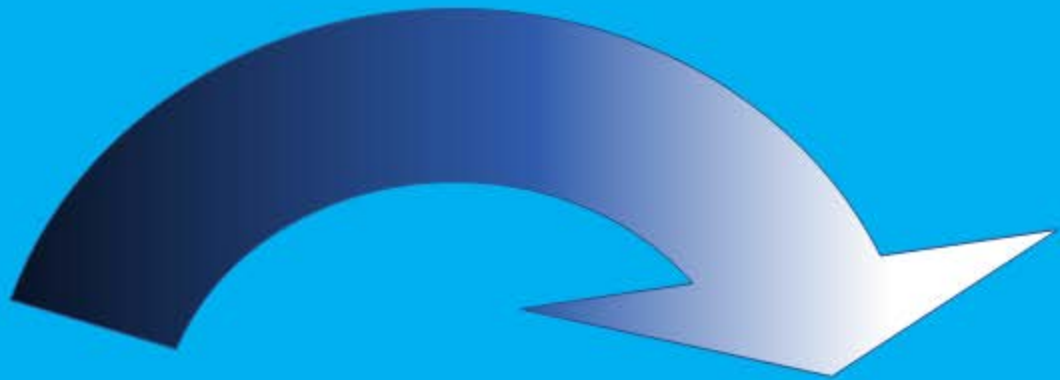


Xavier Elias Castells
Santiago Bordas Alsina

**Economía circular:
Conversión
de residuos en recursos**

Capítulo 10/14



**Biomasa: aprovechamiento
de residuos agrícolas
y forestales.**



Título de la obra:

Economía circular: conversión de residuos en recursos

Capítulo 10. BIOMASA: APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS Y FORESTALES.

Autores:

Xavier ELIAS CASTELLS
Santiago BORDAS ALSINA

Copyright © 2018 Xavier Elias Castells y Santiago Bordas Alsina

Primer edición electrónica

Reservados todos los derechos. La licencia de uso de este libro electrónico es para uso personal. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada, transmitida o utilizada en manera alguna sin previo consentimiento de los autores. No está permitida la reventa ni regalarlo a otras personas. Si desea compartirlo, adquiera una copia adicional para cada destinatario. Gracias por respetar el trabajo de los autores.

XAVIER ELÍAS CASTELLS es doctor ingeniero industrial por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (Universidad Politécnica de Cataluña) y por la Escuela Politécnica Superior de Linares (Andalucía). Fundador de la Bolsa de subproductos de Cataluña y asesor de varios gobiernos sudamericanos en temas ambientales, ha dirigido Ingenierías donde se han proyectado instalaciones de gestión de residuos. Es profesor de cursos de doctorado y postgrado sobre reciclado y tratamiento de residuos en el Instituto Químico de Sarriá, Instituto de Tecnología de Cataluña y otras universidades españolas y sudamericanas. Dirige los másteres a distancia de Ingeniería Ambiental y Ciencia y Tecnología Cerámica de la Fundación Universitaria Iberoamericana

Ha publicado tres libros que son manuales de referencia: *“Energía, agua, medioambiente, territorialidad y sostenibilidad”*, *“Reciclaje de residuos industriales, residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora”* y *“Tratamiento y valorización energética de residuos”*. Ha sido miembro de los consejos de dirección de la Agencia de Residuos y Calidad Ambiental del Gobierno Autónomo Catalán y miembro de las comisiones de medio ambiente de diferentes colegios profesionales, asociaciones y corporaciones. Es Premio Internacional Augusto González de Linares de Medio Ambiente.



SANTIAGO BORDAS ALSINA es Dr. Ingeniero Industrial por la ETSII de Barcelona, número cuatro de su promoción y premio extraordinario de doctorado. Su actividad profesional se ha extendido a la administración pública, a la empresa privada y como autónomo. Ha sido profesor de Termodinámica y Mecánica de la Universidad de Barcelona y de la Universidad Autónoma de Barcelona por concurso-oposición. También ha sido director de empresas nacionales y multinacionales como Sangra e Ideal Standard. Su trabajo abarca aspectos técnicos, científicos y de gestión en ciencia de materiales, construcción, y energía y medio ambiente. Ha publicado tres libros, medio centenar de artículos en revistas nacionales e internacionales y ha sido ponente en más de cincuenta congresos, además de impartir conferencias y participar como profesor en cursos de master y posgrado.



PRÓLOGO:

Es para mí un honor poder prologar éste magnífico libro por tres motivos.

El primero es el tiempo, la coyuntura actual. Nuestro sistema económico produce como externalidad, y cada vez más, todo tipo de residuos, y lo ideal sería que éstos se incorporaran al ciclo económico de nuevo. Debemos dejar atrás la economía lineal actual, y entrar de lleno en la denominada economía circular. Es ya una necesidad, una obligación con el presente y futuro de nuestro planeta.

Actualmente, podemos afirmar que ya estamos en condiciones técnicas para hacer realidad éste planteamiento para muchos este sueño, ésta revolución del sistema, pues también lleva implícito un cambio cultural en nuestro comportamiento.

La conciencia internacional sobre la necesidad de proteger el planeta empieza a ser general y a transformarse en políticas concretas y planteamientos acordes con la sostenibilidad y la protección de nuestro ecosistema.

El segundo es por el gran aprecio personal que tengo por autor principal de éste libro, el Dr. Xavier Elias. De él he aprendido y aprendo continuamente sobre el universo de los residuos, los materiales y la energía, pero sobretodo que un mundo mejor, más limpio y racional con nuestros residuos es posible para nosotros y para las futuras generaciones. Un mundo sostenible es posible y está a nuestro alcance.

El tercero es porque para mí es un pequeño homenaje a mi padre (epd), quién tuvo la oportunidad de prologar la primera edición de ésta obra. Defensor, promotor y creador de las primeras políticas ambientales en el ámbito de Catalunya, para conseguir la tan deseada economía circular.

Este libro incide claramente en éste concepto en general, y en la valorización y el reciclaje de residuos en particular, es decir, de cómo los residuos pueden ser reconvertidos en otros materiales. Hasta ahora algunos residuos eran simplemente tratados y algunos de ellos valorizados sin tener en cuenta los residuos secundarios o la energía involucrada en el proceso. Los autores plantean con solvencia técnica cómo cerrar el ciclo de materiales y de energía, presentando, con una visión enciclopédica y casi exhaustiva, las grandes posibilidades existentes en casi todos los sectores industriales.

Se trata, en definitiva, de poder considerar, por fin, los residuos como una nueva materia prima.

En el mundo industrial, agrícola o minero, una vez se ha producido el residuo, y de acuerdo con la política sostenible de gestión, hay que valorizarlo. Éste constituye el corazón del libro, donde se exponen innumerables ejemplos. No obstante, hay que ser conscientes de que la generación de residuos seguirá produciéndose, y habrá que ver hasta dónde es sostenible el actual modelo de la valorización.

El principal reto ambiental a afrontar en los inicios del siglo XXI, en la denominada sociedad postindustrial, es la transformación de las ciudades (cada vez más pobladas) en grandes centros de consumo, pero también en grandes focos de contaminación y generación de residuos. A esto hay que añadir la actividad tradicional del sector industrial y agrícola con los residuos que también generan.

Es necesario tener esto en cuenta en la planificación de nuestras ciudades y nuestra actividad económica, de forma que el residuo de una actividad pueda ser la materia prima de otra y así sucesivamente.

La acumulación de residuos, la escasez de agua, la necesidad de energía renovable o el cambio climático, deberán afrontarse de manera conjunta y jugando con el binomio amenaza/oportunidad, nuestra sociedad debería trabajar en esta dirección.

La cultura de nuestra sociedad industrial ha sido la de producir y tirar (la denominada economía lineal). Es decir ha sido la sociedad del consumo y del vertedero pero hemos llegado a un extremo insostenible. Con la mundialización de la economía y los medios de producción hemos transferido este problema a los nuevos países productores de bienes de consumo, con restricciones ambientales más débiles o nulas. Quizás esto sea posible a corto plazo pero la realidad se impondrá y todos deberemos asumir el reciclaje como cultura de supervivencia. Este libro constituye un camino para abordarlo correctamente y en profundidad.

Finalmente, agradecer al Grupo Suez el patrocinio de ésta edición, demostrando que es fiel y consecuente con la divulgación y promoción del conocimiento sobre las ciencias ambientales.

Albert Vilalta Cambra

PRESENTACIÓN:

El hilo argumental de la obra sigue fielmente la lógica en que parece se va descubriendo en el siglo XXI la importancia de las materias primas. Estas, incluso las más abundantes, no son infinitas y con el reciclado se dispone de una herramienta para poder reutilizar los residuos y volverles a dar vida como materiales. Sin embargo esta reutilización, que en principio todo el mundo acepta, presenta, en ocasiones, ciertas paradojas. Así mientras que un coche, máximo símbolo de nuestra civilización, y que no es más que una fuente constante de residuos en su producción, uso y desguace al final de su vida útil, cuando es “nuevo”, actualmente, contiene un mínimo del 60% en peso de material reciclado y todo el mundo lo acepta. En cambio esta percepción cambia radicalmente cuando se descubre que un material de construcción está hecho a partir de un residuo.

Siguiendo con el guión de la importancia del reciclado y tratamiento de los residuos, esta obra se estructura en tres partes. En la primera, que hace realmente de introducción, es el capítulo destinado a la ciencia de los materiales y su correlación con las grandes posibilidades de su reciclado. No es más que un prelude de los restantes capítulos de la obra.

La segunda parte, pasa revista a la lista de residuos, de acuerdo con la clasificación establecida por el Catalogo (o Listado) Europeo de Residuos y, atendiendo básicamente a su naturaleza orgánica o inorgánica, así como las posibilidades de reciclado que ofrecen de acuerdo con las tecnologías y legislación descritas previamente. Esta sección pretende desarrollar algunas de las tecnologías disponibles que pueden ser aplicables a los procesos de reciclado de residuos. La finalidad consiste en considerar el tratamiento como una etapa puente que, partiendo de la inertización del residuo, lo transforma y lo valoriza en un material útil o reciclado. Asimismo, también se estudian las tecnologías basadas en los procesos anaerobios y el compostaje en particular como técnica de reciclado de los residuos orgánicos, dada su enorme importancia y trascendencia actual.

Una vez descritas las tecnologías de tratamiento y valorización aptas para el reciclado de residuos, se exponen las diversas características y tipologías de los residuos, para explicar cómo pueden ser valorizados. En líneas generales, la filosofía que puede desprenderse del texto parte del catálogo europeo de residuos pero los va clasificando en residuos livianos de naturaleza orgánica, aptos para su transformación en biocombustibles o materiales de construcción ligeros, dadas sus buenas propiedades de aislamiento térmico y acústico. Mientras que los residuos de naturaleza inorgánica, más densos, son adecuados para su reciclado en forma de materiales para la construcción, pues presentan altas prestaciones mecánicas. Finalmente existe otra topología de residuos que, de momento, no hay otra alternativa que el tratamiento.

La tercera parte, la más extensa, dedica un capítulo a cada una de las gamas de materiales reciclados que pueden lograrse con residuos industriales, residuos domiciliarios (RSU), lodos de depuradora, residuos mineros, biomasa residual, etc., haciendo especial mención a la legislación de la UE y española. Cada uno de estos capítulos, hasta un total de diez, está lleno de ejemplos prácticos de reutilización de residuos. También se hace mención al estado de la tecnología mundial sobre tratamiento de residuos, sí como sus previsibles tendencias.

Los autores. Barcelona, junio de 2018

CONTENIDO DE LA OBRA:

Capítulo 1. La economía circular. Noción de residuo cero. Residuos: problema u oportunidad.

Capítulo 2. Evaluación de la sostenibilidad. Clasificación y gestión de residuos. Bolsas de residuos. El ciclo de vida en la economía circular.

Capítulo 3. Descripción de tecnologías aplicables a la preparación, la recuperación y reciclado y de los residuos.

Capítulo 4. El CER (o LER) y su aplicación al reciclaje de residuos.

Capítulo 5. Las grandes industrias y la valorización de sus residuos.

Capítulo 6. Tratamiento y reciclaje de residuos diversos.

Capítulo 7: Elementos para una smart-city 1. Fabricación de materiales aislantes con residuos.

Capítulo 8. Elementos para una smart-city 2. Residuos para la fabricación de materiales densos.

Capítulo 9. La vitrificación de los residuos. Una tecnología de futuro.

Capítulo 10. Biomasa. Aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales.

Capítulo 11. Valorización y tratamiento de residuos municipales. Nuevas tendencias.

Capítulo 12. Los fangos de depuradora: un residuo en alza. Los sistemas de tratamiento.

Capítulo 13. Posibilidades de valorización de plásticos residuales.

Capítulo 14. Minería y sostenibilidad. Los residuos mineros.

Capítulo 10. BIOMASA: APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS Y FORESTALES.

Resumen

Este capítulo recopila los antecedentes relacionados con el aprovechamiento de los residuos generados por la industria agrícola y forestal, con una introducción de los procesos productivos asociados específicamente al ciclo del carbono, la producción de biomasa y la productividad de los ambientes naturales.

La revisión continúa con una descripción de los procesos y de las técnicas de aprovechamiento de los residuos, especialmente biomasa residual, con fines energéticos, la obtención de biocombustibles y otros procesos como el compostaje o la fertilización de suelos. También se analizan las posibilidades de las algas y la producción del hidrogeno a partir de biomasa. Se Incluyen una descripción de los sistemas de producción agrícola y forestal diseñados específicamente con fines energéticos.

La parte central del capítulo se destina al análisis de los impactos ambientales que se pueden presentar debido al aprovechamiento de los residuos y se realiza un ejemplo de explotación de biomasa forestal.

Al final se exponen unos ejemplos prácticos de valorización energética de la biomasa.

Índice

Resumen	7
1. DEFINICIONES E INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. EL CICLO DEL CARBONO	12
1.1.1. Fotosíntesis	13
1.1.2. El ciclo de carbono: flujos y reservas.	15
1.2. APLICACIONES GENERALES DE LA BIOMASA	17
1.3. BIOMASA Y RECURSOS NATURALES	18
2. ORIGEN Y FUENTES DE LA BIOMASA	22
2.1. COMPOSICIÓN GENERAL DE LA BIOMASA	23
2.2. BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA	24
2.3. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA.....	31
2.3.1. Poder calorífico.....	31
2.3.2. Densidad de la biomasa.....	33
2.3.3. Otras propiedades de la biomasa	33
2.4. NOCIÓN DE BIORREFINERÍA	34
3. ESTRATEGIAS PARA LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA BIOMASA	35
3.1. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA A TRAVÉS DE LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS	37
3.1.1. Aceites vegetales.....	42
3.1.2. Alcoholes	47

3.1.3. Balance energético de los biocombustibles.....	53
3.1.4. Balance de las emisiones de efecto invernadero de los biocombustibles respecto a los combustibles fósiles.....	56
3.1.5. La biomasa algal. Una potente fuente de energía.....	61
3.2. OBTENCIÓN DE BIOCMBUSTIBLES A TRAVÉS DE PROCESOS TERMOQUÍMICOS	69
3.2.1. Pirólisis de la biomasa	69
3.2.2. Obtención de biocombustibles a través de la gasificación.....	73
3.3. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS A TRAVÉS DE LA COMBUSTIÓN O INCINERACIÓN	84
3.3.1. Descripción del proceso de incineración de la biomasa	85
3.3.2. Centrales de producción eléctricas a partir de biomasa	91
3.3.3. Algunos aspectos sobre la corrosión en calderas de combustión de biomasa	99
3.3.4. Calderas de combustión de biomasa de uso doméstico.....	105
3.3.5. Compactación de residuos de madera, serrín y virutas en <i>pellets</i>	108
3.3.6. Combustión de bagazo de caña de azúcar en lecho fluidizado	112
3.3.7. Tratamiento energético de alperujos	117
3.4. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO A TRAVÉS DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.	121
3.4.1. Descripción del proceso de fermentación anaerobia de la biomasa	122
3.5. PRODUCCIÓN BIOLÓGICA DE HIDRÓGENO MEDIANTE ALGAS, BACTERIAS Y RESIDUOS	125
3.5.1. Biofotólisis directa	126
3.5.2. Biofotólisis indirecta	127
3.5.3. Fotofermentación	127
3.5.4. Reacción de intercambio gaseoso o <i>Water gas shift reaction</i>	127
3.5.5. Fermentación oscura	128
3.6. RESUMEN DE ALTERNATIVAS PARA LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA BIOMASA	132
3.7. OTRAS VALORIZACIONES DE LA BIOMASA RESIDUAL	133
3.7.1. Compostaje.....	133
3.7.2. Características de los residuos utilizados para el compostaje.....	136
4. POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO Y COSTOS DE LA BIOMASA	137
4.1. CULTIVOS ENERGÉTICOS.....	137
4.1.1. Cultivos para bioaceites	137
4.1.2. Cultivos para bioalcoholes	139
4.1.3. Cultivos de leñosas de rápido crecimiento	140
4.1.4. Costos de producción de los biocombustibles.....	142

4.2. GENERACIÓN DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA AGRÍCOLA Y GANADERA	143
4.2.1. Residuos industriales ganaderos	144
4.3. POSIBILIDADES DE APROVECHAMIENTO DE LAS ALGAS	146
4.3.1. Aplicaciones de las algas.....	148
4.4. GENERACIÓN DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA FORESTAL	150
4.4.1. <i>Pellets</i> y briquetas.....	151
4.5. FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	154
5. IMPACTO AMBIENTAL DEL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS AGRÍCOLAS Y FORESTALES	154
5.1. EMISIONES CAUSADAS POR EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA	155
5.2. RECURSO SUELO	158
5.2.1. Principales efectos ambientales sobre el suelo	158
5.2.2. Cultivos energéticos y efectos sobre el suelo.....	160
5.3. BALANCE ENERGÉTICO	161
5.4. OTROS EFECTOS AMBIENTALES	162
5.5. CONSIDERACIONES AMBIENTALES GENERALES	162
6. FUNCIONAMIENTO ESPERADO EN LA INSTALACIÓN DE VALORIZACIÓN DE RESIDUOS FORESTALES.....	164
6.1. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO Y DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN	166
6.1.1. Balance de materia del sistema	168
6.1.2. Estimación de la cantidad de contaminantes	169
6.2. RESUMEN DE LA GENERACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES.....	170
6.2.1. Resumen práctico para el conocimiento de los biocarburantes.....	171
6.2.2. Aspectos económicos en la fabricación de biocarburantes	172
6.3. VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS FORESTALES DE PODA Y TALA	173
7. LA SOSTENIBILIDAD.....	174
7.1. LOS INCENDIOS FORESTALES	180
7.1.1. Producción de biomasa en un bosque mediterráneo	181
7.1.2. Energía disponible de forma sostenible	182
7.1.3. Impacto ambiental de los incendios forestales	184
7.2. LOS BOSQUES COMO SUMIDERO DE CO ₂	185
7.2.1. Aspectos económicos	186
7.2.2. Nuevas aplicaciones del CO ₂	187
7.2.3. Importancia de las hojas verdes.....	187
7.3. UN NUEVO CONCEPTO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA	189
7.3.1. Otras posibilidades de gasificación de diversas biomásas	191

7.3.2. Posibilidades del gas de síntesis	196
7.3.3. Ejemplo de sostenibilidad energética en una población	196
7.4. POSIBILIDADES DE LA PIRÓLISIS DE LA BIOMASA	197
7.4.1. Pirólisis avanzada de la biomasa	198
7.5. EL HIDRÓGENO COMO UN VECTOR ENERGETICO SOSTENIBLE	199
8. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS PARA SU VALORIZACIÓN ENERGÉTICA	202
8.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LA BIOMASA.....	203
8.1.1. Propiedades físicas de la biomasa.....	203
8.1.2. Propiedades químicas de la biomasa.....	203
8.2. CÁLCULO DE LA POTENCIA CALORÍFICA INFERIOR	205
8.3. DIAGRAMA DE COMBUSTIÓN	206
8.3.1. Determinación de las líneas del diagrama de combustión.....	209
8.4. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA.....	213
8.4.1. La temperatura de llama	215
8.5. PARÁMETROS DEL CÁLCULO DE UN INCINERADOR	216
8.5.1. Datos básicos para el diseño de un incinerador de biomasa.....	218
8.5.2. Ejemplo dimensionado de un horno de parrilla de forma rápida	219
8.6. VIABILIDAD ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE INCINERACIÓN DE BIOMASA.....	222
9. SOSTENIBILIDAD ENERGETICA DE LOS BIOCOMBUSTIBLES DE 1ª Y 2ª GENERACIÓN.....	225
9.1. INTRODUCCIÓN Y DEFINICIONES	225
9.2. BALANCE DE ENERGIA. RENDIMIENTO	227
9.2.1 Balance energético y rendimiento de los alcoholes.....	229
9.2.2 Biodiésel. Procedencia y rendimientos.....	230
9.3. COMBUSTIBLES DE 2º GENERACION	232
9.3.1 Biometanol.....	232
9.3.2 Biodimetiléter (bio-DME)	233
9.3.3 Biocarburantes sintéticos	233
9.4. CUÁLES SON LOS CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD PARA EVALUAR LOS BIOCOMBUSTIBLES	234
9.4.1. Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (gei).....	234
9.4.2 Otros criterios de sostenibilidad	235
BIBLIOGRAFÍA.....	238
AGRADECIMIENTOS.....	241

1. DEFINICIONES E INTRODUCCIÓN

Los sectores industriales relacionados con la producción de alimentos, el uso y aprovechamiento de recursos naturales, como son las actividades agrícola, forestal y otros como la pesquera, han visto la necesidad, cada vez creciente, de aumentar la eficiencia productiva de sus procesos, al generar bienes y productos relacionados directamente con las cadenas productivas, y demandas crecientes por parte de la población, que han aumentado en tasas elevadas en las décadas anteriores.

Dichos sectores productivos generan bienes básicos de consumo aprovechando sistemas naturales que se ven afectados si la demanda aumenta de manera creciente. En esencia, la base de los sistemas productivos continúa igual, ya que estas actividades basan el suministro de sus materias primas en los procesos naturales que se dan en la biosfera y que por miles de años han permitido el desarrollo y la sustentación de la vida en el planeta.

Los ciclos productivos tradicionales han dado paso a la incorporación de técnicas y equipos que han permitido incrementar la productividad, con el consecuente aumento de materias primas, la generación de residuos, uso extensivo de las superficies cultivables y como consecuencia, impactos ambientales asociados a estas actividades.

Por una parte la actividad agrícola convencional ha derivado en el desarrollo de variedades de frutas y verduras manipuladas genéticamente, que han permitido mayores tasas de producción y han mejorado las condiciones de conservación de los alimentos. Además a través del desarrollo de sofisticadas técnicas de riego y fertilización se ha logrado transformar terrenos infértiles en verdaderos oasis de cultivos, lo cual ha permitido la obtención de productos frescos en regiones en las que antiguamente no era posible. Estos factores han contribuido a acrecentar la producción mundial agrícola, satisfaciendo las necesidades básicas de un buen porcentaje de la población, a pesar del explosivo aumento de habitantes sobre todo en países en vías de desarrollo. Una situación similar se ha dado en la producción ganadera, donde se ha pasado de una ganadería extensiva en territorio, a una intensiva en pequeños rebaños de animales. Todos los sistemas productivos actuales, permiten controlar adecuadamente las variables climáticas, lo cual beneficia las altas productividades y rentabiliza las inversiones efectuadas.

El sector forestal posee una dinámica similar, ya que su desarrollo se ha fundamentado en la selección de especies que mejor se adapten a las condiciones climáticas de una región y sobre esas especies se efectúan mejoras a nivel genético, que permitan mayores tasas de crecimiento. Además la industria maderera ha introducido tecnología a sus procesos lo cual redundo en mejores rendimientos en la transformación de la madera y una mayor durabilidad de los productos.

Estas transformaciones en los mercados de productos agrícolas y forestales han conducido a un aumento en la tasa de generación, lo cual trae como consecuencia, un aumento en la producción de residuos asociados a estas actividades, y que se componen casi exclusivamente de biomasa residual, similares a los productos que les dan origen, y no son aprovechados habitualmente debido a que no son productos en sí. La Directiva 2009/28/CE, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, define la "biomasa" como: la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales.

Así los residuos generados por todas estas actividades poseen un alto potencial de aprovechamiento, considerando que son producidos en forma continua y extendida en todos los ambientes y por lo tanto la accesibilidad a dichos recursos no se ve afectada por condiciones específicas del territorio. Desde este punto de vista son una fuente importante de recursos, considerando además que provienen de un ciclo biogeoquímico y por lo tanto una fuente renovable que perdurará en el tiempo y que de utilizarse en forma sustentable permite una fuente inagotable de recursos que depende del sol como precursor principal en el proceso.

No cabe duda de que en los próximos años se asistirá a una explosión de nuevos descubrimientos de especies, en particular algas, y una profundización en la obtención de vegetales modificados genéticamente. Así, en el sur de la costa Patagónica (Argentina) se han descubierto unas algas de aplicación energética. Una hectárea de soja produce 400 litros de aceite, mientras que estas algas, a igualdad de superficie, pueden producir más de 100.000. Es decir una productividad 250 veces superior sin interferir en un doloroso debate ético que cuestiona el destino de plantas alimenticias, soja, para la fabricación de biocarburantes.

En el campo de la zoología, un reciente descubrimiento de la naturaleza de los microbios que viven en uno de los estómagos de las termitas ayuda a entender cómo estos microorganismos pueden transformar la lignina en energía.

El visionario genetista Craig Venter catalogó ya miles de genes especializados en captar luz de distintas longitudes de onda. Planeó crear una bacteria artificial que lleve una ristra de ellos y pueda aprovechar un espectro muy amplio de la luz. La futura bacteria convertiría en hidrógeno un 10% de la energía solar recibida y con una superficie de cultivo de 13.000 kilómetros cuadrados bastaría para subvenir todas las necesidades energéticas de transporte en los EEUU. Entre 2005 y 2006 el citado investigador y sus colaboradores en una travesía oceánica, consiguieron detectar más de seis millones de nuevos genes y proteínas de microbios marinos con las funciones más sorprendentes. Desde genes que permiten aprovechar la energía solar en formas novedosas a otros que ayudan a usar el nitrógeno, pasando por los que otorgan protección contra los rayos ultravioletas.

Investigadores de la universidad de Berkeley (California, EE.UU.) descubrieron que ciertas algas (*Chlamydomonas reinhardtii*) sometidas a luz solar y privadas de azufre y oxígeno, generaban hidrógeno durante largos periodos de tiempo y en cantidades apreciables (3 l/h de H₂ por litro de cultivo durante cuatro días).

1.1. EL CICLO DEL CARBONO

El conjunto de la biomasa que existe en la tierra tiene como origen el ciclo del carbono que directa o indirectamente permite la fijación del CO₂ de la atmósfera en los tejidos vegetales y animales y, de esta forma, la formación y acumulación de biomasa.

La producción primaria de la biosfera comprende la transformación de la energía lumínica del sol en energía química, por acción de organismos fotosintéticos. Estos organismos poseen la capacidad única de recoger la radiación solar y, mediante procesos bioquímicos, utilizarla para sintetizar estructuras carbonadas que sirven de sustento para la vida. El proceso permite la acumulación de dichos compuestos en las estructuras celulares de estos organismos, con el crecimiento de complejas formas de vida, que representan la base de todas las demás cadenas tróficas que existen en el planeta. Los organismos fotosintéticos poseen esta cualidad, que no es compartida por otros organismos vivientes, y por lo tanto la producción primaria se transforma en la pieza clave de la existencia de las otras formas de vida en el planeta.

La biomasa que se genera se aprovecha luego por otros organismos que la consumen y la transforman en una biomasa de carácter secundario, generando nuevas estructuras celulares, que son el resultado de transformaciones posteriores de la generada en la producción primaria de la biosfera.

1.1.1. Fotosíntesis

La cantidad de radiación, energía, que llega del sol es enorme, del orden de 170.000 TW ($173 \cdot 10^{15}$ W), es decir miles de veces la energía que el hombre consume. Teniendo en cuenta el área del planeta, el flujo solar sobre la Tierra en todos los puntos es de $342,5 \text{ W/m}^2$. Buena parte de ella es reflejada al espacio exterior resultando que, la energía efectiva que alcanza la superficie terrestre, de promedio, es de 170 W/m^2 .

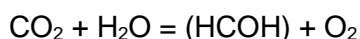
Una parte ínfima de este flujo (algo más del 0,5%) energético es empleado para la creación de la biomasa, a razón de $30 \cdot 10^{10}$ t/año, equivalentes a $868 \cdot 10^3$ TWh o $7,5 \cdot 10^{10}$ tep, es decir casi seis veces el consumo mundial de energía en 2002.

Las plantas producen, de promedio una energía de $5 \cdot 10^3$ kcal/m² y año. Llevando a cabo cálculos teóricos sobre una superficie de $1,5 \cdot 10^{14}$ m² resulta una energía transferida (sol/biomasa) de $7,5 \cdot 10^{17}$ kcal/año o $8,7 \cdot 10^{14}$ kWh/año o sea una potencia media de 100 TW.

La radiación ejerce sobre el océano un fenómeno muy complejo donde cada día se van esclareciendo parámetros adicionales, en particular los relacionados con el mar ya que ocupa el 75% de la superficie del Planeta. Así en 2006, científicos del Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona descubrieron que la radiación solar cuando actúa sobre el plancton marino produce dimetil sulfuro (DMS) que cuando interacciona con el agua que forman las nubes da lugar a un “efecto parasol” a escala global.

El ciclo del CO₂ comienza con la fotosíntesis, un proceso complejo que tiene lugar en los organismos vegetales que poseen orgánulos, localizados al interior de las células, llamadas cloroplastos. El proceso permite reducir la molécula de CO₂ y la transforma en azúcares, para lo cual la radiación solar eleva el potencial de los electrones, entregando la energía necesaria para la formación de las moléculas de azúcares y la liberación del O₂ presente en el H₂O.

La ecuación global de la fotosíntesis es:



El carbono fijado es la base para la composición de las estructuras celulares de animales y vegetales. El CO₂ es liberado luego a través de la respiración celular que se da en todos los organismos vivos, por las emisiones que se producen en la combustión de biomasa y por la descomposición de los organismos muertos. Esquemáticamente el ciclo se presenta en la Figura 10.1:

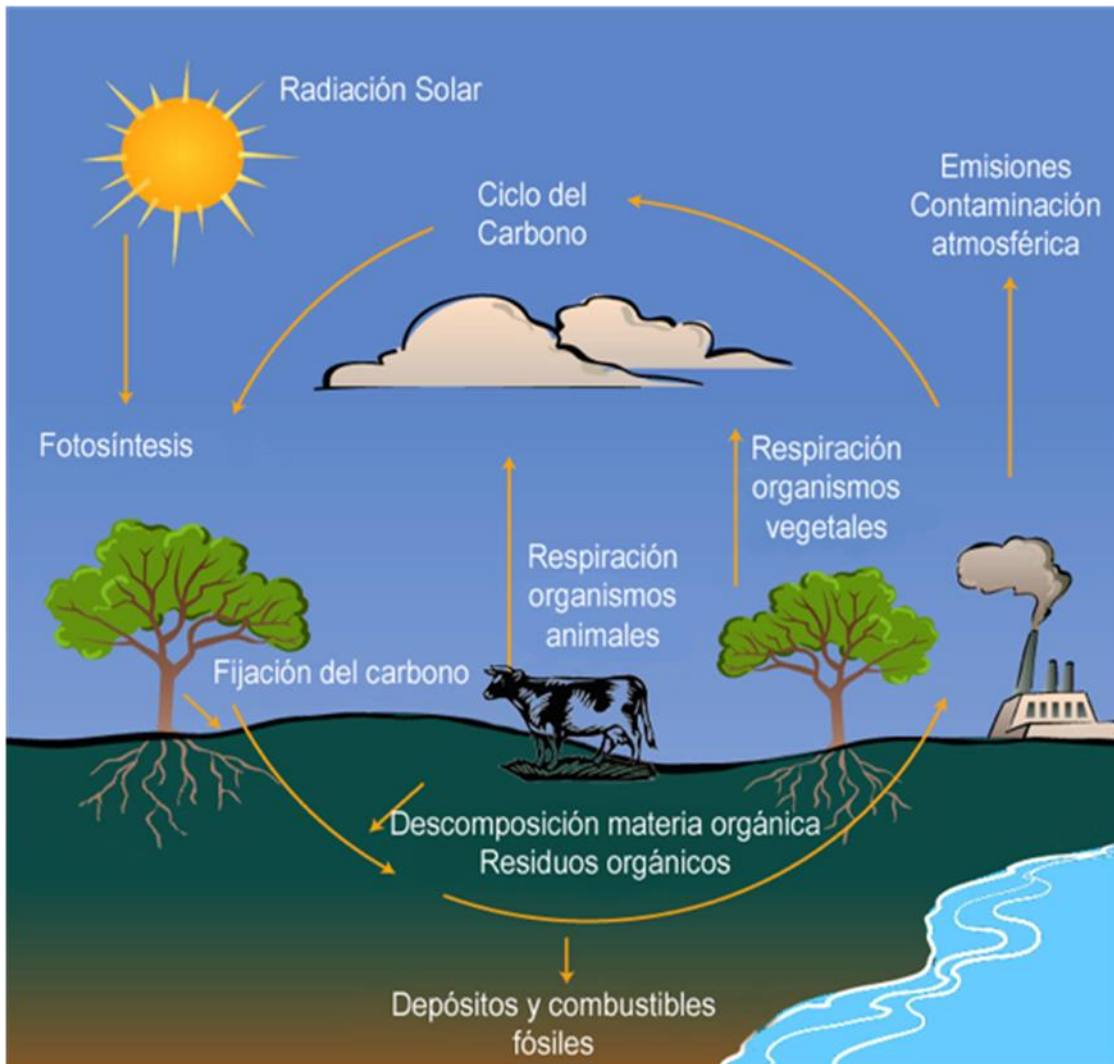


Figura 10.1 El ciclo del carbono.

La fotosíntesis permite la generación de biomasa, utilizando como fuente de energía la luz proveniente del sol, para luego alimentar otras cadenas tróficas presentes en la biosfera. La biomasa disponible, comprende el conjunto de materia orgánica presente en la tierra, posee un carácter renovable, al tener su origen en la radiación solar, asumiendo una función de fuente inagotable de recursos. Si bien los combustibles fósiles y derivados de ellos, poseen un origen también asociado a la cadena de producción primaria fotosintética, no son considerados parte disponible de la biomasa, ya que son depósitos que fueron generados en una escala de tiempo de miles o millones de años, muy superior a una escala humana y participan en ella procesos geológicos que no necesariamente se repetirán, por lo que no pueden ser considerados como elementos activos del ciclo del carbono y por ello como parte de la biomasa disponible en la biosfera.

Antes de la revolución industrial, los combustibles fósiles no estaban participando del ciclo del CO₂ y, después de su descubrimiento y el desarrollo de tecnologías para su utilización masiva, han sido liberados en forma acelerada y por lo tanto han alterado el equilibrio natural, favoreciendo con ello el efecto invernadero.

Si bien la biomasa representa solo una pequeña parte en la masa total de la tierra su importancia es vital, ya que es el gran reservorio de energía para que la vida se sustente en el planeta, a pesar de que solo aprovecha una fracción mínima de la

energía que es entregada por el sol, y fijada por los organismos fotosintetizadores. La alteración de dicho ciclo influye directamente en la existencia de la vida sobre la tierra, ya que permite el suministro de oxígeno a la atmósfera y a todos los organismos que requieren de él para su existencia.

1.1.2. El ciclo de carbono: flujos y reservas.

El ciclo del carbono, por su importancia, trascendencia y complejidad está en continuo estudio. En la Figura 10.2 se presenta el ciclo de carbono global de la década de 1990 según un estudio de IPPC de 2007. En este se muestra las inmensas reservas en gigatoneladas de carbono, y los flujos naturales que había antes de 1750 y los flujos antropogénicos anuales de la citada década en gigatoneladas por año. Tanto el CO₂ como el CH₄ juegan un papel fundamental en el ciclo natural del carbono, en el que se ha de considerar la participación de los grandes y continuos flujos de carbono entre el océano, la biosfera terrestre y la atmósfera, que ha mantenido estables las concentraciones atmosféricas de estos gases miles de años antes de 1750.

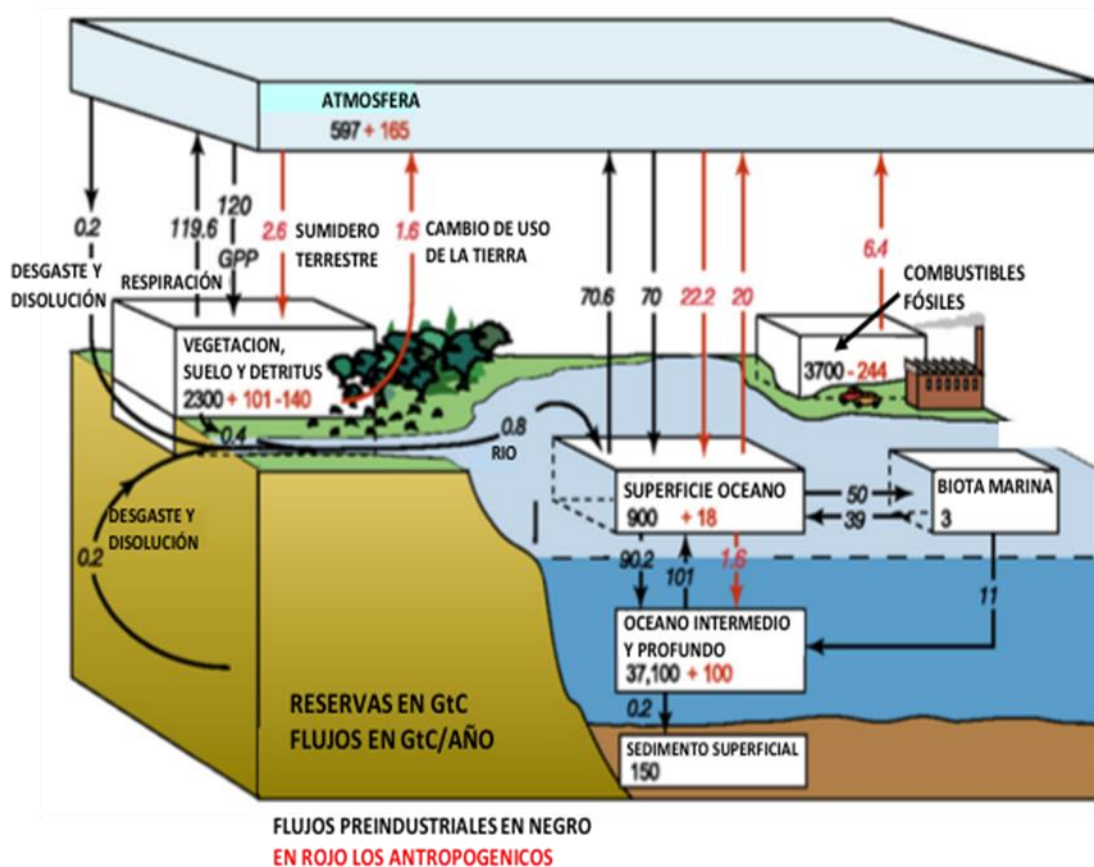


Figura 10.2. El ciclo del carbono global de la década de 1990, en los que se muestra los principales flujos anuales en Gt de C/año y las reservas y su variación en Gt de C. Los flujos preindustriales o "naturales" se indican en negro, mientras que los flujos 'antropogénicos' están en rojo. (Fuente IPPC AR4, 2007).

Durante millones de años, el CO₂ se ha eliminado de la atmósfera a través de la erosión de rocas de silicatos y mediante el enterramiento de sedimentos marinos de carbono fijado por las plantas marinas. La quema de los combustibles fósiles ha devuelto el carbono capturado por las plantas, en la historia geológica de la Tierra, a la atmósfera. Nuevos registros de los núcleos de hielo demuestran que el sistema de la Tierra no ha experimentado nunca las actuales concentraciones atmosféricas de CO₂, o de CH₄. Durante al menos 650.000 años, en los que ha tenido lugar seis ciclos

glaciares-interglaciares, la concentración atmosférica de CO₂ se mantuvo entre 180 ppm (máximo glacial) y 300 ppm (períodos interglaciares calientes). En general se acepta que en el periodo de la época glacial, el CO₂ eliminado de la atmósfera se almacenó en el océano.

Antes de 1750 y durante 10.000 años, la concentración atmosférica de CO₂ ha sido relativamente estable entre 260 y 280 ppm. En este periodo, las perturbaciones del ciclo del carbono debido a las actividades humanas eran insignificantes con respecto a la variabilidad natural. En cambio desde 1750, la concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado, a un ritmo cada vez mayor, pasando de alrededor de 280 ppm a casi 380 ppm en 2005. En enero de 2015 se publicaba que en el observatorio Mauna Loa, ubicado en lo alto de la isla de Hawaii (lugar aislado, remoto, para evitar perturbaciones de carácter general, y por su altitud tampoco influenciado por la vegetación local) se había alcanzado los 400 ppm. En este mismo laboratorio, en Diciembre de 2016 se alcanzaba 405,25 ppm. La concentración de CO₂ en la atmósfera terrestre varía de unas zonas a otras, por zonas globales, las de mayor concentración se observan en el Amazonas, en la parte centro-sur de África y en Indonesia, mientras que las de menor concentración se sitúan en la Antártida.

Este aumento de la concentración de CO₂ atmosférico es debido a las actividades humanas, consecuencia de la quema, principalmente, de los combustibles fósiles y de la deforestación, y también de la producción de cemento y otras actividades industriales, así como de los cambios en el uso de la tierra, para la producción de cultivos energéticos, la conversión de pastizales en tierras de cultivo y la quema de biomasa. De la misma forma, las concentraciones atmosféricas de CH₄ han tenido un rápido aumento, pasando de aproximadamente 700 ppb en 1750 a alrededor de 1.775 ppb en 2005. Entre las fuentes de este aumento hay que considerar los combustibles fósiles, vertederos y tratamiento de residuos, turberas y humedales, los animales rumiantes y los arrozales. El aumento de CH₄ es poco menos de un tercio del CO₂, y es el segundo gas de efecto invernadero más importante, y que también tiene su propio ciclo.

Tanto el CO₂ como el CH₄ juegan un papel fundamental en el ciclo natural del carbono, estos participan en los continuos flujos de grandes cantidades de carbono entre el océano, la biosfera terrestre y la atmósfera, manteniéndose estables las concentraciones atmosféricas de estos gases durante 10.000 años antes de 1750. Como ya se ha comentado, durante este periodo, el carbono se convierte en biomasa mediante la fotosíntesis. Las plantas terrestres capturan CO₂ de la atmósfera; las plantas, el suelo y la respiración animal (incluyendo la descomposición de la biomasa muerta) devuelve carbono a la atmósfera en forma de CO₂, CH₄ o en condiciones anaerobias. Los incendios de vegetación pueden ser una fuente importante de emisiones de CO₂ y CH₄ a la atmósfera en escalas de tiempo anuales, pero gran parte del CO₂ es capturado por la biosfera terrestre en escalas de tiempo de décadas si la vegetación vuelve a crecer.

Por otra parte el CO₂ se intercambia de forma continua entre la atmósfera y el océano. Este entra en contacto con la superficie del océano, pero inmediatamente reacciona con el agua para formar bicarbonato e iones de carbonato, al que se le conoce como carbono inorgánico disuelto (DIC). El tiempo de permanencia de CO₂ (como DIC) en la superficie del océano, en relación con el intercambio con la atmósfera y el intercambio físico con las capas intermedias del océano, es menor de una década. En invierno, en las aguas frías de latitudes altas y con gran cantidad de CO₂ (como DIC) debido a su alta solubilidad, se hunde desde la capa superficial a las profundidades del océano. Este efecto se denomina como “bomba de solubilidad”, y el hundimiento está

localizado y asociado a la "Circulación Meridional de Retorno del Atlántico Norte" o MOC (corriente que transporta hacia el norte una gran cantidad de calor).

Además el fitoplancton absorbe el carbono mediante la fotosíntesis, y también en la capa superficial se encuentran organismos muertos y partículas (aspecto que se conoce por "bomba biológica"), y se transforma en carbono orgánico disuelto (DOC). La mayor parte de este carbono se hunde, y es respirado, a través de la acción de bacterias, en las capas superficiales e intermedias y se recircula otra vez a la superficie como DIC. El flujo de partículas restante llega a las profundidades abisales y una pequeña cantidad alcanza a los sedimentos oceánicos profundos, algunos de los cuales se vuelven a suspender y otros son enterrados. Los intercambios en aguas intermedias ocurren en una escala de tiempo de décadas a siglos, mientras que en las aguas profundas la mezcla tiene lugar en escalas de tiempo del milenio.

Juntos, la solubilidad y las bombas biológicas mantienen un gradiente vertical de CO_2 (como DIC) entre la superficie del océano y las capas más profundas del océano, y por lo tanto, regulan el intercambio de CO_2 entre la atmósfera y el océano. La fuerza de la bomba de solubilidad depende, a nivel mundial, de la fuerza de la cubierta de la MOC, la temperatura superficial del océano, la salinidad, la estratificación y el hielo. La eficiencia de la bomba biológica depende de la fracción de la fotosíntesis enviando fuera de la superficie del océano como partículas que se hunden, pero puede verse afectada por los cambios en la circulación oceánica, el suministro de nutrientes y la composición de la comunidad de plancton y la fisiología.

Todos estos conceptos sobre el ciclo de carbono expresados en valores numéricos, alrededor de 1996, se reflejan en la Figura 10.2. Los flujos, en giga toneladas de carbono por año (GtC/año), de los intercambios naturales o preindustriales (se estima que anteriores a 1750) entre los océanos, la atmósfera y la tierra se muestran por las flechas negras, mientras que los antropogénicos se reflejan en rojo. También se reflejan en GtC las reservas existentes, en negro las anteriores a 1750, y en rojo las variaciones en torno a 1996.

Así, por ejemplo, la pérdida neta terrestre es de -39 GtC/año, que es el resultado de las emisiones de los combustibles fósiles acumulados, menos el incremento que ha sufrido la atmósfera, y menos el almacenamiento que ha ocurrido en el océano. La pérdida de -140 GtC de la reserva de la 'vegetación, el suelo y detritus' se ha evaluado que es consecuencia de las emisiones acumuladas por el cambio de uso del suelo, y requiere su disipación a la biosfera terrestre de 101 GtC.

1.2. APLICACIONES GENERALES DE LA BIOMASA

La biomasa posee una serie de aplicaciones desde el punto de vista energético y de su utilización como insumos del sector industrial, especialmente en las industrias químicas. En términos generales esto se puede observar en el diagrama de la Figura 10.3.

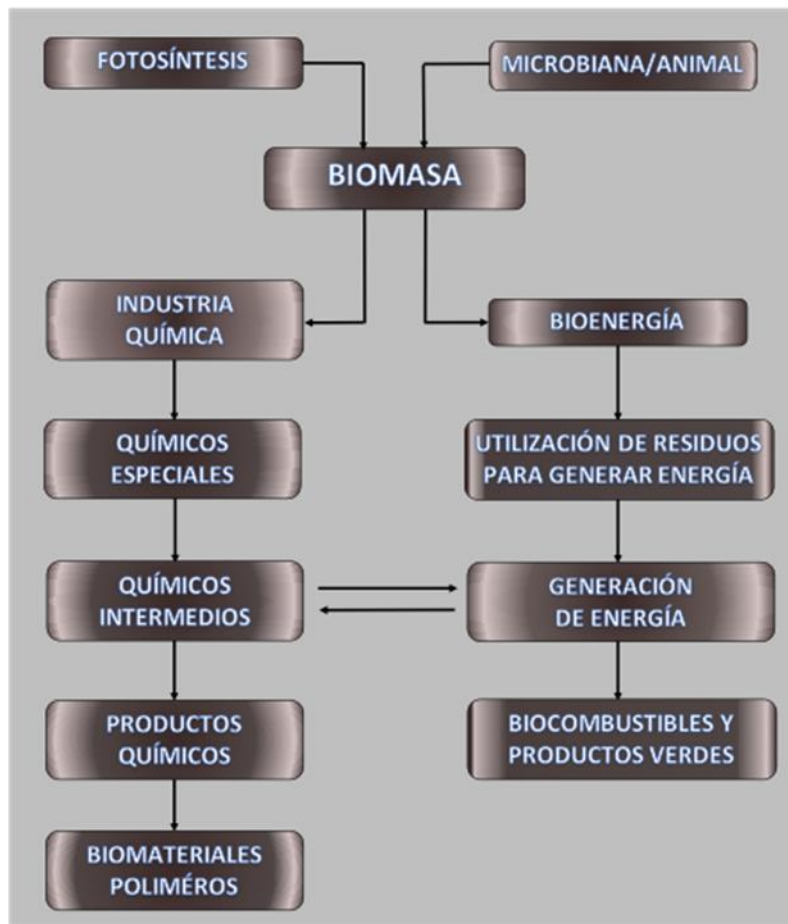


Figura 10.3. Aplicaciones generales de la biomasa.

La biomasa producida posee en general, a excepción de los cultivos energéticos, un uso primario asociado a los consumidores finales, ya sea como alimento o bien materias primas para producir papel o productos químicos.

1.3. BIOMASA Y RECURSOS NATURALES

Solo una parte de la radiación que emite el sol es utilizada por el proceso fotosintético, en términos generales la eficiencia es del orden del 0,05%, con lo cual en la biosfera la biomasa producida anualmente es aproximadamente $1,1 \cdot 10^{14}$ kg, equivalente a unos 68.000 millones de toneladas de petróleo equivalentes ($68 \cdot 10^9$ tep, o bien $748 \cdot 10^9$ MWh). El rendimiento de la fotosíntesis a nivel individual, por ejemplo en un campo de cultivo, es mucho mayor.

Tabla 10.1 Producción primaria neta de los principales ecosistemas (Fuente: Field et al 1998).

Producción Primaria Neta Biosfera (Petagramos de carbono = 10^{15} gramos)			
Océano		Tierra	
Oligotrófico	11,0	Bosques tropicales lluviosos	17,8
Mesotrófico	27,4	Bosques deciduos de hoja ancha	1,5
Eutrófico	9,1	Bosques mixtos	3,1
Macrófito	1,0	Bosques siempre verdes de hoja acidulada	3,1
		Bosques deciduos de hoja acidulada	1,4

		Sabanas	16,8
		Pastizales perennes	2,4
		Arbustos de hoja ancha con suelo desnudo	1,0
		Tundra	0,8
		Desierto	0,5
		Cultivos	8,0
Total	48,5	Total	56,4

La Tabla 10.1 muestra claramente la importancia de los bosques como productores de biomasa y fijadores de CO₂ en el ciclo del carbono. Suponiendo un uso energético de ella, permitiría suplir los requerimientos de una buena parte de los países del mundo, estimándose que al año 2050 un 15% de los requerimientos energéticos mundiales pueden ser cubiertos a partir del aprovechamiento energético de la biomasa.

Los residuos de biomasa, pueden ser utilizados, básicamente para las siguientes cinco labores principales:

- Fertilización de suelos.
- Sustrato productivo.
- Alimentación humana.
- Alimentación ganadera.
- Producción de energía.

Las primeras dos opciones, permiten el empleo indistinto de biomasa de origen agrícola o forestal, al igual que el aprovechamiento energético.

La alimentación humana y ganadera por otra parte se refiere únicamente al uso de los residuos generados por la agroindustria y puede ser considerada para varios tipos de residuos de origen agrícola. Desde tiempos remotos los animales domésticos han sido alimentados con restos de frutas y verduras, y de la misma manera estos residuos pueden ser procesados para su uso e incorporación en alimentos destinados a consumo humano.

La fertilización de suelos comprende la utilización de biomasa residual para mejorar la calidad de taludes, terrenos pobres y erosionados, incorporando una mezcla que puede ser previamente compostada para mejorar la calidad de los nutrientes entregados.

Su utilización como sustrato productivo, comprende la incorporación de biomasa residual como base en la producción de setas, lombrices o levaduras.

Finalmente, la producción de energía es una alternativa que surge con mucha fuerza ya que proporciona importantes beneficios dado el carácter renovable de la biomasa. Para ello existen diversas técnicas y equipos que permiten la obtención de energía para diferentes usos y aplicaciones, siendo la más versátil de ellas la generación de electricidad.

La biomasa agrícola y forestal ha sido utilizada como fuente de energía desde hace siglos, siendo la principal tecnología para su aprovechamiento en los últimos años la combustión en pequeños hornos y calderas de uso particular. De hecho en España, y muchos otros países el uso de la biomasa como combustible estuvo muy extendido hasta la década de los sesenta, momento a partir del cual el resurgir industrial, social y económico facilitó el empleo de combustibles derivados del petróleo. Desde entonces, la utilización de la biomasa como fuente energética ha quedado totalmente relegada a un segundo plano. Sin embargo, tal y como se refleja en los planes de política

energética de la Unión Europea y en particular en España con los distintos planes de Fomento de las Energías Renovables, 2000-2010 y 2011-2020, en los últimos años se está dedicando una gran cantidad de recursos al aprovechamiento de la biomasa como combustible. Estos, además favorecen el desarrollo económico y social de zonas rurales, y también a la reducción de la contaminación medioambiental derivada de su eliminación de los residuos y de las emisiones de CO₂.

En varios estudios de 2002 y 2003 en España o regiones de España, se ha evaluado la capacidad de producción de energía a partir de biomasa y residuos de biomasa. En ellos la metodología empleada consiste en determinar el potencial energético de la biomasa, con una primera selección de los cultivos, teniendo en cuenta la superficie y/o producción dedicada a dichos cultivos, y del conocimiento de los rendimientos de producción de cada residuo. A partir de esta información y del poder calorífico de cada residuo puede evaluarse el potencial energético de una región o zona determinada.

En la Tabla 10.2 se presentan, consecuencia de la explotación agrícola y forestal, los diferentes ratios de residuos generados susceptibles de ser aprovechados como fuente de energía en tres comunidades autónomas, Castilla-La Mancha, Castilla-León y Extremadura, de la zona centro de España. También se indica el poder calorífico superior de cada tipo de residuo evaluado con una bomba calorimétrica.

Tabla 10.2. Explotación de biomasa. Rendimiento de producción de distintos residuos en la explotación (Fuente: A. Melgar et al. 2003).

RESIDUO		RENDIMIENTO DE PRODUCCIÓN	PCS (MJ/kg)
Cereales de invierno	Paja libre de cebada	0,52-0,68 t/h	16,1
	Paja libre de trigo	0,47-0,69 t/h	15,5
	Paja libre de avena	0,34-0,39 t/h	16,4
	Paja libre de centeno	0,55 t/h	18,3
Maíz	Paja libre de maíz	2,26-4,43 t/h	16,2
Manzano	Ramones	1,56 t/h	18,1
Cerezo y guindo	Ramones	1,56 t/h	18,1
Girasol	Cañote y cabezuela	1,5 t/t producto	15,1
Tomate	Piel y semillas	0,025 t/t producto	21,8
Almendro	Ramones	1,88 t/h	18,1
	Cáscara de almendra	0,8 t producto	18,2
Olivo	Ramones	5 t/h	18,1
	Orojo de aceituna	0,48 t/t producto	17,8
	Alperujo	0,8 t/ t producto	17,8
Vid	Sarmientos	0,75-2,5 t/h	13,9
	Orojo lavado de uva	0,14 t/t producto	18,1
Forestal	Desbroce de monte leñoso	0,42-2,62 t/h	17,4
	Desbroce de monte maderable	0,1-0,7 t/h	17,4
	Restos de talas	30% de madera procesada	17,4
	Serrines	15% de madera procesada	18,1
	Cortezas	10% de madera procesada	19,7
	Cortezas y recortes	15% de madera procesada	16,7
	Cáscara de piñones		17,1

A partir de estos datos y del conocimiento de la superficie cultivada o de la cantidad total de producto generado es posible evaluar el potencial energético total de la biomasa en la región o zona considerada. Este dato resulta de gran interés, por un lado para analizar la posibilidad de construir una planta de aprovechamiento de los residuos generados por la explotación agrícola y forestal, evaluando el calor liberado en el proceso de combustión y/o gasificación. Bajo esta metodología, en las tres citadas regiones autonómicas el potencial energético alcanzaría los 210.000 TJ, que es, aproximadamente, la energía que produjeron las siete centrales nucleares españolas, en funcionamiento, en 2014.

Sin embargo la posibilidad del aprovechamiento de cada tipo de residuo es función de sus características físicas y de la estacionalidad. En cuanto al primer aspecto, mediante un análisis inmediato y elemental, se determina, la humedad, cenizas y el carbono fijo, y el contenido de azufre de cada tipo de residuo, lo que a su vez da una indicación de los diferentes tipos de tratamientos que requieren, como secado, triturado, etc., que permiten determinar cómo mejorar el rendimiento de una planta.

Algunos autores indican que el límite máximo de humedad en la biomasa para un correcto proceso de gasificación es de aproximadamente del 30%. Sin embargo, en estas condiciones resulta recomendable, en la práctica imprescindible, el secado, debido a la pérdida de energía que supone la evaporación del agua en el propio proceso. Este defecto, aunque menos determinante en un proceso de combustión, es siempre aconsejable minimizarlo, mediante el correspondiente secado, ya que además supone una relación superficie/volumen de la instalación más favorable.

Entre los residuos citados en la Tabla 10.2, los que menor tratamiento previo precisan son los aserrines, la cáscara de almendra, el alperujo y el orujo lavado de uva. En cambio, debido al elevado tamaño que poseen las pacas procedentes de la recogida de los cereales de invierno, estos requieren un triturado y briqueado previo a su introducción en la planta de aprovechamiento. Estos tratamientos suponen un coste adicional en el aprovechamiento de estos residuos. También es preciso destacar que los residuos procedentes de poda y los residuos forestales, principalmente los resultantes del desbroce, precisan de un triturado *in-situ* para reducir los costes de transporte hasta el lugar de aprovechamiento.

El segundo aspecto a considerar para el aprovechamiento de todos estos residuos es la estacionalidad en la que se generan. En el caso que se está considerando, las tres autonomías del centro de España, se generan mayores cantidades de residuos de maíz y desbroces de monte maderable, de monte leñoso y de otras talas en el segundo trimestre. En el tercer trimestre se concentran ramones de olivo, alperujo, y también parte de desbroces, mientras que en los últimos meses del año, cuarto trimestre, se concentran los residuos de paja de trigo, cebada, avena y de nuevo parte de desbroces.

Cabe destacar las enormes diferencias de estacionalidad entre cada tipo de residuo. Esto obliga a que el diseño de una planta de aprovechamiento de estos residuos sea lo suficientemente versátil para permitir el empleo de diferentes residuos como combustible. De lo contrario, sería necesario realizar una previsión en la capacidad de almacenamiento de un residuo concreto, con los costes económicos que conlleva el correspondiente almacenamiento.

En el aprovechamiento de cualquier residuo tiene gran influencia el coste del transporte desde el lugar de su generación hasta el de tratamiento. En una primera aproximación, en España, se estima que esta distancia no debería superar los 50 km para estos tipos de residuos. Este parámetro es importante, pues determina en parte

la capacidad y situación de cada planta, así como el número óptimo de estas plantas en una determinada región o zona.

En el caso expuesto, los residuos que tiene mayor rentabilidad al ser empleados para la producción de energía eléctrica son el orujo lavado de uva, alperujo, ramones de almendro y olivo, serrines, cortezas, costeros, recortes y los residuos de la industria del tomate.

En el otro extremo se encuentran, con escasa rentabilidad energética y una importante estacionalidad, los residuos de los cereales, lo que aconseja a que estos sean empleados en otros usos diferentes al aprovechamiento energético. En España las posibilidades de los residuos de paja se evalúan en unos 20 millones de toneladas. Sin embargo la paja tiene algunos destinos, con una gran demanda como alimento para la cabaña ganadera. A ello se añade que la paja sufre grandes oscilaciones de precio, en función, sobre todo, de la climatología, aumentando en los años con elevada pluviometría.

También hay que tener en cuenta el elevado potencial de los residuos forestales y los ramones de almendro y olivo en las tres comunidades autónomas citadas, que los convierten en un potencial combustible futuro.

En el caso de España, se estima que en la limpieza de los montes podría llegar aportar del orden de 18 millones de toneladas de biomasa. Aunque es muy difícil aprovechar todo este potencial, para convertirlo en accesible y esté, a su vez, disponible. Hay que destacar lo beneficioso que puede resultar la limpieza de los montes, para la conservación del medio ambiente y la prevención de incendios forestales.

Sin embargo con una visión totalmente general y amplía a efectos de aprovechar la biomasa para producir energía hay otras posibilidades, y por ello la primera duda está ligada al tipo de biomasa que se quiere utilizar en consonancia con el tipo de energía que se desea producir. No puede, ni debe realizarse el mismo tratamiento y el mismo análisis si se hace referencia a la obtención de biocarburantes, ya sea alcoholes o ésteres, o si la energía a conseguir es una energía térmica susceptible de una transformación en otra clase de energía. Así en la producción de biocarburantes la materia prima a utilizar son los cereales, semillas de oleaginosas y aceites. El bioetanol y el biodiésel se obtienen por fermentación de hidratos de carbono y por la transesterificación de los aceites. Esta modalidad de energía presenta una gran diferencia en cuando a la materia prima se refiere, en relación con la energía térmica. La producción de bioetanol tiene la característica de la diversidad de materia prima existente, ya que son válidos todos los productos con un contenido importante en hidratos de carbono en los que pueden incluirse cereales, achicoria, patata, remolacha, y determinados subproductos como las melazas de remolacha y caña etc.

2. ORIGEN Y FUENTES DE LA BIOMASA

Las fuentes de biomasa pueden ser clasificadas en dos grandes grupos: las de origen animal y las de origen vegetal. En cada una de las cuáles se puede considerar otros subgrupos. Esto, en términos globales, permite agrupar los residuos biomásicos en las siguientes cuatro categorías:

- Residuos agrícolas de cultivos e industrias agroindustriales.
- Residuos de explotaciones ganaderas.
- Residuos de biomasa presentes en los residuos sólidos urbanos (RSU) y asimilables.

- Residuos forestales, provenientes de actividades selvícolas e industrias transformadoras de madera.

La sumatoria de dichos residuos equivaldría a la disponibilidad total de biomasa utilizable para las actividades descritas, a lo cual es necesario sumar, cuando se considera el uso energético de la biomasa, todos aquellos cultivos que han sido diseñados con fines exclusivos para su aprovechamiento a través de su transformación energética.

2.1. COMPOSICIÓN GENERAL DE LA BIOMASA

La biomasa posee una composición típica desde el punto de vista cualitativo, pero no cuantitativo ya que la proporción de sus componentes varía dependiendo de cada especie vegetal o animal y de los procesos por los cuales ha sido generada.

La biomasa vegetal está compuesta principalmente de hidratos de carbono, en forma de compuestos lignocelulósicos o amiláceos, y, en menor proporción proteínas, lípidos y compuestos orgánicos nitrogenados. Su composición varía debido a que las estructuras que forman la biomasa no son homogéneas en todos los órganos y por lo tanto dependen de la proporción de ellos en cada especie definiendo composiciones diferentes en cada caso. Por ejemplo, las semillas de leguminosas son muy ricas en proteínas, o las semillas de oleaginosas poseen un alto contenido de lípidos, por lo que no es posible facilitar un valor exacto de su composición.

Para entender la biodegradación, es útil conocer la fracción biodegradable de los residuos. La celulosa, $(C_6H_8O_4)_n$, y la hemicelulosa, $(C_5H_8O_4)_n$, son los principales componentes biodegradables de los residuos de origen vegetal, y el otro componente orgánico principal, la lignina (componente estructural de la madera) tiene, en gran medida, una menor degradabilidad en las condiciones típicas de un vertedero.

Los residuos urbanos contienen aproximadamente un 40-50% de celulosa, un 7-10% de hemicelulosa y un 10-20% de lignina. El contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de varios tipos de residuos como alimentos, distintos tipos de papel y desechos de jardín se resumen en la Figura 10.4.

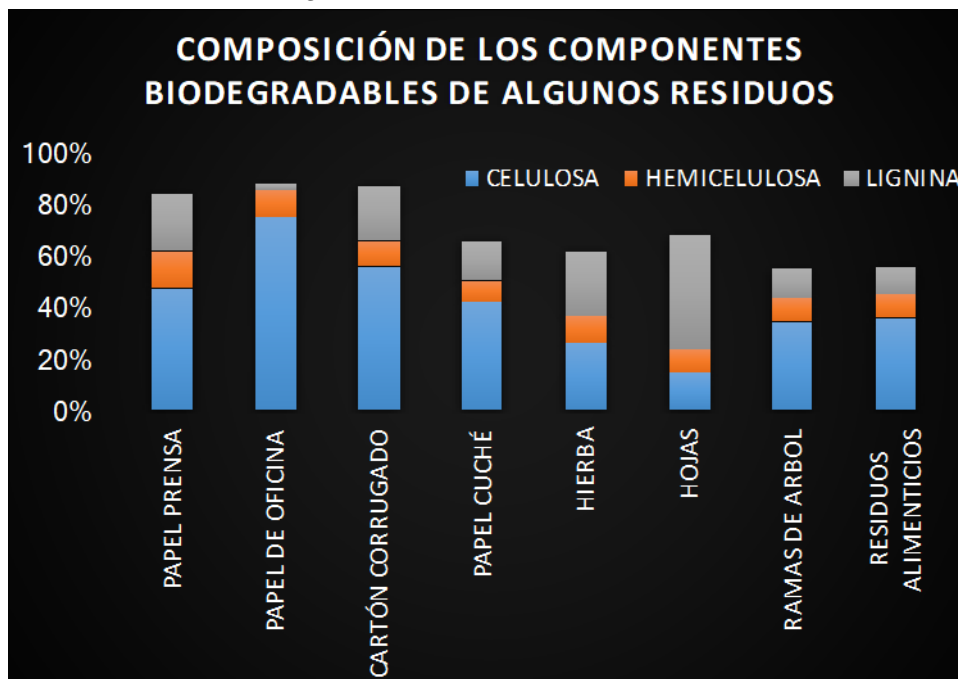


Figura 10.4. Composición de los componentes biodegradables de algunos residuos de alimentos domiciliarios, tipos de papel y de desechos de jardinería, en % respecto al total.

En esta misma línea se presenta, en la Figura 10.5, la distinta composición de la biomasa vegetal de diferentes especies y de residuos obtenidos a partir de vegetales, que además de mostrar su biodegradabilidad, relaciona las características de la especie y las condiciones de crecimiento.



Figura 10.5. Composición general de la biomasa en % respecto del total.

Desde el punto de vista energético, aquella biomasa de estructura más sólida (madera) permite aplicaciones termoquímicas, y la de estructura poco sólida (como los cultivos agrícolas anuales) mayor variedad de aplicaciones, como la hidrólisis, cada una de las cuáles será detallada en los apartados posteriores.

La composición específica de la biomasa permite, en los mercados internacionales, establecer los valores a los cuáles se transaccionan los productos derivados de la biomasa. Según esto existe una correlación que establece que los productos de mayor producción, como son la celulosa, denominados “*commodities*” en terminología inglesa, son los de menor precio, por otra parte los productos químicos derivados de la biomasa que agrupan una gran cantidad de productos, con menores volúmenes trasegados y un mayor precio, para finalmente encontrar productos utilizados en la industria farmacéutica, que representan los de mayor precio.

2.2. BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA

La biomasa es un gran depósito de energía. Fue el primer combustible usado intensivamente hasta el inicio de la revolución industrial y continúa siendo además el principal recurso energético para millones de personas en el mundo. Surge así el concepto de biocombustibles, que se refiere a la fracción de biomasa susceptible de

ser utilizada energéticamente, que pueden provenir tanto de residuos de procesos industriales, de la recogida selectiva de residuos municipales, de restos de actividades agrícolas, forestales o ganaderas como también de cultivos especialmente pensados con fines energéticos.

Desde el punto de vista energético usualmente se utiliza la biomasa residual generada en la etapa de cultivo, o bien los residuos producidos luego del aprovechamiento por parte de los consumidores, como por ejemplo la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU) y en la etapa de transformación de la biomasa, especialmente dado por la fracción no utilizada comercialmente, como por ejemplo la corteza de los árboles. Lo anterior se complementa con la biomasa proveniente de cultivos energéticos que, por lo tanto directamente pasan a contabilizarse dentro de la biomasa disponible para fines energéticos.

El desarrollo de otras aplicaciones energéticas de la biomasa, complementarias a la tradicional combustión directa utilizada desde tiempos remotos, ha permitido el surgimiento del concepto bioenergía, que se ha definido como la utilización intensiva, a través del desarrollo de procesos industriales, de biomasa para la generación de energía, considerando en ello su aprovechamiento directo o bien mediante la transformación y obtención de los denominados biocombustibles.

Esquemáticamente las fuentes de biomasa y los procesos generales que la generan, enfocados a un aprovechamiento como fuente de energía, pueden ser observados en el diagrama de la Figura 10.6.

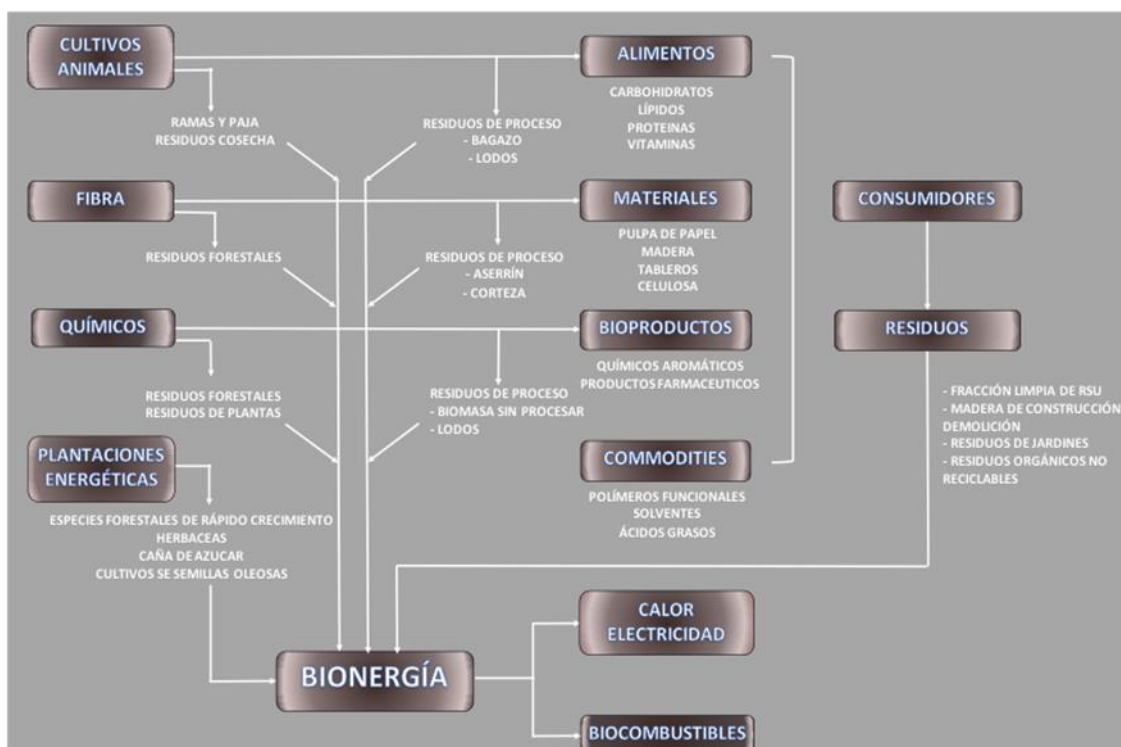


Figura 10.6. Procesos generales de generación y aprovechamiento de la biomasa.

Cada una de las fuentes genera diferentes tipos de biomasa que, de acuerdo a sus características, permiten su uso en diversas aplicaciones. Es posible clasificarla como sigue:

- **Biomasa de alto grado.** La biomasa de este tipo se caracteriza por su alta homogeneidad, lo que la hace especialmente adecuada para su uso energético. Proviene de cultivos energéticos, bosques y plantaciones.

- **Biomasa residual.** La biomasa residual puede ser químicamente homogénea y/o heterogénea, que proviene de residuos agrícolas, forestales y de procesos industriales, donde en cada caso puede estar compuesta por una o varias especies diferentes, lo cual determina sus características químicas.
- **Biomasa de origen urbano.** Los residuos sólidos urbanos (RSU) poseen aproximadamente 50% de peso húmedo de biomasa, siendo esencialmente heterogénea ya que proviene de diversas fuentes y han sido sometidas a diversos procesos. Además, existe un contenido de madera, que puede provenir de materiales de construcción y embalajes.
- **Fangos.** Es esencialmente de origen heterogéneo, ya que se obtiene principalmente de las plantas de tratamiento de aguas residuales, plantas industriales de procesamiento de ganado y agroindustrias.

Al considerar todas las posibilidades de aprovechamiento de los residuos agroalimentarios, biomasa en el sentido más extenso de la palabra, se debe pensar entre el valor conseguido por el producto o material recuperado y reciclado y el volumen de residuo que se ha conseguido reciclar. Desafortunadamente la relación suele ser inversamente proporcional: a mayor valor del producto obtenido tras el reciclaje menor es la masa de reciclado que representa. Un ejemplo claro de ello es la extracción de determinados productos de interés farmacológico de las hojas de algunos árboles para la obtención de un compuesto químico o bien la extracción de esencias a partir de rastrojos o semillas ya prensadas. En ambos casos el residuo secundario es del orden de miles de veces la masa del producto extractado, no obstante su valor es muy alto. En el caso de la biomasa, el residuo secundario siempre puede usarse como combustible para aportar el calor para la generación del vapor que se precisa en el proceso de síntesis.

Día a día crece el interés por rentabilizar la gestión de los residuos y explorar nuevas alternativas de valorización a través de la innovación. Por orden de valor económico, los residuos de la biomasa son:

- Farmacia y cosmética.
- Alimentación humana.
- Productos de uso industrial.
- Alimentación animal.
- Fertilizante y abonos.
- Combustible para valorización energética.

La estrategia más adecuada ha de ser tal que propicie un aprovechamiento integral que destine cada fracción al proceso más eficiente.

Para dar una idea de la magnitud de las cifras, en España, la generación de residuos orgánicos considerados como biomasa, teóricamente valorizable, se muestra en la Tabla 10.3.

Tabla 10.3. Generación de biomasa residual en España (Millones de toneladas/año).

Origen de biomasa residual	Mt/año
Residuos sólidos urbanos	24,0
Fangos de EDAR	8,5
Residuos forestales	18,0
Residuos agrícolas	35,0

Residuos ganaderos (cría y matadero)	85,0
Total	170,5

Estas cifras son tan importantes que, si se valorizaran con la tecnología disponible en la actualidad, se dispondría de una potencia eléctrica de 6 GW (es decir el equivalente a 6 centrales nucleares convencionales).

En la actualidad varios países del mundo llevan a cabo extensos programas para el desarrollo de biocombustibles a partir de cultivos energéticos, con excelentes resultados en su aplicación, llegando a sustituir parte importante del consumo de hidrocarburos para la locomoción. Un ejemplo importante de ello es Brasil, donde en la década de los años 70, debido principalmente a la crisis del petróleo del año 74, se estableció el mayor programa de utilización de biomasa, en forma de caña de azúcar, para la producción de alcohol que es utilizado como combustible de motores de combustión. Este programa ha tenido mucho éxito, ya que por un lado disminuye la importación de petróleo, y por lo tanto las emisiones a la atmósfera asociadas, y es una importante fuente de empleos en sectores más pobres de la sociedad ya que en la actualidad cerca de un millón de puestos de trabajo se asocian directamente a este mercado. Según estimaciones efectuadas por el programa PRO-ALCOOL de Brasil, durante los primeros 25 años de funcionamiento del programa, se ha dejado de importar petróleo por un monto de 40.000 millones de dólares, alcanzando una producción anual de 15.000 millones de litros de etanol al año 2004, 16.300 millones de litros en 2006, 23.000 millones en 2010 y los 27.800 millones en 2015. La mayoría de los vehículos hoy en día, funcionan con una mezcla donde se incorpora un 20% de etanol en la gasolina, pudiendo alcanzar proporciones mayores e incluso muchos vehículos funcionan con el 100%.

La producción de bioetanol en Brasil en 2015 experimentó un aumento interanual del 14%, alcanzando la cifra histórica, ya citada, de 27.800 millones de litros. El aumento está relacionado por la mayor demanda interna y por una reducción de las exportaciones a consecuencia del debilitamiento frente al dólar. Hasta el 2009 la producción de etanol tenía un lugar destacado en la economía del país. A partir de esta fecha, Brasil ha tenido que hacer frente a unas condiciones desfavorables meteorológicas, que le han conducido a menores rendimientos en la producción de caña de azúcar desviando su destino al consumo humano con mayores beneficios que el destinado a la producción de etanol. Los costes elevados de producción y con una deuda contraída desde hacía tiempo, han limitado las inversiones en el sector de la caña de azúcar, a pesar de los esfuerzos del gobierno brasileño para controlar el precio de la gasolina a nivel minorista como forma de controlar la inflación

Pero el productor de etanol más importante, a nivel mundial, es EE.UU. que, a partir principalmente del maíz, en 2004 conseguía producir más de 13.000 millones de litros anuales de biocombustibles, en 2010 alcanzaba los 50.088 millones y en 2015 los 54.500 millones de litros.

La industria del bioetanol en EEUU está condicionada básicamente por los precios del petróleo y por los costes del maíz. A finales de junio de 2015 los precios del etanol caían por debajo de los 53 centavos \$ USA por litro (la mitad del promedio de los últimos ocho años), y además se eliminaban los aranceles a la importación del etanol. A pesar de ello, con pérdidas, la industria seguía aumentando ligeramente las plantas la producción animados por la mayor demanda en el consumo, en las exportaciones, y en el posible aumento los precios de todos los combustibles.

La producción mundial de bioetanol ha crecido notablemente en los últimos años, desde 16.600 millones de litros de 2001 a 83.400 millones de litros de 2011, y ha

continuado hasta alcanzar los 97.000 millones de litros en 2015. EEUU, Brasil y la UE, conjuntamente representan el 90% de la producción y del consumo mundial, obtenido principalmente de maíz en EEUU, de caña de azúcar en Brasil y de cereales, principalmente, en la UE.

La UE es el tercer mercado de combustibles del mundo, en continuo crecimiento tras el apoyo de una política comunitaria sobre biocombustibles. También se ha visto afectado por los mismos motivos que EEUU, en cuanto a la fuerte presión entre la opción de combustibles o alimentos, proclamada por algunas organizaciones, y que finalmente han trascendido en aspectos legales a nivel de la Comisión Europea. Así en 2015, se ha impuesto la limitación del 7% de los biocombustibles de primera generación o que utilizan materias primas aptas para la alimentación.

La UE consume el 25% de bioetanol y el 75% de biodiésel, aunque el consumo de bioetanol es inferior al biodiésel, representa un papel importante a nivel mundial, al ocupar un tercer puesto tras EEUU y Brasil. La producción y el consumo de bioetanol en la Unión Europea, se ha ido potenciado progresivamente, adoptándose medidas para aumentar su crecimiento, con el fin de cumplir los objetivos impuestos para salvaguardar el medio ambiente, utilizando energías renovables menos contaminantes a la atmósfera.

De los datos recogidos en la Figura 10.7, se observa un incremento de la producción de bioetanol en UE, pasando de 1.608 millones de litros de 2006 a 5.250 millones de litros de 2014, utilizando los cereales como productos básicos para su obtención y más en concreto el trigo y el maíz principalmente. Igualmente el consumo, que siempre ha superado a la producción comunitaria, ha pasado de 1.909 millones de litros en 2006 a 5.320 millones de litros en 2014. La diferencia entre el consumo y la producción en la UE, es cubierta por las importaciones de grandes volúmenes de etanol, a fin de cubrir las necesidades cada vez más crecientes del consumo, pasando de importar 534 millones de litros en 2006 a unos mil millones de litros en 2012.

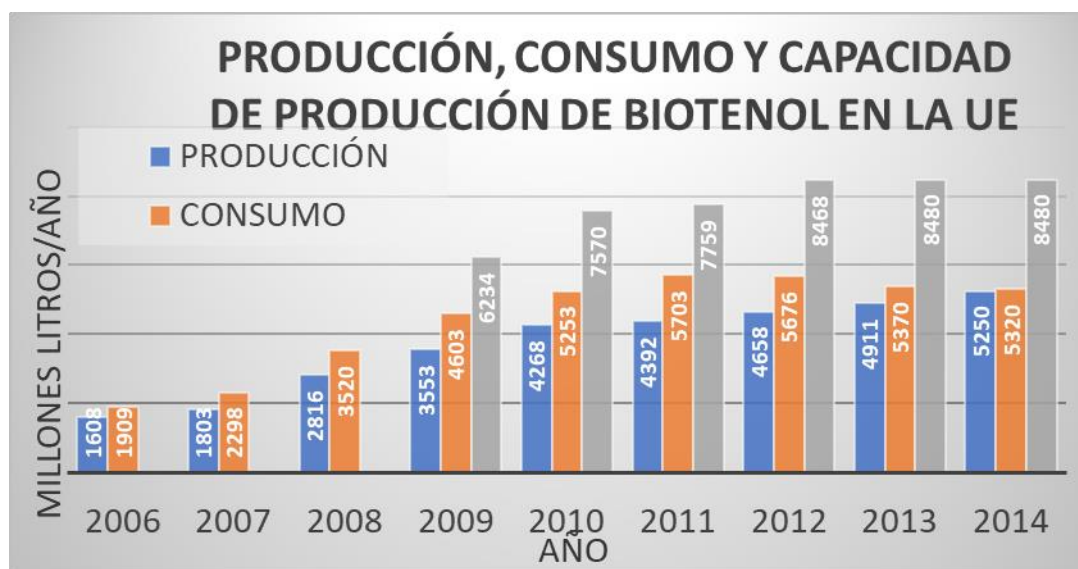


Figura 10.7. Producción, consumo y capacidad de producción de bioetanol en UE de 2006 a 2014 en millones de litro por año. (Fuente de 2006 a 2008 *International Sugar Organization/F.O. Licht* y de 2009 a 2014 *USDA Foreign Agricultural Service*).

En la UE, la situación del biodiésel ha sido aún más importante que el bioetanol, con un crecimiento espectacular de la capacidad de producción de 2004 a 2009, pasando de 2.418 mt (miles de toneladas) a 19.916 mt, para luego seguir con un ligero incremento hasta 2013 con 22.983 mt, tal como indica la Figura 10.8 ralentizado en

gran parte debido a la crisis económica y el bajo consumo. En realidad el consumo y la producción es muchísimo menor, por la lenta adaptación del sector del transporte a estos cambios y a la importación en condiciones favorables. En estos parámetros se encuentra España, que en 2013, era el país con mayor capacidad de producción de la UE, con 4,9 mt, por encima de Alemania, Francia, Italia y Holanda.

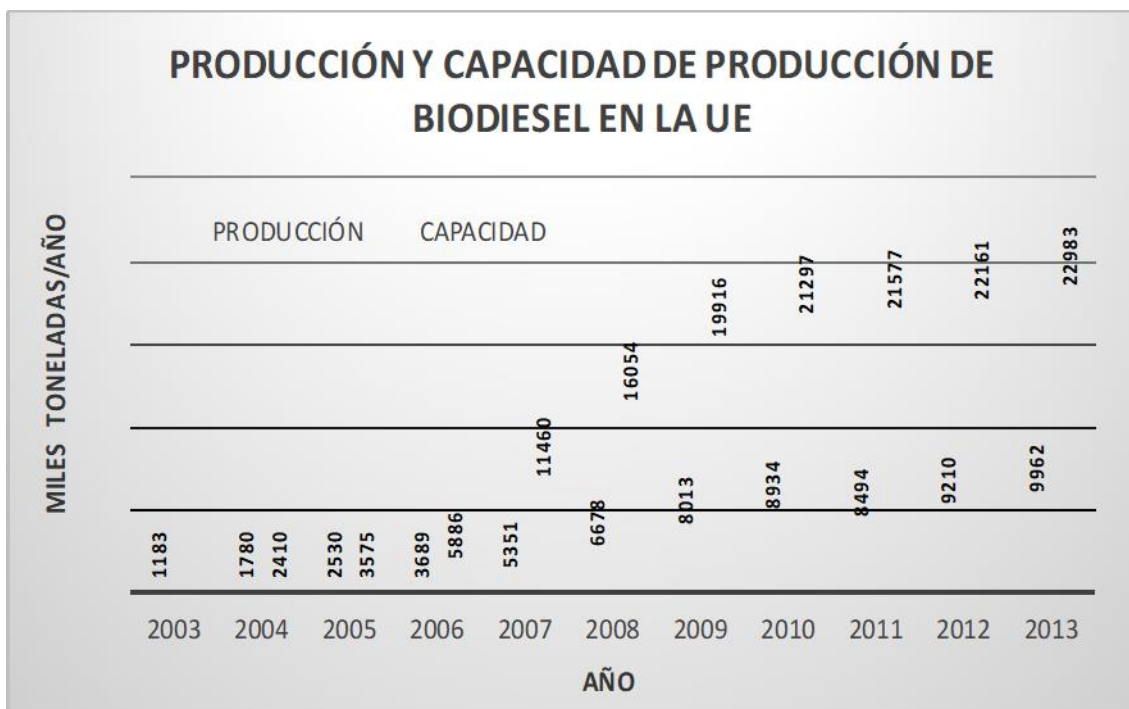


Figura 10.8. Producción y capacidad de producción de biodiésel en UE de 2003 a 2013 en miles de toneladas por año. (Fuente Eurostat)

Los programas para el desarrollo de biocombustibles a partir de residuos alcanzan muy diversas facetas, como por ejemplo el proyecto de la limpieza de aguas residuales secundarias de EDAR mediante la microalga *Botryococcus braunii* llevado a cabo por las universidades de Jaén y Granada (España). En este proyecto el agua residual secundaria constituye el medio de cultivo para la citada alga, esta elimina nitratos, fosfatos, amonio y fenoles, que son los tóxicos más frecuentes en las aguas residuales urbanas. Constituye una verdadera etapa terciaria, habitualmente costosa, pues produce agua limpia o reutilizable, en la que solo es necesario aplicar una desinfección para que pueda ser reutilizada en usos agrícolas o industriales. Además, el alga produce un elevado porcentaje de hidrocarburos que se acumulan en el interior del alga, y que pueden ser aprovechados. Hasta un 86% del peso seco de la *Botryococcus braunii* pueden ser hidrocarburos de cadena larga, la gran mayoría de estos son aceites. Estos no son de “origen” vegetal, no son comestibles, y carecen del átomo de oxígeno libre necesario para una transesterificación, pero pueden utilizarse como materia prima para realizar un hidrocrackeo en una refinería de petróleo y con ello producir octano (gasolina), keroseno y diésel.

En la misma línea se trabaja en la EDAR de El Torno en Chiclana de la Frontera (España) en que con los residuos orgánicos, se pretende propulsar vehículos alimentados por biogás. La demostración a escala industrial se está realizando desde 2011 en el proyecto de la Unión Europea All-gas y liderado por la empresa Aqualia. En este se investiga la utilización de los nutrientes que contienen las aguas residuales para cultivar microalgas y transformarlas en biocombustible, gas natural comprimido vehicular.

Un resumen de diferentes fuentes de biomasa, que pueden ser utilizadas con fines energéticos se presenta en la Tabla 10.4.

Tabla 10.4. Fuentes de producción de diferentes biocombustibles. (Adaptada de la propuesta por el Instituto de Diversificación y Ahorro Energético de España (IDAE))

Recurso	Residuos
Residuos forestales	Ramas, restos de podas y de cosechas, copas de árboles.
Residuos agrícolas	Restos de cultivos leñosos, ramas.
	Restos de cultivos herbáceos industriales, tallos y plantas verdes.
	Pastos y restos de cereales.
Residuos de la industria forestal	Aserrín, virutas, cortezas y restos de maderas.
	Residuos de la industria de la celulosa y papel, licor negro, fangos de depuradoras.
Residuos de industrias agrícolas y agroalimentarias	Cáscaras, cuercos, semillas, hollejos, fangos de plantas depuradoras.
Residuos biodegradables	Residuos de la industria ganadera, purines, estiércol.
	Residuos de animales muertos, sangre, pieles.
	Fangos de la depuración de aguas urbanas e industriales.
Cultivos energéticos y excedentes agrícolas	Cultivos energéticos y residuos de otros cultivos.

Las oportunidades de valorización de la biomasa residual y la proveniente de cultivos energéticos dependen principalmente de las características físicas y la composición química específica de cada tipo de biomasa. Si se efectúa una clasificación de la biomasa en términos de las posibilidades de valorización, es posible identificar tres grupos que agrupan la biomasa según características físicas en homogénea, no homogénea y heterogénea.

A partir de dicha clasificación es posible establecer y homologar alternativas de valorización energética de la biomasa residual. Las alternativas planteadas se presentan en la Figura 10.9.

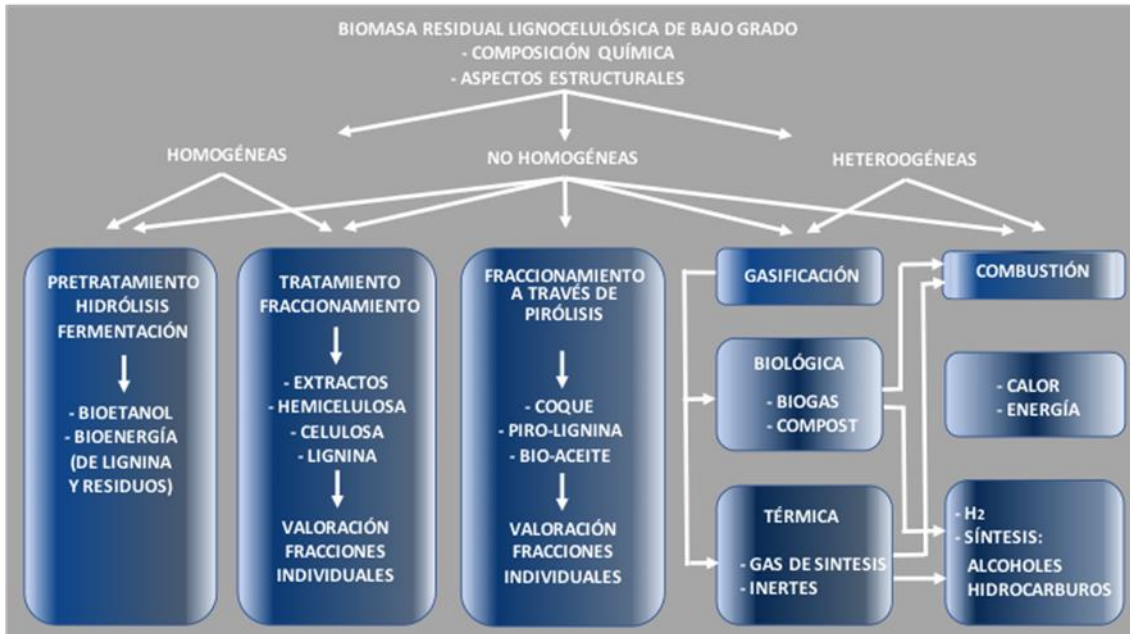


Figura 10.9. Estrategias para la valorización energética de la biomasa residual-

Si bien es posible establecer una clasificación como la planteada en la Figura 10.9, la elección de la alternativa que permita optimizar la transformación de los residuos de biomasa en una fuente de energía, bioenergía, requiere del análisis de parámetros específicos a cada situación. Para ello una caracterización detallada desde el punto de vista físico y químico es primordial a la hora de definir la estrategia a emplear.

2.3. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA

Hay varios aspectos a considerar cuando se plantea un aprovechamiento energético de la biomasa. En primer lugar se debe llevar a cabo una caracterización detallada de las características físicas y químicas del biocombustible que se quiere utilizar, como su estado, densidad, humedad y composición química. Para esto la existencia de normas internacionales, permiten una evaluación clara y homologable que determinan los parámetros para efectuar dichas pruebas.

Luego hay que determinar la capacidad energética del combustible y así poder establecer otros parámetros:

- Poder calorífico, que se define como la cantidad de energía que desprende 1 kilo de combustible.
- Cantidad de aire necesario para lograr la combustión completa de esta unidad de combustible.
- Eficacia del proceso de combustión.
- Temperatura del proceso de combustión.
- Cantidad de gases producidos durante del proceso de combustión.

2.3.1. Poder calorífico

Uno de los aspectos más importantes de los anteriormente nombrados, es la determinación del poder calorífico, ya que permite estudiar las posibilidades de aplicación de la biomasa como combustible. Generalmente este parámetro se expresa en kJ/kg o kcal/kg de combustible ya sea líquido o sólido. Parte de esta energía liberada es absorbida por el agua generada en la combustión debido a la presencia de hidrógeno en el combustible y evaporada en forma de vapor de agua. Se definen de

esta manera el Poder Calorífico Superior (PCS) como la cantidad de calor desprendida por unidad de masa de combustible anhidro, se mide por medio de una bomba calorimétrica, donde se enfrían o condensan los productos de la combustión. Más utilizado, industrialmente, es el Poder Calorífico Inferior (PCI), que se define como la cantidad de calor desprendido por unidad de combustible, sin enfriar o condensar los productos de la combustión, con lo que se pierde el calor contenido en el vapor de agua, corresponde así al PCS menos el calor latente de la vaporización del agua que es arrastrada por los gases de la combustión. El PCI de un combustible siempre se refiere al material seco.

La Tabla 10.5 muestra los poderes caloríficos de diversos combustibles.

Tabla 10.5. Poderes caloríficos de diversos combustibles.

