



Acto de apertura. Curso 2019-2020

Lección inaugural, por Francisco Jesús López Giménez

Catedrático de Ingeniería Agroforestal

LA BIOENERGIA Y LA NUEVA ECONOMIA

*En la naturaleza no hay recompensas o castigos;
hay consecuencias*

Horace A. Vachell

Excmo. Sr. Rector Magnífico
Excmas. e Ilmas. autoridades
Sras y Sres claustales y miembros de la comunidad universitaria
Distinguidos amigos
Señoras y señores

Por razones de procedimiento y no por otro motivo, aunque piensen que es por la edad, y no les faltará razón, he sido designado para pronunciar la lección inaugural del curso 2019-2020 en la Universidad de Córdoba, lo que es para mi un alto honor y sin duda un motivo de satisfacción. Agradezco a nuestra directora, Rosa Gallardo, por confiarme esta tarea. Espero no defraudarle.

Antes de comenzar pido disculpas por mi atrevimiento y osadía al pretender resumir en poco más de quince minutos un tema con muchas implicaciones, pero si me sirve de eximente, permítanme que les diga que lo hago con mucha ilusión y entusiasmo.

El tema elegido es la bioenergía y la nueva economía. Se trata de un tema de actualidad en el que el grupo TEP-169 BIOSAHE viene trabajando desde hace algunos años en caracterización y uso de biomasa de distinta procedencia, biocombustibles, bioenergía y el concepto de biorrefinería. Por otra parte los modelos económicos de producción tienden hacia formas más respetuosas con el medio, reducción de emisiones y residuos, reducir el consumo de energía aumentando la eficiencia, en definitiva hacia lo que se denomina economía verde, bioeconomía, economía circular. El desarrollo del concepto de biorrefinerías y los nuevo modelos de producción en lo que se refiere a materiales de origen biológico han seguido caminos paralelos para producir el encuentro en el concepto de bioeconomía.

Comenzaremos con algunos datos sobre el consumo de energía y extracción de materias primas.

Energía somática y exosomática. Evolución.

La evolución de nuestra sociedad, especialmente en los últimos ciento cincuenta años, se encuentra íntimamente relacionada con el uso de energía. La energía es la fuerza propulsora que permite convertir los recursos materiales en bienes y servicios útiles. El suministro de energía es el factor que limita la producción, así como la fuerza que la impulsa. Aunque no siempre ha sido así y, por ello, el uso de la energía será posiblemente el hecho diferencial más característico de los siglos XX y XXI.

La energía que el ser humano consume para atender su metabolismo, lo que se conoce como energía endosomática, es por término medio, una dieta de 2000 kcal/persona y día. Teniendo en cuenta el tiempo, 24 horas (86.400 s), en términos de potencia sería 100 W. Es decir, la energía endosomática del ser humano es equivalente al consumo de una lámpara de 100 W encendida durante un día.

Sin embargo, lo que claramente nos diferencia del resto de especies animales es precisamente nuestra capacidad de usar energía externa a nuestro propio metabolismo biológico para alimentar funciones sociales, lo que se denomina metabolismo social¹ (Gomez, 2010). Esta energía, denominada exosomática, depende del tipo de sociedad y ha cambiado a lo largo del tiempo (Fig 1), en la medida que se han producido cambios y progresos en la sociedad.



Fig 1. Consumo de energía exosomática (kcal/día) en función del tipo de sociedad. G.T. Miller "Living in the environment" (2000).

Durante miles de años, la única energía que el ser humano utilizaba era la de sus músculos y esta potencia somática fue su principal referencia. A lo largo del progreso humano la energía somática ha permanecido casi invariable, pero se ha incrementado la demanda de energía exosomática.

¹ El concepto de metabolismo se tomó de su empleo en la biología de las células y organismos para describir las relaciones entre la naturaleza y las sociedades humanas.

Actualmente las sociedades industrializadas modernas tienen un consumo de energía exosomática de 125.000 kcal/persona y día (6.000 W) y la sociedad americana de 230.000 kcal/persona y día (11.000 W). En Andalucía nos contentamos con 120.000 kcal/persona y día (6.000 W).

Cada habitante de Europa y de Estados Unidos dispone, por término medio, de 30 a 60 *esclavos energéticos*, máquinas sumamente ineficientes que en teoría hacen la vida más llevadera (aunque, en la práctica, suelen complicarla no pocas veces) a costa de un consumo disparatado de energía. Para ser feliz, un hombre del Neolítico solamente necesitaba 500 vatios de capacidad instalada. El hombre contemporáneo no lo es con menos de 12.000.

¿Cómo hemos llegado hasta aquí?

Esta carrera se inició hace unos 500.000 años, no sabemos muy bien cómo, cuando los humanos empezaron a controlar una primera fuente de energía: el fuego, a partir de combustión de la leña. La vida cambió ya que el fuego proporcionaba calor para protegerse del frío, luz para la vida nocturna y servir de protección contra los depredadores; más tarde se encontraron otras utilidades: cocinar alimentos, secar pieles, trabajar metales para hacer herramientas, cerámica, etc. A partir de entonces su hegemonía como fuente de energía ha cumplido centenares de miles de años. Es evidente la importancia que para el hombre ha tenido y tiene ese recurso energético primario que es la biomasa.

La mitología considera este paso un progreso pero también un castigo de los dioses a Prometeo, el que le robó el uso del fuego a los dioses. El control y uso del fuego supuso aumentar el consumo energético por individuo unos 50 W.

El siguiente paso se dio hace unos 10.000 años, en el neolítico, cuando se inicia la agricultura. Un paso de gigante que implica el cambio del nomadismo a ciertas formas incipientes de sedentarismo. A continuación, pero muy lentamente se irían incorporando otras fuentes de energía como la hidráulica (norias) y eólica (molinos de viento).

Pero no fue hasta la segunda mitad del siglo XVIII (1768) con las mejoras introducidas por James Watt a la invención de Thomas Newcomen en Reino Unido que se incorpora la máquina de vapor al sistema productivo. Es de señalar que casi un siglo antes, un español, el navarro Jerónimo de Ayanz, había inventado una máquina similar aplicándola a un proceso industrial en las minas de plata de Guadalcanal (Sevilla) (García Tapia, 2010). Con la introducción de la máquina de vapor se inició la Revolución Industrial y con ella el aumento de la demanda de energía.

Ya en 1782 se fabricaban máquinas de vapor para telares, fábricas de papel, molinos de harina, destilerías, canales, obras hidráulicas y talleres. Primero eran alimentadas por madera y más tarde con carbón. El petróleo vino a sustituir al carbón a partir de la primera extracción realizada por el "coronel"

Drake en Pensilvania en 1859², pero sobre todo en la primera mitad del siglo XX.

Si observamos la extracción de materias primas en el último siglo vemos que sigue una evolución similar (Fig. 2) con una clara tendencia exponencial.

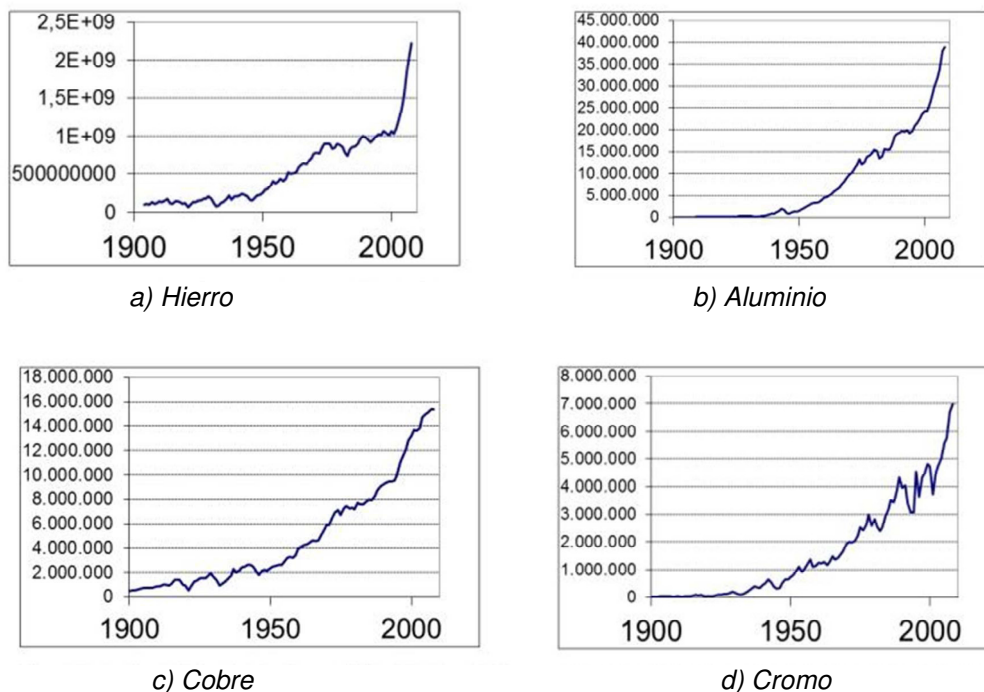


Fig. 2. Extracción de algunos elementos químicos (toneladas) a lo largo del siglo XX. Valero, A., A. Valero 2016.

De acuerdo con datos del USGS (US Geological Survey) la demanda de minerales superó el año 2011 los 45.000 millones de toneladas, siendo los combustibles fósiles, materiales de construcción, metales como el hierro, aluminio, cobre, manganeso, cinc, cromo, plomo, titanio y níquel los más consumidos.

Particularmente preocupante es el fósforo, elemento fundamental en la producción agraria, cuyas reservas muy localizadas geográficamente, alcanzará su pico en las próximas décadas. En este sentido resulta de gran interés la recuperación de fósforo de los residuos y aguas residuales.

El auge más reciente de las nuevas tecnologías y las energías renovables han multiplicado el consumo de muchos elementos químicos como el indio utilizado en las pantallas planas y en los paneles fotovoltaicos de tecnología CIGS. La demanda de este elemento se espera que aumente más de ocho veces de aquí a 2030 y la de galio, otro elemento utilizado en las CIGS, por ventidos.

² En un principio, el petróleo se utilizó para sustituir al aceite de ballena en las lámparas de iluminación. Probablemente este hecho salvó a las ballenas de su extinción.

A evoluciones de consumo similares se enfrentan elementos como el neodimio y disprosio esenciales en la producción de imanes permanentes en aerogeneradores o en motores eléctricos. Tendremos que repasar los elementos de la tabla periódica para recordar estos elementos, más aún teniendo en cuenta que este año celebramos el año de la tabla periódica (150 aniversario).

Hacia un nuevo paradigma energético.

La revolución industrial supuso un cambio de paradigma energético al modificar las fuentes de energía para desarrollar actividades económicas. Anteriormente el principal combustible utilizado era la leña pero a partir de la revolución industrial y durante los siglos XIX y XX se va sustituyendo por carbón mineral, petróleo y gas natural. Fue un proceso de transformación económica, social y tecnológica que se inició en el Reino Unido y que se extendió unas décadas después a gran parte de Europa Occidental y Norteamérica. Durante ese periodo, en el que se pasó de una economía basada en la agricultura y el comercio a una economía más urbana, industrializada y mecanizada se vivió el mayor conjunto de transformaciones económicas, tecnológicas y sociales de la historia de la humanidad desde el neolítico.

Este modelo económico, se asocia con el aumento de la renta per cápita y con mayores niveles de vida de la población y el crecimiento económico que se produce en las economías más desarrolladas supone un cada vez mayor consumo de energía que se multiplica en forma exponencial (Fig 3.) junto con el aumento de población (Martin and Romain. 2015), que llegará en 2050 a cerca de 9.000 millones de habitantes.

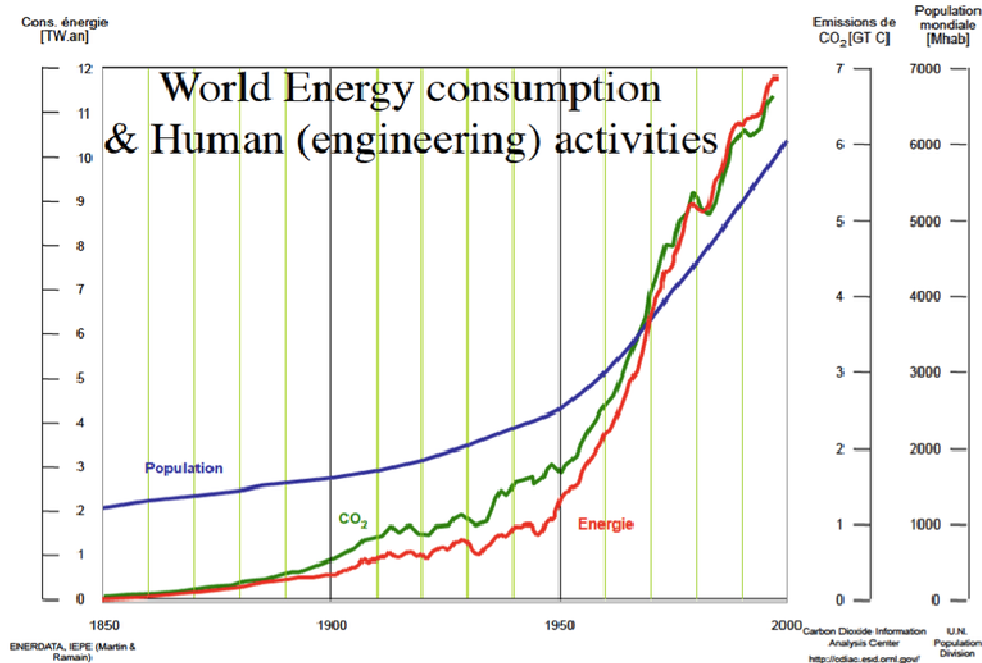


Fig. 3. Consumo energético, emisiones de CO₂ y población humana (1850-2000). Martin and Romain. 2015.

El modelo empieza a mostrar sus debilidades en la década de los 70 del siglo pasado, como consecuencia de las variaciones del precio del petróleo (Fig 4.).



Fig 4. Evolución del precio del petróleo en dólares (1970-2015)

La primera crisis en 1973: el bloque árabe de la OPEP llevó a cabo un embargo petrolífero a los países que apoyaron a Israel en la Guerra del Yom Kippur. Esta medida de castigo provocó un incremento de los precios del petróleo de 3 a 12 dólares el barril.

La segunda crisis de 1979: se produce a consecuencia de dos efectos combinados: la revolución iraní con la caída del Sha y la primera guerra Iran-Irak. Los precios llegan a 40 dólares el barril.

Estas crisis y las siguientes ponen de manifiesto la dependencia de las economías desarrolladas respecto al petróleo. Asimismo produjeron una reducción en la actividad económica y una gran preocupación por la eventual falta de suministro.

Esta situación de sucesivas crisis producidas de forma recurrente y el previsible agotamiento de recursos junto con la incapacidad de la naturaleza de asimilar los impactos de sólidos, líquidos y gases generados en una economía lineal obligan a plantear un nuevo modelo energético y un nuevo modelo de producción.

En la mitología popular, la "*bala de plata*" es la única arma capaz de destruir al "*hombre lobo*". La imagen alude a la creencia de que todos los males se pueden eliminar, basta con encontrar el medio, aunque sea costoso.

Según los expertos, en la actualidad no habrá una "*bala de plata*" para lo que ya es demasiado tarde, sino un número indeterminado de medidas (la "*perdigonada de plata*") que, en conjunto pueden paliar los efectos. Afrontar el

problema de nuestro desmesurado consumo de energía con múltiples tecnologías energéticas en paralelo, tanto de generación primaria como de vectores energéticos. Entre estas medidas se citan la utilización de fuentes renovables, el fomento de nuevos hábitos de consumo de la población que eviten el despilfarro y sobre todo el fomento de nuevas tecnologías que permitan producir energía barata y no contaminante.

En este sentido la Comisión Europea está decidida a desarrollar una economía baja en carbono para el año 2050³. Para ello ha trabajado en incorporar al marco legal el concepto de economía verde. En el marco del amplio concepto de economía verde, la bioeconomía comprende aquella parte de la economía que utiliza recursos biológicos renovables de la tierra y el mar (cultivos, bosques, peces, animales y microorganismos) para producir alimentos, materiales y energía.

En el contexto energético, la bioeconomía se presenta como una respuesta a las actuales crisis sociales y ambientales derivadas del modelo energético actual, con el objetivo de reemplazar los combustibles fósiles por biocombustibles renovables derivados de la biomasa. La bioenergía está llamada a satisfacer una proporción cada vez mayor de nuestras necesidades energéticas, tanto en la automoción como en la demanda térmica y eléctrica.

Economía-Energía-Desarrollo. Bioeconomía. Exergía. Termoeconomía.

"Quien crea que es posible un crecimiento infinito en un planeta finito, o es un loco o es un economista". Kenneth Boulding, Presidente de la American Economic Association, 1966.

El modelo económico y productivo dominante se presenta como un modelo de producción y consumo en el que se relacionan los agentes económicos, en este caso las empresas y las familias, con los mercados de bienes y servicios. De forma simplificada podría decirse que la economía estudia los precios y cantidades intercambiadas en los mercados (un estudio que Aristóteles llamaba "crematística" en la Política) y las magnitudes agregadas de la contabilidad macroeconómica.

Este esquema constituye la visión analítica de la economía estandar, conocida como síntesis neoclásica-keynesiana. Se trata de un sistema económico aislado del medio natural en el que se intercambian, por una parte, bienes y servicios a cambio de dinero y, por otra, factores de producción (tierra, trabajo y capital) a cambio de salarios, alquileres y beneficios del capital o intereses.

Pero los sistemas económicos no son sistemas aislados sino sistemas abiertos en los que tiene lugar la entrada de materias primas y energía y la salida de productos, residuos y calor (energía) disipado.

³ Communication COM (2011)

La tierra es el asiento de estas actividades humanas. Sin embargo, la tierra no es un sistema abierto. Al contrario, la biosfera se caracteriza por ser finita, por no crecer y además, por ser cerrada. No se produce intercambio de materia, salvo algún que otro meteorito, pero sí intercambios de energía, energía procedente del sol (Daly, H. 1993).

En esta idea de los sistemas económicos como sistemas abiertos insiste Passet (1996) indicando la necesidad de establecer puentes entre la economía y las ciencias de naturaleza entendiendo que ambas se encuentran íntimamente relacionadas.

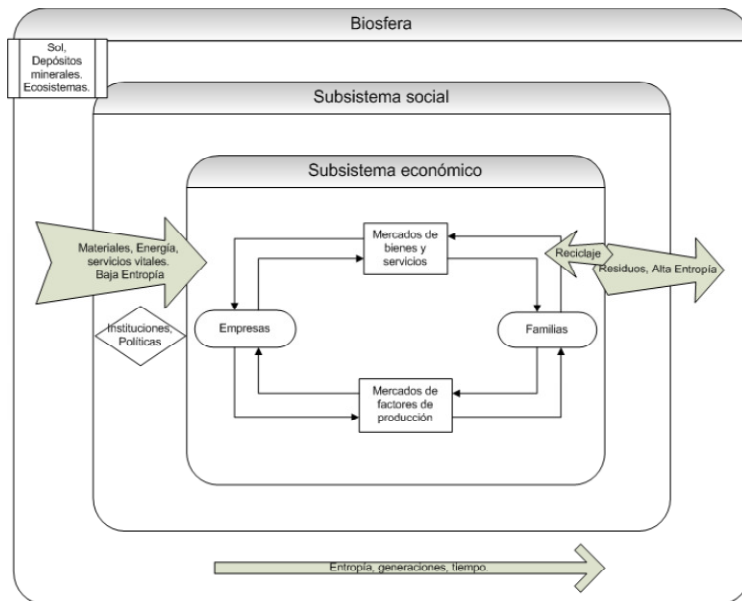


Fig. 5. El sistema económico como sistema abierto.

El modelo económico y productivo dominante identifica el desarrollo económico y el bienestar con el aumento de la producción de bienes y servicios y éste con el consumo creciente de energía.

En la década de los 70 aparecen voces críticas con el modelo económico dominante. Así en 1972, el club de Roma, constituido por los exmandatarios de distintos países, apeló a la conciencia de todos, advirtiendo sobre los límites del crecimiento. (Informe Meadows).

Georgescu-Roegen en su obra "*La ley de la entropía y el proceso económico*" (1971), profundizando los pensamientos de Lotka y Vernadsky, crea una nueva corriente de pensamiento: la bioeconomía⁴.

Georgescu plantea que los sistemas económicos de igual forma que los sistemas termodinámicos están sujetos a las leyes de la termodinámica. El principio de conservación y el principio de degradación de energía (2º

⁴ La primera vez que se habla de bioeconomía es en el libro de H. Reinheimer publicado en 1913 titulado "Evolution by co-operation: A study in bioeconomic."

principio), de la calidad de la energía. El calor no se convierte íntegramente en trabajo y las transformaciones que tienen lugar van acompañadas de un incremento de la función entropía.

Desde el punto de vista técnico se utilizó el concepto de energía disponible o exergía permitiendo realizar análisis exergéticos en instalaciones al objeto de localizar y cuantificar las irreversibilidades con que se desarrolla el proceso productivo e identificar qué equipos y qué causas son responsables de su ineficiencia, todo ello con el objetivo de mejorar el diseño o las condiciones de operación y aumentar la eficiencia. Debemos reconocer en esta materia las contribuciones del profesor de esta Universidad D. Jose Agüera (1991, 2011) aplicados, entre otros, a la central térmica de Puente Nuevo (Córdoba).

Estos planteamientos conducen a una nueva rama de ciencia denominada Termoeconomía, desarrollada principalmente por A. Valero y M.A. Lozano (1993) con la introducción del concepto de coste exergético. La termoeconomía, fundamentada en el segundo principio de la termodinámica, tiene como objetivo la asignación de costes y la optimización de los sistemas térmicos.

La Estrategia Europea de Bioeconomía⁵ establece una nueva forma de producir y consumir recursos biológicos que de respuesta a los problemas ambientales y al mismo tiempo generar oportunidades para el desarrollo económico y el empleo, poniendo énfasis en la investigación y la innovación como motores de dicho cambio y garantizando la seguridad alimentaria.

En la Estrategia Andaluza de bioeconomía circular, la bioeconomía se define como: "*Modelo económico basado en la producción y uso de recursos biológicos renovables y su transformación sostenible y eficiente en productos biológicos, bioenergía y servicios para la sociedad*".

Igual que en la Estrategia Europea, la Estrategia Andaluza incluye los sectores de la agricultura, la silvicultura, la pesca, la producción de alimentos, pasta de papel, además de parte de las industrias química, biotecnológica y energética.

La bioeconomía se plantea con carácter integrador y multidisciplinar tratando de englobar los conocimientos de distintas ramas de la ciencia. Interesan a este fin las aportaciones de las ciencias biológicas, la ecología, las ciencias sociales, la agronomía, la ciencia forestal, la biotecnología, la química y la ingeniería.

Bioenergía

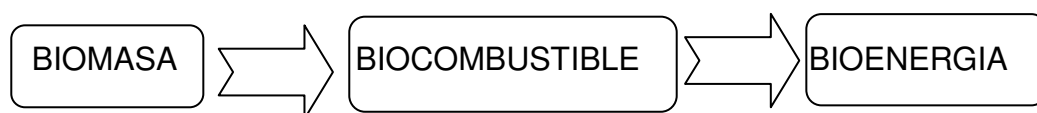
La bioenergía es la energía química contenida en los materiales orgánicos, que pueden ser convertidos en fuente de energía directa y útil por vía de procesos biológicos, mecánicos o termoquímicos (Bessou et al., 2011). Se refiere a la

⁵ Estrategia Europea de Bioeconomía. 2012

energía renovable procedente de fuentes biológicas que puede ser usada para calefacción, electricidad y combustible, y sus coproductos. En términos de la moderna bioenergía, etanol, biodiesel y biogás son los tres principales productos bioenergéticos (Yuan et al., 2008).

En la UE, la bioenergía⁶ representa alrededor del 60% de toda la energía renovable consumida, lo que equivale al 10% del consumo final bruto de energía en Europa.

Realmente los conceptos biomasa, biocombustible y bioenergía están relacionados aunque conviene hacer algunas precisiones. El término biomasa, principal fuente de carbono orgánico del planeta que se produce de manera constante, hace referencia al recurso energético, ya sean residuos agrícolas o forestales, residuos de las industrias agrícolas y forestales, los residuos de origen animal o humano y los cultivos con fines energéticos. Los biocombustibles son productos obtenidos de la biomasa después de ser sometida a procesos biológicos, mecánicos o termoquímicos. Dependiendo de su naturaleza se pueden clasificar en biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Finalmente, el término bioenergía se refiere a la energía obtenida a partir de biocombustibles.



Los recursos biomásicos deben ser extraídos, tratados y transportados hasta las instalaciones en las que serán procesados y valorizados para su aprovechamiento. Es necesario, por tanto, contar con experiencia en la gestión de las distintas biomásas, al objeto de avanzar en la optimización de su logística, que debe considerarse como un factor más de producción en las cadenas de valor. En este sentido, resulta interesante la creación de los Centros Logísticos de Comercialización de Biomasa. (CLCB).

Biocombustibles sólidos

Los combustibles sólidos (ISO 2014) se producen directa o indirectamente a partir de biomasa mediante transformaciones, generalmente de naturaleza física, tales como el astillado, molienda, secado, densificación y que además es susceptible de ser usado directamente en los procesos de conversión energética.

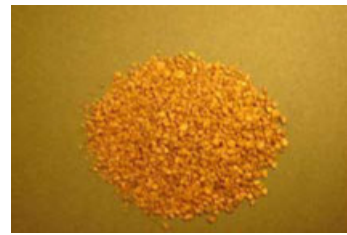
⁶ AEBIOM. Statistical Report. 2017



Orujo de uva seco



Astillas de madera



Hueso de aceituna



Pellets de madera



Serrín



Cáscara de almendra



Cáscara de piñón



Leña

Fig. 6. Biocombustibles sólidos.

De este modo se obtienen los biocombustible sólidos, que son diversos, tal como restos de cosechas, astillas, pellets, leñas, cáscara de almendras, hueso de aceituna, etc., (Fig. 5) y que finalmente se usan para la producción de calor y electricidad.

El desarrollo tecnológico producido en el diseño de calderas en las últimas décadas permite su aplicación en el ámbito residencial para proporcionar calefacción y agua caliente sanitaria en distintas tipologías de edificaciones: viviendas unifamiliares, colegios, hoteles, piscinas cubiertas o los sistemas de calefacción de distrito (district heating).

Biocombustibles líquidos

Se denominan biocarburantes a los combustibles líquidos obtenidos mediante determinadas transformaciones de la materia vegetal y que pueden utilizarse en motores de vehículos en sustitución de los combustibles de origen fósil.

Teniendo en cuenta las materias primas empleadas y el estado de madurez de las tecnologías de producción y utilización, se han venido clasificando en biocarburantes de 1ª, 2ª 3ª y 4ª generación (Agencia Andaluza de la Energía 2018).

Biocarburantes de primera generación: las materias primas provienen en su mayoría de cultivos agrícolas empleados en alimentación (oleaginosas, cereales, caña de azúcar), o grasas residuales animales y vegetales; y las tecnologías emplean procesos conocidos y plenamente establecidos en la industria como son la fermentación alcohólica, la fermentación anaerobia, la transesterificación y la hidrogenación, etc. Ejemplos de ellos son el biodiesel obtenido por transesterificación, los aceites vegetales, el hidrobiodiesel, el bioetanol obtenido a partir de los cereales y los azúcares que se encuentran en otros productos vegetales, el bio-etil-terbutil-éter (ETBE) y el biogás. La producción y el uso de estos biocarburantes están ya en fase de aplicación avanzada.

Biocarburantes de segunda generación: se obtienen a partir de materias primas no alimentarias donde los azúcares y grasas no son de fácil acceso y hay que emplear tecnologías y procesos más avanzados. El bioetanol producido a partir de materias primas lignocelulósicas, el bio-hidrógeno, el syngás, los bio-aceites, el biometanol, el biobutanol o el diésel sintético obtenido a través de la reacción de Fischer-Tropsch pertenecen a esta categoría.

Los biocarburantes de segunda generación permiten incrementar el rango de materias primas ya que el uso de material lignocelulósico y residual no compete con el mercado alimentario. En España existen dos plantas de producción de etanol de segunda generación.

Biocarburantes de tercera generación: utilizan métodos de producción similares a los de segunda generación, pero empleando como materia prima cultivos bioenergéticos específicamente diseñados o adaptados (a menudo por medio de técnicas de biología molecular) para mejorar la conversión de biomasa a biocombustible. Un ejemplo es el desarrollo de los árboles “bajos en lignina”, que reducen los costes de pretratamiento y mejoran la producción de etanol, o el maíz con celulasas integradas o los biocombustibles obtenidos a partir de algas, por las cuales determinadas especies son capaces de producir en el interior de sus células grandes cantidades de lípidos.

Biocarburantes de cuarta generación: estos llevan la tercera generación un paso más allá. La clave es la captación y almacenamiento de carbono (CAC), tanto a nivel de la materia prima como de la tecnología de proceso.

Biocarburantes avanzados: en la actualidad es más adecuado hablar de "biocarburantes avanzados" entendidos como aquellos que se obtienen a partir de determinadas materias primas sin especificar los procesos o tecnologías de obtención.

La EIBI (European Industrial Bioenergy Initiative)⁷ “Los biocarburantes avanzados son los que se han producido a partir de materias primas lignocelulósicas (es decir, residuos agrícolas y forestales, por ejemplo, / el bagazo, la paja de trigo biomasa rastrojo de maíz / base de madera), los cultivos no alimentarios (por ejemplo, hierbas, miscanthus, algas), o de desechos industriales y residuos corrientes, que tiene bajas emisiones de CO₂ o la reducción de las emisiones de GEI es alta, y que pueden llegar a cero o límites de bajo impacto sobre los cambios indirectos del uso de la tierra”.

BIOCARBURANTE	DESCRIPCIÓN	APLICACIONES
Bioetanol	Etanol producido a partir de biomasa o de la fracción biodegradable de los residuos, mediante fermentación para su uso como biocarburante.	Motores de gasolina en mezclas de hasta el 15%. Motores flex-fuel, mezclas superiores como E-85 (85% de etanol). E- diesel: etanol mezclado hasta un 10% con gasoil para motores diesel. En desarrollo.
Biodiesel	Ester metílico producido a partir de aceite vegetal o animal mediante esterificación	Motores diesel convencionales puro o en mezclas con gasóleo.
Biogás	Combustible gaseoso producido por digestión anaerobia de biomasa y/o fracción biodegradable de residuos	Purificado hasta alcanzar la calidad del gas natural: uso en turbinas de gas.
Biometanol	Metanol producido a partir de biomasa	Similares aplicaciones que el bioetanol
Biodimetiléter	Dimetiléter producido a partir de biomasa	Indicado para la sustitución del gasoil en los motores de ciclo Diésel
Bio-ETBE (Etil ter-butil éter)	ETBE a partir de bioetanol por reacción con el isobuteno. La fracción volumétrica que computa como biocarburante es del 47%	Puede ser usado en mezcla al 15% en volumen con la gasolina. Mejora el poder antidetonante
Bio-MTBE (Metil ter-butil éter)	MTBE a partir de biometanol. La fracción volumétrica que computa como biocarburante es del 36%	Puede ser usado en mezcla al 15% en volumen con la gasolina. Mejora el poder antidetonante
Biocarburantes sintéticos	Hidrocarburos sintéticos o sus mezclas obtenidos mediante síntesis de Fischer-Tropsch a partir de biomasa	En función del hidrocarburo sintético obtenido podrá emplearse en un motor diesel o de ciclo Otto
Bio-hidrógeno	Hidrógeno producido a partir de la biomasa y/o a partir de la fracción biodegradable de los residuos para uso como biocarburante	Uso en motores adaptados
Hidrobiodiesel	Producido por hidrogenación/isomerización de aceite vegetal o animal	Uso en motores diesel
Bioqueroseno	Fracción ligera procedente de la destilación de biodiesel obtenido por transesterificación	Uso en mezclas con queroseno hasta el 20% para uso en motores de aviación.
Otros biocarburantes	Productos producidos por tratamiento en refinería de biomasa, la biogasolina y el bioLPG; y los carburantes de biorefinería.	Uso en motores diesel o Otto en función de las características del combustible

⁷ (EIBI 2010) European Industrial Bioenergy Initiative < <http://ec.europa.eu> >

Tabla 1. Biocarburantes y sus aplicaciones. Agencia Andaluza de la Energía. 2018

Teniendo esto en cuenta, el término biocarburantes avanzados se suele utilizar de manera general para describir:

- Los biocarburantes producidos por procesos avanzados de materias primas no alimentarias (por ejemplo, desechos, residuos agrícolas y forestales, cultivos energéticos, algas). El producto final puede ser equivalente a los combustibles producidos por la tecnología de primera generación (por ejemplo, etanol o FAME), o puede ser un tipo diferente de biocombustible avanzado (tales como, BioDME). En general, la próxima generación de biocombustibles se consideran más sostenibles por la materia prima y porque los procesos utilizados ofrecen mayores niveles de reducción de gases de efecto invernadero y no compiten con los cultivos alimentarios para el uso del suelo.

- El término "biocombustibles avanzados" se aplica también a los biocombustibles con propiedades avanzadas, como aceites vegetales tratados con hidrógeno (HVO), bio crudo o aceite de pirólisis, etc. Estos productos finales pueden ser más compatibles con las infraestructuras de combustible existentes u ofrecer otras ventajas técnicas. En última instancia, el objetivo es producir biocombustibles con propiedades avanzadas de materias primas sostenibles que no se consideren competidoras de manera negativa con los sistemas de producción de alimentos. (BIOFUELSTP⁸)

Bioetanol

El bioetanol se puede obtener mediante fermentación de los azúcares con la levadura *Saccharomyces cerevisiae* a partir de diversas materias primas: productos azucarados (mostos de uva, azúcares de caña o remolacha), productos amiláceos ricos en almidón (cereales) o productos celulósicos. La utilización de productos amiláceos y celulósicos requiere, aparte de las operaciones mecánicas previas (molienda), procesos de hidrólisis ácida o enzimática para romper las cadenas de polisacáridos. La realización de hidrólisis enzimática frente a la hidrólisis ácida presenta las ventajas de ahorro de energía e inversión y permite controlar el proceso con facilidad (Otero et al, 2007). Tras la fermentación se procede a destilar el alcohol.

El 45 % del etanol producido en el mundo se obtiene a partir de cereales. Brasil es el mayor productor mundial de bioetanol, a partir de la caña de azúcar. En Estados Unidos, la producción de bioetanol es también muy importante, utilizando básicamente el almidón del maíz. En España, la producción industrial de bioetanol se ha concretado en la utilización de cereal (trigo y cebada) como materia prima básica, con posibilidad de utilizar los excedentes de la industria remolachera transformados en jugos azucarados de bajo coste, así como los

⁸ (BIOFUELSTP) European Biofuels Technology platform < www.biofuelstp.eu >

excedentes vinícolas subastados en Bruselas. En la actualidad, nuestro país aparece como el primer productor europeo de bioetanol.

Como subproductos del proceso se obtiene DDGS (granos secos de destilación solubles) que una vez peletizados se destinan a la elaboración de pienso para el ganado y CO₂ utilizable en la industria química.

La utilización del etanol puro o en mezclas con la gasolina exige algunas modificaciones en el motor, por ejemplo los motores flexifuel. Sin embargo a partir del etanol, mediante reacción con isobuteno, se obtiene etil ter butil éter (ETBE) que se emplea como aditivo de las gasolinas para mejorar su poder antidetonante en sustitución del plomo tetraetilo. Además, este compuesto oxigenado mejora el desarrollo de la combustión y reduce las emisiones de monóxido de carbono. En Brasil se utiliza sin mezclar en motores que han sido previamente modificados (Volpato et al, 2007; Ortiz Marcos, 2003).

Biodiésel

El biodiésel es un éster similar al vinagre que se obtiene a partir de aceites vegetales como la soja, la colza, la palma y el girasol (Dorado et al, 2004a; Dorado et al, 2004b). Aunque estas especies suelen ser las materias primas más utilizadas en su producción, se puede obtener a partir de más de 300 especies vegetales e incluso del aceite vegetal de cocina frito. Esta última opción ha cobrado fuerza ante la necesidad de reciclar los aceites usados en procesos de fritura.

Después de la depuración de los aceites, el proceso continúa con una etapa de transesterificación. Durante esta reacción se sustituye al alcohol del aceite vegetal (glicerol) por otro más simple (metanol, etanol, etc.). Tras la transformación química, se obtienen ésteres grasos (etílicos, metílicos, etc.). La reacción supone la transformación de las moléculas de triglicéridos, que son grandes y ramificadas, en moléculas de ésteres de ácidos grasos, que son lineales, no ramificadas, más pequeñas y de propiedades fisicoquímicas análogas al gasóleo mineral.

Tras la reacción se forman dos fases claramente diferenciadas, la inferior está formada principalmente por glicerina y la superior por los ésteres (biodiésel). Gracias a la diferencia en sus densidades se facilita la separación de ambos elementos. El biodiésel obtenido debe cumplir con las propiedades de calidad exigidas en la norma EN 14214 para poderlo comercializar. Se emplea en los motores de ignición por compresión (de ciclo diesel) y en calderas de calefacción, ya sea puro o en mezclas con gasoil en proporciones variables.

Biocombustibles gaseosos

Biogás. Se puede producir fácilmente por fermentación anaerobia de residuos húmedos de la biomasa con una composición media de un 60% de metano y un 40% de CO₂. La proporción de metano depende de la materia prima empleada. El biogás tiene problemas por la presencia de SH₂, ya que es muy

corrosivo. La potencia obtenida con estos combustibles en motores es menor que en el caso de la gasolina o el gasoil, debido sobre todo al menor poder calorífico de este combustible (entre 4700 y 5500 kcal/Nm³), así como a su baja densidad, razón por la cual también es muy inferior su autonomía. Para aumentar el poder calorífico del biogás se debe eliminar el CO₂. Se puede utilizar como combustible para generar calor y electricidad.

