-MSc.pdf>

- Thomson, P. (2006). *Health, history and hard choices: Funding dilemmas in a fast-changing world*. [en línea] Consultado en noviembre de 2015 en http://www.who.int/global_health_histories/seminars/presentation07.pdf
- Tolosana, E. (2009). *Manual Técnico para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal*. Madrid: Fucosava-Mundi-Prensa.
- Vian Ortuño, A. (2006). *Introducción a la Química Industrial*. Barcelona: Reverté.
- VV.AA. (2007). *Industria Química basada en biomasa: implicaciones tecnológicas*. [en línea] Consultado en noviembre de 2015 en http://www.researchgate.net/publication/257017865_Industria_Quimica_Basada_en_Biomas_a/file/72e7e5243170304b4a.pdf
- VV.AA. (2010). *Renewables 2010 Global Status Report* [en línea] Consultado en noviembre de 2015 en http://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/gsr/REN21_GSR_2010_full_revised%20Sept2010.pdf
- VV.AA. (2001). *Diccionario de la lengua española – 22da Ed.* Madrid: Real Academia Española.

Créditos de las imágenes

- Figura 3: Rockwell, N. (1920, octubre) “Popular Science magazine Vol. 97 N°4 cover”. Wikimedia Commons. [en línea]. De dominio público. Consultado en febrero de 2014 en http://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Perpetual_Motion_by_Norman_Rockwell.jpg
- Figura 10: Glab, K. (2007, abril) “Lignin structure”. Wikimedia Commons. [en línea]. De dominio público. Consultado en febrero de 2014 en http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lignin_structure.svg
- Figura 11: Gackowski, S. (2009, diciembre) “Denatonium chemical structure”. Wikimedia Commons. [en línea]. De dominio público. Consultado en noviembre de 2015 en http://en.wikipedia.org/wiki/File:Denatonium_chemical_structure.svg
- Figura 12: Edgar181 (2008, marzo) “chemical structure of sucrose octaacetate”. Wikimedia Commons. [en línea]. De dominio público. Consultado en noviembre de 2015 en http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sucrose_octaacetate.png
- Figura 19: Sierra, M. (2008, marzo) “Trampa petrolífera”. Wikimedia Commons. [en línea]. De dominio público. Consultado en noviembre de 2015 en http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prospeccion_petroleo.svg
- Figura 20: Sacanis, P. (2006, noviembre) “Oil reserves 2005”. Wikimedia Commons. [en línea]. De dominio público. Consultado en noviembre de 2015 en http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oil_reserves_2005.jpg
- Figura 21: “Cuencas petroleras”. Secretaría de Energía de la República Argentina. [en línea]. Consultado en noviembre de 2015 en http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/archivos/imagenes_varias/2003265131.jpg

Figura 22: Tosaka (2008, junio) "Oil drilling rig's simple illustration". Wikimedia Commons. [en línea]. De dominio público. Consultado en noviembre de 2015 en http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oil_Rig_NT.PNG

Figura 23: WarX (2006, noviembre) "Oil well with pumpjack scheme". Wikimedia Commons. [en línea]. De dominio público. Consultado en noviembre de 2015 en http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oil_well_scheme.svg

Los autores

Gustavo Pablo Romanelli

Doctor en Química de la UNLP. Es investigador principal del CONICET y profesor adjunto del curso de Química Orgánica, y del curso optativo Química de los Biocombustibles. Se desempeña como docente en la UNLP desde 1986. Es co-autor de "Introducción a la Química Orgánica" (EDULP, 2013), perteneciente a la presente colección Libros de Cátedra. Además es Director de proyectos de investigación de CONICET y UNLP. En 2012 recibió el Premio a la Labor Científica en la categoría Investigador Formado por la FACyF (UNLP).

Diego Manuel Ruiz

Doctor de la Facultad de Ciencias Exactas de la UNLP. Es investigador de la UNLP; desde 2001 se desempeña como Jefe de Trabajos Prácticos en el curso de Química Orgánica y del curso optativo Química de los Biocombustibles de la FCAyF, y como docente en el nivel medio, desde 1994. Es el autor de los libros: "Ciencia en el Aire" (Siglo XXI Eds, 2012), "Viaje al Centro de la Tierra" (Siglo XXI Eds, 2014), "Vos y la Energía" (FYPF, 2014) y co-autor de "Introducción a la Química Orgánica" (EDULP, 2013), perteneciente a la presente colección Libros de Cátedra. En 2010 recibió el Premio a la Labor Científica en la categoría Joven Investigador por la FACyF (UNLP) y en 2012 obtuvo la primera mención en el Primer Premio Internacional de Divulgación Científica Ciencia que ladra-La Nación.

Gustavo Antonio Pasquale

Doctor de la Facultad de Ciencias Exactas de la UNLP. Es investigador de la UNLP. Desde 2005 se desempeña como docente en los Cursos de Química Orgánica, Química General e Inorgánica y el curso optativo de Química de los Biocombustibles de la FCAYF (UNLP) y es docente en el nivel medio, desde 2006. Publicó numerosos artículos en revistas internacionales y presentó trabajos en congresos científicos nacionales e internacionales relacionados con temas de “síntesis orgánica” y “química verde”.

Romanelli, Gustavo Pablo

Química de la biomasa y los biocombustibles / Gustavo Pablo Romanelli ; Diego Manuel Ruiz ; Gustavo Antonio Pasquale. - 1a ed. - La Plata : Universidad Nacional de La Plata, 2016.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-950-34-1425-5

1. Biocombustibles. 2. Biomasa. 3. Química. I. Ruiz, Diego Manuel II. Pasquale, Gustavo Antonio III. Título
CDD 542

Diseño de tapa: Dirección de Comunicación Visual de la UNLP

Universidad Nacional de La Plata – Editorial de la Universidad de La Plata
47 N.º 380 / La Plata B1900AJP / Buenos Aires, Argentina
+54 221 427 3992 / 427 4898
edulp.editorial@gmail.com
www.editorial.unlp.edu.ar

Edulp integra la Red de Editoriales Universitarias Nacionales (REUN)

Primera edición, 2017
ISBN 978-950-34-1425-5
© 2017 - Edulp

n
naturales



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA