

Silvina M. Manrique

BIOMASA

CON FINES ENERGÉTICOS



Recursos, potencialidad y cambio climático



Capítulo I

La impresión de este libro fue realizada en la imprenta del Congreso de la Nación (Argentina) a través de la gestión de la Presidenta de la Comisión de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, diputada Sandra Castro.



CAPÍTULO I

LA BIOMASA COMO RECURSO ENERGÉTICO

1. El sol: Origen de la biomasa
2. Concepto. Tipos y clasificaciones de la biomasa
3. Ventajas y desventajas del empleo de biomasa como energético
4. Principales barreras y oportunidades de la bioenergía
5. Sistemas de aprovechamiento energético de la biomasa
6. Cadena energética de la biomasa. Sistemas bioenergéticos
7. Imprecisiones e indefiniciones a tener en cuenta
8. Los RDF y RSF

Universidad Tecnológica Nacional – República Argentina

Rector: Ing. Héctor C. Brotto

Vicerrector: Ing. Pablo Rosso

edUTecNe – Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional

Secretario Académico: Ing. Rudy Omar Grether

Coordinador General: Ing. Ulises J. P. Cejas

Responsable de Ediciones: Ing. Eduardo Cosso

Área de Promoción y Comercialización: Fernando Cejas

Área Pre-prensa y Producción: Ing. Carlos Busqued

Área Publicaciones en Web: Téc. Bernardo H. Banega

Coordinador del Comité Editorial: Dr. Jaime A. Moragues

Asesor Académico: Dr. Marcos Cohen



www.edutecne.utn.edu.ar



Prohibida la reproducción total o parcial de este material sin permiso expreso de edUTecNe

Biomasa con fines energéticos

**Recursos, potencialidad
y cambio climático**

Dra. Silvina M. Manrique

edUTecNe

Buenos Aires, 2017

Biomasa con fines energéticos

Dra. Silvina M. Manrique

Diseño de Tapa: Carlos Busqued

Diseño Interior: Alfredo Pintos

Silvina M. Manrique

Biomasa con fines energéticos: recursos, potencialidad y cambio climático. -
1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : edUTecNe, 2015.
220 p. ; 210x297 cm.

ISBN 978-987-1896-41-7

1. Medio Ambiente. 2. Energía. 3. Biomasa . I. Título
CDD 333.7

Fecha de catalogación: 29/04/2015

Queda hecho el depósito que marca la ley N° 11.723

© edUTecNe, 2017

Sarmiento 440, Piso 6°

(C1041AAJ) Buenos Aires, República Argentina

Impreso en Argentina – *Printed in Argentina*

SÍNTESIS DE LOS CONTENIDOS

El objetivo de este libro es brindar un panorama actualizado de la biomasa como fuente de energía renovable, clarificando conceptos, analizando su situación a nivel mundial y nacional, identificando las variadas discusiones actuales con respecto al uso y manejo de estos recursos, y describiendo los principales vínculos de esta fuente energética con el cambio climático global y la sustentabilidad. La obra hace hincapié en el análisis de los recursos de biomasa utilizados al presente, describiendo herramientas técnicas y metodológicas que orientarán a planificadores y proyectistas en el estudio, caracterización y cuantificación de su potencial en las diferentes regiones. A diferencia de otras obras en el tema, este libro busca no sólo facilitar el aprendizaje y profundización en este campo del saber con claras orientaciones técnicas, sino que también propone, a la par, discusiones éticas y reflexiones teóricas, imprescindibles para la correcta identificación de alternativas energéticas y ambientales más sólidas y sustentables.

PÚBLICO LECTOR

La presente obra está dirigida a especialistas o interesados en el campo de la biomasa como fuente de energía renovable. Si bien el libro profundiza sobre aspectos técnicos que seguramente serán de mayor provecho para personas que posean conocimientos básicos del área de las ingenierías, ciencias exactas y naturales, o experiencia previa en el tema, se considera igualmente valioso para ser utilizado por todos aquellos actores involucrados con cualquiera de las etapas de una cadena energética de biomasa, a los cuales esta obra podría orientar para la toma de decisiones fundamentadas.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1: LA BIOMASA COMO RECURSO ENERGÉTICO

CAPÍTULO 2: LA BIOMASA EN EL CONTEXTO ENERGÉTICO MUNDIAL

CAPÍTULO 3: RECURSOS DE BIOMASA DE TIPO “SECO”

CAPÍTULO 4: RECURSOS DE BIOMASA DE TIPO “HÚMEDO”

CAPÍTULO 5: ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE RESIDUOS DE TIPO SECO Y HÚMEDO

CAPÍTULO 6: EL ROL DE LA BIOMASA EN EL CAMBIO CLIMÁTICO

REFERENCIAS

CAPÍTULO 1

LA BIOMASA COMO RECURSO ENERGÉTICO

1. EL SOL: ORIGEN DE LA BIOMASA

La energía de la biomasa proviene del sol. Mediante la **fotosíntesis** las plantas absorben y almacenan una parte de esta energía que llega a la tierra; las células vegetales utilizan esta radiación para formar sustancias orgánicas a partir de compuestos simples y del dióxido de carbono (CO₂) presente en el aire. En símbolos, la fotosíntesis puede expresarse como:



La **fotosíntesis** es un proceso complejo. Los seres vivos poseedores de cloroplastos (donde están la clorofila y otros pigmentos) captan energía luminosa procedente del sol y la transforman en energía química (ATP)^[1] y en compuestos reductores (NADPH)^[2], y con ellos transforman el H₂O y el CO₂ en elementos orgánicos reducidos, liberando oxígeno (O₂). Para este proceso es necesaria la presencia de minerales. Los productos finales de este proceso son la sacarosa (disacárido) o el almidón (polisacárido). De acuerdo a lo descrito, puede considerarse **la biomasa como una forma de energía solar** en la que el receptor, transformador y acumulador de la energía solar no es un sistema artificial sino uno ya existente en la naturaleza.

La energía solar así transformada por las plantas se transfiere posteriormente a los animales a través de las cadenas tróficas. El reino animal incorpora, transforma y modifica la energía química contenida en las plantas. En este proceso de transformación de la materia orgánica se generan subproductos que no tienen valor para la cadena nutritiva o no sirven para la fabricación de productos de mercado, pero que pueden utilizarse como combustible en diferentes aprovechamientos energéticos (Figura 1.1.).

[1] Adenosín trifosfato.

[2] Nicotinamida adenina dinucleótido fosfato.

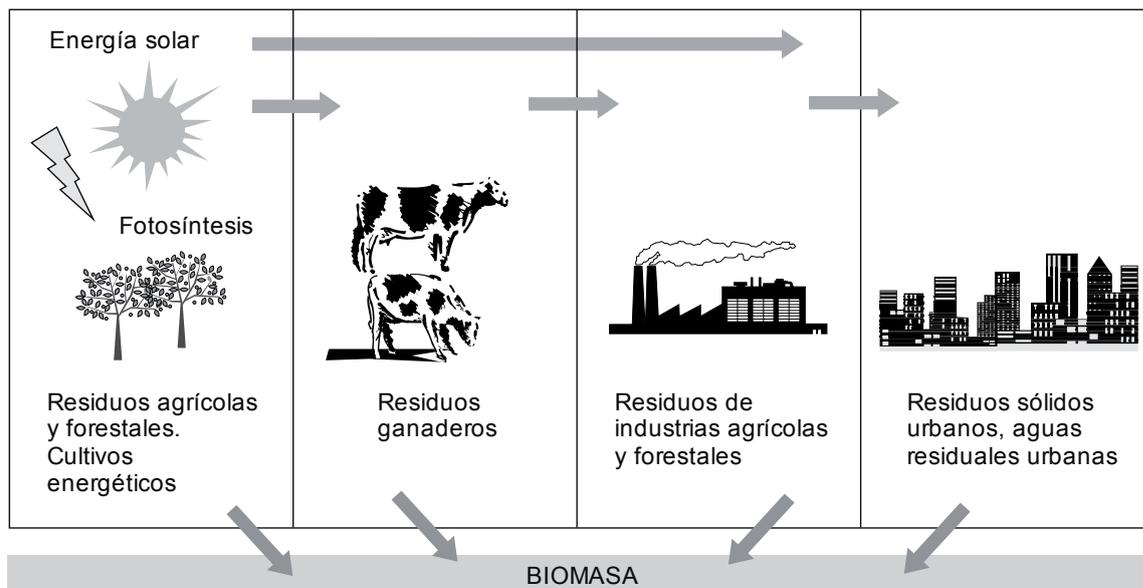


Fig.1.1. Fuentes de generación de biomasa.

En este contexto, **la producción de energía a partir de la biomasa está basada** en la utilización de los materiales residuales producidos por los animales y las plantas e incluso las mismas como tales, para la obtención de energía mediante diferentes procesos de transformación. El proceso de combustión (oxidación química) es el medio de extracción por excelencia de la energía química de un compuesto de biomasa. Mediante el mismo se libera en forma de calor la energía acumulada en los enlaces químicos de los materiales biomásicos para ser utilizada posteriormente en diversas aplicaciones. Hay que considerar a la combustión de la biomasa así definida como un proceso acelerado respecto al que se produce naturalmente, conocido como putrefacción de la materia orgánica (Figura 1.2.).

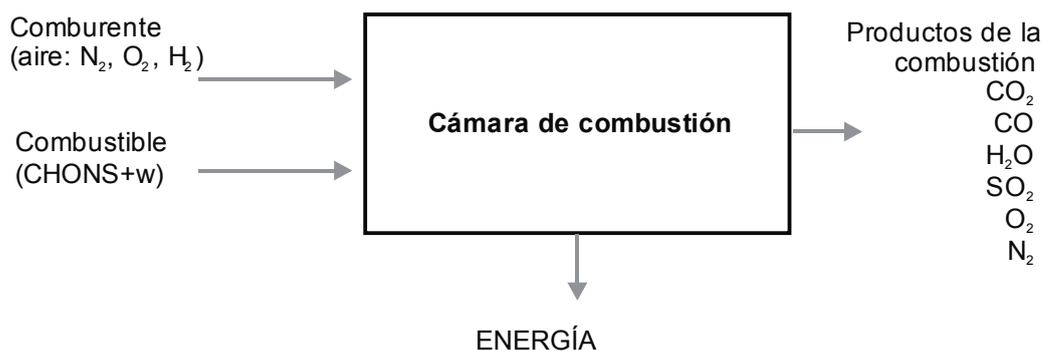


Fig.1.2. Esquema de flujo de masa y energía en la combustión (Puigdevall y Galindo, 2007).

La materia orgánica, en cuanto a su composición elemental, está formada principalmente de carbono (C), oxígeno (O), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S). La participación concreta de cada uno de estos elementos depende del tipo de materia orgánica de que se trate. Se puede representar de manera general con la notación **CHONS** (materia compuesta principalmente por estos elementos, sin determinar la proporción existente de los mismos)^[3]. Cuando un recurso de biomasa es sometido a

^[3] La fórmula elemental de la biomasa microbiana es $C_5H_7NO_2$.

un proceso de combustión completa queda en forma de CO_2 , vapor de agua y óxidos de nitrógeno (NO_x), acompañados de nitrógeno molecular (N_2) y el O_2 no consumido en la combustión. Es usual separar materia activa (**C, H, O y S**) y materia inerte (cenizas, humedad y N). En la combustión, los elementos activos del combustible (C, H, S) reaccionan con el oxígeno del aire (comburente) dando lugar a CO_2 , H_2O y SO_2 .

La valorización de la energía de biomasa pasa actualmente por la combustión, ya sea como un proceso intermedio o como el final, salvo cuando se desea obtener otro producto de utilización en la industria química a partir de la biomasa o cuando se la utiliza en pilas o células de combustible.

2. CONCEPTO. TIPOS Y CLASIFICACIONES DE LA BIOMASA

Según el Diccionario de la Real Academia Española, existen dos definiciones de biomasa:

Biomasa:

1. **f. Biol.** Materia total de los seres que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o de volumen.
2. **f. Biol.** Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

La primera corresponde al campo de la biología, la ecología y otras ciencias naturales, mientras que **la segunda es específica para el campo de las Energías Renovables**. Es muy importante tener en claro esta diferencia, para no generar confusiones. En este sentido, la biomasa con fines energéticos no necesariamente es materia viva, sino que puede ser también muerta. En este libro, por tanto, desde el punto de vista energético (siguiendo a Puigdevall y Galindo, 2007):

Se considera biomasa a todas aquellas sustancias orgánicas que fueron formadas a partir de los compuestos de carbono elaborados mediante el proceso de fotosíntesis, que pueden haber sido sometidas o no a diferentes procesos de transformación, y que son susceptibles de ser utilizadas por debajo de su tasa de renovación natural (en cantidad producida por unidad de tiempo). No se incluyen por tanto en la definición a los combustibles fósiles que si bien tienen un primer origen en los compuestos formados en la fotosíntesis, se usan muy por encima de su tasa de renovación (tardan millones de años en formarse).

La “biomasa” incluye así un conjunto muy heterogéneo de materiales que tienen en común el poseer la materia orgánica como componente principal. La legislación de diferentes países excluye del término “biomasa” cualquier tipo de material que se

catalogue como **tóxico o peligroso**. Según la Especificación Técnica Europea CEN/ TS 14588 “biomasa es todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización”.

El término bioenergía implica toda la energía que puede obtenerse cuando la biomasa es sometida a algún proceso de conversión energética (en el Tema 5 de este capítulo se mencionan tales procesos).



Diferentes sistemas de clasificación han sido propuestos en la búsqueda de incluir todos los tipos de biomasa que pueden ser utilizados con fines energéticos. Muchas veces estas clasificaciones aparecen combinadas (Figura 1.3.). Algunas de las más importantes se detallan a continuación (ver también Tabla 1.1.)

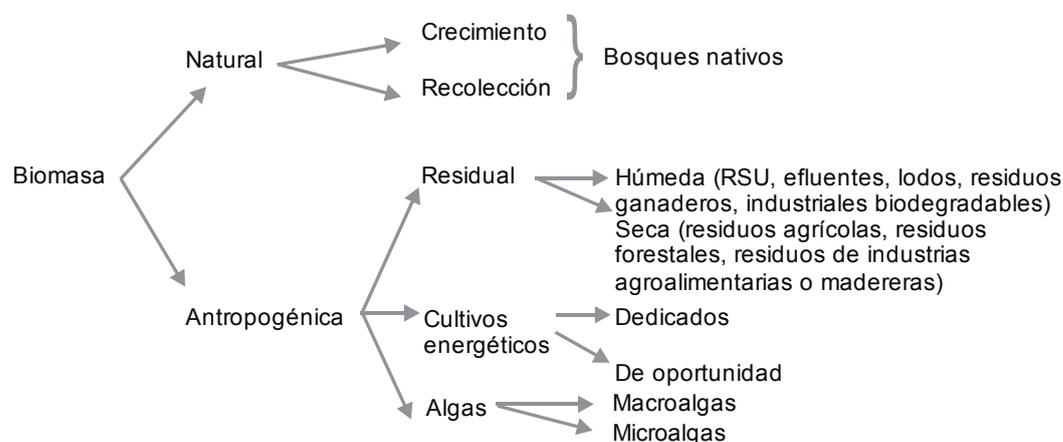


Fig.1.3. Clasificación combinada de los recursos de biomasa. Donde RSU: residuos sólidos urbanos.

- ◆ El origen de producción de la biomasa: natural (generada espontáneamente en la naturaleza), o antropogénica o producida (generada como resultado de la intervención humana; puede ser residual o implantada);
- ◆ Del modo en que se obtiene: primaria (se obtiene directamente de un ecosistema natural), secundaria (algún nivel de transformación) y terciaria (industrias de procesamiento);
- ◆ Su finalidad de uso: residual, cultivos energéticos (cultivos realizados con el único fin de obtener energía, principalmente cultivos agrícolas), algas;
- ◆ Su contenido de humedad: biomasa residual seca o húmeda (más de 50 % de humedad);
- ◆ Los principales compuestos que forman parte de su composición: biomasa azucarada, oleaginosa, amilácea, lignocelulósica, con hidrocarburos;
- ◆ El sector de suministro: forestación, agricultura, industria, residuos;

- ♦ Los tipos de plantas de biomasa existentes: biomasa leñosa, biomasa no leñosa, residuos procesados, combustibles procesados.

Desde el punto de vista energético, resulta más conveniente considerar los recursos de biomasa según su contenido de humedad, que tendrá una casi directa relación con el proceso de conversión energética a aplicarse:

- ♦ **Biomasa seca (BS):** Aquella que puede obtenerse en forma natural con un contenido de humedad menor al 50 %^[4], como residuos forestales (de aprovechamientos madereros o tratamientos silvícolas), residuos agrícolas (cultivos herbáceos y podas de frutales), residuos de industrias agroalimentarias o de transformación de la madera, cultivos energéticos (anuales o perennes). Lo ideal para su aprovechamiento energético es el empleo de procesos termoquímicos.
- ♦ **Biomasa húmeda (BH):** Se denomina así cuando el porcentaje de humedad supera el 50 %, como por ejemplo en aguas residuales urbanas, residuos ganaderos, flujos residuales industriales, residuos sólidos urbanos-RSU (considerando exclusivamente la fracción orgánica, susceptible de ser tratada mediante un proceso biológico). Resulta especialmente adecuada para su tratamiento mediante procesos bioquímicos, o en algunos casos particulares, mediante simples procesos físicos, obteniéndose combustibles líquidos y gaseosos.

Esta clasificación no es definitiva, ya que todo tipo de recurso puede ser empleado utilizando cualquier proceso si la biomasa es sometida a pretratamientos para su adecuación (reducción de humedad, tamaño, eliminación de componentes no deseados, etc.). Sin embargo, mientras mayor cantidad de pretratamientos sean incorporados, menor será el margen energético obtenido y más altos los costos generados.

A lo largo de este libro consideraremos que los biocombustibles pueden ser sólidos, líquidos y/o gaseosos. Biomasa se usará para referirse principalmente a la materia prima (residual forestal, residuos agrícolas, pecuarios, de industrias de transformación y agroindustriales, efluentes cloacales, plantas anuales o plurianuales con fines energéticos, microalgas, aguas residuales urbanas, residuos sólidos urbanos, lodos de sedimentación, etc.), a partir de la cual podrán obtenerse biocombustibles de cualquier naturaleza.

^[4] Si bien en la literatura no se realiza la aclaración, este contenido de humedad puede considerarse en **base húmeda** (es decir, peso de agua del material sobre peso total de la muestra, por 100). Este porcentaje, expresado en **base seca** (peso de agua sobre peso seco de la muestra por 100) será de 100 %.

Clasificación	Categoría	Ejemplo
Origen de producción	Biomasa natural	Biomasa natural en pie (cuyo margen aprovechable es el crecimiento anual del bosque) y residuos de podas naturales.
	Biomasa antropogénica	Cultivos energéticos, biomasa residual agrícola y forestal, residuos de industrias de transformación: papeleras, industrias de transformación de la madera y agroalimentarias.
Finalidad de uso	Biomasa residual	Residuos agrícolas, forestales y de industrias derivadas de ambas, la fracción orgánica de RSU.
	Cultivos energéticos	El cardo (<i>Cynara cardunculus</i>), el miscanto (<i>Miscanthus sinensis</i>), el girasol (<i>Helianthus annuus</i>), la colza, etc.
	Algas	Incluye microalgas (por ejemplo <i>Botryococcus braunii</i> , <i>Chlorella protothecoides</i> , <i>Nannochloris sp.</i> <i>Chlorella vulgaris</i> , etc.) y macroalgas.
Características del recurso	Biomasa residual seca	Residuos de actividades agrícolas (paja, tallos, bagazo), forestales (ramas de poda, enfermos), industrias agroalimentarias (orujo de oliva, marro de café, cascarillas de arroz) y de transformación de madera (cortezas, costeros, serrines, virutas, polvo de lijado, recortes, etc.).
	Biomasa residual húmeda	Aguas residuales urbanas (doméstica, comercial, etc.) e industriales (agroalimentarias, mataderos, papeleras, etc.), los residuos ganaderos (de la actividad ganadera estabulada, principalmente purines) ^[5] , y los residuos sólidos urbanos (RSU) (sólo la fracción orgánica de los mismos).
Principales compuestos presentes	Biomasa azucarada	La caña de azúcar y la remolacha azucarera, entre otros.
	Biomasa amilácea	Maíz, trigo, cebada, entre otros.
	Biomasa oleaginosa	Girasol, colza, soja, palma aceitera.
	Biomasa lignocelulósica	Representan un 65 % de la biomasa total que se produce en el planeta, incluyendo leñas, madera, biomasa residual agrícola, forestal (y sus industrias de transformación).
	Biomasa con hidrocarburos	Especies como las del género <i>Euphorbia</i> , entre otras.
Sector de suministro	Forestación	Plantaciones de corta rotación (sauce, álamo, eucaliptos, etc.), restos de madera y chips desde las cortas.
	Agricultura	Cultivos herbáceos (<i>Miscanthus</i>), semillas oleaginosas (colza, girasol), cultivos azucarados (caña de azúcar, sorgo dulce), cultivos almidonados (maíz, trigo), paja, restos de podas de viñedos y frutales, estiércol húmedo y seco.
	Industria	Residuos industriales leñosos, aserrín y otros. Residuos fibrosos vegetales desde industrias de papel, etc.
	Residuos	Residuos de parques y jardines, madera residual o de demolición, fracción orgánica de los RSU, residuos biodegradables de enterramientos, aguas residuales.
Plantas de biomasa existentes	Biomasa leñosa	Árboles, arbustos y rastreras, arbustos como café y té, materiales leñosos del suelo forestal, bambú, palmas.
	Biomasa no leñosa	Cultivos energéticos, paja de cereal, algodón, mandioca, raíces, pastos, plátanos, papas, plantas acuáticas.
	Residuos procesados	Cáscaras y cascarillas de cereales, bagazo, residuos de piña y otros frutos, plantas de tortas de aceite, aserrines, corteza de madera industrial y residuos de cosecha, licor negro, RSU, etc.
	Combustibles procesados	Carbón (madera y residuos), briquetas (biomasa densificada), metanol y etanol (alcohol de madera), plantas de aceites, gas de síntesis, biogás.

Tabla 1.1. Clasificaciones, categorías y ejemplos de biomasa.

[5] Purines: estiércol y orín entremezclados, originados desde la crianza de cerdos.

3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL EMPLEO DE BIOMASA COMO RECURSO ENERGÉTICO

Las **cualidades internas** de la biomasa como recurso energético, tanto positivas como negativas, se resumen en la Tabla 1.2.

Ventajas o fortalezas	Desventajas o debilidades
a) Neutra en emisiones de carbono	a) Dispersa
b) Bajo contenido de azufre	b) Estacional
c) Mundialmente disponible	c) Menor densidad energética
d) Accesible	d) Alto contenido de humedad
e) Renovable	e) Susceptible a eventos naturales o antrópicos
f) Diversa	
g) Versátil	
h) Biodegradable	
i) Almacenable	
j) Potencialidad energética	

Tabla 1.2. Principales ventajas y desventajas de la biomasa como recurso energético.

La biomasa es un **recurso neutro en emisiones de carbono**, ya que se considera que todo el CO_2 emitido en la utilización energética ha sido previamente fijado en las estructuras del material vegetal durante su crecimiento, por lo que no contribuye al incremento de su concentración en la atmósfera, y por tanto, al aumento del efecto invernadero (Figura 1.4.). Sin embargo, este balance puede no ser completamente nulo si se realiza un análisis de ciclo de vida. Las emisiones de azufre también son bajas, ya que su contenido de este elemento es generalmente inferior al 0,1 %.

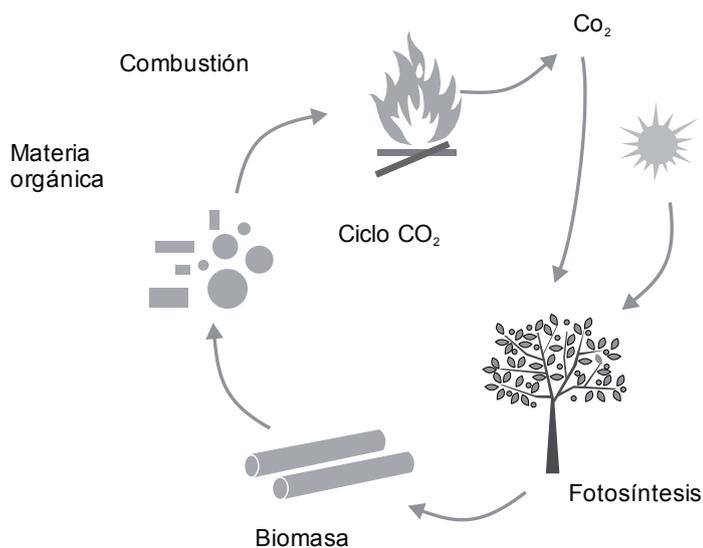


Fig.1.4. Ciclo de CO_2 al utilizar biomasa como combustible energético (Fuente: probio.gub.uy).

Se trata de un **recurso renovable**, si bien su renovabilidad dependerá de que la intensidad de utilización no supere su tasa de renovación natural, o de que haya continua reposición del mismo. En la naturaleza, y sin intervención humana, es

innatamente renovable, **puede degradarse** a partir de procesos naturales ocurridos en el medio natural a un ritmo más o menos lento, y se encuentra **ampliamente disponible** en sus diferentes manifestaciones (posiblemente, los sitios con menor presencia de biomasa sean los desiertos y zonas áridas del mundo). La **accesibilidad** depende de las características geográficas (mares, zonas de alta montaña, etc.), pero también del tipo de biomasa que se considere (por ejemplo, los lodos de depuradora son menos accesibles que los residuos agrícolas o leña, desde el punto de vista de su aprovechamiento inmediato), aunque en términos generales, no requiere de equipos específicos y personal calificado para poder localizar y acceder a los recursos (como los combustibles fósiles).

La gran **diversidad** de materiales que se engloban bajo este término la convierten en una fuente de energía **versátil**, a partir de la cual pueden obtenerse combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, empleando procesos más o menos complejos, y para diversas aplicaciones. El **potencial energético** de la biomasa varía en función del tipo de recurso y sus características (humedad, constitución elemental, cenizas, etc.).

El empleo de la biomasa como recurso energético también implica algunas complicaciones con respecto a los combustibles fósiles. Su alto grado de **dispersión** reduce y limita su campo potencial de empleo: si bien existen diferencias en función del tipo de biomasa, generalmente un radio de 50-60 km es el máximo aceptable para la instalación de algún tipo de infraestructura de aprovechamiento energético.

Los recursos de biomasa están disponibles **estacionalmente**, o a intervalos de tiempo determinados, por lo que es necesario algún sistema de almacenamiento que permita lograr la continuidad en el suministro del recurso cuando éste es empleado con fines energéticos, y esta **disponibilidad puede ser afectada** por eventos climáticos (altas o bajas temperaturas, mayor o menor precipitación), biológicos (plagas o enfermedades) o catastróficos (incendios, inundaciones, sequías).

La biomasa posee **menor densidad energética** que los combustibles fósiles, requiriendo sistemas de almacenamiento por lo general mayores, y, dado su **mayor contenido de humedad**, hace necesario para algunos tipos de recursos, un proceso de secado previo a la valorización en determinadas aplicaciones de combustión y gasificación.

4. PRINCIPALES BARRERAS Y OPORTUNIDADES DE LA BIOENERGÍA

En cuanto a aspectos externos, que actúan promoviendo o dificultando el avance en el desarrollo de la bioenergía, se identifican como principales los que se muestran en la Tabla 1.3. El aprovechamiento energético de la biomasa podría contribuir a la **diversificación energética y seguridad de suministro** en localidades aisladas, reduciendo la dependencia de energía desde fuentes importadas, y creando **oportunidades de empleos** estables en áreas rurales y entre pequeñas y medianas

empresas, fomentando el desarrollo regional. Gran parte de los equipos necesarios pueden ser fabricados localmente. Puede contribuir a la lucha contra la **desertificación**, ya que posibilita el uso productivo de tierras marginales, en pendientes o semiáridas y la implantación de cultivos energéticos en tierras abandonadas, lo que podría evitar la erosión y degradación del suelo. Asimismo, puede integrarse con procesos de **recuperación ambiental**, principalmente cuando corresponden a la utilización de subproductos de procesos productivos o residuos de actividades humanas (como los RSU).

Oportunidades	Amenazas o barreras
a) Diversificación energética	a) Débil desarrollo de mercado
b) Seguridad de suministro	b) Logística de suministro y una poco organizada distribución de los biocombustibles
c) Mitigación de gases de efecto invernadero	c) Los ámbitos administrativo y legislativo resultan cuellos de botella
d) Generación de empleo rural	d) Los costos de las tecnologías de bioenergía y de los recursos
e) Reducción de emisiones contaminantes	e) Uso de la tierra y aspectos ambientales: controversia de beneficios de biocombustibles
f) Lucha contra desertificación	f) Barreras técnicas y tecnológicas
g) Reducción de residuos y desechos contaminantes	g) Falta de información, participación y aceptación pública

Tabla 1.3. Principales oportunidades y barreras de la bioenergía.

El uso de bioenergía **disminuye las emisiones nocivas** (CO_2 , NO_x , SO_2), en relación con las generadas por el empleo de combustibles fósiles, lo que puede tener consecuencias benéficas sobre la salud humana y puede contribuir en la **mitigación del cambio de clima**, al disminuir las emisiones de gases efecto invernadero comparada con los combustibles fósiles.

En términos generales, la mayoría de los autores coinciden en que las principales barreras no son las de índole técnica (rendimiento de equipos, eliminación de cenizas, alimentación del material, sistemas de pretratamiento, etc.), sino aquellas **económicas, institucionales y logísticas** (coordinación de la cadena de suministro), las que frenan la expansión de la bioenergía.

Así, por ejemplo, la relación oferta-consumo frecuentemente es definida por el mismo agente, sin una valoración explícita del recurso; no existen estructuras de suministro para la oferta de biocombustibles, a lo que se suma que los canales de distribución de la biomasa no están tan desarrollados como los de los combustibles fósiles; existe escasa coordinación intersectorial; el desarrollo de la bioenergía requiere el impulso de incentivos, subsidios y exenciones que permitan hacer frente a los desembolsos iniciales y fomenten el desarrollo de este tipo de iniciativas; las

normativas y organismos de fiscalización y control resultan muchas veces insuficientes; se requiere **mayor divulgación y promoción** de procesos participativos en el desarrollo de proyectos bioenergéticos, que estimulen confianza y aceptación del público (los proyectos inconsultos son percibidos generalmente por las comunidades a partir de los impactos negativos en el área de implementación, y predisponen al rechazo de nuevas iniciativas). **Estudios técnico-económicos específicos** que demuestren la viabilidad del proyecto y sus impactos son necesarios en cada caso. Seguramente, no todos los proyectos podrán pasar de la etapa de prefactibilidad.

5. SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA

5.1. Aplicaciones de la biomasa

En cuanto a las aplicaciones de la biomasa, deben distinguirse aquellas que persiguen **finés energéticos**, de las que no tienen este propósito. Si bien la aplicación energética es el principal objetivo en este libro, muchos otros usos no energéticos pueden favorecer, promover e incluso financiar aquellos aspectos energéticos asociados a la biomasa. Entre algunos de los **usos de la biomasa no energéticos** pueden mencionarse: fertilización y mejoramiento de suelos (compost, lombricompost, coberturas verdes); protección de cultivos (cortinas rompevientos); conservación de biodiversidad (corredores biológicos); forrajeo de animales; protección y mejoramiento de suelos; fitorremediación de suelos contaminados; fijación de dunas y suelos; secuestro de carbono; entre otros. Sin embargo, **su aporte energético y reducción de emisiones de CO₂ son dos de sus cualidades más apreciadas actualmente** (este tema será tratado en el capítulo 6).

Entre las **aplicaciones energéticas** se tienen principalmente: térmicas, eléctricas y mecánicas (que pueden ser combinadas):

- ♦ **Generación de energía térmica:** generalmente la biomasa residual seca es utilizada para cocción y calefacción mediante un proceso de combustión. Mundialmente, el 86 % de la energía producida con biomasa se emplea en aplicaciones de este tipo. Sin embargo, también puede quemarse el biogás procedente de la digestión anaerobia de un residuo de tipo húmedo, el gas de síntesis generado en la gasificación de un residuo sólido o los biocarburantes (aunque su principal aplicación es en motores o turbinas). La biomasa con un contenido de humedad de menos de 50 % puede ser usada en procesos de combustión (Permchart y Koupryanov, 2004), pero éste es más eficiente con un contenido máximo de 30 % (base seca, o 23 % en base húmeda. Los cambios de bases se explican en el Capítulo 3, ítem 2) ^[6]

[6] Por ejemplo una humedad del 150 % base seca (b.s.) significa que cada kilogramo de madera seca posee 1,5 (kg) de agua. Esta humedad equivale a 60 % de agua base húmeda (b.h.).

- ◆ **Generación de energía eléctrica:** en función del tipo y cantidad de biomasa disponible varía la tecnología más adecuada a emplear para este fin. Las principales tecnologías utilizadas son: turbina de vapor, turbina de gas (si los gases de escape de la turbina, que poseen una alta temperatura, se aprovechan en un ciclo de vapor se habla de un ciclo combinado), motor alternativo de combustión (MACI) y pilas de combustible (el biogás o gas de gasificación puede utilizarse en estas tecnologías todavía no plenamente desarrolladas y asentadas en el mercado). La utilización de MACI (de ciclo Otto o diésel) para la producción de electricidad o cogeneración no es algo nuevo, resultando especialmente idóneos en sistemas de dimensiones pequeñas o medias (15 kW -30 mW) y siempre que se requiera un motor que trabaje con rendimiento elevado. Cuando se demandan pequeñas potencias, se recurre al motor de ciclo Otto (15-50 kW), si bien se construyen hasta 2.000 kW. Aunque normalmente se emplea el motor diésel, por trabajar con mayor rendimiento equivalente al de las grandes centrales termoeléctricas.
- ◆ **Generación de energía mecánica:** los biocarburantes (que incluyen básicamente biodiésel y bioetanol) pueden ser empleados en los motores alternativos del sector de transporte (automóviles, camiones, autobuses) sustituyendo total o parcialmente a los combustibles fósiles (Figura 1.5.). En industrias agrarias que dispongan de una adecuada materia prima oleaginosa es una interesante opción el empleo de biodiésel en maquinaria agrícola autopropulsada (tractores, cosechadoras, etc.) sustituyendo parcialmente a los combustibles fósiles. Sin embargo, la tendencia es hacia la creación de grandes plantas de producción y la distribución conjunta con la red de estaciones de servicio de carburantes fósiles.
- ◆ **Cogeneración:** es la producción conjunta de energía térmica y eléctrica, con lo cual se consiguen rendimientos globales superiores a los sistemas de producción de energía térmica o eléctrica por separado. El principio de funcionamiento de la cogeneración se basa en el aprovechamiento de los calores residuales de los sistemas de producción de electricidad comentados (turbinas de vapor, turbinas de gas y motor alternativo), de forma que en vez de perderse en forma de calor, esta energía se aprovecha para usos térmicos, obteniéndose rendimientos totales mucho mayores. Esta alternativa es ventajosa principalmente cuando una empresa o industria presenta consumos térmicos y eléctricos importantes.

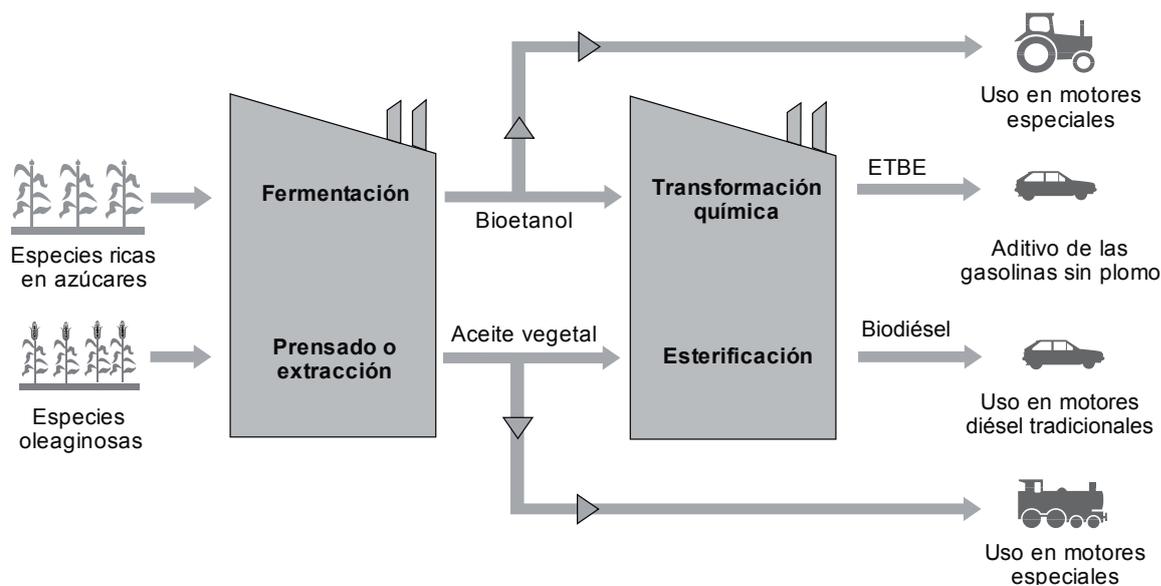


Fig.1.5. Esquema de la producción de biocarburantes (biodiésel y bioetanol).

Fuente: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/producción-de-electricidad/xiv.-las-centrales-de-biomasa

5.2. Procesos de conversión energética de la biomasa

Según las aplicaciones para las cuales se va a destinar (calor, electricidad, etc.), y el tipo de biomasa disponible (entre los principales factores), existen diversos procesos de conversión energética posibles de ser aplicados (Figura 1.6.). Estos procesos pueden ser básicamente de tres tipos:

- Termoquímicos (combustión, cocombustión, gasificación, pirólisis, licuefacción).
- Bioquímicos (digestión anaeróbica, fermentación alcohólica).
- Físico-químicos (prensado, extracción química, refinado y transesterificación).

Los procesos termoquímicos básicamente se aplican cuando se cuenta con un residuo de biomasa de tipo seco. Es aquel en el que se favorecen cierto tipo de reacciones químicas por medio de la aportación de calor y la elevación de la temperatura de los reactivos. Según se aumenta la temperatura, se promoverá la ruptura de los enlaces de algunas moléculas, generando fracciones de menor masa, y posteriormente la reacción entre las especies generadas, que buscarán alcanzar los compuestos más estables y favorables (estado de mínima energía). Por tanto, combustión, pirólisis y gasificación son procesos de la misma naturaleza con reacciones sólido-gas. Es decir, partiendo de un combustible sólido, al aumentar la temperatura, éste se descompone. A esas temperaturas el combustible sólido o las sustancias en que se ha descompuesto, pueden interactuar con la atmósfera. Según como sucede todo esto, se tendrá pirólisis, gasificación o combustión.

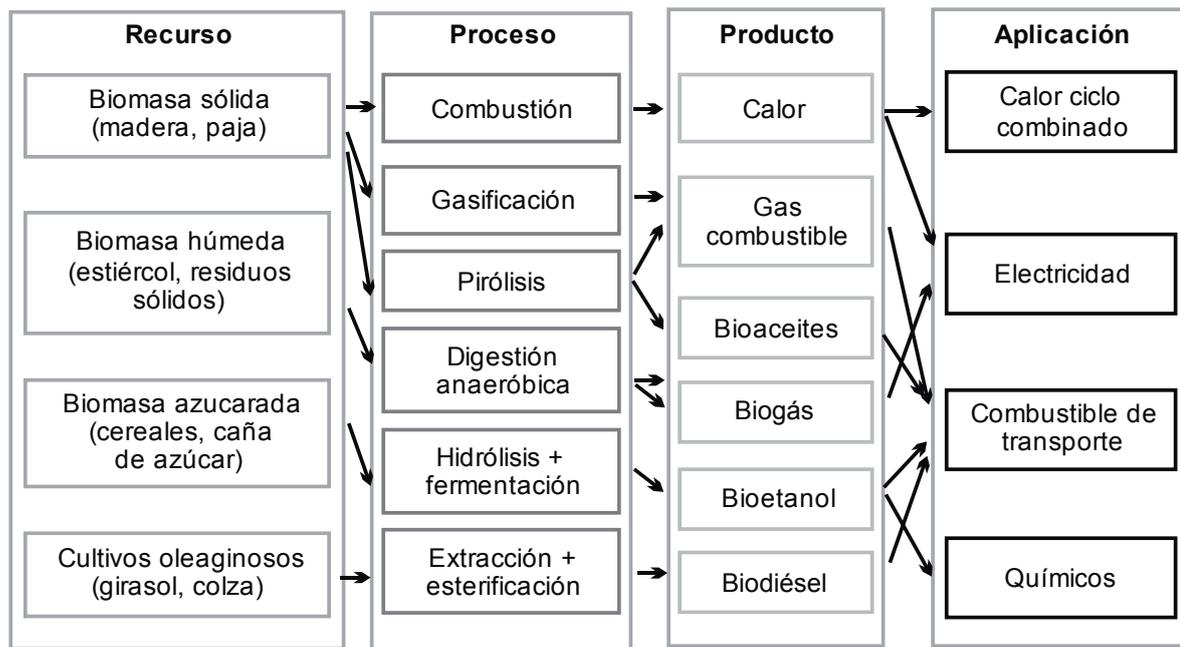


Fig.1.6. Procesos de conversión energética de la biomasa para producción de calor, electricidad y combustibles (modificado de Salinas y Hernández, 2008).