Gasógeno o gas pobre. Se puede obtener de residuos secos forestales o agrícolas mediante gasificación con aire como agente gasificante obteniéndose un gas cuya composición es: 20-30 % de CO, 10-25% de H₂, 2-15% de CO₂, 0-4% de CH₄, y el resto N₂. Se pueden usar en motores de gasolina y diesel. Para uso de estos gases en motores diesel es preciso mezclarlos con una parte de gasoil, que no suele pasar del 10%. Se puede producir electricidad mediante microturbinas acopladas a la salida de los reactores. Su poder calorífico está comprendido entre 2.5-8 MJ/Nm³

Gas de síntesis. Está compuesto mayoritariamente por CO, H₂ y CH₄ y puede obtenerse mediante gasificación del carbón y de la biomasa utilizando como agente gasificante oxígeno o vapor de agua. A partir del gas de síntesis se puede obtener hidrógeno, alcoholes (mediante síntesis), aldehídos, hidrocarburos (mediante la síntesis de Fischer-Tropsch), diesel o gasolina sintética para uso en motores convencionales de combustión interna. El poder calorífico del gas de síntesis está comprendido entre 10-20 MJ/Nm³. Si el gas de síntesis presenta un elevado contenido en metano, entonces el poder calorífico se eleva a 30 MJ/Nm³.

Biorrefinerías.

La industria química actual está basada principalmente en el petróleo y gas natural, de forma que actualmente existen en el mercado más de 2500 productos diferentes basados en estos recursos fósiles. Globalmente, la industria química requiere aproximadamente el 7-8% del consumo mundial de hidrocarburos líquidos y gaseosos. En este contexto, la utilización de biomasa para la obtención de energía y productos químicos es una opción de enorme interés. Realmente cuando la biomasa pueda sustituir de forma significativa a los recursos fósiles, podríamos decir que la industria química llegaría a ser sostenible (Jenk, Agterberg, et al. 2004).

Dentro de una economía basada en la biomasa, es decir una economía que a partir de biomasa produzca combustibles, energía y productos químicos y materiales derivados de biomasa, existe la posibilidad de producir cada uno de los anteriores bienes en instalaciones separadas o bien en una sola instalación en la que además de energía y biocombustibles se produzcan, al igual que en la refinerías actuales, una serie de productos químicos orgánicos base, bienes de consumo y productos intermedios (“commodities”, “intermediate platforms”) que sirvan de plataforma para obtener los productos químicos secundarios de consumo y compuestos básicos (“secondary commodity chemicals”, “building blocks”) a partir de los cuales puedan obtenerse los materiales que

proporcionen las prestaciones demandadas por los productos acabados. Surge así de manera natural el concepto de biorrefinería integrada (Clark, Budarin et al. 2006) como el de una instalación productiva en la que, al igual que las refinerías actuales más avanzadas, pero partiendo de biomasa en lugar de petróleo, se produzcan combustibles, energía y diferentes líneas de productos químicos, de tal forma que se incremente la rentabilidad económica con respecto a las instalaciones que produzcan exclusivamente biocombustibles y energía.

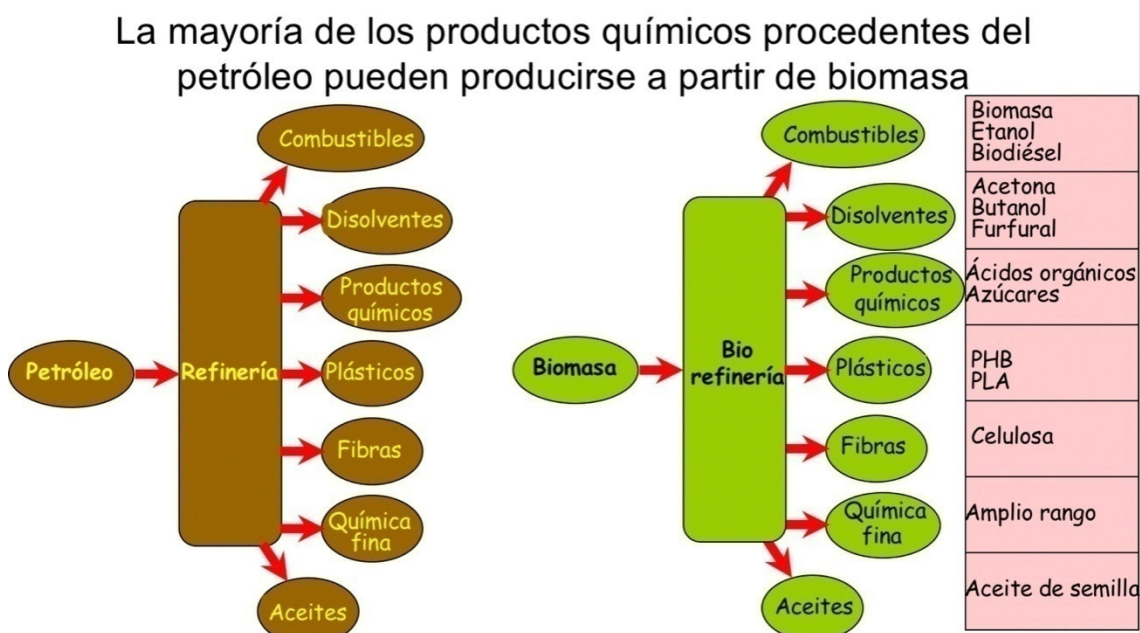


Fig. 7. Colin Webb. Curso "Biorefinery engineering and design". 2015. CIA3 Córdoba

Tipos de biorrefinerías

En función de los productos deseados, una instalación de biorrefinería tratará de dirigir los procesos de transformación de la biomasa hacia el tipo de tecnologías más conveniente para tal fin. Así, se distinguen dos tipos de biorrefinerías⁹: aquellas que buscan la producción energética (**Energy-driven Biorefinery**) y llevan a cabo una valorización posterior de las sustancias que no pueden ser aprovechadas energéticamente o que son generadas como residuos del proceso (por ejemplo, plantas de bioetanol con valorización de los DDG para alimento animal) y aquellas que dirigen su producción hacia la extracción de compuestos de alto valor añadido (**Product-driven Biorefinery**) y emplean los residuos/subproductos generados como fuente de energía (biocombustibles, electricidad y/o calor). Un ejemplo de este último caso, puede

⁹ Manual sobre las biorrefinerías en España. 2017. BioPlat, SUSCHEM. http://www.suschem-es.org/docum/pb/otras_actividades/presentacion_biorrefinerias_180917/Manual_de_Biorrefinerias_en_Espana_feb_2017.pdf.

corresponderse con las bodegas donde aparte de la producción de vino, se puede llevar a cabo una extracción de polifenoles de los restos de uva para su uso como antioxidantes así como una revalorización energética del sarmiento y raspón, que de lo contrario no tendrían ningún uso.

Aunque se pueden describir hasta 10 tipos de biorrefinerías¹⁰ nos centraremos en aquellas que por el momento pueden tener mayor interés en España y sobre todo en Andalucía. Atendiendo al tipo de biomasa que se usa, se pueden distinguir cuatro tipos de biorrefinerías:

1 Biorrefinería de material lignocelulósico

Este tipo de biorrefinerías, se corresponde con la valorización de los componentes de la biomasa lignocelulósica (celulosa, hemicelulosa y lignina) a través de procesos termoquímicos y bioquímicos, siendo el sector forestal el que mejor puede adaptar en sus instalaciones este tipo de procesos y en especial las industrias papeleras.

La biomasa forestal está constituida fundamentalmente por materiales lignocelulósicos de naturaleza fibrosa que forman parte de la pared celular que recubre las células vegetales, en cuya composición se distinguen tres tipos de biopolímeros: celulosa (rica en glucosa (hexosa)); hemicelulosas (rica en xilosa (pentosa)); y lignina (constituida por unidades básicas de entre las que predominan los grupos aromáticos fenólicos).

El aprovechamiento de la biomasa forestal lignocelulósica requiere, en primer lugar, la separación de la misma en sus tres componentes básicos. A partir de aquí, cada componente debe seguir caminos separados. La fracción de celulosa debe ser hidrolizada enzimáticamente hasta sus unidades básicas (glucosa), que sirvan posteriormente como sustrato para fermentaciones. La fracción de hemicelulosa puede ser tratada químicamente para producir furfural y sus derivados, o bien ser hidrolizada enzimáticamente a monosacáridos y a continuación utilizada como sustrato de fermentaciones. La fracción de lignina puede ser despolimerizada para aprovechar los compuestos aromáticos o ser gasificada para obtener syngas.