Combustible	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
Biomasa de chopo seca	4.700	4.392
Madera de pino	4.800	4.500
Madera de fresno y encina	4.700	4.300
Madera de eucalipto	4.950	4.630
Astilla de eucalipto	4.800	4.500
Carbón de residuos agrícolas	6.400 – 7.100	6.100 – 6.800
Carbón vegetal	7.500 – 8.300	7.200 – 8.000
Biomasa de cardo seca	3.900	3.600
Pasto	4.300 – 4.600	4.000 – 4.300
Girasol	4.600 - 4.900	4.300 – 4.600
Maíz	4.550 – 4.600	4.250 – 4.300
Cascarilla de arroz	3.400 – 4.100	3.200 – 3.850
Cascarilla de café	3.400	3.200
Cáscara de coco	4.300 – 4.800	4.050 – 4.550
Bagazo de caña de azúcar	4.400	4.150
Ramas de algodón	4.750	4.500
Fueloil	10.150	9.450
Gasolina	11.200	10.500
Etanol de 96 (4% agua en volumen)	6.740	6.420

Metano	12.738	11.950
Propano	12.900	11.080
Butano (gas)	11.800	10.932

En las aplicaciones industriales sólo tiene sentido hablar del PCI, ya que los gases de combustión se emiten a la atmósfera a una temperatura superior a la de condensación del vapor de agua y, por lo tanto, no se aprovecha el calor latente del vapor.

Un concepto importante es la noción de PCI útil (PCI_u), y equivale al PCI del combustible menos el calor latente de evaporación del agua de humedad. Así, tomando un ejemplo de la tabla anterior, el PCI_u de madera de chopo con un 25% de humedad será:

$$PCI_u = 4.392 \cdot 0,75 - 600 \cdot 0,25 = 3.144 \text{ (Kcal/Kg)} = 3,65 \text{ kWh/kg}$$

2.3.2. Densidad de la biomasa

Para valorizar la biomasa se tritura para el transporte y su introducción al horno, por ello es preciso distinguir entre:

- **Densidad a granel o aparente:** Se determina por la división entre el peso y el volumen de una masa de partículas razonablemente compactadas. Existe una subdivisión entre la densidad aireada, cuando las partículas son compactadas por gravedad y la densidad empacada, cuando las partículas son sometidas a un período de vibración.
- **Densidad absoluta (real) o específica:** Se define como la relación entre la masa de la partícula y el volumen ocupado por ella, por lo tanto, se calcula sin considerar el volumen ocupado por los poros.

La densidad aparente y real (entre paréntesis), todos ellos en Kg/m^3 , de diversos materiales es:

- Carbón vegetal: 550 (1.400).
- Carbón mineral: 700 (1.400)
- Bagazo de caña: 200 (1.450)
- Cascarilla de arroz: 600 (1.400)

De los datos anteriores se deduce que la densidad real de la biomasa en general, y en este caso del carbón mineral, es la misma. Por otra parte la densidad a granel de ciertos materiales, como sería el caso del bagazo, es tan pequeña que para que su uso sea atractivo como recurso energético, habrá que aumentar la densidad aparente.

2.3.3. Otras propiedades de la biomasa

En este apartado se resaltan ciertas propiedades, e inconvenientes, de uno de los derivados de la biomasa llamado a tener un papel descollante en los próximos años: el biodiésel.

- Como recurso primario, los aceites de las oleaginosas tienen un contenido en aceite que varía en un amplio rango, del 10 al 15% en peso para el aceite de coco, hasta más de un 50% para las almendras de palma. Los carbohidratos (principalmente polisacáridos) del 15 al 30% en peso. Proteínas: muy alto en el caso de la soja, hasta un 40% (cifra que justamente define a este producto como proteico), pero las oleaginosas tienen un contenido menor, entre el 15 y el 25%.

- Tienen la capacidad de participar en los enlaces de hidrógeno, haciéndolos más hidrosolubles que los hidrocarburos. Esta característica confiere al biocombustible una capacidad de ser cien por cien biodegradable.
- En el empleo como carburante se reducen notablemente los índices de contaminantes peligrosos: así los niveles de hidrocarburos poliaromáticos (cancerígenos) se reducen en un 75% y los de benzo(a)antracenos en un 50%.
- Como disolvente, es incompatible con una serie de plásticos derivados del caucho natural.
- Tiene una escasa estabilidad oxidativa, teniendo una vida útil máxima de seis meses.

2.4. NOCIÓN DE BIORREFINERÍA

La utilización integral de la biomasa ha permitido el desarrollo de un concepto denominado biorrefinería, que se define como una instalación industrial que convierte y procesa la biomasa para transformarla en combustible, energía y productos químicos. De esta forma se establece un proceso análogo a las refinerías de petróleo, las cuáles producen una múltiple variedad de productos a partir del petróleo. Las biorrefinerías industriales representan una estrategia integral para la utilización de la biomasa y la creación de una nueva actividad basada en ella. En la Figura 10.10 se muestra la similitud conceptual de estos dos tipos de refinerías

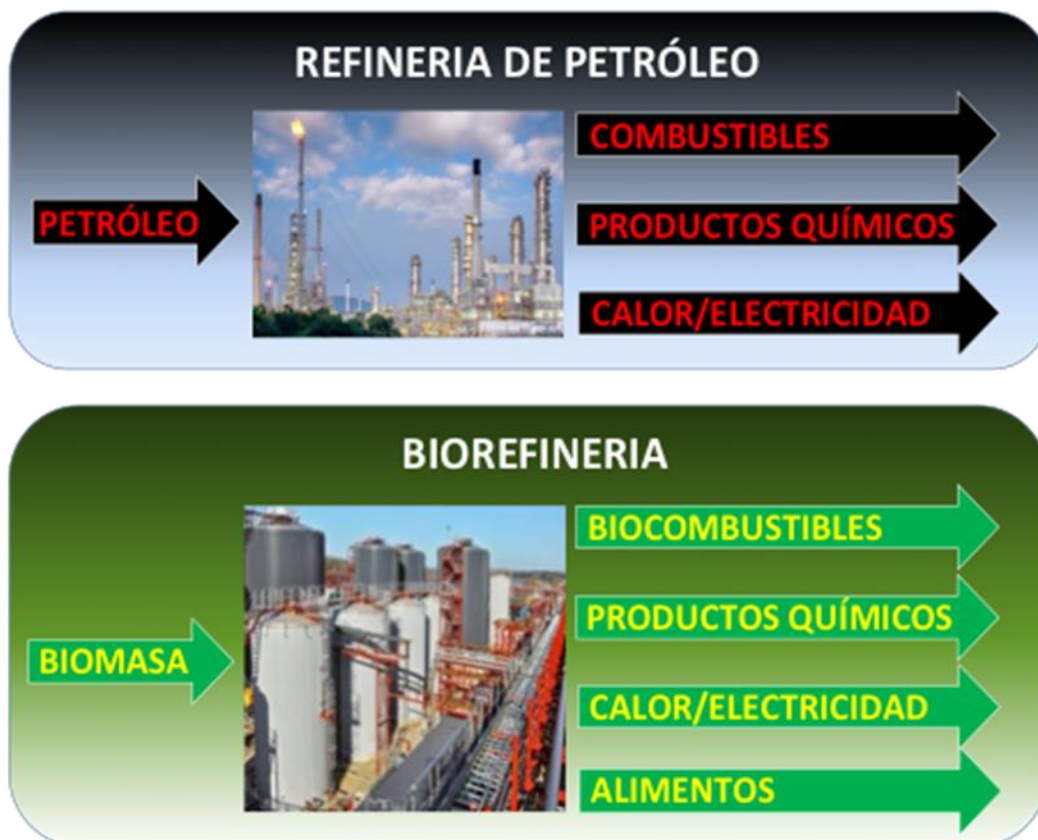


Figura 10.10. Similitud conceptual entre una refinería de petróleo y una biorrefinería.

Sin embargo la materia prima inicial, el petróleo con la gran variedad de hidrocarburos o la biomasa con infinitos tipos de carbohidratos, es muy distinta, fundamentalmente por la ausencia o presencia del oxígeno y como indica, esquemáticamente, la Figura 10.11. Ambas refinerías tienen características y propiedades básicas muy distintas.

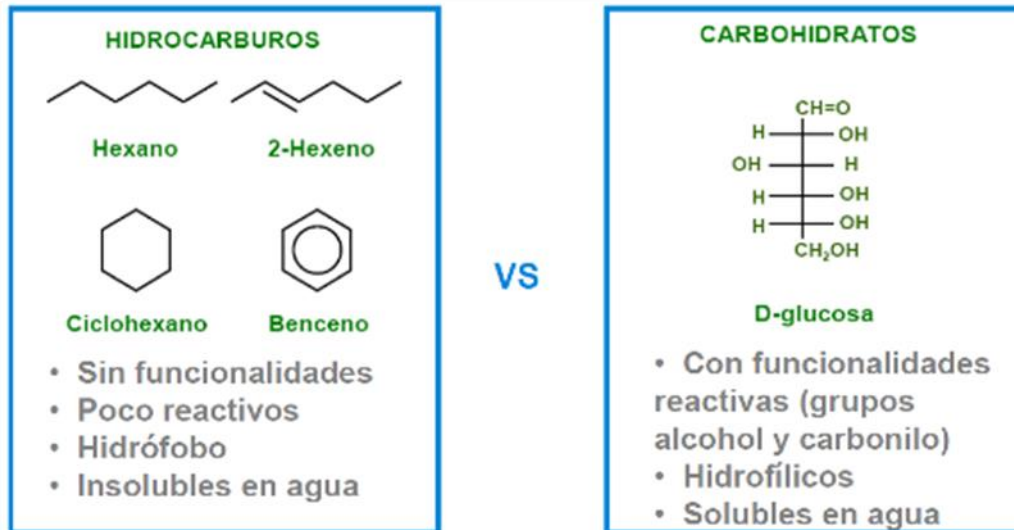


Figura 10.11. Refinería versus biorrefinería: características y propiedades básicas de su respectiva materia prima.

Así, la biorrefinería permite la elaboración de productos muy diversos y con ello obtener ventajas comparativas sobre los procesos individuales, ya que aprovecha las etapas intermedias de la transformación para maximizar el rendimiento de la biomasa que es ingresada al sistema. De esta forma una biorrefinería puede simultáneamente producir diversos productos químicos, biocombustibles líquidos, electricidad y calor.

Un ejemplo esquemático de este concepto se muestra en la Figura 10.12.

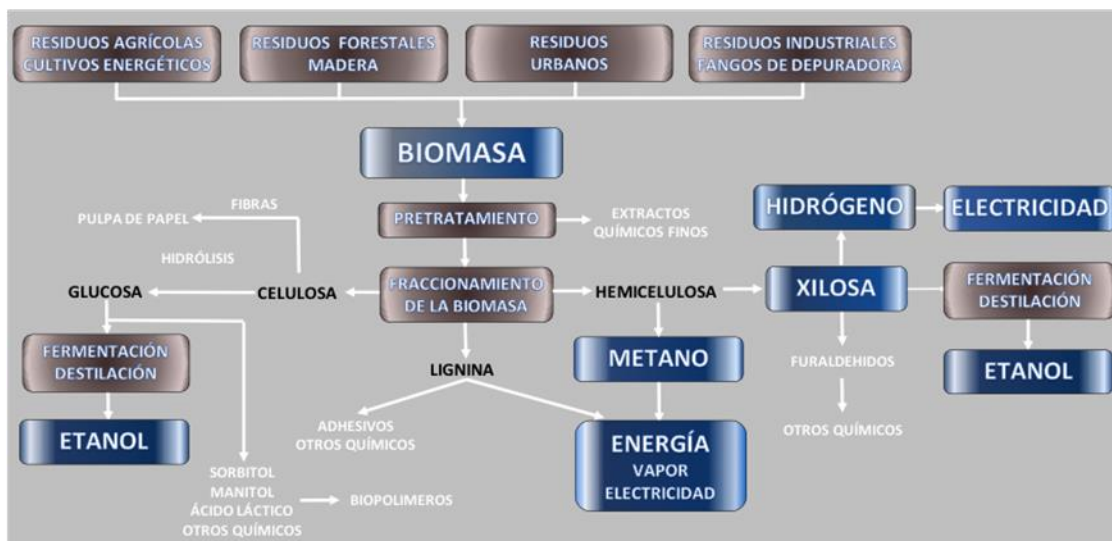


Figura 10.12. Esquema conceptual de una biorrefinería.

3. ESTRATEGIAS PARA LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA BIOMASA

El aprovechamiento energético de la biomasa se puede obtener mediante varios procesos de transformación de la energía. Según sea el destino que se busca dar a este aprovechamiento se tendrán distintas posibilidades técnicas para lograr un proceso que genere el producto deseado. En términos generales se pueden definir dos grandes grupos de procesos que permiten la obtención de energía a partir de materia orgánica. Los sistemas termoquímicos que incluyen los procesos de incineración, la

pirólisis y la gasificación y los sistemas bioquímicos que aprovechan la degradación natural de la biomasa para obtener un gas combustible.

En términos generales una instalación para la generación de electricidad a partir de biomasa posee una secuencia de componentes que se puede resumir de la siguiente manera:

1. **Sistema de recepción de biomasa:** La biomasa es conducida desde los lugares de origen hasta la instalación industrial de valorización, donde es almacenada y sometida a un pretratamiento para acondicionarla a las características requeridas por el proceso. Esta etapa incluye generalmente triturado y secado de la biomasa y se efectúa en condiciones adecuadas de seguridad para prevenir la inflamación.
2. **Sistema de alimentación de la biomasa:** Desde el lugar de almacenamiento la biomasa se traslada hasta un sistema de alimentación que la transporta internamente hasta el proceso de transformación y valorización.
3. **Sistema de valorización:** La biomasa es sometida al proceso de transformación, en este caso con fines energéticos, a través de la combustión, pirólisis, gasificación, digestión anaerobia u otro. De lo cual se obtiene generalmente energía calórica, o bien biocombustibles líquidos, sólidos o gaseosos.
4. **Sistema de transformación de la energía:** Dependiendo del proceso será necesario por ejemplo, para la obtención de energía eléctrica, una turbina de vapor, un motor de combustión o una turbina de gas, en el caso de la combustión, gasificación y la digestión anaerobia respectivamente.
5. **Sistema de depuración de gases:** La instalación industrial deberá contar con un sistema de depuración de gases, para controlar emisiones a la atmósfera asociadas al proceso de transformación.

Adicionalmente el proceso de valorización energética podrá contar con un sistema de almacenamiento de los productos y acondicionamiento para el traslado hacia otras instalaciones industriales, ya que los mecanismos utilizados pueden tener como finalidad la producción de biocombustibles para alimentar otras industrias.

La biomasa residual, y dependiendo de factores como la composición química o la estructura, puede ser clasificada de acuerdo a su origen a partir de tres fuentes, la biomasa de origen homogéneo, la de origen no-homogéneo, y la heterogénea. Cada una de ellas puede seguir, a su vez, diferentes vías para su utilización como fuente energética, como se indica en la Tabla 10.6.

En el caso de la biomasa homogénea estas pueden ser:

- Pretratamiento a base de hidrólisis o fermentación, para la obtención de un biocombustible líquido como el etanol. La obtención de energía de la lignina y los residuos.
- Tratamientos de fraccionamiento para la obtención de extractos, hemicelulosa, celulosa y lignina.

En el caso de la biomasa no-homogénea:

- Fraccionamiento a través de pirólisis y la obtención de coque, gases combustibles y líquidos piroleñosos.
- Gasificación, a través de procesos biológicos, producción de biogás, o bien a través de procesos termoquímicos, para la obtención de gas de síntesis, en ambos casos se produce un biocombustible de alto poder calorífico, el cual es de fácil oxidación, para la obtención de calor y energía. Otra alternativa es su uso para la síntesis de otros biocombustibles como los alcoholes.

- Combustión directa.

La biomasa heterogénea posee alternativas similares, ya que puede ser utilizada tanto para la gasificación como en la combustión directa.

La clave de todas las alternativas es la obtención de fracciones intermedias de biomasa con características homogéneas. Las oportunidades disponibles para efectuar la valorización energética de la biomasa, pueden ser agrupadas de acuerdo al esquema presentado en la Tabla 10.6.

Tabla 10.6. Diferentes alternativas para la utilización de la biomasa como fuente energética.

Alternativa	Tipo de Biomasa	Oportunidades
A	Homogénea	Transformar las plantas que utilizan, por ejemplo, fibras de madera, en bio-refinerías para producción de biocombustibles.
B	No-homogénea	Clasificar la biomasa en fracciones homogéneas funcionales.
C	Heterogénea	Convertir la biomasa en biocombustible homogéneo como el biogás.

En la alternativa A, para la utilización de la biomasa como fuente energética, es preciso transformar las actuales plantas de procesamiento de madera en bio-refinerías, que serían capaces de producir productos específicos, como por ejemplo:

- Fibras.
- Carbohidratos solubles para la producción de biocombustibles y biopolímeros.
- Compuestos químicos derivados de la lignina y biocombustibles.
- Calor y energía para uso interno.
- Energía para vender a la red.

En el caso de las alternativas B y C, se debería utilizar biomasa residual como fuente de energía, la cual permite la aplicación de diferentes estrategias para la transformación de la biomasa en un biocombustible. Un ejemplo de esto es la producción de aceites de alto grado.

3.1. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA A TRAVÉS DE LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS

La producción de biocombustibles líquidos permite la utilización de la energía proveniente de los residuos agrícolas y forestales, en el abastecimiento de motores a combustión, sustituyendo parte importante de los carburantes fósiles utilizados en la actualidad.

La Directiva de biocombustibles 2003/30/EC de 8 de Mayo de 2003, actualmente derogada por la 2008/28/CE, referente a la promoción del uso de biocombustibles para el transporte, establecía como objetivo el uso del 2,5% de biocarburantes en el sector del transporte en 2005, el 5,75% en 2010 y un 10% para 2020.

España no cumplió con la primera cita, escasamente se alcanzó el 0,4% y tampoco en 2010, pues supondría un consumo de 18,2 Mtep. En 2005 se produjeron 2,8 Mtep y siguiendo su progresión se estimaba una producción de 9,4 Mtep en 2010, por lo que

los objetivos marcados parecían, en el caso de España, difíciles de cumplir. Es por ello que estas leyes iniciales sufrieron varias actualizaciones, la Ley española 12/2007 rebajó la obligación de consumo de biocarburantes al 3,9% para 2009 y se mantenía el 5,83% para el 2010. Sin embargo, siguieron las modificaciones, la Orden ITC/2877/2008, establecía obligaciones separadas sobre la gasolina y el gasóleo, para este último el 2,5% en 2009 y el 3,9% en 2010, apuntando una obligación global del 7% para 2011. Nuevamente, la Resolución de 7 enero de 2011 de la Secretaria de Estado de Energía de España, rebajaba de facto la obligación de consumo de 2010 del 5,83% al 4,78%.

Sin embargo, España cumplía holgadamente con los porcentajes de incorporación obligatoria de biocarburantes en el transporte en estos últimos años, pero a base de la importación de los biocarburantes. Los datos provisionales indicaban que los biocarburantes alcanzarían una participación en términos energéticos del 6,8% en relación al gasóleo, 4,7% en gasolina y 6,4% en el conjunto de carburantes de automoción. Todos estos porcentajes son superiores a los mínimos fijados como obligatorios para 2011: 6%, 3,9% y 6,2%, respectivamente

En 2011 el incremento del consumo fue del 21% con respecto a 2010, pero la producción española de biodiésel cayó nuevamente en España. La Asociación de Productores de Energías Renovables, APPA, manifestaba que las importaciones desleales de biodiésel copaban el mercado. El problema venía de bastantes años atrás. Así, en España existía ya en 2008 una gran capacidad para producir biocombustibles, con unas cuarenta y cuatro plantas abiertas, pero alrededor de la mitad estaban paradas. En el 2009, funcionaban al ralentí, con un escandaloso 9% de producción respecto al total de su capacidad. En 2011, el ratio medio continuaba muy bajo, solo al 14% de su capacidad.

Esta situación era consecuencia de la entrada masiva de biodiésel procedente de Estados Unidos y últimamente casi exclusivamente de Argentina, en situación de dumping fiscal, alcanzando el 71% del mercado español en 2008, y en aumento, llegando al 89% en el último trimestre de 2011, beneficiándose del incentivo fiscal español, pese a venir de origen con una subvención equivalente.

El principal beneficio de la producción de biocombustibles se asocia a constituir una alternativa de los combustibles fósiles, en un sector de la economía especialmente dependiente de estos productos y de su importación, contribuyendo, además, a la disminución de los gases de efecto invernadero. Es importante recalcar los importantes beneficios sociales asociados al establecimiento de una industria de biocombustibles líquidos y el cultivo de especies que abastezcan dicho mercado, ya que se produce un incentivo a la producción agrícola, sobre todo en países en vías de desarrollo dependientes de mercados externos donde una de las principales fuentes de empleo se ubica en los sectores rurales, disminuyendo además la dependencia energética de los sectores de consumo de petróleo.

Desde el aspecto tecnológico, existen dos principales productos de la transformación de biomasa en combustibles líquidos, los bioaceites carburantes y los bioalcoholes. Los primeros como sustituto del diésel y los segundos como sustituto de las gasolinas. Si bien en la práctica esta sustitución es, en muchos casos, parcial y se alcanzan sustituciones de hasta un 10% en volumen.

La tendencia más universal parece que estriba en tomar el vegetal y extraer de él todas las sustancias valiosas que contenga, como vitaminas y antioxidantes, las semillas destinarlas a la producción de biodiésel y el resto, en términos de masa la gran mayoría, a energía. El caso de la uva es bien representativo en este sentido: una vez prensada se retira el líquido para elaborar el vino. El resto, mezcla de piel (holleja)

y grano, se fermenta para extraer alcohol. Del material seco se separa el grano y la piel. Del grano se extrae, con disolvente, un aceite de excelente calidad y el grano resultante, junto a la piel, se destinan a la producción de energía.

Otro ejemplo de aprovechamiento lo constituye la valorización de la corteza y pulpas de naranjas, típico flujo residual de las fábricas de zumos de frutas. El desarrollo tecnológico elaborado por el Servicio de Investigación Agrícola de Florida (EEUU) ha permitido poner en marcha una planta que generó, en 2007, 190.000 litros de bioetanol anuales. El Gobierno de la Comunidad Autónoma de Valencia (España), en la que existen grandes extensiones de cítricos, y se generan 500.000 t/año de este residuo, piensa transformarlos en 37.500.000 litros de bioetanol. Transformando estas cifras: Cada tonelada de residuo puede producir entre 75 y 80 litros de bioetanol, que para coches de movilidad reducida (10.000 km/año), supondría proporcionar combustible para 25.000 automóviles. De esta manera la sostenibilidad se mantiene como un parámetro crítico y pilar fundamental de la valorización integral.

Existen muchas formas de clasificar la biomasa. Una de ellas puede ser:

- **Residuos forestales:** resultantes de un proceso de producción de madera, podas de parques, restos de talas, etc.
- **Terrenos agrícolas degradados:** procedentes de espacios deforestados, degradados, quemados donde todavía no están en condiciones de llevar a cabo una reforestación.
- **Residuos agrícolas:** liberados en la recolección y procesado de alimentos. Pajas, cultivos de bulbos, residuos de invernaderos y podas de árboles frutales.
- **Excedentes de terrenos agrícolas:** resultantes de la recolección una vez satisfechas las expectativas de alimentos y piensos.
- **Estiércoles:** o biomasa procedente de las explotaciones ganaderas.
- **Residuos orgánicos:** los RSU, los fangos de depuradora. Residuos generados después del procesado de materiales: envases, embalajes, residuos industriales de la industria de madera, papel, etc.

Debido a la conversión de residuos de biomasa y de dedicar grandes extensiones de terreno, e incluso de cambiar algunos cultivos, en plantaciones específicas para generar biomasa susceptible de ser transformada en cultivos energéticos, la UE ha promulgado las Directivas 2009/28/CE, relativas al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, en la que se dan los criterios de sostenibilidad para biocarburantes y biolíquidos. En la misma dirección se circunscribe la Directiva 2009/30/CE, aunque está más relacionada con las especificaciones de la gasolina, el diésel y el gasóleo. En esta se introduce el cálculo del efecto de los biocarburantes en las emisiones de gases de efecto invernadero. Ambas Directivas presentan el mismo texto en algunos de sus artículos, en particular los que se refieren a la sostenibilidad, determinando las características de las tierras destinadas a cultivos energéticos y cálculo de las emisiones en la producción de biocombustibles. Así, en España estas dos Directivas se trasponen en un único texto, el RD 1597/2011 de 4 de noviembre, con el título de “Criterios de sostenibilidad de biocombustibles y biolíquidos”.

La primera Directiva, mucho más general, establece un marco común para el fomento de la energía procedente de fuentes renovables. Fija objetivos nacionales obligatorios para los países de la Comunidad Europea en relación con la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el consumo final

bruto de energía. Establece normas relativas a las transferencias estadísticas entre Estados miembros, los proyectos conjuntos entre Estados miembros y con terceros países. Ratifica la cuota del 20 % como mínimo de energía procedente de fuentes renovables en el consumo final bruto de energía de la Comunidad Europea para 2020, indicando en su Anexo I los objetivos globales de cada nación en relación con la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de energía final en 2020, véase Tabla 10.7. También indica que cada Estado miembro velará para que la cuota de energía procedente de fuentes renovables en todos los tipos de transporte, en 2020, sea como mínimo equivalente al 10 % de su consumo final de energía en el transporte.

Tabla 10.7. Objetivos globales nacionales en relación con la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de energía final en 2020 (Fuente Directiva 2009/28/CE)

	Cuota de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de energía final bruta, 2005 (S ₂₀₀₅)	Objetivo para la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de energía final bruta, 2020 (S ₂₀₂₀)
Bélgica	2,2%	13%
Bulgaria	9,4%	16%
Republica Checa	6,1%	13%
Dinamarca	17%	30%
Alemania	5,8%	18%
Estonia	18%	25%
Irlanda	3,1%	16%
Grecia	6,9	18%
España	8,7%	20%
Francia	10,3%	23%
Italia	5,2%	17%
Chipre	2,9%	13%
Letonia	32,6%	40%
Lituania	15%	23%
Luxemburgo	0,9%	11%
Hungría	4,3%	13%
Malta	0%	10%
Países Bajos	2,4%	14%
Austria	23,3%	34%
Polonia	7,2%	15%
Portugal	20,5%	31%
Rumania	17,8%	24%
Eslovenia	16%	25%
Eslovaquia	6,7%	14%
Finlandia	28,5%	38%

Suecia	39,8%	49%
Reino Unido	1,3%	15%

La Directiva 2009/28/CE señala en sus considerandos que la creciente demanda de biocarburantes y biolíquidos y los incentivos para su uso previstos en la misma, no deben tener como efecto alentar la destrucción de áreas ricas en biodiversidad. Por ello, es necesario prever criterios de sostenibilidad que garanticen que los biocarburantes y biolíquidos sólo puedan beneficiarse de los incentivos cuando pueda asegurarse su cumplimiento.

En concreto en su artículo 17 da los criterios de sostenibilidad para la producción de biocarburantes y biolíquidos, y sobre las tierras de las que se obtienen. Así, indica que independientemente de que las materias primas se hayan cultivado dentro o fuera del territorio de la Comunidad, la energía procedente de biocarburantes y biolíquidos se tendrá en cuenta para los siguientes tres fines:

- Evaluación del cumplimiento de los requisitos de la Directiva en relación con los objetivos nacionales;
- Evaluación del cumplimiento de las obligaciones de utilizar energías renovables;
- Determinar la posibilidad de optar a una ayuda financiera al consumo de biocarburantes y biolíquidos

La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero derivada del uso de biocarburantes y biolíquidos considerados para los tres fines indicados anteriormente será de un 35% como mínimo. Pero a partir del 1 de enero de 2017, será de un 50% como mínimo, y a partir del 1 de enero de 2018, del 60% como mínimo, en este último caso en instalaciones cuya producción haya comenzado a partir del 1 de enero de 2017.

En este artículo 17 también se indica que no se producirán biocarburantes y biolíquidos a partir de materias primas procedentes de tierras de elevado valor en cuanto a biodiversidad, es decir tierras que a partir de enero de 2008 pertenecían a una de las siguientes categorías, con independencia de que sigan encontrándose en la misma situación:

- Bosques primarios y otras superficies boscosas, de especies nativas, cuando no hay signos visibles claros de actividad humana y los procesos ecológicos no están perturbados significativamente.
- Zonas designadas por ley o por las autoridades competentes pertinentes con fines de protección de la naturaleza, o para la protección de las especies o los ecosistemas raros, amenazados o en peligro. A menos que se demuestre que la producción de tales materias primas no ha interferido con dichos fines de protección de la naturaleza.
- Prados y pastizales con una rica biodiversidad natural, o no natural, es decir, prados y pastizales que dejarían de serlo a falta de intervención humana, que son ricos en especies y no están degradados, salvo que se demuestre que la explotación de las materias primas sea necesaria para preservar su condición de prados y pastizales.
- A partir de materias primas procedentes de tierras con elevadas reservas de carbono, es decir tierras que en enero de 2008 pertenecían a una de las siguientes categorías pero que ya no se encuentran en dicha situación:

- Humedales, es decir, tierras cubiertas de agua o saturadas por agua permanentemente o durante una parte importante del año;
- Zonas arboladas continuas, es decir tierras con una extensión superior a una hectárea, con árboles de una altura superior a cinco metros y una cubierta de copas superior al 30 %, o con árboles que pueden alcanzar dichos límites *in situ*;
- Tierras con una extensión superior a una hectárea, con árboles de una altura superior a cinco metros y una cubierta de copas de entre el 10 % y el 30 %, o con árboles que pueden alcanzar dichos límites *in situ*, salvo si se aportan pruebas de que las reservas de carbono de la zona en cuestión antes y después de la conversión son tales que, la reducción de emisiones sea como mínimo del 35%, o a partir del 1 de enero de 2017 del 50%, y a partir del 1 de enero de 2018, del 60%.
- Que no provendrán de materias primas extraídas de tierras que, a enero de 2008, fueran turberas, a no ser que se aporten pruebas de que el cultivo y la recolección de esta materia prima no implican el drenaje de suelos no drenados con anterioridad.

3.1.1. Aceites vegetales

Los aceites de origen vegetal pueden ser clasificados, en términos generales, en tres tipos de aceite:

- **Aceite bruto:** Obtenido por medio de técnicas industriales, como el prensado o mediante el uso de disolventes.
- **Aceite refinado:** El aceite sometido a procesos de limpieza o procesamientos posteriores, para la mejora de su calidad.
- **Aceite esterificado:** Resultado de la reacción química entre el aceite vegetal y un alcohol, que generalmente es el metanol, generando un aceite con mejores características para su uso con fines energéticos.

Los bioaceites o aceites vegetales pueden ser utilizados con alta eficiencia en motores de combustión de inyección indirecta, ya que son más viscosos que el gasóleo tradicional. Además pueden sustituir parcialmente el gasóleo en vehículos tradicionales, con lo que se facilita su uso.

Actualmente los bioaceites son sometidos a un proceso de esterificación, con lo que se hidrolizan los enlaces éster de los triglicéridos, se libera glicerina y cadenas de los ácidos grasos, que reaccionan posteriormente con un alcohol formando moléculas lineales que son mucho menos viscosas y por lo tanto facilitan su uso. Este tipo de carburante se denomina biodiésel. Las mezclas por debajo del 7% se consideran gasóleo. En mezclas inferiores al 30% de biodiésel, no hace falta modificación mecánica alguna y muchos fabricantes dan garantía. En estado puro, denominado B100, se pueden requerir pequeñas modificaciones en el motor. En 2006 se hicieron experiencias positivas en turismos de distintas marcas con *common rail*, bomba rotativa e inyector bomba, y en camiones Renault Magnum/Premium y Scania. En 2015 ESCANIA e IVECO confirmaban el correcto funcionamiento de sus camiones en un test en Argentina con la utilización del B100, biocombustible al 100%, no solo desde el punto de la eficiencia sino también de las emisiones.

Es de vital importancia conocer la presencia de ácidos grasos no saturados, ya que provocan inestabilidad en la reacción y además generan residuos que se depositan en inyectores, dificultando el paso del combustible y provocando que la combustión sea incompleta y se produzca un aumento de gases de combustión.

Desde el punto de vista del rendimiento, la utilización de bioaceites conduce a rendimientos ligeramente por debajo de los combustibles fósiles tradicionales, por lo que hay factores de diseño de los motores que deben ser mejorados para aumentar la eficiencia. La esterificación del aceite puro permite solucionar una gran parte de los problemas que surgen al utilizarlo como combustible líquido.

Otra opción consiste en calentar el aceite vegetal puro para disminuir la viscosidad, de manera que los problemas asociados a esta condición permitan mejorar las prestaciones del combustible. La mezcla del aceite puro con gasóleo se puede hacer sin ningún tipo de modificación a los procesos, y es un método utilizado en la actualidad.

La Tabla 10.8 muestra las características más importantes del bioaceite, comparado con un combustible fósil:

Tabla 10.8. Comparación de las características de diversos biodiésel con el gasóleo. (Adaptación a partir de De Juana 2004 y Camps, 2002)

Características	Ester metílico de colza	Aceite de colza	Gasóleo Europa
Densidad a 20°C, kg/l	0,880	0,916	0,835
Viscosidad 20°C cSt	7,5	31,8	4,0
PCI (kJ/kg)	33.100	34.300	35.000
Azufre % en peso	0,002	0,0001	0,2
Numero de Cetano	47,8	32/36	51

Los antecedentes y la situación actual permiten establecer que el uso de aceites es una posibilidad real para la sustitución de los combustibles fósiles en los motores de automoción, pero hay consideraciones económicas que deben tenerse en cuenta, ya que el precio de los aceites vegetales se ha incrementado en los últimos años, además de los costos necesarios para el proceso de esterificación. La internalización de los beneficios ambientales asociados a estas tecnologías es una de las opciones que deben ser evaluadas para permitir la rentabilización de estos proyectos.

Los antecedentes y la situación actual permiten establecer que el uso de aceites es una posibilidad real para la sustitución de los combustibles fósiles en los motores de automoción. Sin embargo hay consideraciones económicas, sociales y ambientales que deben tenerse en cuenta, ya que el precio de los aceites vegetales se ha incrementado en los últimos años, además de los costos necesarios para el proceso de esterificación, así como la utilización del suelo. La internalización de los beneficios ambientales asociados a estas tecnologías es una de las opciones que deben ser evaluadas para permitir la rentabilización de estos proyectos

3.1.1.1. Proceso de esterificación

El proceso de esterificación es el mecanismo mediante el cual se lleva a cabo la transformación de los aceites vegetales para la producción del biodiésel. El aceite es un éster, que se hace reaccionar con un alcohol, usualmente metanol, obteniendo como productos la glicerina, y moléculas lineales formadas por los ésteres de los ácidos grasos con el alcohol, que al utilizar metanol se convierte en un metilester. El proceso es sencillo, necesiéndose un catalizador para impulsar la reacción, que generalmente es el hidróxido potásico. En promedio a partir de 1,05 toneladas de aceite y 0,11 toneladas de alcohol, se obtienen casi una tonelada de metilester, 0,023 toneladas de ácidos grasos y 0,1 toneladas de glicerina.

El proceso es presentado en la Figura 10.13.

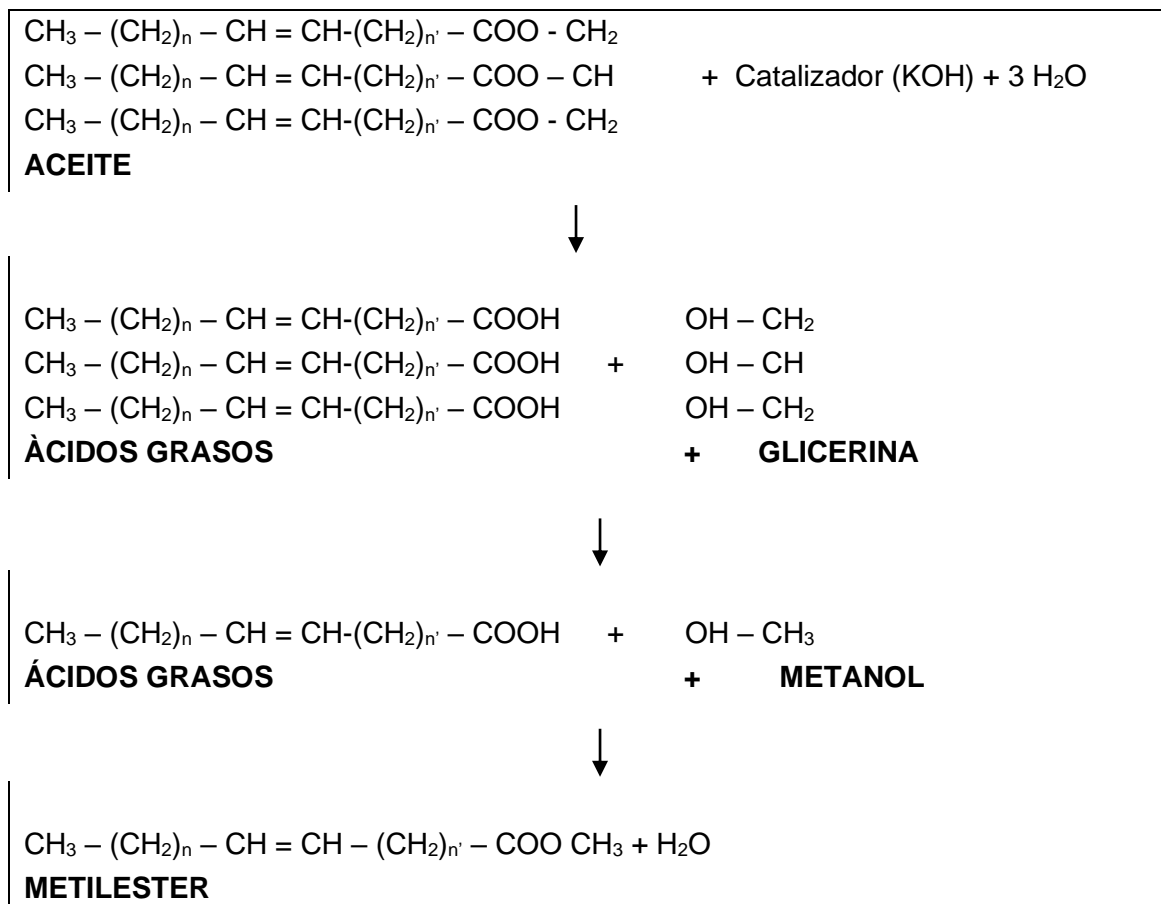


Figura 10.13. Proceso de esterificación con metanol.

En la Figura 10.14 se muestra una planta completa (Caparroso, Navarra, España) para la producción anual de 35.000 t de biodiésel y 3.180 t de glicerina farmacéutica, utilizando como materia prima 36.000 t de todo tipo de aceites vegetales, inicialmente de soja, colza, girasol y palma, con una inversión de 25 M€ (año 2005). Esta inició su andadura con importantes subvenciones, luego fue vendida a un poderoso grupo español, pero finalmente terminó con el cierre en 2013, víctima en parte debida de la problemática de la producción del biodiésel en España, muy baja producción, por el dumping de las importaciones, con un bajo precio y también subvencionadas en origen, así como por la importante subida de precios de la producción agroalimentaria que se originó en América y que afectó de una forma general e importante a todo el mundo. Esta fue un aumento de precios especulativo, que se originó precisamente por la “escasez” de estos productos agroalimentarios en su entrada en el sector de la energía.



Figura 10.14. Planta de producción de biodiésel de Caparrosa (Navarra, España) a partir de aceites vegetales y que utilizaba un proceso de esterificación.

En la Figura 10.15 se muestra el esquema del proceso productivo de la citada planta, en la que la transesterificación va precedida de un pretratamiento de refinado del aceite.

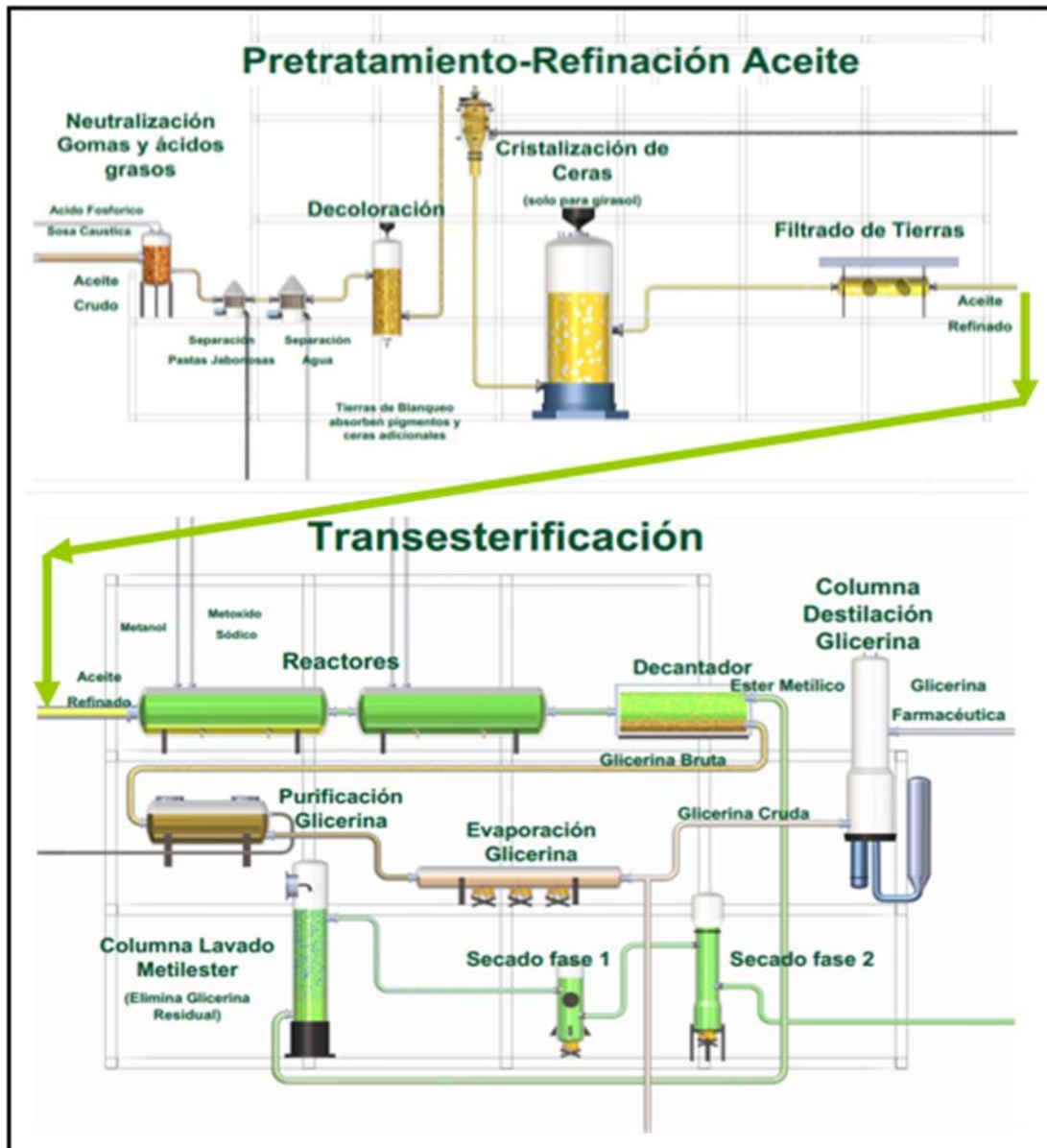


Figura 10.15. Esquema del proceso productivo de la planta de producción de biodiésel de Caparros compuesto de un pretratamiento y de una transesterificación.

3.1.1.2. Cultivos para la producción de bioaceites

Las principales fuentes utilizadas en países europeos para la obtención de aceites son la colza y el girasol. Ambas son plantas oleaginosas que contienen gran cantidad de aceites y son cultivados anualmente. Se desarrollan en la actualidad numerosas investigaciones para incorporar otras especies a la producción de bioaceites, mediante la selección de variedades con mayor productividad de aceite y menor costo de producción. En este sentido uno de los cultivos que se está desarrollando es el cardo (*Cynara cardunculus L.*) ya que posee una alta concentración de aceite y es un cultivo perenne con lo que se disminuyen sustancialmente los requerimientos de establecimiento de la plantación. El único inconveniente en la producción de los aceites, es la necesidad del proceso de esterificación, ya que aumentan los costos y requiere de instalaciones industriales, con la producción de un gran volumen de glicerol residual. Por ello es interesante plantear investigaciones tendientes a desarrollar motores que utilicen directamente el aceite, prescindiendo del proceso de

esterificación. La productividad promedio de algunos de los cultivos más utilizados se muestra en la Tabla 10.9.

Tabla 10.9. Productividad de aceites en diferentes cultivos.

Cultivo	Contenido de aceite (% del peso total)	Producción de aceite (kg/ha)
Girasol	44	308
Colza	40	600
Cardo	24	360

3.1.1.3. DME

Es el éster más sencillo y es inocuo para el medio ambiente. Actualmente se usa principalmente como propelente y se perfila como uno de los combustibles perfectos para sustituir al diésel en motores de combustión interna cambiando el sistema de inyección. A temperatura ambiente es un gas que licua a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y puede ser fácilmente almacenado en tanques a presión y usar la infraestructura propia de los GLP y tiene un mayor índice de cetano que el gasóleo y el metanol. Su combustión no produce carbonilla, SO_2 y poco NO_x . Esto lo convierte en un perfecto sustituto para el gas natural en turbinas, cocinas y hornos industriales. Se obtiene a partir de la deshidratación del metanol, por lo que puede ser producido a partir de diferentes fuentes, fósiles como carbón o gas natural, o biomasa. El carbón y la biomasa se gasifican para obtener el gas de síntesis a partir del que se produce el metanol. Actualmente se ha desarrollado un proceso que combina la síntesis de metanol a partir del gas de síntesis con la deshidratación.

El DME, aunque no para uso común en vehículos, está teniendo mucha aceptación como vector energético equivalente al GLP, especialmente en países emergentes con grandes reservas de carbón o gas, como China o Irán, que desean evitar el exceso de contaminación sin modificar sus usos habituales.

3.1.2. Alcoholes

Otro de los procesos existentes para la generación de combustibles a partir de la biomasa, es la obtención de alcoholes, como el etanol, a base del fraccionamiento de la lignocelulosa.

En realidad el empleo de etanol como combustible en un motor de explosión no constituye ninguna novedad, pues el prototipo presentado por Nicolás Otto en la Exposición Internacional de París de 1878 estaba alimentado con alcohol etílico, presumiblemente de origen natural.

En la actualidad hay programas de producción de alcoholes, para su uso como combustible, en países como Brasil, donde se producen anualmente más de 10 millones de m^3 de etanol para su utilización en motores de automoción. Su uso puede ser puro, o bien en mezclas de entre 5 y 10% con gasolina normal, alcanzando incluso un 20% de sustitución en Brasil, donde se han introducido los denominados motores flex, que indistintamente utilizan cualquier proporción de gasolina y alcohol.

Sin embargo la utilización de alcoholes de bajo peso molecular aunque mejoran el octanaje, ver Tabla 10.10, presenta los inconvenientes de:

- Formación de azeótropos de bajo punto de ebullición que aumentan la volatilidad con una baja presión de vapor, como indica la Tabla 10.10, y con la

correspondiente problemática de la mayor cantidad de vapores que se desprenden en su almacenamiento.

- Carácter higroscópico, en la Tabla 10.10 muestra la total solubilidad del etanol en agua, y nula del hidrocarburo, lo que facilita la separación del hidrocarburo del agua en caso de contaminación de agua y acuíferos si hay derrames.

Estos problemas, en cuanto a su utilización en motores convencionales de gasolina, son en parte superados por la baja proporción del alcohol en la mezcla de una biogasolina, y desaparecerían totalmente al utilizar los éteres transformados de los correspondientes alcoholes. Esta metodología es la habitual a que han recurrido las refinerías para incorporar oxígeno a las gasolinas, como por ejemplo en los ETBE a partir del etanol. El ETBE se produce a partir de un 47% de bioetanol y un 53% de isobuteno, y puede entrar en las gasolinas hasta el 22%. Pero ello encarece aún más el biocombustible y no resulta comercialmente competitivo. Por esta y otras razones aún se continúa investigando en la obtención de bioalcoholes alternativos a la gasolina.

Tabla 10.10. Parámetros característicos de la gasolina y del etanol

PARÁMETRO	UNIDAD	GASOLINA	ETANOL
Poder calorífico	kJ/kg	43.500	28.225
	kJ/litro	32.180	22.350
Densidad	kg/litro	0,72-0,78	0,792
Octanaje RON (Research Octane Number)		90-100	102-130
Octanaje MON (Motor Octane Number)		80-92	89-96
Calor latente de vaporización	kJ/kg	330-400	842-930
Relación aire/combustible estequiométrica		14,5	9,0
Presión de vapor	kPa	40-65	15-17
Temperatura de ignición	°C	220	420
Solubilidad en agua	% en volumen	-0	100

El bioetanol mezclado con la gasolina produce un biocombustible de alto poder energético con características muy similares a la gasolina pero con una reducción de las emisiones contaminantes en comparación con la de los motores tradicionales de combustión que emplean gasolina. El etanol se usa en mezclas con la gasolina en concentraciones del 5 o el 10%, denominadas E5 y E10 respectivamente, que no requieren modificaciones en los motores actuales.

Las especificaciones medioambientales de los combustibles comercializados para uso en vehículos equipados con motor de encendido con chispa, tipo gasolina, están especificadas en el Anexo I de la Directiva 2009/30/CE. Precisamente por la menor presión de vapor del alcohol, y los problemas que ello provoca en las mezclas para que tengan las características de una gasolina, se autoriza un “rebasamiento de la presión de vapor de la gasolina según el % de contenido de bioetanol, tal como indica el Anexo III, de la citada Directiva, que se corresponde a la Tabla 10.11

Tabla 10.11. Rebasamiento autorizado de la presión de vapor de la gasolina que contenga bioetanol según su contenido en la mezcla en % en volumen dado por el Anexo III de la Directiva 2009/30/CE.

Contenido de bioetanol (% v/v)	Rebasamiento autorizado de la presión de vapor (kPa)
0	0
1	3,65
2	5,95
3	7,20
4	7,80
5	8,0
6	8,0
7	7,94
8	7,88
9	7,82
10	7,76

En el caso de alcohol puro, o de concentraciones más elevadas que la E10, se requiere de motores especiales, denominados FFV, *Fuel Flexible Vehicle*, los cuales precisan una serie de adecuaciones, con un depósito, motor y sistema de combustible especial, para permitir la combustión del alcohol, principalmente por la mayor presión que deben soportar las válvulas, al poseer una mayor relación de compresión, además de la utilización de materiales que no sean atacados por el alcohol.

La obtención del alcohol de forma industrial se puede realizar a partir de tres sustratos diferentes:

- Biomasa azucarada, es decir que contenga azúcares, por ejemplo glucosa, sacarosa o fructosa, como los cultivos de caña de azúcar, sorgo dulce o remolacha.
- Biomasa almidonada o amilácea, con polisacáridos de tipo almidón, como, por ejemplo, la proveniente de cereales o tubérculos.
- Biomasa celulósica, a través del fraccionamiento de lignocelulosa, como, por ejemplo, la madera.

Los tres sustratos siguen un proceso similar, como indica la Figura 10.16, una fermentación inicial que permite la obtención de un alcohol de baja graduación alcohólica, y luego una destilación para concentrar el alcohol y la deshidratación del mismo.

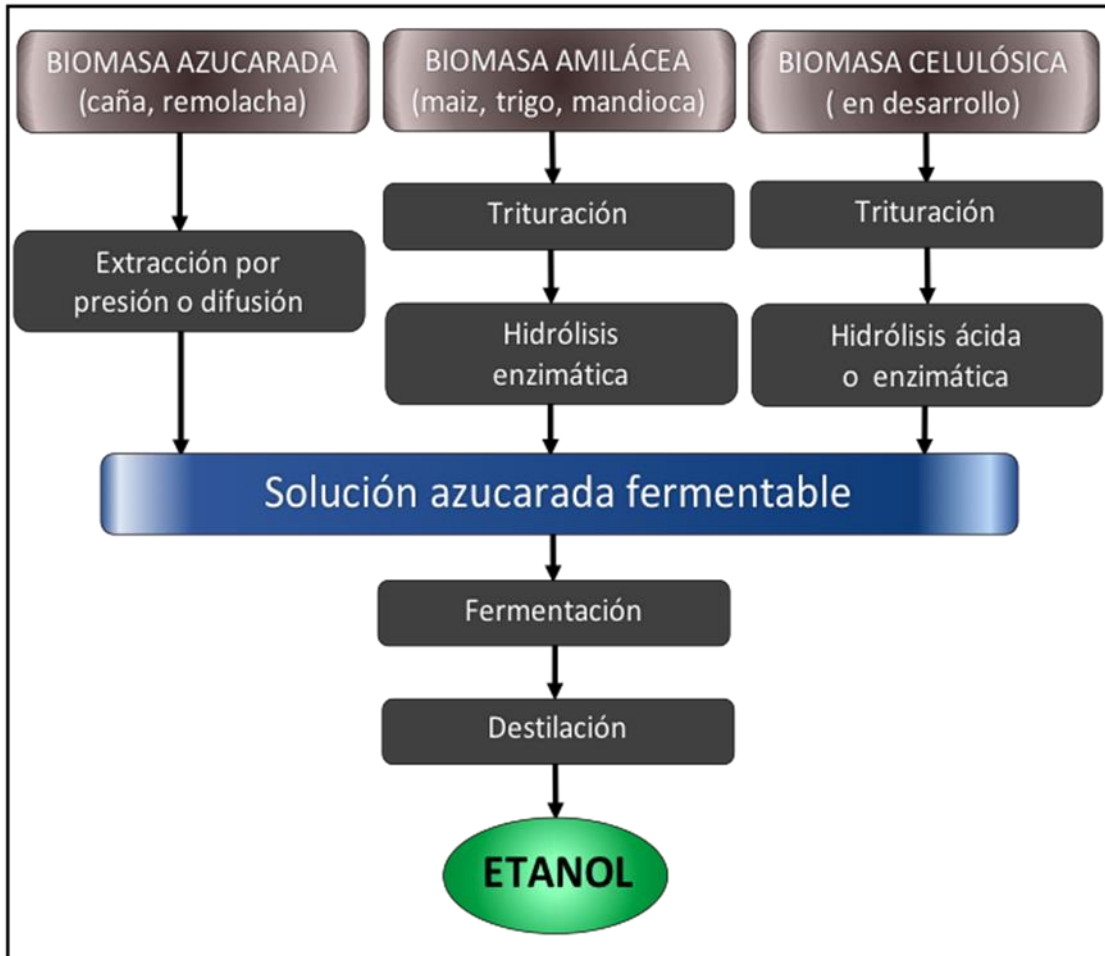


Figura 10.16. Esquema del proceso de obtención de etanol por fermentación de carbohidratos.

El método más sencillo es la conversión a partir de biomasa azucarada, de donde se extrae fácilmente un jugo rico en azúcares por presión o difusión, que a su vez es fermentado hasta obtener un alcohol de bajo grado alcohólico, con un alto contenido de agua, lo cual lo hace inadecuado para su uso como combustible y debe ser destilado y deshidratado.

En el caso del sustrato almidonado es necesario convertir primeramente el almidón en azúcar lo cual hace más larga la síntesis completa, proceso que se realiza a través de una hidrólisis convencional.

En el caso de biomasa celulósica, la síntesis se lleva a cabo por medio de una hidrólisis fuerte, que permite la obtención de un sustrato fermentable.

3.1.2.1. Hidrólisis y fermentación de la biomasa para la obtención de alcohol

En este apartado se describen con cierto detalle los procesos de hidrólisis y fermentación sobre los que se han hecho referencia en el párrafo anterior o también en el esquema de una biorrefinería de la Figuras 10.10 y 10.11. Ambos procesos son fundamentales para la obtención del etanol a partir de la biomasa.

Los residuos de biomasa, como ya se ha comentado, contienen mezclas complejas de carbohidratos, llamados celulosa, hemicelulosa y lignina. Para obtener los azúcares de la biomasa, ésta ha de ser tratada con ácidos o enzimas que facilitan su obtención. Para ello la celulosa y hemicelulosa son hidrolizadas por enzimas o diluidas por ácidos para obtener sacarosa que es fácilmente fermentada. Los principales métodos para extraer estos azúcares son tres:

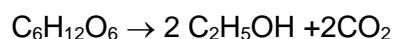
- la hidrólisis con ácidos concentrados,
- la hidrólisis con ácidos diluidos y
- la hidrólisis enzimática.

Las celulosas no pueden ser fermentadas directamente, es necesario convertirlas en azúcares más sencillos para su conversión en alcohol. La hidrólisis es un proceso químico que divide la molécula de celulosa por la acción del agua. Las complejas estructuras de la celulosa (celulosa, hemicelulosa y lignina) son divididas en diferentes procesos para conseguir una solución azucarada, y eliminar productos de descomposición de los azúcares que pueden inhibir o, al menos, dificultar el proceso de fermentación. Principalmente se realizan procesos de hidrólisis de ácidos concentrados con bajas temperaturas, de ácidos diluidos a altas temperaturas y enzimáticos.

- Hidrólisis con ácidos concentrados: En este proceso se añade entre 70-77% de ácido sulfúrico a la biomasa, que ha sido secada previamente hasta obtener una humedad menor del 10%. La proporción de ácido es de 1:25 por cada parte de biomasa y se mantiene a una temperatura controlada de 50 °C. Entonces se añade agua, para diluir el ácido a un 20-30% de la mezcla, aumentando su temperatura hasta los 100 °C. El gel producido en este proceso es prensado para obtener la mezcla de ácido y azúcar, que finalmente son separados. Este es un proceso del que se obtiene rendimientos muy elevados pero a un coste igualmente muy elevado, por lo que industrialmente no se utiliza.
- Hidrólisis con ácidos diluidos: Es uno de los procesos de hidrólisis más antiguos, simples y eficientes para la producción del alcohol. El primer paso consiste en mezclar una proporción de 0,7% de ácido sulfúrico con la hemicelulosa presente en la biomasa, para que se hidrolice a 190 °C. La segunda parte consiste en optimizar el rendimiento de la reacción con la parte de la celulosa más resistente, para ello se usa un 0,4% de ácido sulfúrico a 215 °C. Finalmente los líquidos hidrolizados son neutralizados y recuperados, normalmente mediante percolación.
- Hidrólisis enzimática: Consiste en “romper” (hidrolizar) la celulosa por la adición de determinadas enzimas. La celulosa es degradada por las celulasas a azúcares, que pueden ser fermentados por levaduras o bacterias para producir etanol. En síntesis, el proceso consiste en descomponer la celulosa y la hemicelulosa del residuo en azúcares sencillos y transformarlos en etanol por fermentación. En primer lugar se lleva a cabo un pretratamiento del residuo cuyo objetivo es alcanzar los mejores resultados en las etapas siguientes (hidrólisis y fermentación). Desde el punto de vista económico, esta etapa es crítica, puesto que gran parte del coste total del proceso estaría en esta primera etapa. Como resultado del pretratamiento se obtiene una disolución de azúcares provenientes de la ruptura de la hemicelulosa y un residuo sólido (constituido principalmente por la celulosa del residuo original). La hidrólisis enzimática presenta ventajas frente a la hidrólisis química, como menores costes de equipamiento (debido a que se realiza a presión atmosférica y a temperatura próxima a la ambiental), mayores rendimientos y no necesita utilizar agentes químicos.

La última etapa del proceso, consiste en la fermentación por levaduras de la glucosa liberada a partir de la celulosa, así como la de los azúcares procedentes de la hemicelulosa que se han liberado durante los pretratamientos anteriores. La levadura contiene una enzima llamada invertasa, que actúa como catalizador ayudando a convertir los azúcares en glucosa y fructosa (ambos $C_6H_{12}O_6$). Estos reaccionan con otra enzima, como la zimasa, que también está presente en la levadura para,

finalmente, obtener etanol. De forma muy simplificada puede representarse por la reacción química



En la reacción anterior, teóricamente a partir de 100 gramos de glucosa se obtienen 51,1 gramos de etanol y 48,8 gramos de CO₂, pero el rendimiento industrial puede variar entre el 87 y 93% de aquel valor, en un funcionamiento en continuo, pues hay otros microorganismos en competencia de los azúcares.

El alcohol producido por fermentación, con un grado alcohólico entre 10 y 15°, contiene una parte significativa de agua, que debe ser eliminada para su uso como combustible. Para ello se utiliza un proceso de destilación, aprovechando que el etanol tiene un punto de ebullición menor (78,3 °C) que el agua (100 °C), la mezcla se calienta hasta que el alcohol se evapora y se pueda separar por condensación del mismo.

3.1.2.2. Cultivos utilizados para la producción de alcoholes

Existe una serie de cultivos agrícolas tradicionales que permiten la obtención de alcoholes para su utilización como combustible. Entre ellos la remolacha y la caña de azúcar son los que más ampliamente se han utilizado con estos fines. Existiendo además cultivos como cereales o el maíz que también poseen un potencial elevado para su transformación en biocombustibles.

La remolacha posee en la actualidad un rendimiento medio de 60 toneladas por hectárea, de donde es posible obtener aproximadamente 6.000 litros de etanol. Una estimación general permite concluir que para la producción de un litro de etanol se requiere gastar un total de 4,22 Mcal de combustible primario. Los rendimientos de otros cultivos se muestran en la Tabla 10.12.

Tabla 10.12. Rendimientos de etanol a partir de diferentes cultivos.

Cultivo	Productividad del cultivo (toneladas/ha)	Obtención de etanol (litros/ha)
Remolacha	60	6.000
Sorgo azucarero (tallos)	90	6.000
Sorgo azucarero (grano)	35	3.000
Trigo	2,5	877
Maíz	10	3.700
Caña de azúcar	50	3.500
Madera	20	3.200
Residuos de poda	2,3 – 4,0	700-1.200
Patata (tubérculo)	62,5	5.000

3.1.2.3. Empleo de alcoholes como disolventes para la obtención de pastas celulósicas

Algunos procesos de pasteado emplean como disolventes orgánicos metanol, etanol, propanol, glicoles, etc., para la desintegración de la lignina, proceso denominado *organosolv*. Las maderas que mejor se adaptan a este proceso son las denominadas frondosas, como el eucalipto. Las maderas coníferas presentan un menor grado de deslignificación, requiriendo temperaturas de cocción más elevadas y la presencia de aditivos.