Los procesos bioquímicos de transformación de la biomasa en energía son aquellos que se llevan a cabo mediante diversos tipos de microorganismos, ya sean contenidos en el producto original, ya sea añadidos durante el proceso. Estos microorganismos producen la degradación de las moléculas complejas a compuestos más simples, de alta densidad energética. Estos procedimientos se utilizan, fundamentalmente, para tratar biomasa natural o residual de alto contenido en humedad (la de tipo húmeda) que, si fuese tratada por métodos termoquímicos, daría unos rendimientos energéticos especialmente desfavorables, debido al alto calor de vaporización del agua (mientras mayor contenido de humedad, menor poder calorífico del material, porque parte de la energía se perderá en la evaporación). Los procesos bioquímicos más corrientes para la obtención de energía son la **fermentación alcohólica** para producir etanol (alcohol etílico o bioetanol) y la **digestión anaerobia**, para la producción de metano (principal componente del biogás). En muchos casos, algunos de estos procesos, principalmente los empleados en el tratamiento de biomasa residual húmeda o residuos sólidos urbanos, van acompañados de una técnica final de valorización del producto sin fines energéticos: el compostaje o lombricultura.

Cabe destacar que generalmente el objetivo del tratamiento de la materia orgánica de tipo húmeda no es la generación de energía, sino el propio tratamiento de un residuo con el fin de cumplir los límites de vertido, o bien con el fin de reducir su volumen o estabilizarla. Según el proceso elegido, también será posible realizar aprovechamientos energéticos por medio de procesos de biometanización, obteniendo un biogás utilizable para la generación eléctrica, térmica o cogeneración. La materia orgánica debe presentar condiciones mínimas de calidad para su tratamiento. En primer lugar debe ser un residuo biodegradable, y, además, satisfacer una serie de requisitos cuando el material tratado quiera ser utilizado o valorizado.

Entre los procesos fisicoquímicos se encuentran aquellos que consisten en la alteración de las características físicas del material, como por ejemplo los procesos de prensado, extracción química, refinado y transesterificación. Uno de los productos más apreciados actualmente que se puede obtener por esta vía es el biodiésel, utilizado principalmente como biocombustible.

6. CADENA ENERGÉTICA DE LA BIOMASA. SISTEMAS BIOENERGÉTICOS

El empleo de biomasa con fines energéticos involucra una serie de eslabones o etapas que van desde la producción del recurso, la logística de almacenamiento y distribución, el procesamiento y conversión energética del mismo hasta la distribución y aplicación de la bioenergía o biocombustible (Giampietro *et al.*, 2006; Buchholz *et al.*, 2009) (Figura 1.7.). Estas etapas varían en función del recurso considerado, de su aplicación, de la tecnología de conversión energética empleada, de los canales de distribución utilizados y del sitio en donde será puesta en marcha la alternativa, como así de sus características ambientales, culturales, económicas, institucionales, en un momento histórico dado (Lewandoski y Faaij, 2006; Loken, 2007; Sheehan, 2009). La complejidad resultante es difícil de ser abarcada en su totalidad y es a menudo ignorada cuando se planean sistemas bioenergéticos, enfocándose sólo en uno de los componentes del sistema (Buchholz *et al.*, 2009).

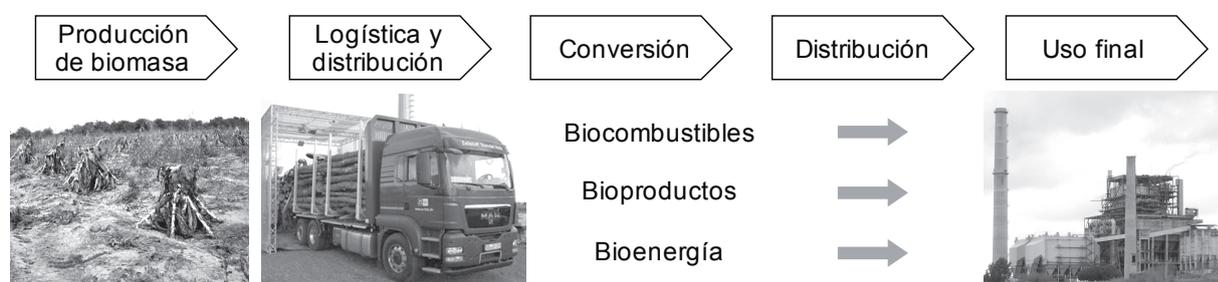


Fig.1.7. Etapas de la cadena de producción de bioenergía. Fuente: modificado de <http://www.citsinaloa.gob.mx/es/inversion/bionegocios.html>

La serie de etapas que van desde la producción de la biomasa hasta la obtención de energía para una determinada aplicación constituyen una **cadena energética de la biomasa**. Por lo general, en las diferentes cadenas energéticas de la biomasa existen etapas intermedias en las que la materia prima original es transformada en productos intermedios cuyas características corresponden mejor a las necesidades de las diferentes aplicaciones energéticas en las que la biomasa es utilizada (CIEMAT, 2007).

Algunas de las características fundamentales de los sistemas bioenergéticos (sistemas de producción de energía en base a biomasa) son (Bush, 2008; FAO, 2009; NRC, 2009; Leach y Mearns, 1988; Arnold *et al.*, 2003):

- **Multisectorialidad:** Los sistemas bioenergéticos están vinculados a los sectores forestal, energético, agrícola, económico, industrial y de desarrollo rural, entre

otros. Al ser sectores tan diferentes, las respuestas dadas a la problemática bioenergética desde cada uno de ellos (energía o agricultura, por ejemplo) serán particulares, por lo que es necesario lograr una buena coordinación y sinergia. En particular, las políticas de planificación y promoción deberían consensuar las diferentes perspectivas, a fin de no cometer los mismos errores de los viejos sistemas energéticos.

- **Interdisciplinariedad:** El espectro de ciencias y técnicas que están involucradas en el análisis de los sistemas bioenergéticos incluye gestión forestal y silvicultura, agronomía, física, química, ingeniería, ciencias ambientales, geografía, economía, edafología, microbiología, ingeniería mecánica, eléctrica, etc. El aporte de cada una de estas ciencias será diferencial, pero la mirada interdisciplinaria es fundamental en la medida en que es necesario abordar el estudio desde una perspectiva de sistema.
- **Especificidad geográfica:** Los patrones de producción y consumo de biomasa y sus impactos sociales, económicos y ambientales asociados, son sitio-específicos. Las generalizaciones amplias sobre la situación de la biomasa y los impactos en las distintas regiones, o aún dentro del mismo país, han dado lugar a menudo a conclusiones engañosas, a planeamientos pobres y a implementación de políticas ineficaces. Los sistemas de bioenergía tienen en cada caso características diferentes que los hacen singulares, requiriendo soluciones especiales.
- **Heterogeneidad en las fuentes de oferta de biomasa:** A diferencia del resto de las fuentes de energías renovables que están basadas en una única fuente (eólica: el viento; solar: el sol; mareomotriz: las mareas, etc.), la biomasa está constituida por una multiplicidad de fuentes, si bien todas de naturaleza orgánica, pero de origen y características particulares diferentes. Por otra parte, terrenos naturales o antropizados, tales como arbustales, tierras de labranza, huertas y plantaciones agrícolas o agrosilvícolas, arbolado urbano, cortinas forestales, etc., pueden contribuir también en términos de biomasa leñosa, por lo que las aplicaciones energéticas pueden combinarse fácilmente con otras de carácter ambiental.
- **Heterogeneidad en los sectores de demanda de biomasa:** Los usuarios de biomasa residual y con bajo nivel de transformación del recurso, mayormente son rurales y, en menor medida, urbanos residenciales. Sin embargo, también hay niveles visibles de consumo en los sectores comerciales, públicos e industriales, que necesitan de una evaluación y contabilidad cuidadosas, ya que demandan biocombustibles transformados y a una escala mayor.
- **Adaptabilidad de los usuarios:** Los patrones de oferta y consumo se influyen mutuamente y tienden a adaptarse a las variaciones en las fuentes y disponibilidad de los distintos recursos. Sin embargo, es necesario evitar los ciclos de “riqueza y pobreza” en el sector rural, mediante actividades que aporten continuidad, manejando sobre bases racionales los diferentes recursos de biomasa.

Un sistema de bioenergía tiene una respectiva estructura y puede ser definido por diferentes límites dependiendo del objetivo de estudio. En un análisis sencillo del sistema de energía diseñado para convertir recursos energéticos en formas finales de energía, la interacción del sistema es definida por su eficiencia termodinámica.

Agregando complejidad al sistema de energía, se puede estudiar la interacción entre el sistema energético y el medioambiente. En este sentido, un buen ejemplo es un problema de contaminación, el cual es definido como la emisión de energía y especies materiales resultantes de la conversión de los procesos de energía. Agregando aún mayor complejidad al sistema energético, hay otros flujos entre el sistema y los alrededores. Desde que cada sistema energético tiene una función social en nuestra vida, la relación también puede ser establecida entre el sistema energético y los alrededores teniendo en cuenta la consideración de la interacción social entre el sistema y el ambiente.

En esta consideración puede reconocerse que la relación de la bioenergía con la sustentabilidad tiene múltiples facetas. En la Figura 1.8. se esquematizan algunas de las relaciones entre las diferentes etapas del ciclo de vida de la bioenergía, con los aspectos en los que puede influir, a favor o en contra, en el camino hacia un mayor nivel de sustentabilidad.

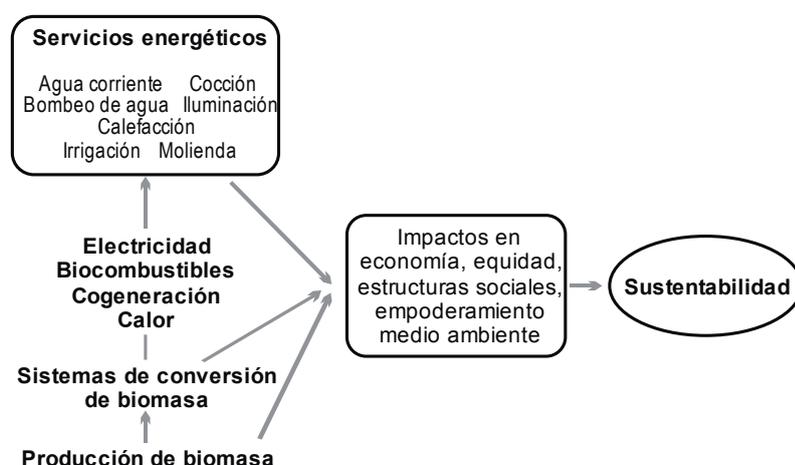


Fig. 1.8. Representación conceptual de los sistemas de energía de biomasa y su relación con la sustentabilidad (Kartha y Larson, 2000.

La propuesta de empleo de biomasa debería contemplar no sólo la provisión de energía renovable o mitigación de gases de efecto invernadero-GEI (que son dos de las cualidades de la biomasa más apreciadas actualmente), sino también el impacto integral que estos sistemas energéticos podrían implicar en el sitio de su implementación, es decir, su “nivel de sustentabilidad”. Existe una estrecha relación entre un sistema bioenergético y la sustentabilidad. Por ejemplo, si la realización de un monocultivo con fines energéticos (cultivo energético) implica el desmonte de grandes zonas boscosas y el desplazamiento de comunidades, no debería hablarse de “energía verde” o “energía sustentable”, porque esta sustentabilidad es cuestionable. En términos generales...¿qué es lo sustentable? Definir este concepto y las discusiones

en torno al mismo pueden implicar otro módulo, por lo que sólo se mencionará que no existe una condición **sustentable** universal hacia la cual todo debe ser encaminado (Manrique, 2013).

Lo **sustentable** tiene claramente una connotación particular en cada contexto, en cada momento y frente a cada grupo humano, en cada uno de los cuales se define su esencia, su significado y su “utopía” a seguir (Seghezzi, 2008). No puede conocerse cómo será en el futuro la sociedad o sistema “sustentable”, pero sí pueden reconocerse que algunas actividades o prácticas humanas actuales son insustentables y no contribuirán al logro de esa sustentabilidad. Si la sustentabilidad es definida localmente y verificada y reorientada permanentemente en su rumbo en función de las tendencias observadas, seguramente, lo insustentable comenzará a quedar atrás poco a poco.

Como una propuesta de visualización podría decirse que un sistema bioenergético (SB) sustentable para la región debería estar basado en los siguientes eslabones o elementos fundamentales (Figura 1.9.): a) la **sustentabilidad**, localmente definida, como base de cualquier propuesta; b) la **participación** como eje transversal necesario para el planteo de los sistemas, su evaluación y su puesta en funcionamiento; c) los recursos, como plataforma para definir escala, aplicación y características de cualquier proyecto bioenergético; d) la **tecnología**, el conocimiento técnico-científico y los saberes populares, que definen las especificidades para la implementación de los SB; y e) los **impactos**, considerando la vinculación entre los factores anteriores específicos del proyecto y el contexto. Los aspectos económico-financieros se incluirían dentro de las categorías de impactos y de tecnologías.

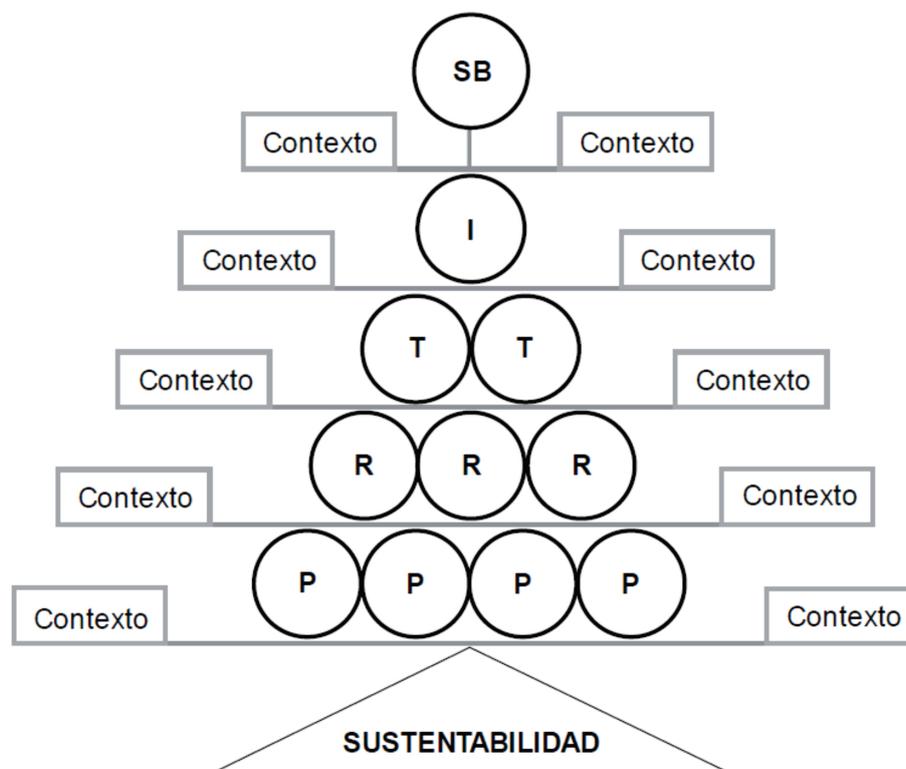


Fig. 1.9. El delicado equilibrio de los sistemas bioenergéticos. Donde P es: participación; R: recursos; T: tecnologías; I: impactos; SB: sistema bioenergético.

La Figura 1.9. muestra los elementos necesarios para lograr SB “más” o “menos” sustentables, y pueden constituir un marco de análisis de las opciones propuestas. Los principios sólidamente definidos de la sustentabilidad son la base sobre la cual se asentarán las políticas, proyectos, planes o sistemas. Hay un punto de equilibrio, ya que deben confluír y consensuarse las opiniones de los diferentes actores involucrados. Sin embargo, del balance de los componentes fundamentales que dan cuerpo y altura a los SB (participación, recursos, tecnologías, impactos), depende el futuro de los mismos, como así, de la influencia de los factores externos contextuales (sociales, políticos, económicos, institucionales, ambientales, tecnológicos, etc.). Los eslabones propuestos refieren a:

- Participación

Se considera que los enfoques participativos y el involucramiento de los diferentes sectores y actores afectados contribuyen a la sustentabilidad y relevancia de los proyectos y facilitan el fortalecimiento de comunidades locales. Así, un eje transversal para el planteamiento de propuestas útiles, ajustadas a la realidad y autónomas a largo plazo, es lograr esta real participación.

- Recursos

La base biofísica o fuente, es decir, el recurso y sus características, marca el punto de partida de cualquier proyecto de bioenergía. No toda la biomasa potencial identificada en un sitio puede ser utilizada, ya que existen restricciones de diversa índole y diferentes potenciales de aprovechamiento. La biomasa potencial de un sitio debe ser considerada en aquella fracción disponible y dentro de ésta a la realmente utilizable en función de factores ambientales, geográficos, técnicos, legales, sociales, etc. Cuando se trata de dimensionar un sistema complejo o con inversión en infraestructura, el hecho de no considerar el potencial del recurso puede llevar a un sobredimensionado y costos extras y/o a la generación de impactos negativos en el sitio.

- Procesos-tecnologías

La tecnología, entendida no sólo como artefactos sino también como habilidades requeridas para desarrollar, producir y usar artefactos, es un factor clave para proyectos de intervención local de SB. Es interesante seleccionar la propuesta tecnológica que presente las mejores cualidades desde el punto de vista local (aceptación, disponibilidad, accesibilidad, conocimiento).

- Impactos

Si bien los impactos aparecen arriba de la pirámide, esto no significa que tengan menor nivel de importancia, sino que sólo podrán ser evaluados cuando se hayan considerado las especificidades de cada uno de los SB o la cadena bioenergética total (recursos, procesos-tecnologías, aplicaciones). Desde un enfoque de sustentabilidad,

lograr beneficios en un área como la provisión de energía, por ejemplo, no debería generar nuevos problemas en otras áreas tales como contaminación o degradación de recursos naturales, afectación de modos de vida o desplazamiento de comunidades, avasallamiento de derechos humanos, escasez de alimentos o aumento de precios en los mismos, debilitamiento de las economías regionales, generación de emisiones contaminantes o de GEI, entre otros. Por tanto, el tipo de impactos a ser evaluados y su priorización deben ser definidos y consensuados con la participación de los actores involucrados.

El esquema presentado puede servir como guía para el diseño y selección de un sistema bioenergético. Dentro de cada uno de los eslabones es necesario definir criterios e indicadores, que son los que posibilitarán testear las tendencias del sistema.

7. IMPRECISIONES E INDEFINICIONES A TENER EN CUENTA

La definición de biomasa acuñada en este libro, si bien incorpora un requisito que la mayoría de las definiciones no incorpora (“debe ser utilizada por debajo de su tasa de renovación”), debería ser un requisito tácito frente a cualquier alternativa de aprovechamiento no sólo de biomasa, sino de cualquier tipo de recurso natural, dado su límite finito. Ryan y Openshaw (1991) mencionan que la biomasa es un recurso “**condicionalmente renovable**”. Dentro del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), uno de los mecanismos de flexibilidad propuestos por el Protocolo de Kyoto, la Junta Ejecutiva aprobó una definición de biomasa, residuos biomásicos (en 2005, EB 20 Report Anexo 8) y *biomasa renovable* (en 2006, EB23 Report Anexo 18), como categorías diferentes:

- **Biomasa:** Material orgánico no fosilizado y biodegradable, originado en plantas, animales y microorganismos y que incluye productos, subproductos, residuos y desechos de la agricultura, la silvicultura y sus industrias asociadas, y fracciones de desechos industriales y municipales, gases y líquidos recuperados de la descomposición de biomasa.
- **Residuos biomásicos:** Biomasa que es un co-producto, un residuo o un desecho de la agricultura, de la forestería o de las industrias relacionadas.
- **Biomasa renovable:** la biomasa es renovable si su uso no implica un cambio del uso de la tierra, la disminución de ninguna reserva de carbono involucrada, incumplir ninguna reglamentación y se garantiza la neutralidad de carbono de la biomasa transformada en energía, a corto y largo plazo.

En un sentido general, los **residuos** son productos de desecho generados en las actividades de producción o consumo que no alcanzan, en el contexto en el que son producidos, ningún valor económico. Por consiguiente, la consideración de un producto como residuo se debe a la voluntad o interés del generador o poseedor del mismo (FCEN, 2008). Es decir, una misma materia puede ser un "desecho" o un "producto útil" dependiendo de la utilidad que pudiera prestar. Sin embargo, no siempre basta

con cambiar el enfoque o punto de vista para transformar un desecho en producto útil y en particular, en un energético. Frecuentemente se requiere de algún proceso industrial o semi industrial para realizar esta transformación (Alkalay, 1997). En el caso de la biomasa, existen múltiples alternativas de transformación y aplicación (FAO, 2004). En la legislación de la UE, por ejemplo, existe una definición de residuos:

“Un residuo puede definirse como cualquier sustancia u objeto perteneciente a alguna de las categorías que figuran en el anexo de esta ley, del cual su poseedor se desprenda o del que tenga la intención u obligación de desprenderse. En todo caso, tendrán esta consideración los que figuren en el Listado Europeo de Residuos (LER), aprobado por las instituciones comunitarias”.

El término **bioenergía** implica toda la energía que puede obtenerse cuando la biomasa es sometida a algún tipo de proceso de transformación, siendo el más conocido el proceso de combustión. Sin embargo, este término con su prefijo bio=vida, suele asociarse a connotaciones positivas (verde, bueno, sustentable) que son en muchos casos opuestas a algunos sistemas de aprovechamiento bioenergético actuales, en determinadas circunstancias y sitios del mundo (Honty y Gudynas, 2007). Por tanto, es necesario aclarar que dicho término se utiliza en el presente libro para hacer referencia a la energía renovable obtenida a partir de plantas o parte de ellas (anuales o perennes, leñosas o herbáceas), residuos animales y otros residuos industriales, cloacales, agrícolas, municipales, domiciliarios, de origen orgánico e inclusive microalgas. **No se incluye en este concepto asociación alguna con ningún sistema o forma particular de aprovechamiento, ni se asocia de manera directa con que su uso sea beneficioso, ya que para esto debe realizarse una evaluación en cada caso.** Se descarta de esta definición, aquella energía obtenida de seres vivos en forma directa (tracción animal, por ejemplo) que no está almacenada bajo formas orgánicas. Empíricamente, la bioenergía puede ser medida mediante una bomba calorimétrica, que sirve para medir el calor de combustión de las sustancias.

Por otra parte, otro término importante bajo discusión es el de biocombustible (biofuel), que se interpreta de diferentes maneras. Según FAO (2009) *“son todos los combustibles producidos directa o indirectamente desde la biomasa, tal como leña, carbón, bioetanol, biodiésel, biogás o biohidrógeno”.* Es decir, existen básicamente tres tipos de biocombustibles: sólidos, líquidos y gaseosos.

CIEMAT (2007) denomina con el término genérico de biocombustibles a los combustibles intermedios que aparecen en las cadenas energéticas de la biomasa, entendida como la serie de etapas que van desde la producción de la biomasa hasta la obtención de energía para una determinada aplicación. Es decir, un biocombustible es un combustible de origen orgánico, ya sea sólido, líquido o gaseoso, que aparece en la cadena energética de la biomasa, con mayor o menor nivel de transformación (incluyendo aquellos no transformados), a partir de diferentes tipos de biomasa, entendida como materia prima. Según esta fuente, en el caso de biocombustibles aprovechados en forma directa, sin ninguna transformación, los términos biomasa y biocombustible pueden ser usados indistintamente.

De acuerdo con las normas estándar de CEN/TC 335 (2004), los **biocombustibles sólidos** incluyen, por ejemplo, pellets de madera, leña, chips de varias fuentes de biomasa, y madera usada que no contiene compuestos orgánicos halogenados o metales pesados. El término *forestfuel* se utiliza para definir combustible leñoso que no ha sido utilizado previamente, según las normas suecas (Swedish standard SS 18 71 06); mientras que el término “*wood fuel*” es combustible originado desde material biológico (biocombustible), el origen del cual fueron árboles o partes de árboles. La madera usada que no es parte de los biocombustibles sólidos pertenece a los combustibles sólidos recuperados (*SRF, solid recovered fuels*, los cuales también incluyen plásticos, goma y papel (Ericsson, 2006). Entre los **biocombustibles líquidos** pueden mencionarse: bioalcoholes (etanol, butanol, metanol), biodiésel, aceites vegetales, bioéter, etc. y entre los **biocombustibles gaseosos**: biogás, gas pobre, syngas (gas de síntesis).

Los biocombustibles líquidos, que se emplean a nivel comercial mundialmente como biocarburantes, pertenecen a dos grandes grupos:

- Bioalcoholes, derivados de productos vegetales con alto contenido de hidratos de carbono (cultivos energéticos). Los bioalcoholes son de dos tipos: bioetanol (etanol de origen vegetal) y su derivado, el etil-ter-butil-éter (ETBE) que se usan como aditivos en motores de ciclo Otto (motores de encendido provocado).
- Bioaceites y ésteres derivados de éstos (genéricamente denominados biodiésel). Su principal aplicación es en motores de encendido por compresión (ciclo Diesel). Este grupo incluye aceites vegetales y biodiésel (reacción de aceite con alcohol).

En el campo científico, investigadores y organismos internacionales, así como la Agencia Internacional de Energía (IEA), utilizan el término “biocombustibles” para englobar sólo los combustibles líquidos usados como carburantes: biodiésel y bioetanol (Fargione *et al.*, 2008, Demirbas, 2008b y c; Escobar *et al.*, 2009; Bindrabán *et al.*, 2009; Domínguez-Faus *et al.*, 2009, Zhang y Cooke, 2009; entre muchos otros), quedando el resto de los recursos orgánicos englobados bajo el término biomasa (Bush, 2008), con lo cual la bioenergía involucra en este caso la energía desde los biocombustibles y desde la biomasa. Son pocos los casos en donde los autores explicitan que utilizarán el término biocombustible para referirse sólo a los biocombustibles líquidos (Rajagopal *et al.*, 2007), y directamente, la gran mayoría, lo asume como si fuera la única acepción posible. Estas imprecisiones causan bastante confusión actualmente.

Agregando aún mayor complejidad, otros autores consideran que la bioenergía es aquella producida a partir de cierto tipo de recursos de biomasa y con ciertas tecnologías, como la **biomasa moderna** (Smeets *et al.*, 2007) o uso moderno, dado por la transformación del recurso biomásico en un biocombustible de mayor valor agregado, que incluye biogás, bioetanol, biodiésel, briquetas de carbón vegetal, pellets, etc. (Demirbas *et al.*, 2009). Estos usos se asocian con una más eficiente utilización de los recursos, y el empleo de tecnologías más sofisticadas, como opuesto a usos

tradicionales (Smeets *et al.*, 2007), y están al alcance de los países desarrollados, si bien no de manera exclusiva (Larsen *et al.*, 2003; WEC, 2007; EUBIA, 2009).

En la Terminología Unificada sobre Bioenergía (TUB) publicada por FAO (2004) (y modificada en FAO, 2009) se señala claramente que un biocombustible es cualquier combustible de origen biológico no fosilizado, mientras que los biocarburantes “son un subgrupo de los biocombustibles, caracterizados por la posibilidad de aplicación a los actuales motores de combustión interna”. En este grupo se incluyen, por tanto, los combustibles líquidos biodiésel y bioetanol.

Siguiendo esta definición, FAO (2004) desglosa el término **biocombustible** en tres categorías diferenciales: dendrocombustibles, agrocombustibles y subproductos de origen municipal (Figura 1.10.). Los dendrocombustibles abarcan todos los tipos de biocombustibles derivados directa o indirectamente de una biomasa leñosa. Dentro de éstos, se incluyen: leña, carbón vegetal, licor negro ^[7] y otros (metanol, etanol, gas de síntesis, etc.). Los agrocombustibles incluyen todos los biocombustibles procedentes de cultivos agrícolas, agroindustrias y materias de biomasa derivadas directamente de cultivos destinados a la producción de combustible (o cultivos energéticos, como se define más adelante). Y por último, los subproductos de origen municipal, que abarcan los residuos sólidos urbanos (RSU), y desechos sólidos, líquidos y gaseosos derivados de la elaboración de la biomasa. Son los subproductos de biomasa generados por las poblaciones humanas.

Producción. Oferta	Tipo de biocombustible	Usos, ejemplos de biocombustibles
Dendrocombustibles Directos	DENDROCOMBUSTIBLES	Sólidos: leña, rollizos, chips, aserrín, carbón vegetal
Dendrocombustibles Indirectos		Líquidos: licor negro, etanol
Dendrocombustibles Recuperados		Gaseosos: gas de pirólisis
Cultivos energéticos	AGROCOMBUSTIBLES	Sólidos: paja, tallos, cáscaras, bagazo
Subproductos animales		Líquidos: etanol, biodiésel
Subproductos de la agroindustria		Gaseosos: gas de pirólisis
CENTROS URBANOS	SUBPRODUCTOS MUNICIPALES	Sólidos: residuos sólidos urbanos
		Líquidos: efluentes cloacales, bioaceite de pirólisis
		Gaseosos: biogás, gas de pirólisis

Fig.1.10. Fuentes de abastecimiento y tipos de biocombustibles (FAO, 2009).

^[7] El licor negro es un residuo generado en el proceso de cocción química de las astillas para la obtención de pulpa química, kraft o pasta woodfree (<http://celulosapapel.blogspot.com/2007/10/licor-negro.html>).

Existen, sin embargo, superposiciones de los alcances de los diferentes términos en la literatura sobre el tema, desde la misma fuente. Así, por ejemplo, también FAO, en su metodología WISDOM, *Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview Mapping*, metodología aplicada ya en varios países del mundo, como asimismo recientemente aplicada en Argentina (FAO, 2009), plantea el mapeo de la potencialidad de la bioenergía, aunque en su título menciona “*dendrocombustibles*”. Las categorías consideradas son: leña, carbón vegetal o residuos agroindustriales, que según la categorización anterior, esta última quedaría incluida en los agrocombustibles.

En cuanto a cultivos energéticos, se definen como *todos aquellos cultivos agrícolas o forestales (herbáceos o leñosos) que se realizan con el único fin de producir energía*. La principal aplicación para la cual se destinan es para generar combustibles líquidos (biodiésel y bioetanol), denominados biocarburantes, incluidos como *agrocombustibles* en la clasificación anterior, y que al presente se obtienen de cultivos (agro) de tipo alimenticios.

El uso del término “biocombustible”, generalmente asociado a los combustibles líquidos empleados para automoción, opaca esa dimensión agrícola, pero en el caso de América Latina y el Caribe es fundamental considerar esta procedencia ya que revisten la mayor importancia y tiene implicancias claves para el desarrollo sustentable (Honty y Gudynas, 2007). Si bien los *agrocombustibles* pueden ofrecer una serie de ventajas como combustibles renovables, muchas señales de alerta están comenzando a surgir desde distintos ámbitos de la sociedad, la academia y los sectores productivos (Farrell *et al.*, 2006; Hill *et al.*, 2006; Alder *et al.*, 2007; Gibbs *et al.*, 2008; Righelato y Spracklen, 2007; Fargione *et al.*, 2008; Searchinger *et al.*, 2008). Algunos de estos aspectos serán discutidos en el capítulo 2.

Sin embargo, existen dos categorías de cultivos energéticos que deben discriminarse: **cultivos energéticos de oportunidad**, que son aquellos que pueden ser cosechados desde áreas donde crecen naturalmente sin alterar el uso de la tierra tradicional; y los **cultivos energéticos dedicados**, los cuales implican el establecimiento de cultivos anuales o perennes con especies exóticas o silvestres productivas sobre tierras fértiles (Callaghan *et al.*, 1980; Lawson y Callaghan, 1980). Algunos autores sostienen que la primera categoría, que implica mínima competencia con otros usos de la tierra, debería proveer una de las principales formas de producción de energía, económica, ambiental y socialmente aceptable (Palz *et al.*, 1980; Bertinat, 2007). Además, existen datos que muestran que la vegetación natural puede tener un mayor rendimiento que los cultivos agrícolas o árboles (Lawson y Callaghan, 1980).

El uso de términos tan amplios como “biocombustibles” o “bioenergía”, sin especificar su alcance y definición, entorpece los análisis y genera confusiones, ya que se invocan los atributos positivos de un tipo de combustible para una defensa genérica (Honty y Gudynas, 2007). Así, por ejemplo, se mencionan las bondades de algunos tipos de biocombustibles, como el biogás obtenido desde los residuos sólidos urbanos (dispuestos en rellenos sanitarios), para demostrar los beneficios de la bioenergía y el empleo de biomasa en general, incluyendo aquí a los biocombustibles líquidos para automoción, que tienen implicancias radicalmente

diferentes (ver por ejemplo UN Energy, 2007). Esta defensa genérica sobre la sustentabilidad de la bioenergía como si se tratara de un solo producto terminado y perfectamente conocido, hace que la problemática específica de cada tipo de biocombustible nunca cobre identidad propia.

8. LOS RDF Y CDR

Es necesario mencionar otros tipos de combustibles que a menudo se incluyen en el grupo de la biomasa: los RDF (refuse derived fuels) o CDR (combustibles derivados de residuos) que son aquellos elaborados a partir de desechos no peligrosos ^[8] para su incineración o coincineración. Los residuos de origen son (Frankenhauser, 2011):

- la fracción resto de los residuos municipales (RSU);
- los residuos industriales no peligrosos;
- los voluminosos ^[9];
- el rechazo de plantas para el reciclaje de residuos recogidos selectivamente (por ejemplo, plantas de selección de envases).

Existen centrales que utilizan principalmente CDR adquirido a plantas especializadas en la gestión de desechos, las cuales recogen, tratan y transforman los desechos comerciales en un combustible sólido denominado CSR. Es una fracción de residuos pretratada para incineración y que debe cumplir con ciertas características para su aprovechamiento (en cuanto a humedad, poder calorífico, etc.). De manera general puede definirse:

- CDR (combustible derivado de residuo): Combustible elaborado a partir del tratamiento mecánico (y en algunos casos también biológico) de residuos domésticos, comerciales o industriales no peligrosos para su incineración o coincineración (cocombustión).
- CSR (combustible sólido recuperado): combustible derivado de residuo que se adecua a las normas europeas en materia de CDR.

Los CDR se producen mediante distintos tratamientos en función de la fracción de partida o basura de origen (ISR, 2008):

- Biosecado, que consiste en una biodegradación acelerada de la materia orgánica más volátil y una posterior separación y clasificación. La cantidad de CDR que se obtiene es del orden del 33 % de la cantidad de residuos entrante, aunque puede

[8] Según la Directiva Marco de Residuos (Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre).

[9] Se consideran como “residuos voluminosos” aquellos residuos que, por sus dimensiones no pueden ser gestionados como el resto de los residuos urbanos y por ello van a ser objeto de un tipo de recogida especial y de un tratamiento distinto dependiendo de sus características. Se suele tratar de electrodomésticos, muebles y enseres domésticos.

variar en función de la composición de los residuos urbanos. El poder calorífico del CDR es del orden de 13-15 MJ/kg. Debido a la escasa estabilización (por su humedad) de los subproductos resultantes, este CDR no suele destinarse a cementeras, sino a otras instalaciones como por ejemplo plantas incineradoras. La fracción restante constituye el rechazo, que es destinado a tratamiento finalista (incineración o vertido) (Figura 1.11.).

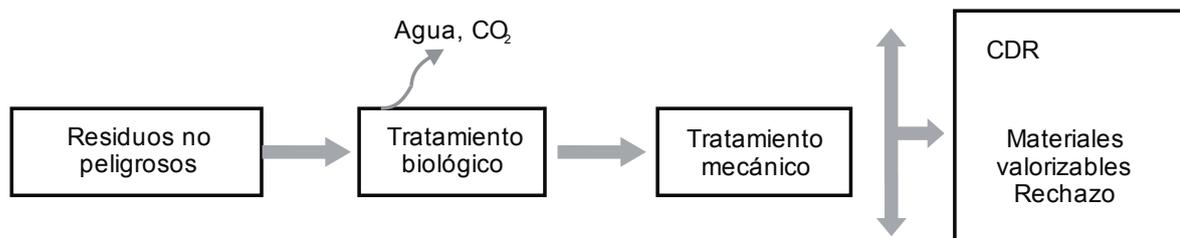


Fig.1.11. Esquema del proceso de biosecado para la obtención de CDR (Puig Ventosa et al., 2012).

- **Tratamiento mecánico-biológico.** En este tratamiento se separan dos fracciones: una húmeda, que tiene un elevado contenido de materia orgánica que se estabiliza previamente al vertido; y una fracción seca, que tras ser sometida a una clasificación mecánica permite la obtención de CDR. La diferencia fundamental entre el biosecado y el tratamiento mecánico-biológico es que en el primer caso se trata biológicamente la totalidad del residuo, mientras que en el segundo se separa la fracción orgánica en la fase de tratamiento mecánico, y solamente ésta es sometida al tratamiento biológico. Se obtiene una cantidad menor de CDR (alrededor del 18 % del residuo entrante). Este procedimiento tiene múltiples alternativas, en función del grado de separación de fracciones en la etapa de producción de CDR, que puede incluir también operaciones de densificación, clasificación por tamaños, etc., hasta alcanzar las especificaciones concretas requeridas por las instalaciones consumidoras de CDR (Figura 1.12.).

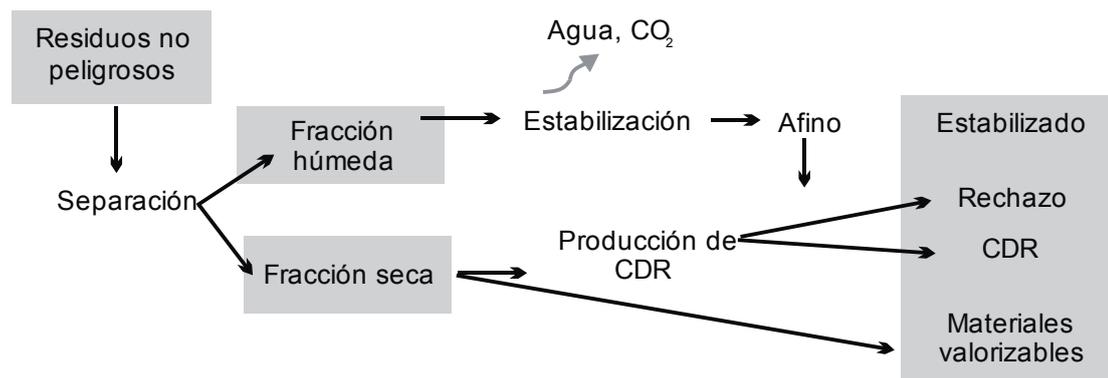


Fig.1.12. Esquema del tratamiento mecánico-biológico para la obtención de CDR (Puig Ventosa et al., 2012).

Una variante del último sistema es el tratamiento mecánico-biológico con digestión anaerobia (metanización) de la fracción orgánica, con el cual se obtienen porcentajes similares de CDR. Otra variante es la utilizada para residuos entrantes con prácticamente nulo contenido en materia orgánica (como podrían ser los rechazos de selección de envases o residuos industriales asimilables a domésticos). En este caso el tratamiento es sólo de tipo mecánico y no es necesaria la estabilización ni el secado.

Especialmente cuando los residuos de partida contienen materia orgánica, la producción de CDR es altamente demandante de energía, dado que para que el producto sea aceptado en una instalación industrial su contenido en humedad debe ser bajo, lo cual hace necesario someter el producto a un proceso de secado térmico (Alonso, 2010).

La composición típica de los CDR (si bien es altamente variable en función del tipo de residuos de origen y del sitio) es de 31 % de plásticos, 13 % de papeles y cartón, 12 % de madera, 14 % de textiles y un 30 % de otros (Currie, 2011). Generalmente se utilizan en una amplia variedad de industrias, en sustitución de los combustibles fósiles tradicionalmente manipulados por las mismas, como por ejemplo hornos industriales (como cementeras y hornos de cal), plantas generadoras de electricidad o de cogeneración, calderas industriales (por ejemplo de pasta de papel), incineradoras con recuperación de energía, y hornos de acero. Algunos autores afirman que la utilización de CDR implica impactos negativos ambientales y altos costos económicos para la sociedad y sólo representa beneficios para las empresas o industrias que los utilizan. Dado que los CDR contienen un elevado porcentaje de elementos que podrían ser reciclados, no deberían ser promovidos como solución final, sino mejorar la recogida selectiva y el reciclaje. Además, la adecuación de CDR a CSR implica una alta demanda de energía y su quema en cementeras genera una dispersión de productos tóxicos mayormente sin control, siendo menos estrictos los límites de emisiones aplicables a la combustión de CDR que a la incineración de residuos. Por último, si bien la fracción orgánica de los RSU se considera como biomasa, los CDR no pueden incluirse en esta categoría, ya que se trata de todo tipo de materiales mezclados. Sin embargo, los consumidores, aprovechando la normativa europea que los considera biomasa y por tanto neutros en emisiones de carbono, pueden descontar las emisiones generadas a partir de los CDR como cero, ya que están incluidos en los sistemas de comercio de emisiones.