Las principales barreras que dificultan a día de hoy el establecimiento de este tipo de biorrefinerías son fundamentalmente tecnológicas, sobre todo en lo concerniente al fraccionamiento de los componentes de la biomasa y el pretratamiento necesario para el aprovechamiento de la lignina y celulosa. De hecho, esta etapa es una de las más costosas y menos desarrolladas dado que la heterogeneidad de la biomasa hace que no exista un pretratamiento válido para todas ellas. Hoy en día, la valorización que se lleva a cabo con los residuos generados en la fabricación de papel es el aprovechamiento energético de las lejías negras.

¹⁰ Alemania ha identificado en su hoja de ruta sobre biorrefinerías hasta 10 posibles paltformas. Biorefineries Roadmap as part of the German Federal Government action plans for the material and energetic utilisation of renewable raw materials. 2012. Enlace: https://www.bmbf.de/pub/Roadmap_Biorefineries_eng.pdf

El desarrollo tecnológico permitirá la obtención de una gran variedad de productos industriales a partir de la celulosa y lignina, lejías negras y residuos forestales, pudiéndose integrar a la instalación los procesos de gasificación, pirólisis y fermentación para dar lugar a bioetanol, biomateriales, productos alimenticios y productos químicos, tales como adhesivos, dispersantes, pinturas, fármacos, textiles, etc.

2 Biorrefinería de material cereal

Este concepto de biorrefinería en la actualidad se corresponde con las plantas de etanol que utilizan materias primas con alto contenido en almidón como son el maíz, la cebada y el trigo. Dichas plantas generan una serie de subproductos que pueden ser aprovechados con diversos fines, entre los que se encuentran los DDG, que por sus características alimenticias y su alto contenido en fibra vegetal, se utilizan como complemento alimenticio para el ganado.

También, se pueden obtener otros co-productos como harinas, jarabe de maíz de alta concentración de fructosa, almidón, dextrosa, etc, los cuales pueden seguir rutas de procesamiento para la obtención de productos alimenticios, plásticos, pegamentos, adhesivos, etc.

La línea de productos podrá ampliarse cuando puedan aplicarse procesos termoquímicos y bioquímicos a la paja de cereal y al cañote de maíz, y así aprovechar el material lignocelulósico de la misma manera que ha sido descrito en las biorrefinerías de material lignocelulósico.

3 Biorrefinería de semillas oleaginosas

Estas instalaciones se corresponden con las plantas de biodiésel que utilizan como materias primas cultivos con alto contenido en aceite como la colza, girasol y soja. Como coproductos se obtiene la glicerina así como otros componentes con alto contenido en proteína que se emplean para fines alimentarios. Por su parte, la glicerina puede utilizarse en los sectores farmacéutico, cosmético y químico para la fabricación de emulsiones, humectantes, jabones, plastificantes, resinas, lubricantes, etc.

Las futuras plantas de biodiésel se adaptarán para la utilización de materias primas no empleadas en la industria alimentaria (como la jatropha y la palma africana), cuya fracción lignocelulósica puede ser utilizada también para producir biogas. Asimismo, se espera además un desarrollo tecnológico que posibilite la extracción de productos químicos con un valor añadido a partir de glicerina vía conversión química y fermentación.

Planta de procesamiento de semillas oleaginosas y producción de biodiesel

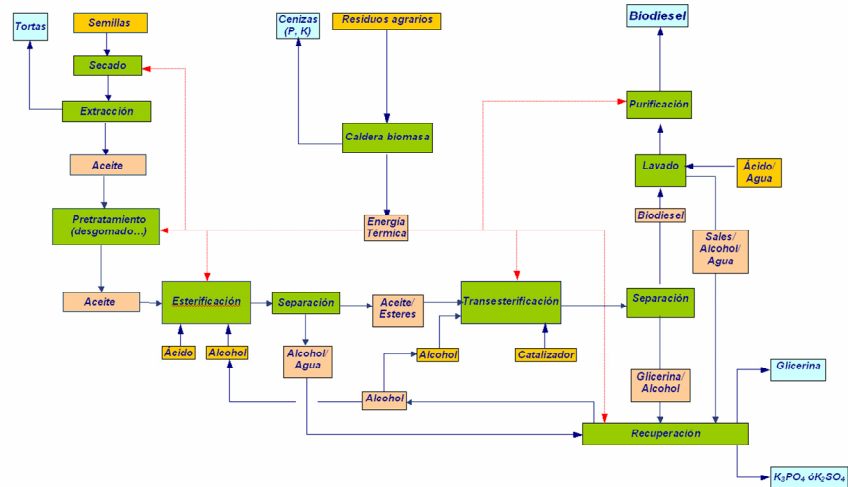


Fig. 8. Biorrefinería de semillas oleaginosas.

4 Biorefinería verde

Las materias primas incluidas en este concepto de biorrefinería se corresponden a las biomásas con alto contenido en humedad tales como pastos y cultivos verdes (alfalfa y trébol) y los cereales en fase temprana de desarrollo así como otros cultivos como la patata, la yuca, la remolacha azucarera y la caña de azúcar.

El sector más característico en el que se puede aplicar este tipo de concepto es la industria azucarera, en la cual durante el proceso industrial se generan dos líneas de productos: el jugo de prensado o jugo verde y la torta prensada.

El jugo de prensado o verde contiene una gran variedad de sustancias (proteínas, aminoácidos libres, ácidos orgánicos, tintes, enzimas, hormonas, otras sustancias orgánicas, minerales, etc), y a partir de él puede llegar a obtenerse ácido láctico y sus derivados, aminoácidos, etanol y ciertas proteínas. La torta, rica en nutrientes, suele destinarse a la alimentación animal aunque también puede emplearse para la producción de ácido levulínico y biocombustibles sintéticos (gas de síntesis e hidrocarburos) y pelets (Narodoslawsky, M. 1999).

Asimismo, estos procesos dan lugar a diferentes residuos que pueden emplearse para la obtención de biogás, en combinación con la producción de calor y electricidad.

La bioenergía en Andalucía.

En Andalucía, el potencial de biomasa está por encima de las 3.812.350 toneladas equivalentes de petróleo al año, según estimaciones de la Agencia Andaluza de la Energía. Hoy es la fuente de energía renovable que más cantidad de energía puede aportar al sistema. Dicho potencial se reparte de la siguiente manera: residuos agrícolas (34,7%), residuos industriales (23,1%), residuos forestales (8,5%), residuos ganaderos (2%), cultivos energéticos (16,2%) y residuos urbanos (15,5%). El aprovechamiento actual ronda el 30%. El recurso más importante, con creces, es el olivar.