Las materias primas alternativas a las maderas tradicionales, suelen ser más fáciles de tratar que las maderas convencionales, aunque en algunos casos presentan inconvenientes debido al elevado contenido de sílice que afecta tanto a la calidad de la pasta como a la recuperación del disolvente. En los últimos años, numerosos investigadores han ensayado las posibilidades de deslignificación de materias alternativas a la típica madera como:

- **Bagazo de caña de azúcar.** Se han obtenido resultados de deslignificación comparables a las pastas convencionales de maderas frondosas.
- **Pajas.** Se han obtenido buenos valores, si bien la lignina residual presenta valores elevados. Con pajas de arroz se han conseguido pastas “al etanol” con elevados rendimientos. La paja de cáñamo, al igual que la paja de trigo, son muy sensibles al refinado.
- **Hierba elefante (*Miscanthus sinensis*),** de elevada producción (30-35 t/ha y año de materia seca), se deslignifica bien con etanol/sosa.
- **El carrizo (*Phalaris arundinacea*),** con rendimientos de 4 a 8 t/ha y año de materia seca, es una planta especialmente valorada en los países nórdicos donde se la considera una importante fuente sostenible de fibras cortas para la industria papelera. Las hojas de este vegetal se han de eliminar previamente mediante un fraccionamiento mecánico en seco, del que se obtienen rechazos que pueden ser valorizados para la producción de biodiésel.
- **Podas de olivo.** Recurso muy abundante en los países mediterráneos. Sus pastas “al etanol” consiguen buenos resultados de deslignificación. Se puede obtener una calidad de papel aceptable con un coste energético menor que en el caso del eucalipto.
- **Podas de tagasaste,** leguminosa arbustiva endémica en las islas Canarias (España), de la familia *Fabaceae* (*Genistae*), es un vegetal empleado para la recuperación de suelos degradados, dado su carácter leguminoso. Se debe podar para que rebrote ya que, básicamente, se usa como forraje.
- **Podas de vid,** muy abundante en España. Los rendimientos de la deslignificación no son muy elevados.

A primeros de 2007, durante los I Encuentros de Energía, las autoridades del Gobierno regional Valenciano (España) presentaron un plan para sacar valor añadido a las 190.000 hectáreas destinadas al cultivo de la naranja, a partir del alcohol que se puede obtener por el tratamiento sobre la pulpa y la corteza de los cítricos.

3.1.3. Balance energético de los biocombustibles

Existe una gran controversia respecto el balance de la energía que puede extraerse de un biocombustible frente a la gastada en obtenerlo, así como de las emisiones que se generan durante su consumo y producción. Los estudios son numerosos, los primeros datos ya aparecen en la literatura en 1995, y continúan apareciendo en el momento de redactar esta obra. Sin embargo la mayoría de ellos concluyen en su aspecto positivo. La disparidad de resultados es consecuencia de las múltiples variables que afectan al resultado. En efecto, diferentes cultivos, diferentes rendimientos para un mismo cultivo según las particularidades del terreno y meteorología, sol, temperatura y lluvia, diferente metodología para su cultivo y tratamiento de conversión industrial, con los correspondientes subproductos o residuos generados, el transporte del centro agrícola al industrial etc.

Se han realizado numerosos estudios en Europa y EE.UU. y más recientemente en otros países de Centro y Sudamérica, en algunos casos impulsados por el gobierno, para evaluar las posibilidades de distintos tipos de cultivos en sus respectivos

territorios, atendiendo a sus propias características. Por ejemplo un estudio realizado para Argentina en 2008, concluye que la relación entre la energía del etanol producido a partir de la soja respecto a la gastada, cuando no se tienen en cuenta los subproductos generados, varía entre 1,12 (soja de primera siembra directa, con consumos máximos de energía) y 1,94 (soja de primera con siembra directa y tecnología punta, con consumos mínimos de energía). Si se considera además el valor energético de los subproductos o residuos del proceso, glicerina y sobretodo harina de soja, las anteriores relaciones pasan a 3,74 y 6,48 respectivamente. En esta misma línea un trabajo realizado en Chile (2007) indica que tanto en la producción de bioetanol como biodiésel, este con una relación mucho mayor, el balance es siempre positivo, aunque en ambos biocombustibles está fuertemente influenciado, sobretodo en el bioetanol, por el nivel de energía primaria gastada en el proceso productivo, el cual es función de la tecnología utilizada en la planta.

La Tabla 10.13 presenta una síntesis ajustada de los resultados de distintas referencias, realizada por el Centro Nacional de Investigación del Café de Colombia, en la que se indican varias características del biotanol obtenido a partir de distintos cultivos. En una de las primeras columnas se muestra el rendimiento de los litros de etanol por tonelada de cultivo, con valores coherentes con los de la Tabla 10.12. También se indica, por litro de etanol producido, la energía gastada en el proceso agrícola y en el industrial para la transformación del cultivo en etanol, así como la energía del etanol producido y la del residuo o subproducto generado. Finalmente, se aporta el balance mediante la diferencia entre la energía producida y la total gastada por litro de bioetanol producido, o mediante su cociente. En este caso según se considere, o no, la energía del residuo o subproducto.

Tabla 10.13. Balance energético del bioetanol obtenido a partir de diferentes cultivos y según distintas referencias. (Fuente Nelson Rodríguez Valencia, Cenicafé Colombia 2009).

BALANCE ENERGÉTICO EN LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL OBTENIDO DE DIFERENTES CULTIVOS								
Cultivo	Rendimiento	Energía (kJ/l de etanol)				BALANCE	Relación E. prod./E. gastada	
	l etanol/t cultivo	Gastada en el proceso		Producida al generar		E producida - E gastada (c+d)-(a+b)	Sin residuos c/(a+b)	Con residuos (c+d)/(a+b)
		Agrícola	Industrial	Etanol	Residuo			
		A	b	C	d			
Caña de azúcar ¹	66	4.858	12.695	22.008	20.544	24.999	1,25	2,42
Yuca ¹	174	4.267	14.731	22.008	-	3.010	1,16	
Sorgo ¹	83	6.498	13.366	22.008	15.480	17.624	1,11	1,89
Trigo- cebada ²	350	13.337	12.099	21.377	-	4.059	0,84	
Sorgo ²	80	3.690	12.099	21.377	-	5.588	1,35	
Patata ²	100	11.420	12.099	21.377	-	2.142	0,91	
Maiz ³	314			21.377	-		0,245-0,310 1,13-1,34	

¹- Adaptado Carrillo, L, 2004; ²- Adaptado Miliarum, 2007; ³- Adaptado Honty, G and Gudynas, E,2007.

La Tabla 10.13 presenta el balance energético del sorgo según dos referencias, poniendo de manifiesto, en este caso, la diferencia de la energía gastada en la fase de cultivo. También como el trigo, cebada o patata presentan un balance negativo. En la

conversión del maíz en etanol existe una extendida polémica respecto de cuál es el rendimiento del proceso, mientras unos, como el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, afirman que es mayor a 1,77 cuando se utilizan las tecnologías energéticamente más eficientes, otros, como en la Tabla 10.13, sostienen que es menor que uno.

La Tabla 10.14 da la relación entre la energía producida y la consumida para producir biodiésel a partir de distintos cultivos situados en diferentes lugares del mundo.

Tabla 10.14. Balance energético del biocombustible obtenido a partir de diferentes cultivos y según distintas referencias.

BALANCE ENERGETICO DEL BIODIÉSEL	
Cultivo	Energía generada/Energía consumida
Maíz (Europa)	1,7-3,0
Colza (Europa)	1,7
Girasol-Soya-Colza (USA-Europa)	3,2-3,4
Ajonjolí (Brasil)	2-2,9
Palma	6,6-6,7

Como se ha comentado al principio de este apartado, es sumamente complejo evaluar cualquiera de estos balances, pues, además de las muchas variables citadas en un párrafo anterior, este viene influenciado por la capacidad de producción y tecnología de la planta de conversión, aunque habitualmente cuanto mayor sea la capacidad más desarrollada se halla la tecnología. Así, en la Tabla 10.15 se refleja cómo influye la economía de escala en la producción de biodiésel, con valores de 2006, aspecto que, sin duda, también influye en el balance energético.

Tabla 10.15. Economía de escala en la producción de biodiésel, valores de 2006.

ECONOMÍA DE ESCALA EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL		
Capacidad de producción (t/año)	Instalación planta (Euros/t)	Operación planta. Costos fijos. (Euros/t)
30.000	412	50
60.000	334	42
100.000	272	36
150.000	236	29
250.000	194	22

En esta línea, cabe destacar la importancia de la energía que aportan los biocombustibles, y para potenciar su uso, el artículo 21 de la Directiva 2009/28/CE, da unas "Disposiciones específicas relativas a la energía procedente de fuentes renovables en el transporte", concretamente legisla:

- Cuando los porcentajes de los biocarburantes, mezclados en derivados de aceites minerales, excedan del valor límite del 10 % en volumen, los Estados miembros exigirán que se indique este extremo en los puntos de venta.
- La contribución de los biocarburantes obtenidos a partir de desechos (los denominados de segunda generación), residuos, materias celulósicas no alimentarias y material lignocelulósico se considerará que equivale al doble de la de otros biocarburantes.

El último punto potencia la producción de biocarburantes procedentes de los residuos, etc., pues les otorga un valor energético doble respecto a otros biocarburantes a efectos del cumplimiento, como mínimo, del equivalente al 10% de su consumo final

de energía renovable en el transporte, dentro de los objetivos, obligatorios, globales nacionales, especificados en la Tabla 10.7, en materia de energías procedentes de fuentes renovables.

Las intenciones sobre el futuro de los biocombustibles quedan patentes en el “Libro Blanco de Transporte (2011)” de la Comisión europea, que establece el objetivo de reducir a la mitad el número de vehículos urbanos que utilizan combustibles fósiles hasta 2030 y que los biocarburantes podrían representar un 40% de la energía consumida en el transporte de mercancías por carretera en 2050.

Sin embargo todos los biocombustible, según su procedencia, no se consideran iguales. Los hay que compiten con los recursos naturales y con el cometido esencial de la agricultura: proveer de alimentos a la población y al ganado. Ante esta tesitura, el 14 de abril de 2015 la Comisión de Medio Ambiente del Parlamento Europeo ha decidido limitar en los carburantes la adición de los llamados biocarburantes tradicionales o clásicos, los agrocombustibles tradicionales, los que proceden de cultivos de maíz, el trigo, la soja, o la remolacha, a un máximo del 7% para su uso en el transporte hasta el 2020. En gran parte, el problema ha surgido por el “cambio indirecto del uso de la tierra” (“*indirect land-use change*”, ILUC). Para algunos expertos este es el principio del fin de los biocombustibles de primera generación, y por esto Europa los está limitando, ya que no se puede permitir, ni quiere, que formen parte “de nuestro futuro, ni desde el punto de vista climático, ni medioambiental, ni social”. La UE pretende potenciar biocombustibles avanzados, de segunda generación, obtenidos a partir de materia prima no alimentaria, como desechos de rastrojos, bosques, paja, o procedente de determinados tipos de desperdicios y residuos y nuevas fuentes como las algas.

Los combustibles de próxima generación, según los expertos no tendrán gran relevancia antes del 2020. Dentro de estos biocombustibles se encuentran: el etanol lignocelulósico, el butanol, el metanol y el dimetil éter. Todos ellos, están todavía poco desarrollados, tanto por las materias primas utilizadas, como en su tecnología, al día de hoy poco desarrollada. Únicamente EEUU produce etanol celulósico, estando en la vanguardia de esta tecnología, pero con escasa producción.

[3.1.4. Balance de las emisiones de efecto invernadero de los biocombustibles respecto a los combustibles fósiles.](#)

La discusión sobre el balance energético neto de los biocombustibles, aunque parece claro para muchos de ellos, se ve acrecentada por el balance de los emisores de efecto invernadero, GEI, en comparación de los que generan los combustibles fósiles, y recientemente, aún más cuando se pondera las emisiones por el cambio de uso de las tierras de cultivo.

La sustitución de los combustibles fósiles por combustibles producidos a partir de biomasa reduce, teóricamente, las emisiones de gases de efecto invernadero, dado que el CO₂ producido deriva del carbono extraído de la atmosfera durante el crecimiento de la planta. En la práctica, sin embargo, se necesita energía para cultivar la cosecha y para procesar el cultivo, o el residuo del cultivo, para convertirlo en biocombustibles. En consecuencia la ganancia neta de energía, como ya se ha comentado, y el ahorro neto de CO₂ se reduce significativamente. Pero, además, hay que considerar las emisiones equivalentes de N₂O (potente gas de efecto invernadero, 296 veces respecto al del CO₂), procedente de la agricultura, o la generada para producir los fertilizantes utilizados, etc. También por la mayor volatilidad de los biocombustibles. Por el contrario, deben disminuirse por la menor cantidad de emisiones de CO, óxidos de azufre, SO_x, e hidrocarburos que se producen en algunos

biocombustibles en comparación con los combustibles fósiles. Estos y muchos otros aspectos, afectan significativamente el balance de las emisiones GEI de los biocombustibles respecto a los combustibles de origen fosil.

El balance de las emisiones de los biocombustibles en comparación con las que producen los correspondientes combustibles fósiles en muchas ocasiones se presenta como el porcentaje de reducción de emisión del biocombustible respecto a la del combustible fósil tomado como referencia. Así, la Figura 10.17 muestra por una parte el tanto por cien de reducción de emisiones respecto al combustible fósil de referencia realizadas por la producción de biocarburantes en España a partir de distintos cultivos, también realizados en España. El combustible de referencia genera emisiones equivalentes de 83,9 g de CO₂ eq por cada MJ de energía almacenado en el combustible fósil que “corresponde a las emisiones medias reales procedentes de la parte fósil de la gasolina y del diésel consumidos en la Comunidad” según transcribe la Directiva 2009/30/CE, en el punto 19, apartado C, Anexo IV. Pero, además, la Figura 10.17 indica, en g de CO₂ eq/MJ, las emisiones de los procesos agrícolas, eec (abreviatura utilizada en la legislación europea y española, como por ejemplo en la Directiva 2009/28/CE), de transformación, ep, de transporte y distribución, etd, así como de las emisiones evitadas mediante captura y secuestro o retención de CO₂, eccr, y las emisiones evitadas por la electricidad producida por cogeneración, eee.

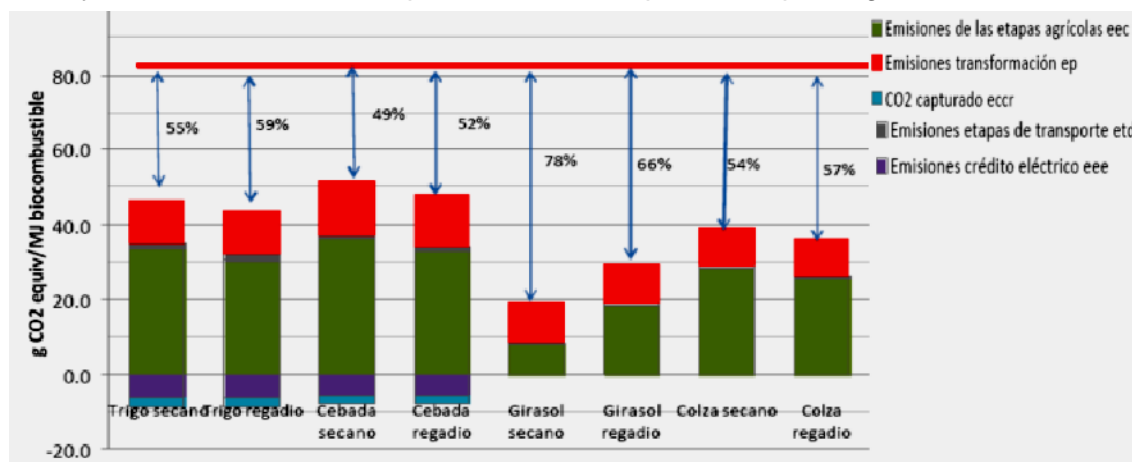
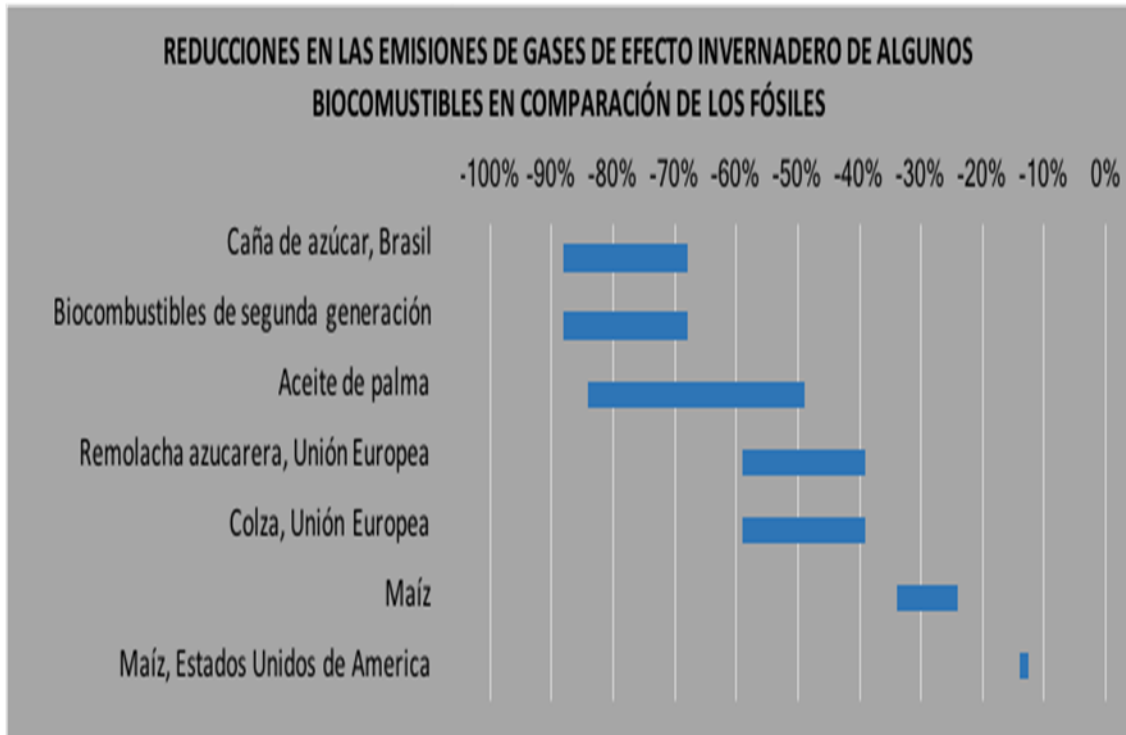


Figura 10.17. Ahorros de emisiones de GEI de biocarburantes producidos en España, con materias primas procedentes de cultivos realizados en España. (Fuente CIEMAT 2010).

En la Figura 10.18 se indican los balances de emisiones, de nuevo mediante la reducción de emisores en comparación con los combustibles fósiles, para la producción de biocombustibles según distintos tipos de cultivos publicados por AIE, 2006, y FAO, 2008. En esta figura hay que destacar la nota a pie de figura, en la que se indica que en dicho balance no se ha contabilizado el cambio de uso de la tierra, aspecto que actualmente es el origen de una gran controversia, como ya se ha comentado.



No comprende las repercusiones del cambio en el uso de la tierra

Figura 10.18. Reducción en las emisiones GEI de algunos biocombustibles respecto de los combustibles fósiles (AIE 2006 y FAO 2008).

Ante esta situación la UE, mediante las ya citadas Directivas 2009/28/CE y 2009/30/CE, concreta una metodología, en el Artículo 19 de la primera y en el Artículo 7 *quinquies* de la segunda, con el mismo texto y título "Cálculo del efecto de los biocarburantes y biolíquidos en las emisiones de gases de efecto invernadero". En estos se propone una metodología, desarrollado en el apartado C del anexo V de la Directiva 2009/28/CE y en el Anexo IV de la 2009/30/CE. En estos artículos se indica que en el caso de que las emisiones anualizadas de gases de efecto invernadero procedentes de las modificaciones en las reservas de carbono causadas por el cambio de uso del suelo (expresadas como masa equivalente de CO₂ por unidad de energía producida por biocarburantes) sean igual o inferior a cero podrán tomarse los valores de emisiones por defecto de la Tablas A y B del Anexo V o IV de dicha Directiva. Ambas tablas se adjuntan en esta obra como Tablas 10.16 y 10.17, por su interés, ya que dan unos valores típicos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en la producción de biocarburantes según el tipo de cultivo, pero sin contabilizar las emisiones netas de carbono debidas a cambios en el uso del suelo.

Tabla10.16. Valores típicos y valores por defecto para los biocarburantes producidos sin emisiones netas de carbono debidas a cambios en el uso del suelo (Fuente Directiva 2009/28/CE y 2009/30/CE)

Proceso de producción del biocarburante	Reducción de emisiones de gases efecto invernadero	
	Valores típicos	Valores por defecto
Etanol de remolacha azucarera	61%	52%
Etanol de trigo (combustible de proceso no especificado)	32%	16%
Etanol de trigo (lignito como combustible de proceso en instalaciones de cogeneración)	32%	16%
Etanol de trigo (gas natural como combustible de proceso en caldera convencional)	45%	34%
Etanol de trigo (gas natural como combustible de proceso en instalaciones de cogeneración)	53%	47%
Etanol de trigo (paja como combustible de proceso en instalaciones de cogeneración)	69%	69%
Etanol de maíz, producción comunitaria (gas natural como combustible de proceso en instalaciones de cogeneración)	56%	49%
Etanol de caña de azúcar	71%	71%
Parte del etil-terc-butil-éter procedente de fuentes renovables (ETBE)	Iguales a los del proceso utilizado de producción del etanol	
Parte del terc-amil-etil-éter procedente de fuentes renovables (TAEE)	Iguales a los del proceso utilizado de producción del etanol	
Biodiésel de colza	45%	38%
Biodiésel de girasol	58%	51%
Biodiésel de soja	40%	31%
Biodiésel de aceite de palma (proceso no especificado)	36%	19%
Biodiésel de aceites usados de origen vegetal o animal*	88%	83%
Aceite vegetal de colza tratado con hidrógeno	51%	47%
Aceite vegetal de girasol tratado con hidrógeno	65%	60%
Aceite vegetal de palma tratado con hidrógeno (proceso no especificado)	40%	26%
Aceite vegetal de palma tratado con hidrógeno (proceso con captura de metano en la almazara)	65%	65%
Aceite vegetal puro de colza	58%	57%
Biogás producido a partir de residuos orgánicos urbanos como gas natural comprimido	80%	73%
Biogás producido a partir de estiércol húmedo como gas natural comprimido	84%	81%
Biogás producido a partir de estiércol seco como gas natural comprimido	86%	82%

* Excluido el aceite de origen animal producido por los subproductos animales clasificados como material de la categoría 3 de conformidad con el Reglamento (CE) nº 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 3 de octubre de 2002, por el que se establecen las normas sanitarias aplicables a los subproductos animales no destinados al consumo humano (Do L 273 de 10.10.2002, p.1.)

Tabla 10.17. Valores típicos y valores por defecto estimados para los futuros biocarburantes que no se encontraban o solo se encontraban en cantidades insignificantes en el mercado en enero de 2008, producidos sin emisiones netas de carbono debidas a cambios en el uso del suelo (Fuente Directiva 2009/28/CE y 2009/30/CE)

PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL BIOCARBURANTE	REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO,	REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO
	VALORES TÍPICOS	VALORES POR DEFECTO
ETANOL DE PAJA DE TRIGO	87%	85%
ETANOL DE RESIDUOS DE MADERA	80%	74%
ETANOL DE MADERA CULTIVADA	76%	70%
GASÓLEO FISCHER-TROPSCH PROCEDENTE DE RESIDUOS DE MADERA	95%	95%
GASÓLEO FISCHER-TROPSCH PROCEDENTE DE MADERA CULTIVADA	93%	93%
DIMETIL-ÉTER DE RESIDUOS DE MADERA (DME)	95%	95%
DME DE MADERA CULTIVADA	92%	92%
METANOL DE RESIDUOS DE MADERA	94%	94%
METANOL DE MADERA CULTIVADA	91%	91%
PARTE DEL METIL-TERC-BUTIL-ÉTER PROCEDENTES DE FUENTES RENOVABLES (MTB)	IGUALES A LOS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE METANOL UTILIZADO	

En el texto de ambas tablas se hace hincapié, de nuevo, en que no se contabilizan las emisiones por cambio de uso del suelo. En efecto, debido a las políticas para fomentar la producción de biocombustibles en los EE.UU. y Europa se han utilizado terrenos que anteriormente se dedicaban para la alimentación u otros cultivos y que, por tanto, anteriormente ya generaban el correspondiente CO₂. En consecuencia estos nuevos cultivos no aportan el mismo beneficio que si se tratara de un cultivo en una tierra que no había ninguno. Este cambio conocido por ILUC, *indirect land use change impacts of biofuels*, tiene consecuencias negativas, con un aumento de las emisiones de dióxido de carbono, aparte de la conceptual importancia de la reducción de la cantidad de tierra fértil disponible para satisfacer la creciente demanda de alimentos. La CE no ha legislado sobre el cómputo que debe considerarse de las emisiones GEI de los biocombustibles por el cambio de uso de tierra, ni ha dado a conocer su postura sobre la inclusión o no de este cambio indirecto del uso de tierras. Sin embargo, como se ha comentado en el apartado 3.1, la Directiva 2009/28/30 indica claramente que no se producirán biocarburantes y biolíquidos a partir de materias primas procedentes de tierras de elevado valor en cuanto a biodiversidad.

Parece ser que si se contabilizasen las emisiones por cambio de uso del suelo, el alcohol producido a partir de aceite de palma, la soja y la colza podrían generar más emisiones de CO₂ eq que la gasolina convencional. Algunos informes dan valores para estos respectivos cultivos de 105, 103 y 95 g de CO₂ eq/MJ, que se situarían por encima de 83,9 g de CO₂ eq/MJ, que constituye el valor de referencia de un combustible fósil. Por debajo de este valor se situarían el trigo, el maíz, la caña de azúcar, la remolacha azucarera y paja de trigo. Sin embargo los más favorables resultan ser los llamados biocarburantes de segunda generación. Es por ello que se está impulsando estos biocarburantes, que por otra parte ya han sido citados en la Figura 10.18. Estos son los producidos a partir de biomasa lignocelulósica, como la contenida en la paja, hierba, tallos, cañas, raíces, madera, cáscaras, etc. y que no compiten por la utilización de suelo agrícola dedicado a la alimentación, o incluso los biocombustibles que algunos investigadores llaman de tercera generación, aún en fase de investigación muy incipiente, como los aceites procedentes de algas y el hidrógeno procedente de la biomasa de los que se hablará en los próximos apartados.

Para realizar el cálculo de las emisiones de CO₂ de cambio de uso del suelo, complementando la metodología propuesta en la Decisión de la Comisión sobre directrices para calcular las reservas de carbono en suelo a efectos del anexo V de la Directiva 2009/28/CE, así como la reducción de emisiones de CO₂ por mejora de la gestión agrícola, puede usarse la herramienta desarrollada en el proyecto Biograce (www.biograce.net).

Como se ha comentado anteriormente, este cambio de uso del suelo ha hecho decantar en 2015 a la UE a la utilización de biocombustibles de primera generación que compiten con la alimentación hasta el límite del 7,5% en los carburantes para automoción.

3.1.5. La biomasa algal. Una potente fuente de energía

En la actualidad existe una gran controversia en torno a la utilización de cultivos agrarios como fuente de energía, como ya se ha comentado, sobre todo por la posible competencia con los cultivos para alimentación. La utilización de fuentes de naturaleza orgánica, diferentes a los cultivos tradicionales para la producción de biocombustibles puede suponer una solución. Las microalgas es uno de las alternativas más esperanzadoras.

El interés industrial sobre las algas es innegable. En 2009 se contabilizaron unas 200 empresas que estudiaban las innumerables especies de algas para seleccionar las mejores. El país más interesado era EE.UU. sobre el que se cifraban unos 500 millones de dólares invertidos, seguido de cerca por Europa, también otras potencias como Australia o Japón. Sin embargo este último país retiraba su ayuda de 100 millones de dólares para balsas cerradas de algas, y EE.UU., que estudiaba desde 1996 las especies de algas más favorables en el proyecto *Aquatic Species Program* con 2 balsas abiertas de 1.000 m² lo suspendía, pues parece que este sistema no era el idóneo para su producción a gran escala. A pesar de las grandes ventajas y posibilidades, uno de los problemas más importante es la elevada dilución que precisa el cultivo de algas, aunque se alcancen los 140 millones de células por mililitro, no solo en los sistemas abiertos si no también incluso en los biorreactores.

La definición de alga es compleja y varía en algunos matices según diferentes autores. Una de ellas, considera que son organismos protistas (esto es que no forman parte de los reinos eucarióticos, estos son los hongos, animales y plantas), pudiendo ser procariontas, sin núcleo, y eucariotas, con núcleo, unicelulares o pluricelulares sin

verdaderos tejidos ni órganos. Una de sus características más importantes consiste en ser organismos fotótrofos, es decir, que adquieren su energía de la radiación del sol mediante la fotosíntesis. Sin embargo algunas especies, las algas verdes, las rojas y las glaucófitas, son reconocidas como plantas, y otras como las cianobacterias, si bien durante mucho tiempo se les ha llamado algas verdeazules, actualmente, se las considera bacterias que fotosintetizan.

Existen varias decenas de miles de especies identificadas y aún muchas más aún sin identificar. Ocupan prácticamente todos los hábitats, son muy variadas y se pueden clasificar siguiendo muchos otros criterios. Por ejemplo, por el tamaño, en este caso las algas se pueden clasificar en dos grandes grupos: microalgas y macroalgas. Las microalgas son microorganismos con clorofila y otros pigmentos, con multitud de formas, tamaños y colores que desarrollan fotosíntesis oxigénica. Por el tipo de agua donde viven, las microalgas pueden ser de agua dulce, agua salada y mezclas de agua dulce con agua salada. Otras, las macroalgas, pueden ser coloniales y desarrollar anatomías complejas, incluso con tejidos diferenciados, y de varios metros de longitud.

Entre los grupos más interesantes cabe destacar las llamadas tradicionalmente algas verdeazuladas o *Cynophyceae*, Euglenófitos, Cromófitos o *Chromophyta* dentro las que se encuentran las algas doradas, las pardas y las diatomeas, Haptófitos o *Cryptophyta*, Rodófitos o *Rhodophyta* que corresponde a las algas rojas, Clorófitos o *Chlorophyta* conocidas por algas verdes, etc. cada una de ellas a su vez están subdivididas y existen diversas cepas.

Aunque hay muchísimas especies de algas objeto de estudio y experimentación, solo se citarán algunas de ellas, a título de ejemplo, por su particular interés energético, alimenticio o rápido crecimiento:

- *Scenedesmus dimorphus*, es un alga unicelular que pertenece a la clase *Chlorophyta*. Es una de las especies preferidas para la producción del aceite para biodiésel, aunque forma sedimentos espesos si no se agita de manera constante.
- *Phaeodactylum tricornutum*, es un alga diatomea.
- *La Botryococcus braunii* es una alga verde, puede producir hidrocarburos de cadena larga que representan el 86 % de su peso seco, por lo que es única por la calidad y la cantidad de hidrocarburos líquidos que produce.
- *La Dunaliella tertiolecta*, con una producción de aceite de alrededor del 37% (base orgánica) y de crecimiento muy rápido, lo que significa que tiene un ritmo de captación de CO₂ también alto.
- Grupos de algas *Spirulina*, especialmente valiosa como comestible y alto precio en el mercado.
- Diversas algas verdes tienden a producir almidón más que lípidos, con de crecimiento muy rápidos a 30 °C y mucha luz.