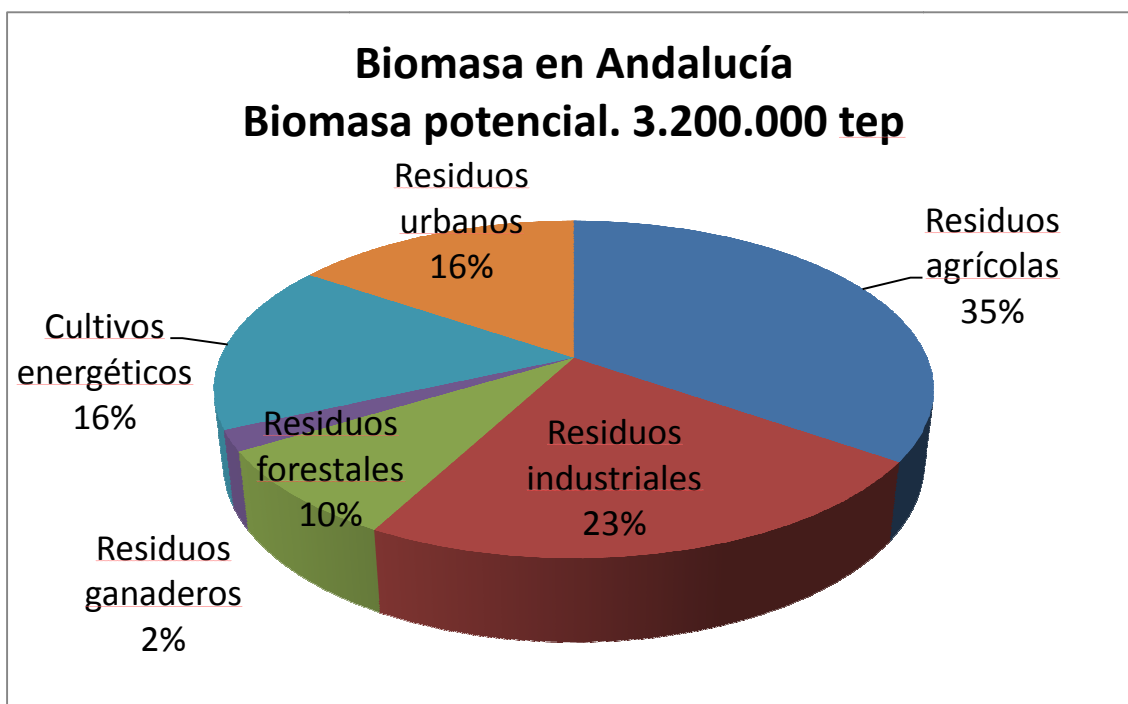


Fig. 9. Biomasa en Andalucía

La biomasa producida en Andalucía proviene de forma principal del sector agrario y asciende hasta casi 8 millones de toneladas al año. Es necesario señalar que hasta el 40 % de esta biomasa tiene su origen en el sector del olivar y los invernaderos. Por otra parte, la biomasa agroindustrial genera cerca de 6,8 millones de toneladas al año y la biomasa forestal residual alcanza las 320.000 toneladas (MAPA).

En el sector de la bionergía, Andalucía se halla a la vanguardia del uso de la biomasa con fines térmicos con un total de 27.000 instalaciones y 11 plantas de biocombustibles siendo líder de producción de biocombustibles y de generación eléctrica a partir de biomasa sólida y cogeneración contando con 18 centrales con una potencia instalada de 257 MW. Además cuenta con 19 plantas de biogás con una potencia de 30 MW que se incorporan en su mayoría a la red eléctrica y una pequeña parte se destina al autoconsumo.

En nuestra provincia se genera con fuentes renovables cerca de dos tercios de la energía eléctrica que se consume, fundamentalmente con biomasa

procedente del olivar y energía solar térmica y fotovoltaica. Dispone de ocho plantas de biomasa de 81,14 MW en total.

Consideraciones finales.

La bioeconomía se presenta como una respuesta a las actuales crisis sociales y ambientales derivadas del modelo energético y productivo actual. La bioenergía y las biorefinerías son elementos centrales en esta nueva economía.

El enfoque de la nueva bioeconomía circular representa una magnífica oportunidad para Andalucía que cuenta con un gran potencial de biomasa, unos sectores industriales bien desarrollados y una extensa red de conocimiento, factores claves en el desarrollo de la nueva economía.

El panorama descrito al principio puede parecer sombrío pero debemos tener esperanza. La historia de la ciencia nos enseña que los grandes descubrimientos que han cambiado nuestras vidas se han producido gracias a grandes consorcios de investigación, centros y grupos de investigación, Parques tecnológicos, grupos de creadores de conocimiento, investigadores de "garaje", alguna serendipia, pero que para dar sus frutos necesitan algo de apoyo, ambiente adecuado de libertad y creatividad y tiempo.

BIBLIOGRAFIA

- Agencia Andaluza de la Energía. 2018. Los biocarburantes en Andalucía.
- Agencia Provincial de la Energía. 2014. Biorrefinerías: una oportunidad de negocio para las zonas rurales y las industrias. Diputación de Avila.
- Agüera, J. 1991. Balances térmico y exergético de centrales térmicas. Ed. Ciencia 3.
- Agüera, J. 2011. Análisis exergoeconómicos en centrales térmicas. Ed. Ciencia 3.
- Bessou C., F. Ferchaud, B. Gabrielle, B. Mary. 2011. Biofuels, greenhouse gases and climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 31: 1-79.
- Blanco, C. 2016. Usando la biomasa forestal como una fuente de energía sostenible. Cap. 9. UPNA.
- Clark, J.H., V. Budarin, et al. 2006. Green chemistry and the biorefinery: a partnership for a sustainable future. *Green Chemistry*. 8: 853-860.
- Daly, H. 1993. Steady-State Economics: A new paradigm. *New Literary History*, 24(4), 811-816.

Dennis L. Meadows et al. 1972. The limits to growth. Universe Books. New York.

Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. Enlace: <https://www.boe.es/doue/2009/140/L00016-00062.pdf>.

Dorado MP, Ballesteros E, López FJ, Mittelbach M. 2004. Optimization of alkali-catalyzed transesterification of *Brassica carinata* oil for biodiesel production. *Energy & Fuels* 18:77-83.

Dorado MP, Ballesteros E, Mittelbach M, López FJ. 2004 Kinetic parameters affecting the alkali-catalyzed transesterification process of used olive oil. *Energy & Fuels* 18:1457-1462.

Ehrlich, P. y col. 2012. Securing natural capital and expanding equity to rescale civilization. *Nature*. 486, 68-73.

Estrategia andaluza de bioeconomía circular. 2018. Junta de Andalucía.

García Tapia, Nicolás. 2010. Jerónimo de Ayaz y Beaumont. Un inventor navarro. UPNA.

Gómez Romero, P. 2010. La re-evolución de la energía. Cap. 8 de "El sector energético ante un nuevo escenario". Ed. J.L. García Delgado y J.C. Jiménez. CNE. Civitas. Thomson Reuters. 159-188.

Georgescu-Roegen, N. 1996. La Ley de la Entropía y el proceso económico. Madrid: Fundación Argentaria. Originalmente publicado en inglés en 1971 bajo el título *The Entropy Law and the Economic Process*.

Jenk, J.F., Agterberg, et al. 2004. Products and processes for a sustainable Chemical Industry. *Green Chemistry*. 6: 544-556.

Lozano, M.A., Valero, A. 1993. Theory of the exergetic cost. *Appl. Energy*: 32 (4): 269-286.

Miller, G. Tyler Jr. 2000. *Living in the environment*. 11th Ed. Brooks/Cole

Narodoslawsky, M; 1999. "The Green Biorefinery, Proceedings 2nd Intern. Symp. Green Biorefinery", Feldbach, Austria.

Otero et al. 2007. Fueling industrial biotechnology growth with bioethanol". *Adv Biochem engin/Biotechnol* 108:1-40

Passet, R. 1996. Principios de bioeconomía. Fundación Argentaria.

Prieto, P. 2017. En la encrucijada entre las energías fósiles y las energías renovables. *Economistas sin fronteras*, nº 24.

Ragauskas A. J. et al. 2006. The Path Forward for Biofuels and Biomaterials. *Science*, 311: 484-489.

Valero, A. A. Valero. 2014. *Thanatia: the destiny of earth's mineral resources: a thermodynamic cradle-to-cradle assessment of the earth*. World Scientific Publishing, London-UK: Imperial College Press.

Volpato et al. 2007. Engine management for Flex Fuel plus compressed natural gas vehicles. *Highway and urban environment book series: alliance for global sustainability series 12*, 23-33.

Yuan J. S., K. H. Tiller, H. Al-Ahmad, N. R. Stewart and C. N. Stewart Jr. 2008. Plants to power: bioenergy to fuel the future. *Trends in Plant Science*, 13: 421-429.