La habilidad de las algas para sobrevivir y proliferar en un amplio rango de condiciones ambientales se manifiesta en la tremenda diversidad de compuestos que biosintetizan, en particular los lípidos. Sus características pueden verse modificadas como respuesta metabólica a un cambio de las condiciones ambientales a las que se vea sometida, buscando mejorar la eficiencia energética.

Es por ello que además se está realizando un profundo trabajo genético, hibridando diferentes microalgas y provocando mutaciones a fin de conseguir las características deseadas, como paredes más débiles, mayor proporción de lípido para obtener biodiésel o más carbohidratos para producir bioalcohol, etc.

Las microalgas constituyen un grupo muy diverso de organismos. Se les considera uno de los grupos de organismos más versátiles en términos de su tamaño, forma y función ecológica. De la misma manera que las plantas, las algas convierten la energía solar en energía química mediante la fotosíntesis y forman la base de la cadena alimenticia para más del 70% de la biomasa mundial. Se las considera verdaderas maquinarias fotosintéticas generadoras de pigmentos, con una adaptación ecofisiológica y bioquímica única, pues permiten la bioconversión directa de la energía solar en compuestos químicos, bajo una gran variedad de condiciones medioambientales y a una velocidad mayor que cualquier otra fuente vegetal.

Contienen una gran cantidad de pigmentos esenciales que bajo la acción de la luz solar y de sustancias inorgánicas simples como dióxido de carbono, compuestos nitrogenados y fosforados, son transformados a través del proceso fotosintético en compuestos orgánicos complejos como carbohidratos, lípidos, proteínas, etc., que posteriormente se acumulan en las células y en los tejidos de los organismos simples y superiores. Además, por el proceso de fotosíntesis, también regulan el contenido de oxígeno y dióxido de carbono en la atmósfera, colaborando en el control del efecto invernadero, las lluvias ácidas y el adelgazamiento de la capa de ozono.

Las algas tienen una mayor productividad que las plantas terrestres, y no compiten con ellas por el terreno. Además se debe considerar que las algas se pueden cultivar en zonas marinas o en tierra, obteniéndose una cosecha continua. Las algas producen naturalmente aceite y algunas especies generan más carbohidratos y menos aceite, que pueden ser procesados y fermentados para producir etanol. Como las algas tienen un bajo contenido de celulosa, las convierte en un material muy adecuado para la degradación biológica.

La producción de aceite por medio de las microalgas es mucho mayor a las de las tradicionales semillas oleaginosas. Algunas estimaciones indican que soja, colza y palma aceitera producen al año respectivamente 50 m³/km², de 100 a 140 m³/km², y 610 m³/km², mientras que las microalgas pueden producir de 10.000 a 20.000 m³/km² en el mismo periodo de tiempo. En peso seco, se tienen estimaciones de productividades tan altas como 60-80 toneladas por hectárea y año; en contraste con cultivos convencionales que producen del orden de 10-30 t/año.

En los próximos apartados se comentará la producción de biocombustibles a partir de algas, así como estas constituyen el sistema biológico más eficiente para la captación y fijación del CO₂. Por otra parte no debe olvidarse que algunas algas, como la *Botryococcus braunii*, pueden alimentarse con CO₂ y aguas residuales, y con ello producir agua limpia e incluso potable, como se comentó en el apartado 2.2 de este capítulo. Posteriormente, en el apartado 3.5, se estudiará la producción de hidrógeno a partir de algas, y en el apartado 4.3 se presentarán otras aplicaciones y vías de su aprovechamiento.

3.1.5.1. Obtención de biocombustibles y otros productos a partir de las algas

Dependiendo de las especies, con la correspondiente distinta proporción de lípidos, carbohidratos y todo tipo de pigmentos pueden producir diferentes tipos de lípidos, hidrocarburos y otros aceites complejos, de los cuales no todos son adecuados para hacer biodiésel, bioalcohol, y otros productos minoritarios de interés farmacéutico y para la alimentación animal. Es por ello que para sacar el máximo provecho de todos los compuestos que constituyen las algas se debe recurrir al concepto de biorrefinería.

El contenido de aceite en algunas microalgas puede exceder del 80 % en peso de biomasa seca, aunque los niveles del 20 al 50 % son bastante comunes. Los lípidos de las microalgas son principalmente ésteres de glicerol formados por ácidos grasos con cadenas constituidas de 14-20 átomos de carbono. Estos ácidos grasos pueden ser saturados o insaturados, y es justamente la presencia de ácidos grasos poli-insaturados (*Poly Unsaturated Fatty Acids*, PUFA) como: ácido eicosapentaenoico, ácido arachidónico, ácido linoleico y ácido linolénico que hacen extremadamente interesante el cultivo de estos microorganismos.

La acumulación de lípidos en algas se produce durante periodos de stress ambiental, incluyendo crecimiento en medios con bajas condiciones de nutrientes. Una de las estrategias para inducir este stress en cultivos para la producción de biodiésel consiste en disminuir la ración de compuestos nitrogenados o inducir variaciones en la temperatura, el pH, inanición. etc. Modificando uno o más de estos parámetros el alga reacciona modificando su perfil químico. Por ejemplo, la deficiencia de elementos nutritivos como el nitrógeno limita la capacidad de crecimiento de las microalgas imposibilitando la síntesis de proteínas; pero en el caso de algunas especies como *Nannochloropsis sp* la carencia de nitrógeno es una condición imprescindible para obtener en tiempos relativamente breves, un aumento importante del contenido lipídico celular. Generalmente se logra un aumento más substancial de los triglicéridos con respecto a los lípidos de membrana. La senescencia también ha demostrado ser un elemento importante en la determinación porcentual del contenido de lípidos en la célula.

El tipo y cantidad de lípidos y carbohidratos producidos por micro-algas se encuentran relacionados, frecuentemente, con factores del medio ambiente como luz, temperatura, concentración de iones y pH. No es raro encontrar niveles de lípidos entre 20 y 40% sobre materia seca. En ocasiones los niveles de lípidos en micro-algas son extremadamente altos.

El alga seca retiene sus aceites que pueden extraerse mediante prensado (70 a 75% de aceite se obtiene de la materia seca) y en combinación con disolventes como hexano, benceno o éter. Como existen riesgos de toxicidad y explosión en el uso de algunos disolventes, el hexano es el que se usa mayoritariamente. Después de haberse extraído aceite mediante prensado, la pulpa resultante se mezcla con ciclohexano para extraer el remanente de aceite. El aceite se disuelve en el ciclohexano, y la pulpa se filtra fuera de la solución. La separación de aceite y ciclohexano se efectúa mediante destilación. Con la combinación de estos dos procesos (prensado y disolventes) es posible obtener alrededor de 90% del aceite contenido en algas. No es necesario tratar los excedentes de agua después de su uso en el cultivo de alga, sino que se usa nuevamente en el flujo continuo del sistema. Esta agua contendrá en ocasiones residuos útiles de algas. Sin embargo, habrá que añadir CO₂ en cantidad proporcional a la cantidad de agua residual reutilizada. El esquema básico de producción está esquematizado en la Figura 10.19.



Figura 10.19. Esquema básico de obtención de aceite de algas.

La calidad del aceite dependerá del tipo de alga utilizada. Generalmente el aceite proveniente de algas puede compararse con el aceite de soja. La pulpa de algas, post-extracción del aceite, contiene diversos compuestos nutritivos como, ácidos grasos poli-insaturados de cadena larga, vitaminas y antioxidantes como los betacarotenos. Puede utilizarse en las industrias alimenticias y farmacéuticas porque contienen también esteroides que pueden emplearse como elementos de construcción de hormonas. Además la cianobacteria es elemento potencial en aplicaciones bio-médicas en compuestos anti-virales, anti-microbiales y anti-cancerígenos. El precio de la pulpa de alga en Holanda oscilaba entre 1,0 y 3,0 €/kg en 2007.

Los procesos de transformación del aceite, lípidos, para producción de biodiésel son la transesterificación, tal como se ha descrito en el apartado 3.1.1.1. Todo este proceso se lleva a cabo en un reactor donde se producen las reacciones de transesterificación, y en posteriores fases se realiza la separación, purificación y estabilización.

Un caso singular es el de las especies de algas verdes *Botryococcus braunii* muy utilizada para la producción de biodiésel. Esta especie produce alta cantidad de hidrocarburos como terpenos, que constituye alrededor del 30 al 40% de su peso seco, en el que el botriococeno es el hidrocarburo predominante. Este puede ser utilizado para la producción de diésel, y también octano y queroseno. Para la producción de biodiésel a partir de botriococeno, primero debe encontrarse una cepa adecuada de *Botryococcus braunii* que produzca un alto rendimiento de hidrocarburo. Al seleccionar este tipo de cepas, puede que se pierdan atributos como resistencia a enfermedades, desventajas competitivas, etc. Por esta razón se necesitan fotobiorreactores para el cultivo de este tipo de cepas. La *Botryococcus braunii* es un alga colonial que crece principalmente en agua dulce y con frecuencia se la ve flotando sobre la superficie de aguas estancadas debido a la gran cantidad de hidrocarburos localizados extracelularmente que se encuentran en la matriz de la colonia dentro de glóbulos. En la fase de reposo contiene hidrocarburos hasta en un 86% del peso seco, cuando se extraen estos hidrocarburos con hexano.

Algunas algas poseen una elevada proporción de carbohidratos, en consecuencia son las más apropiadas para producir bioetanol. Las algas crecen gracias al proceso de fotosíntesis, en el que la luz del sol, el dióxido de carbono de la atmósfera, el agua y los nutrientes disueltos forman moléculas orgánicas complejas como el azúcar, los hidratos de carbono y la celulosa.

Ejemplo de este tipo de algas son las algas rojas llamada *Kappahycus alvarezii*, objeto de estudio del centro de investigación Central Salt & Marine Chemicals Research Institute (CSMCRI) de la India. De estas además de bioetanol se obtienen fertilizantes.

Esta alga se puede cultivar en balsas de bambú en el mar, a dos o tres kilómetros de la costa. Otro proyecto, este en producción industrial, la constituye la planta de bioalcohol de BioFields de México (Puerto Libertad, Sonora, México), en la que se utilizan cianobacterias, algas híbridas verdeazuladas, y su cultivo se realiza con agua del mar, terrenos “no utilizados” y además aprovechan el CO₂ de las emisiones de la central termoeléctrica de Puerto Libertad.

3.1.5.2. Cultivos de algas. Sistemas

Hay dos diseños básicos para la producción a gran escala de estos microorganismos: sistemas abiertos tipo carrusel, en los que el cultivo está expuesto a la atmósfera y los sistemas cerrados denominados fotobiorreactores. Los sistemas abiertos tipo carrusel, como el que se muestran en la Figura 10.20, pueden ser construidos de diferentes materiales (hormigón, plásticos, cerámicas) y están constituidos por canales poco profundos con un nivel de agua que no supera los 15-20 cm, en forma de circuito cerrado. Las piletas están divididas en dos o más pasillos por tabiques de hormigón. El medio de cultivo es impulsado mediante paletas rotatorias, que permiten alcanzar densidades celulares de hasta 0,7g de células (base seca) por litro. Generalmente ocupan grandes áreas de terreno (500- 5.000 m²), como puede observarse en la Figura 10.20.



Figura 10.20. Sistema de cultivo de algas del tipo de carrusel abierto con circulación del medio de cultivo.

Si bien los carruseles cuestan menos de construir y operar, la baja densidad celular origina varios inconvenientes, incluyendo baja productividad, fácil contaminación, costosa recuperación del producto de medios diluidos y dificultad para el control de la temperatura. Estos inconvenientes estimularon el desarrollo de fotobiorreactores construidos con materiales transparentes como vidrio y policarbonato, entre otros. Y a diferencia de los carruseles abiertos, los fotobiorreactores permiten esencialmente cultivos unialgales por períodos prolongados, mayor rendimiento, además del control de las condiciones de cultivo, incluidas las de contaminación. Aunque mucho más eficiente que los sistemas abiertos, siguen existiendo dos problemas esenciales: la incidencia de la radiación solar sólo se lleva a cabo por la superficie y la concentración es muy baja (1 g/l). La Figura 10.21 muestra la fotografía de diversos biorreactores



Figura 10.21. Fotografía de diversos tipos de biorreactores.

Existe un parámetro importante a considerar en un biorreactor consiste en la forma en cómo se elimina el oxígeno generado, ya que su exceso es letal para el cultivo.

Para la recuperación de la biomasa algal del cultivo se han planteado diferentes métodos: centrifugación, floculación y sedimentación, filtración, microfiltración y ultrafiltración. La tecnología elegida depende de la especie con la cual se está trabajando.

3.1.5.3. Recolección y obtención del aceite

Las algas, básicamente, se recolectan de su medio de cultivo a través de algún proceso de separación adecuado y luego se extrae el aceite. Existen tres métodos bien conocidos de extracción de aceites de algas:

- *Expeller/press*: las algas después de ser secadas mantienen su contenido de aceite, entonces son comprimidas con una prensa de aceite. A veces se utiliza una combinación de prensa y disolventes de extracción.
- Método del disolvente de hexano: Este es uno de los disolventes de extracción preferidos ya que no es muy caro. Una vez que el aceite se ha obtenido con una prensa se utiliza el ciclohexano para extraer el contenido remanente del alga. Luego por destilación se separa el ciclohexano del aceite.
- Extracción por fluido supercrítico: es un método capaz de extraer el 100% del aceite, pero necesita un alto equipamiento. El CO₂ es licuado hasta el punto de tener las propiedades de un líquido y un gas, entonces este fluido licuado actúa como un disolvente de extracción para el aceite algal.

Existen otros métodos de extracción mucho menos utilizados como la extracción enzimática, el choque osmótico y la extracción a través de ultrasonidos.

3.1.5.4. Importancia de las algas en la captura del CO₂

Parece el sueño de cualquier científico: conseguir un combustible de características similares al petróleo, que no se agote, utilizable en los vehículos actuales y que,

además, no sólo no produzca más CO₂ sino que ayude a reducir las emisiones de este gas culpable del calentamiento global del planeta.

De todos los estudios sobre algas lo que más destaca es que el proceso de su reproducción necesita grandes cantidades de CO₂. A diferencia de lo que comúnmente se piensa, el gran pulmón de la tierra no es el Amazonas, pues de día produce oxígeno y toma CO₂, pero de noche realiza el proceso contrario, sino que son los océanos; y la ventaja, de un próximo futuro, será que el biopetróleo se producirá aplicando al fitoplancton luz solar y dióxido de carbono.

Entre las algas más eficientes para la captura y fijación del CO₂ se puede destacar la *Discosphaera tubifera*, perteneciente al grupo de las cocolitoforales. En una torre de un metro cuadrado de superficie se puede generar en un sólo día el producto energético equivalente al que generan mil metros cuadrados cultivados con girasoles en un año. Cada torre de tres metros cúbicos de agua puede fijar 150 kilogramos de CO₂ por hora.

La fijación de CO₂ por cultivos de algas fotoautotróficas tiene el potencial de disminuir el total de emisiones a la atmósfera, lo que ayudaría a aliviar la tendencia actual de acumulación de este gas y el consiguiente efecto invernadero que produce.

En sistemas intensivos de cultivo de microalgas se puede considerar el uso de los gases de la chimenea de las plantas generadoras de energía y/o grandes industrias, para así secuestrar el CO₂ emitido, como el de la planta de bioalcohol de BioFields de México, comentado anteriormente. Esta tecnología se está implantando en diversos países, como en Seabiotic en Israel, o en EE.UU. donde existen varias plantas que quemar gas natural y están cultivando 7.000 kg de algas por central.

En España el proyecto CO2AlgaeFix, iniciativa liderada por la empresa AlgaEnergy, y avalada por la Dirección General de Medio Ambiente de la Unión Europea, iniciaba el proyecto LIFE en 2011, con la construcción de una planta de microalgas destinada a la captación y biofijación de CO₂ a escala preindustrial procedente de la central de ciclo combinado de Arcos de la Frontera, de 1.600 MW. En una previsión inicial esta instalación se utilizaría el alga *cianobacteria Anabaena*, produciendo unas 100 toneladas de biomasa de algas al año. El sistema de cultivo sería del tipo de reactor vertical plano, conocido como jaula-bolsa, que permite mantener unas condiciones óptimas para el crecimiento de las microalgas, para capturar y fijar la emisión de 200 toneladas anuales de CO₂, de los gases de la central térmica anexa (el equivalente a lo que absorberían 34.000 árboles). Después de cuatro años, se han probado diversos tipos de reactores, tubulares, verticales planos y *raceways*, y distintas especies de algas y sistemas de cultivo. La *Chlorella vulgaris* es con la que se ha conseguido el mejor rendimiento, productividad volumétrica de biomasa, de 0,6g/l y día en reactores tubulares y de 0,3 g/l y día en reactores verticales planos, consiguiéndose los objetivos planteados en el proyecto. Si bien el proyecto ha finalizado en junio de 2014, la planta continúa en funcionamiento y evolucionando, así en los próximos meses se construirá el mayor fotobiorreactor tubular del mundo con 85.000 litros de capacidad de cultivo. Toda la información del proyecto puede consultarse en el Informe Layman de CO2AlgaeFix, de carácter divulgativo, y en el Manual de Buenas Prácticas.

Para estos proyectos se debe identificar, con precisión, las especies y cepas con mayor tolerancia a la concentración de CO₂, como se ha comentado en el proyecto CO2AlgaeFix. Aunque la concentración de CO₂ varía en las diferentes emisiones de cualquier sistema de combustión, se asume que lo habitual es del 15 al 20% en volumen. Sin embargo la gran especialización que existe en determinadas especies de algas como la *Chlorococcum littorale* puede crecer incluso en concentraciones de CO₂

tan elevadas como el 60%. Otra especie, la *Euglena gracilis* puede tolerar hasta un 45% de concentración de CO₂.

Otro aspecto a tener en cuenta para poder emplear los gases de chimenea de las plantas generadoras de electricidad o las industrias es que muchas veces salen por las chimeneas a muy altas temperaturas, 120 °C o más, por lo que los microorganismos a escoger para este uso deben ser termofílicos y poder tolerar elevadas temperaturas en su medio de crecimiento. Esto implica una ventaja adicional en cuanto a la reducción de costes para las industrias ya que no es necesario enfriar los gases de chimenea; en contrapartida, al emplearse sistemas abiertos de cultivo se pueden registrar elevadas tasas de evaporación de agua.

También se pueden emplear especies de microalgas marinas. De esta manera el medio de cultivo es la misma agua marina con la disminución de costes de funcionamiento al no tener que emplearse agua dulce depurada o tratada. Entre las especies marinas más estudiadas existe la *Tetraselmis sp.*, *Synechococcus sp.*, *Chlorococcum littorale*, *Clamydomonas sp.*, *Nannochloropsis salina* y *Phaeodactylum tricornutum*.

3.2. OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES A TRAVÉS DE PROCESOS TERMOQUÍMICOS

A diferencia de los procesos bioquímicos los procesos termoquímicos se realizan a partir de la utilización de calor como fuente de transformación. Dependiendo de las condiciones en que dichos procesos se llevan a cabo es posible identificar la pirólisis, la gasificación y la combustión directa. Dada la importancia de este último proceso, en la valorización energética de biomasa, será explicado en forma más extensa.

La valorización energética de la biomasa a través de procesos termoquímicos permite en el caso de la pirólisis y la gasificación, la obtención de un biocombustible con propiedades homogéneas, independiente de las características de la biomasa inicial. Lo cual le confiere una gran versatilidad en el uso y aplicación a procesos industriales convencionales.

3.2.1. Pirólisis de la biomasa

La pirólisis se puede definir como la descomposición térmica de un material en ausencia de oxígeno o cualquier otro reactante. En este caso la biomasa es craqueada a una temperatura que oscila alrededor de 500 °C. Esta descomposición se produce a través de una serie compleja de reacciones químicas y de procesos de transferencia de materia y calor. La pirólisis también aparece como paso previo a la gasificación y la combustión. Se trata de un proceso utilizado desde hace mucho tiempo para producir carbón vegetal. Esquemáticamente corresponde al croquis de la Figura 10.22.

La pirólisis consigue la recuperación energética de residuos biomásicos, a un bajo costo, permitiendo la obtención de biocombustibles gaseosos, líquidos o sólidos homogéneos. Estos biocombustibles pueden ser utilizados luego en procesos de gasificación o combustión para la producción de electricidad o vapor industrial. De la misma forma, en el caso de la valorización material, es un proceso que se utiliza para la recuperación de materias primas contenidos en productos.

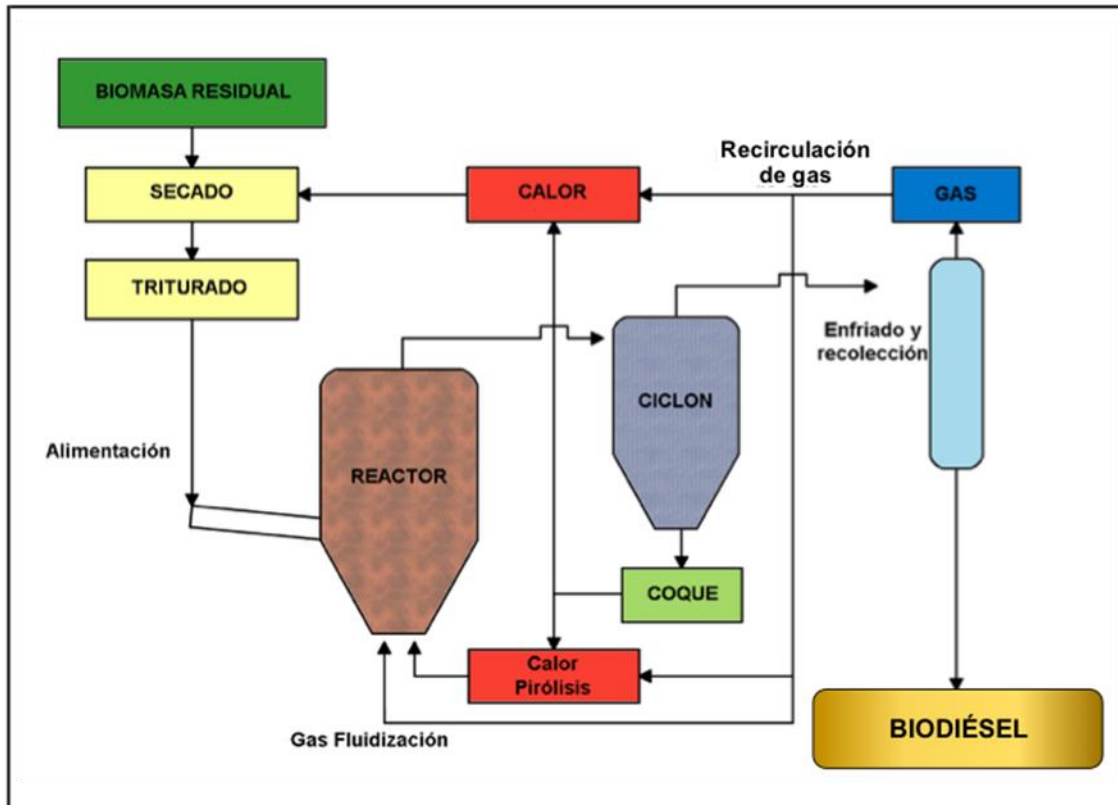


Figura 10.22. Ciclo de pirólisis de biomasa

Se puede considerar que la pirólisis comienza en torno a los 250 °C, llegando a ser prácticamente completa alrededor de los 500 °C, aunque ello es función del tiempo de residencia del residuo en el reactor. Permite la producción de diversos productos en función de la tecnología utilizada y el tratamiento posterior que se haga de ellos, dando lugar a diversos usos y aplicaciones de estos productos generados en este proceso. Las reacciones propias de la pirólisis permiten la formación de productos primarios, entre los que se encuentran:

- Compuestos gaseosos principalmente de CO, CO₂, CH₄, C₂H₆ y pequeñas cantidades de hidrocarburos ligeros.
- Compuestos líquidos entre los cuales destacan las cetonas, ácido acético y compuestos aromáticos (estos se hallan en fase vapor a la temperatura del proceso, luego condensan durante el enfriamiento).
- El residuo carbonoso de la pirólisis, coque, conocido como “char” que puede ser utilizado como combustible o para la producción de carbón activo.

En términos generales el proceso de pirólisis posee las siguientes etapas o fases:

- **Primera fase.** Endotérmica, llevada a cabo a temperaturas inferiores a 200 °C, la biomasa va perdiendo la humedad, se desprende vapor de agua, algo de metanol y ácido acético.
- **Segunda fase.** Es también endotérmica, realizada a temperaturas de entre 200 °C y 280 °C. Se produce la precarbonización de la biomasa, generando algunos compuestos líquidos y gaseosos (principalmente jugo piroleñoso y CO₂ respectivamente).
- **Tercera fase.** Es exotérmica, se produce entre los 280 °C y los 500 °C, se forman algunos alquitranes ligeros y se incrementa la producción de líquidos piroleñosos, con un mayor contenido de ácidos y aldehídos fórmicos. Además

se generan una cantidad importante de gases combustibles como el CO, CH₄ y H₂.

- **Cuarta fase.** Se desarrolla sobre los 500 °C, también exotérmica, se siguen originando compuestos volátiles, quedando un residuo carbonoso y generándose gran proporción de H₂, CO y CO₂.

En términos de eficiencia, un proceso como el descrito permite a partir de 1.000 kilogramos de madera, la obtención de, aproximadamente, 330 kilos de carbón, 110 kilos de alquitranes, 360 kilos de líquido piroleñoso y 200 kilos de gas.

Sin embargo el poder calorífico del gas de pirólisis es bajo si se le compara con el de un combustible convencional como el gas natural, tal como refleja la Figura 10.23. Los valores de esta tabla constituyen una primera referencia, pues su verdadero valor depende del tipo de biomasa y proceso concreto de pirólisis y sobre todo en la gasificación del agente oxidante usado, con lo que se consigue un poder calorífico mayor o menor.

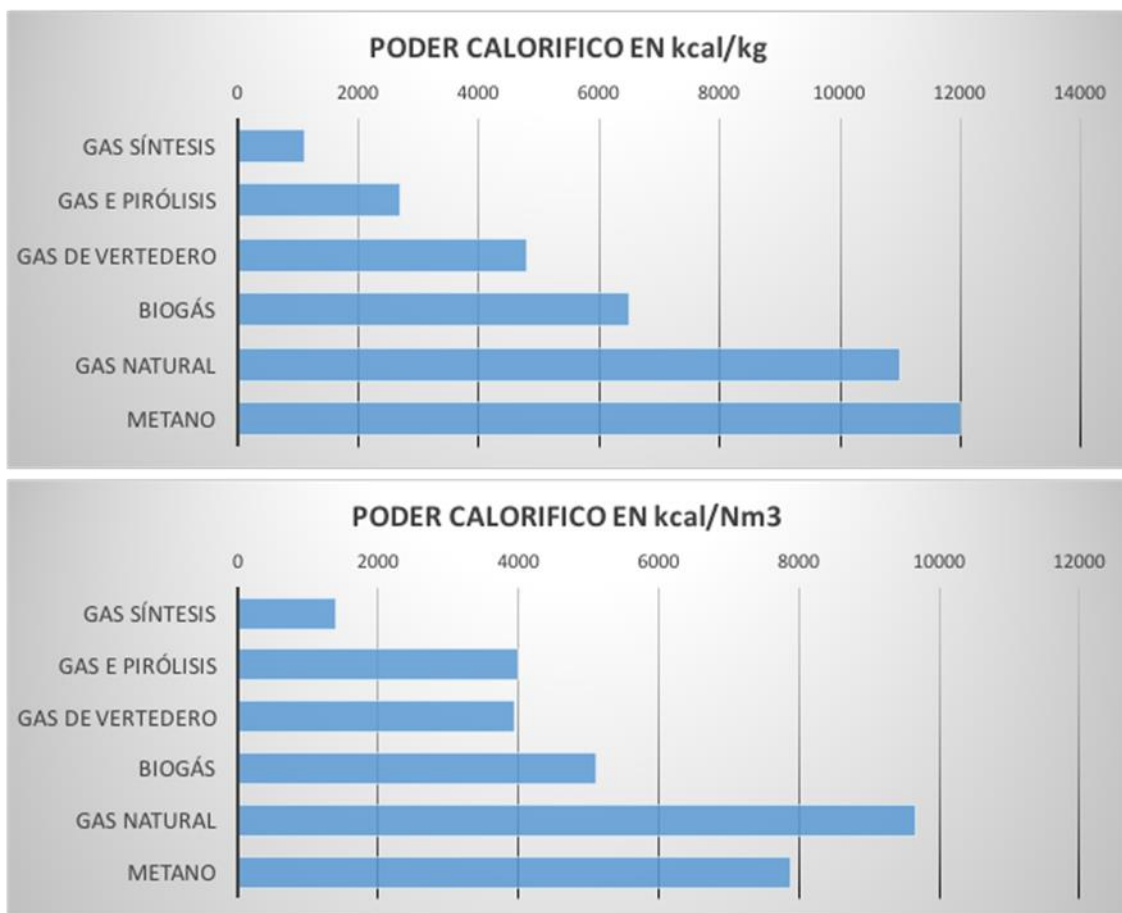


Figura 10.23. Poder calorífico de distintos tipos de gases por kg y por Nm³.

Es por esta razón, su bajo poder calorífico, que los procesos pirolíticos deben ser optimizados para aumentar la proporción de fracción líquida, a través de la llamada pirólisis flash. Este líquido puede ser utilizado como combustible o como precursor de otros compuestos químicos.

Dependiendo de las condiciones físicas en que se efectúe la pirólisis, se pueden diferenciar distintos tipos de procesos, que a su vez poseen una serie de parámetros que determinan los productos obtenidos en cada proceso, así aspectos como la temperatura o la presión pueden tener una gran importancia para determinar los

productos que se pretende obtener. La Tabla 10.18 establece un resumen de los principales procesos que se utilizan.

Tabla 10.18. Características de los diferentes procesos de pirólisis.

Pirólisis	Tiempo residencia	Velocidad calentamiento	Presión (bar)	Temperatura Max °C	Principal Producto
Carbonización	Horas-días	Muy baja	1	400	Sólido
Convencional	5-30 min	Baja	1	600	Gas líq. y sólido
Fast	0.5-5 seg	Muy Alta	1	650	Líquido
Flash-líquido	< 1 seg	Alta	1	<650	Líquido
Flash-gas	< 1 seg	Alta	1	>650	Gas
Ultra	<0.5 seg	Muy alta	1	1.000	Gas
Vacío	2-30 seg	Media	<0.1	400	Líquido

La pirólisis flash, llevada a 1.000 °C en menos de un segundo, tiene la ventaja de asegurar una gasificación casi total de la biomasa, aunque la gasificación total puede obtenerse también mediante una oxidación parcial de los productos no gaseosos de la pirólisis.

La pirólisis se utiliza, con frecuencia, como complemento de otros procesos como la incineración, la gasificación o la digestión anaerobia, por ello es posible situarla en el contexto que se muestra en la Figura 10.24, a través de la cuál es posible establecer las vías de aprovechamiento de la biomasa residual para su valorización energética.

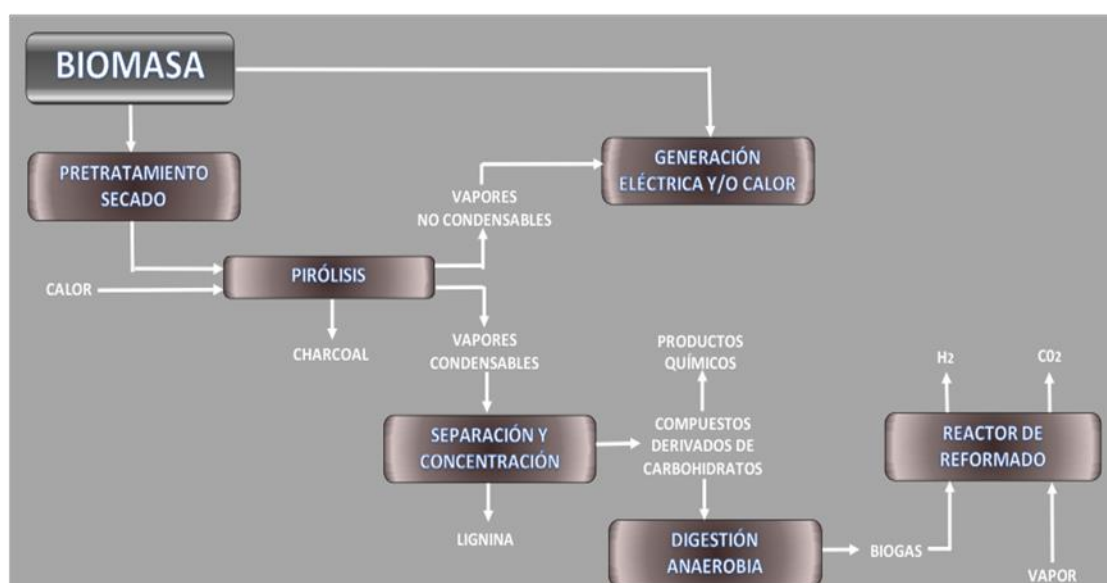


Figura 10.24. Diagrama de utilización de la biomasa.

- **Ventajas, generales, de la pirólisis**
 - Muy baja emisión de partículas.
 - Posibilidad de aplicación al tratamiento de suelos contaminados.
- **Desventajas, generales, de la pirólisis**
 - Generación de coque de difícil reutilización.
 - Posibilidad de formación de productos tóxicos intermedios.

3.2.2. Obtención de biocombustibles a través de la gasificación

La gasificación es un proceso similar a la pirólisis, con la diferencia que debe existir la presencia de una cantidad controlada de agentes oxidantes. Este oxidante, que puede ser aire, oxígeno, hidrógeno, CO₂, o vapor de agua, o una mezcla de alguno de ellos, reacciona con el residuo carbonoso generado en la descomposición térmica de la biomasa produciendo un gas con propiedades energéticas que dependen del proceso utilizado y el agente oxidante utilizado. De esta forma las técnicas de gasificación permiten la obtención de un biocombustible gaseoso homogéneo, a partir de la transformación de biomasa de origen heterogéneo, pero de bajo poder calorífico tal como se indica en la Figura 10.23.

El proceso básico bajo el cual se desarrolla la gasificación es la interacción de vapor a una temperatura elevada, oxígeno, u otro agente oxidante, con la biomasa sólida. Dichas reacciones no ocurren con facilidad ya que requieren temperaturas elevadas para que se lleven a cabo, alcanzando temperaturas sobre los 1.000 °C y presiones que superan hasta 30 veces la presión atmosférica (según la tecnología empleada). Un resumen del proceso es el siguiente:

La gasificación viene determinada por cuatro etapas encadenadas que, dependiendo de cómo se lleven a cabo individualmente producirán una mejor o peor gasificación del combustible biomásico. Estos procesos son los siguientes:

- **Secado.** Esta primera etapa se produce cuando la biomasa carbonosa entra en el gasificador, que al encontrarse con la alta temperatura interna del reactor hace que se libere el agua de humedad. La consecuencia inmediata es la transformación del agua en vapor.
- **Pirólisis.** Es la etapa que va asociada a todo proceso termoquímico, y se produce a partir de los 300-500 °C, extendiéndose hasta los 700 °C. En esta fase que se produce la descomposición del material carbonoso, liberándose la materia volátil, volátiles ligeros, alquitranes, volátiles pesados, y char o residuo carbonoso y cenizas.
- **Reacciones secundarias.** A partir de 500 °C se empiezan a producir numerosas reacciones entre todos los productos obtenidos durante la pirólisis, originándose procesos de craqueo, oxidación y reducción.
- **Gasificación.** En esta última etapa es donde se produce la gasificación de los alquitranes y del char generados en las anteriores etapas a temperaturas que oscilan entre los 800 y 950 °C. Estas reacciones permiten obtener un producto gaseoso que está formado principalmente por H₂, CO, CO₂, CH₄ y C₂H_x, junto con un residuo carbonoso, y la parte de alquitranes que no han reaccionado, que pasan a constituir un producto indeseable de la reacción.

La obtención de los diferentes productos y, por lo tanto de los mecanismos seguidos por las reacciones, va a depender de numerosos factores. El resultado es una matriz de reacciones muy compleja, en el que tiene lugar multitud de reacciones heterogéneas y homogéneas, en serie y en paralelo.

Por otra parte, uno de los principales problemas que presenta la aplicación de esta tecnología es la aparición de productos condensables en el gas a su salida, alquitrán (o tar). El tar se origina como consecuencia de la oxidación incompleta de las moléculas más pesadas. Se considera que su formación está directamente relacionada con la lignina presente en el combustible carbonoso. Su aparición, obliga en algunos casos a someter a los gases a un proceso de lavado exhaustivo, antes de poder emplearlo tanto para la obtención de biocombustibles de segunda generación, como para el empleo del gas resultante en un motor de combustión interna o en una

turbina, para generar energía eléctrica. El alquitrán puede ser eliminado por diferentes mecanismos como craqueo térmico, *scrubber*, venturis, etc., con lo que se puede llegar a eficiencias del 99%, pero estos últimos presentan el inconveniente de perder la energía contenida en el alquitrán.

Evidentemente en todas estas reacciones es crucial el agente oxidante. La utilización del aire da lugar a un gas con bajo poder calorífico, pero a un costo varias veces menor si se compara con el gas de síntesis que se obtiene con el empleo, por ejemplo, de oxígeno puro. En este caso, si bien permite la obtención de un gas de alto poder calorífico, ya que no tiene nitrógeno, requiere de inversiones adicionales para su producción, lo cual solo se justifica en instalaciones industriales de gran envergadura. El empleo de oxígeno es interesante cuando se pretende obtener un gas apto para su posterior aplicación en procesos de Fischer-Tropsch ya que no se encuentra diluido por el nitrógeno, lo que mejora el rendimiento de la reacción. En la gasificación con vapor de agua se produce un gas de poder calorífico medio. Su gran inconveniente radica en que se trata de un proceso endotérmico, aunque permite aumentar la concentración de hidrógeno en el gas de síntesis. En la gasificación con una mezcla de oxígeno, aire y vapor de agua, el gas de síntesis producido tiene un contenido energético medio entre 2.000 y 4.000 kcal/Nm³. Esta opción soluciona la endotermicidad del proceso en el caso de trabajar solo con vapor.

La Tabla 10.19 muestra una estimación de los resultados que se obtendrían al utilizar cada uno de estos gases oxidantes.

Tabla 10.19. Características de los gases obtenidos por la gasificación de biomasa. (Adaptación a partir de Camps 2002)

Gas oxidante	Contenido energético del gas obtenido	Principales usos del gas de síntesis
Aire	< 6 MJ/Nm ³	Quemadores de caldera o turbinas de gas
Oxígeno	10 – 20 MJ/ Nm ³	Gas de síntesis para la producción de metanol, gasolinas o amoniaco.
Vapor de agua + Oxígeno	10 – 20 MJ/ Nm ³	Gas de síntesis para la producción de metanol, gasolinas o amoniaco

Existe una variedad amplia de reactores que se utilizan para los procesos de gasificación de biomasa, su elección depende de varios factores como pueden ser la granulometría del residuo, la humedad de éste, o la limpieza del gas requerida. Los principales reactores utilizados son:

- **Lecho fijo:** Donde es posible distinguir los denominados a contra corriente (*updraft*) y corriente paralela (*downdraft*).
- **Lecho fluidizado:** Donde se debe distinguir los sistemas denominados lecho burbujeante y circulante.

El proceso de gasificación posee varias ventajas, entre las principales cabe mencionar:

- Versatilidad en la valorización del residuo, ya que se puede aprovechar la energía que contiene en forma de calor, electricidad o como gas de síntesis para la obtención de productos químicos.

- Buen rendimiento eléctrico, en el caso de que esa sea la vía deseada para el aprovechamiento del residuo, los rendimientos totales permiten la obtención de 1 kWh de energía a partir de, aproximadamente, 1 kilogramo de biomasa.
- Menor impacto ambiental.

La principal diferencia de la gasificación con la incineración es que en la obtención del gas de síntesis se realiza una oxidación parcial, en cambio la incineración realiza una oxidación completa de la biomasa. El gas de síntesis es de bajo costo y flexible para múltiples usos. El proceso de gasificación posee similitudes importantes con el proceso de obtención de biogás, ya que ambos permiten la obtención de un gas de moderado poder calorífico a partir de biomasa. Esquemáticamente, la comparación de dichos procesos se muestra en la Figura 10.25.

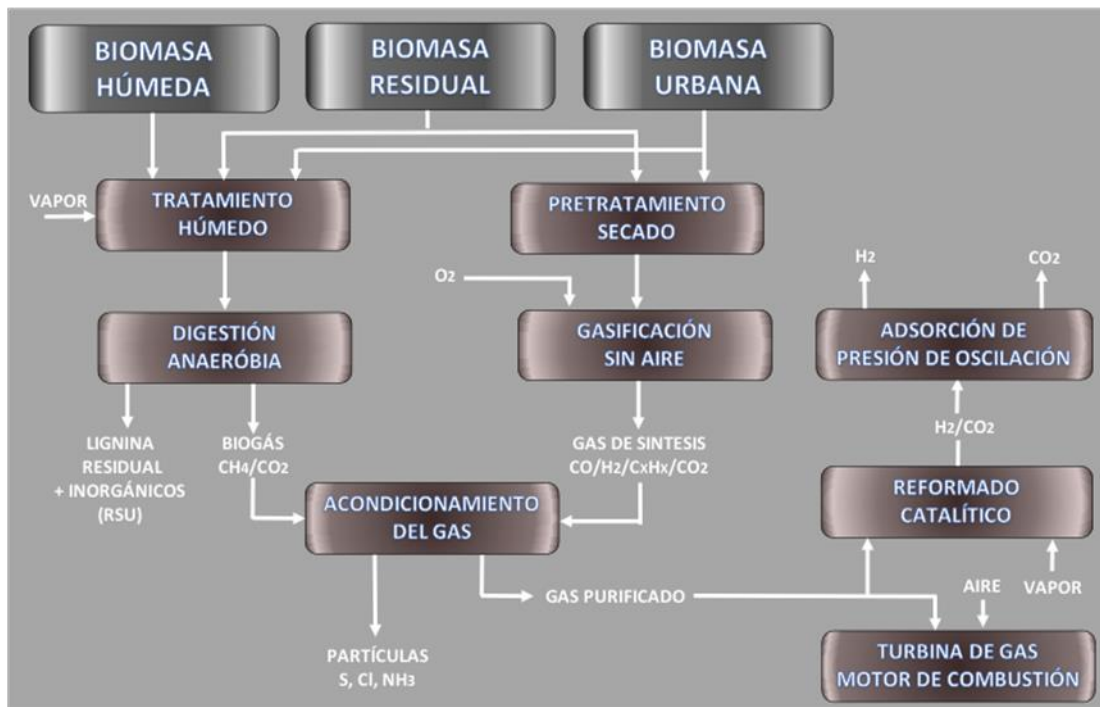


Figura 10.25. Producción de gas de síntesis, biogás e hidrógeno a partir de biomasa.

El gas de síntesis tiene muchas posibles valoraciones o aplicaciones. Las más relevantes son como combustible para una caldera, un motor de combustión o una turbina y la síntesis de algunos compuestos.

La valorización en una caldera, exige que el gas de síntesis se someta a combustión, seguida de una oxidación y postcombustión, a fin de aprovechar toda su potencia energética. Luego mediante el intercambiador de la caldera se puede aprovechar esta energía en un proceso térmico como puede ser un secado o generar electricidad mediante un ciclo de Rankine.

El gas de síntesis se aplica sin problemas como combustible a un motor de combustión de gas, aunque las exigencias, o limitaciones, son consecuencia de la cantidad de alquitranes y partículas. Normalmente se requiere un acondicionamiento. Este puede realizarse con ciclón, *scrubber* y filtrado, aunque para realizar estas operaciones normalmente hay que enfriar el gas de síntesis a temperaturas por debajo de los 100 °C o incluso los 50 °C, por lo que se necesita un intercambiador y un separador del agua condensada. En el mercado hay motores especialmente preparados para utilizar el gas de síntesis

En el caso de las turbinas, habitualmente con una capacidad de producción de electricidad superior a 1 MWe, se requiere también un tratamiento aún más importante, y es precisamente este aspecto uno de los puntos críticos y aún no totalmente resuelto de ciclo BIGCC que se comentará en uno de los siguientes subapartados. También hay la posibilidad de aplicarlo a microturbinas, con potencias de 10 a 200 kWe, aunque es un campo todavía en desarrollo.

El gas de síntesis se puede emplear como materia prima para la generación de otros productos como hidrogeno, dimetil éter o DME, metanol, o productos derivados de la síntesis Fischer-Tropsch como la nafta y diésel Fischer-Tropsch. Este tiene características parecidas al diésel de origen fósil y puede ser utilizado en un motor convencional sin llevar a cabo ninguna modificación, aunque presenta un menor grado de lubricidad por lo que podría aconsejarse la adición de algún lubricante adicional.

3.2.2.1. Diversos tipos de gasificación para la biomasa

La biomasa se puede gasificar con diversas tecnologías de gasificación que, básicamente, se diferencian por el tipo de reactor. La práctica totalidad de los gasificadores existentes pertenecen a alguno de los siguientes tipos que se describen a continuación.

Gasificador de lecho descendente o fijo: Es la técnica más antigua y la que cuenta con mayor número de instalaciones industriales, principalmente aplicadas al carbón. Se puede usar tanto con aire solo, como con oxígeno y vapor de agua, que son introducidos por la parte inferior en contracorriente con el sólido que se alimenta por la cabeza del gasificador. La extracción de cenizas suele hacerse por la parte inferior del lecho. El sólido requiere un troceado y un cribado previo para evitar la alimentación de partículas demasiado finas que pudieran ser arrastradas por la corriente gaseosa. La eficiencia del sistema es relativamente buena pero los gases contienen una elevada cantidad de alquitranes.

- **Lecho fluidizado:** Son gasificadores de construcción más sencilla que los de lecho fijo. El sólido se alimenta con un tamaño más fino que en el caso anterior, inyectándose el agente gasificante por la parte inferior. La reacción tiene lugar con el sólido suspendido en la corriente gaseosa, lo que facilita el contacto entre ambas fases. La extracción de las cenizas suele hacerse por el fondo.
- **Corriente de arrastre:** El sólido finamente pulverizado es introducido en el reactor donde una corriente gaseosa lo arrastra, produciéndose la gasificación de modo casi instantáneo. La temperatura de reacción es elevada, lo que evita la formación de alquitranes en el gas. La escoria fundida suele extraerse por la parte inferior.

3.2.2.2. Producción de electricidad a partir de la gasificación de biomasa

Las instalaciones de gasificación más atractivas son las instalaciones de mediana o gran capacidad. Estas siempre son diseñadas a medida para una aplicación y cantidad de combustible, residuo o biomasa a tratar determinada. Muchas de estas grandes instalaciones de gasificación utilizan carbón como materia prima en su proceso como la de Elcogas de Puertollano (España). Pero, también hay algunas instalaciones grandes, que utilizan biomasa, como la de Güssing en Austria. Esta actualmente está constituida por una planta de cogeneración de biomasa y otra de biogás y biodiésel. De tal manera que se establece una combinación de procesos que produce y reutiliza gas de síntesis, calor, metano y biodiésel, y constituye el embrión de una biorrefinería. Consume biomasa forestal y residuos de poda de roble de la región, con un consumo de 2,5 t/h. La central se compone, fundamentalmente, de un gasificador de lecho

fluidizado de 8 MW de potencia, sobre la que se insistirá con más detalle en el apartado 7.3 de este capítulo. La biomasa se gasifica con vapor de agua. Los residuos del gasificador vuelven al reactor hasta que se gasifican totalmente. El gas de síntesis se utiliza para producir:

- 2 MWe de electricidad mediante un turbogenerador.
- El equivalente a 1 MW de metano, en una planta piloto, en donde el gas de síntesis se depura y sufre una reacción en la que el CO y el H₂ se convierten en metano, que se inyecta directamente a la red de gas, y agua. Este proceso se denomina “*upgrading*”.
- Biodiésel, a pequeña escala por el proceso Fischer-Tropsch, unas 250 t/año, apto para cualquier motor.
- 4,5 MW de calor residual, que se inyecta en el *district heating* municipal.

Para utilizar el gas de síntesis, primero se enfría, luego se filtra con calcita y se lava con el biodiésel producido. Este, cargado de alquitranes, se reenvía a la cámara de combustión del gasificador donde se quema directamente. El proceso reduce costes de lavado con agua. Se utiliza la biomasa de roble ya que produce menos alquitranes que la del pino. Se eliminan unas 700 t/año de cenizas.

Los rendimientos obtenidos:

- Si solo se contabiliza la producción de electricidad el rendimiento es de 25%.
- Si se contabilizan todo el aprovechamiento térmico se alcanza el 85%. El 10% de la energía se utiliza para autoconsumo.
- De 3 kg de astilla de roble se obtiene 1 m³ de gas de síntesis.
- De 5 kg de astilla de roble se produce 1 litro de biodiésel.
- De 5 m³ de gas de síntesis se obtiene 1 m³ de metano puro.

Otras plantas como las Kokemaki en Finlandia, Oberwart, Klagenfurt y Villach en Austria o Harboore en Dinamarca son ejemplos de cómo puede ser el futuro de este tipo de grandes instalaciones.

En España se ha construido una planta de cogeneración por gasificación de biomasa en Xàtiva (Valencia, España) que entró en funcionamiento en 2010 con una potencia de 1,6 MW. Se alimenta con residuos forestales, 33.000 kg de biomasa/día, unas 11.000 t biomasa/año, y produce 13.000 MWh/año de energía eléctrica.

En España existe EQTEC, empresa de ingeniería de matriz catalana, dedicada a la fabricación de gasificadores para la generación de gas de síntesis y electricidad a partir de residuos.

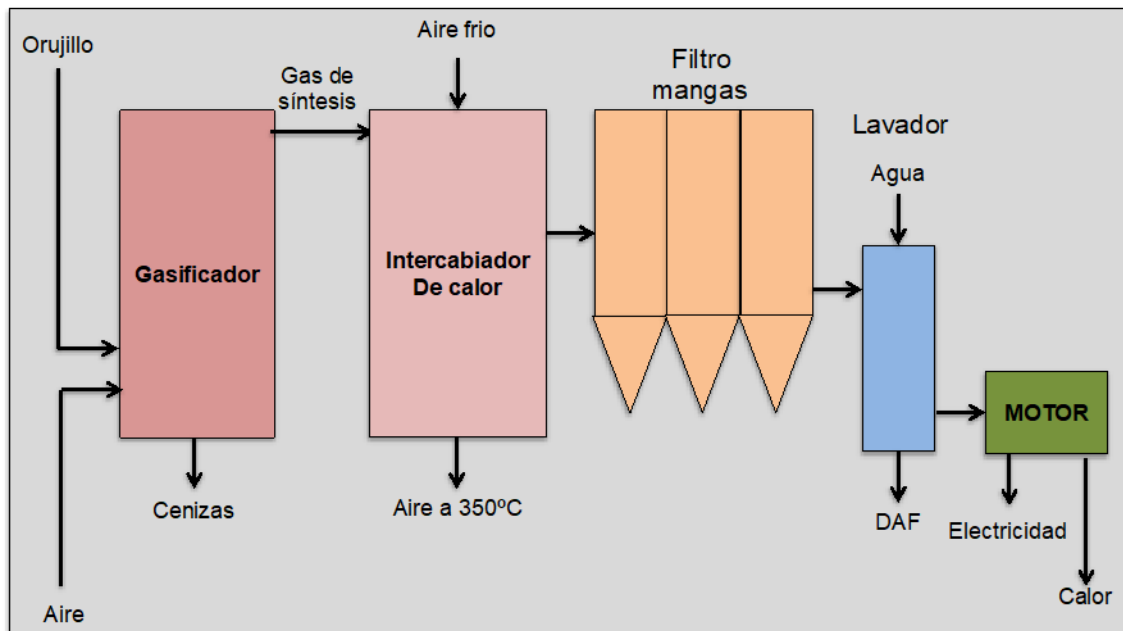


Figura 10.26. Principio de funcionamiento de la planta de cogeneración con orujillo.

La planta se halla en funcionamiento en una industria agroalimentaria que produce aceite y otros derivados de la aceituna. El residuo que genera esta industria se denomina orujillo y es una mezcla de restos de aceite vegetal y hueso que se recuperan en la centrifuga después del prensado de la aceituna. El contenido en cenizas es del 6%.

El gasificador es de lecho fluidizado. El combustible (orujillo, con una humedad del 15%) se inyecta por la parte inferior del lecho. Por la parte superior sale el gas de síntesis a una temperatura de 720 °C (la temperatura, en este caso no puede ser superior ya que esta corresponde al punto de fusión de las cenizas que contienen mucho K_2O). Seguidamente un intercambiador de calor enfría el gas de síntesis hasta 350 °C. El aire de enfriamiento abandona el intercambiador a 150 °C. Sin solución de continuidad, el *syngas* entra en el filtro de mangas (las mangas deben cambiarse con frecuencia). Después del primer lavado el gas de síntesis se comprime para que pueda enviarse al motor.

Para tratar el agua de lavado, que arrastra alquitranes hay instalado un DAF (sistema de inyección de coagulantes y sedimentación de partículas en el agua de lavado). Finalmente el gas de síntesis limpio se calienta ligeramente y se envía a los motores de cogeneración.

La generación se lleva a cabo con motores Jenbacher de 2 MW (eléctricos) cada uno. La planta dispone de un total de 3 motores que generan una potencia eléctrica de 6 MW. Los motores funcionan una media de 7.600 horas al año, lo que produce una energía eléctrica de 45.600 MWh/año. Cada uno de los motores lleva más de 25.000 horas de funcionamiento (en enero de 2017). El autoconsumo del conjunto es del orden del 8%.

Con los gases de escape calientes de los motores se producen 5 t/h de vapor saturado a 5 bars. El agua caliente de refrigeración de las camisas de los motores se emplea para el secado del orujillo y precalentamiento del agua a vaporizar.

La Tabla 10.20 muestra las principales características del conjunto de gasificación de EQTEC en la planta agroalimentaria descrita.

Tabla 10.20. Ficha técnica de la planta de cogeneración a partir de orujillo

COMBUSTIBLE RESIDUAL		
PCI orujillo	4.000	Kcal/kg
PCI orujillo	4,65	MWh/t
Presentación	Polvo entre 6 y 0,2 mm	
GASIFICADOR		
Tipo	Lecho fluidizado	
Cantidad	4	Unidades
Alimentación (de diseño)	1,15	t/h
Potencia térmica (entrada)	5,35	MW
Rendimiento GS (en frío)	76%	
Potencia salida	4,06	MW
Potencia total	16,26	MW
MOTORES		
Cantidad	3	Unidades
Potencia total entrada	16,26	MW
Potencia entrada motor	5,42	MW
Rendimiento eléctrico	37,5%	
Potencia eléctrica	2	MW
Potencia térmica (gases)	4,22	MW
Potencia térmica (agua)	4,56	MW
Potencia Gas Síntesis	1,50	kWh/Nm ³
RENDIMIENTOS		
Electricidad/Energía entrante	28,5%	
Electricidad/Energía entrada motor	37,5%	
Autoconsumo sistema	8,5%	
Horas funcionamiento motor (aprox.)	7.600	
Horas funcionamiento gasificador	8.300	

La misma empresa, EQTEC, está construyendo un par de instalaciones, de 8 MW eléctricos, en el sur de Inglaterra para la gasificación de CDR procedente del RSU. Esta circunstancia abre grandes posibilidades al futuro desarrollo de la valorización energética de residuos.

Las principales diferencias respecto al funcionamiento con biomasa son:

- El combustible (CDR) debe peletizarse.
- El tamaño del gasificador dependen de las propiedades térmicas del combustible: densidad aparente, tamaño y volatilidad.
- La temperatura de trabajo es cercana a los 1.000 °C.
- A la salida del gasificador existe un ciclón en serie con el gasificador.

- Los alquitranes se extraen y se craquean en una cámara de postcombustión a 1.200 °C.
- El gas de síntesis sufre un doble lavado (ácido y básico) antes de entrar en el motor de cogeneración.

El coste de fabricación, ya sea del gas de síntesis o de la electricidad, depende, de manera muy importante, del coste del combustible y, naturalmente, de su poder calorífico.

El coste total de funcionamiento se obtendrá de sumar el coste de explotación (incluyendo el CAPEX) y el coste del combustible elegido. Con diferencia, la opción más interesante es la de usar residuo (por ejemplo CDR) como combustible. Hay que tener presente que el límite superior de precios del gas de síntesis esta en torno a los 30 €/MWh, que corresponde al gas natural.

La foto de la Figura 10.27 corresponde a una vista general de una planta de esta firma instalada en Rumania (planta de 4 MW (eléctricos) a partir de paja de trigo.



Figura 10.27. Vista general de la planta de cogeneración de 4 MW eléctricos de EQTEC, usando paja de trigo.

Sin embargo desde hace unos años existen en el mercado unos gasificadores comerciales para biomasa, de baja capacidad, de muy fácil manejo, por la simplicidad de todos sus elementos y funcionamiento. Son gasificadores de origen asiático con tecnología comercial, experimentada y probada, capaces de producir gas de síntesis, sin problemas, para alimentar motores que produzcan de 40 a 700 kWe. Pueden utilizar como biomasa, madera, mazorca de maíz, bambú, coco y cascarilla de arroz. Estos países disponen de biomasa abundante pero en cambio la red de distribución eléctrica es muy deficiente o, en ocasiones, inexistente. Por ello esta tecnología se ha desarrollado y ajustado con éxito durante más de 30 años y hoy en día se halla a escala comercial, en tamaños desde los pocos kWe hasta los 700 kWe, y de manera modular se puede llegar fácilmente a producir unos pocos MWe.

Estos gasificadores son extremadamente simples, son de lecho fijo y del tipo de corriente paralela o *down-draft*. De esta forma, se logra, sin un sofisticado sistema de

limpieza de gases, una buena calidad de gas de síntesis, y unas condiciones de funcionamiento tales que:

- La puesta en funcionamiento, a partir de la instalación en frío, sea rápida. El modelo *dawn-draft* tarda 10 minutos. Es decir, que la puesta en marcha, o rearme por cualquier contingencia (lo normal es falta de alimentación) sea rápida. En este último caso, el rearme es de 3 minutos.
- El funcionamiento sea flexible con la alimentación. El modelo *dawn-draft* no altera sus parámetros a no ser que la alimentación, la calidad del material alimentado, descienda por debajo del 50% del valor nominal de diseño. Es decir, se trata de una instalación que es poco sensible a la alimentación.

La producción de alquitranes, compuestos que pueden invalidar la generación de electricidad a partir del gas de síntesis, es función de:

- La forma interna del reactor de gasificación. En este sentido los que físicamente presentan mejor comportamiento son, precisamente, los de lecho fijo *dawn-draft*.
- El sistema de lavado de los gases a la salida del reactor.

Por lo que hace referencia a la geometría interna del gasificador *dawn-draft*, la Figura 10.28 muestra el esquema básico de funcionamiento.

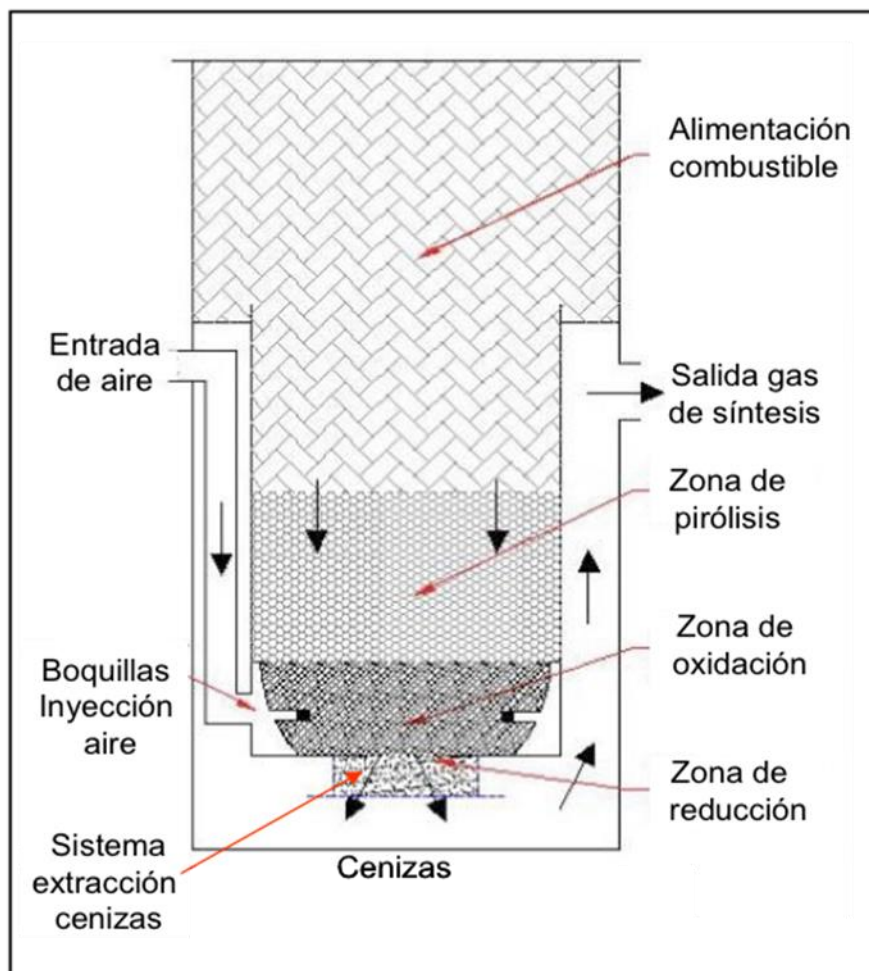


Figura 10.28. Principio de funcionamiento de un gasificador "dawn-draft"

El combustible, biomasa, penetra por la parte superior por medio de dos compuertas sincronizadas, de manera que siempre una de ellas está cerrada para impedir la entrada de aire. Debido a la elevada temperatura y a la ausencia de aire, la biomasa

se descompone en gases y vapores al poco de penetrar en el reactor (zona de pirólisis). Cuando alcanza la garganta (zona de oxidación) la temperatura asciende a valores superiores a 1.100 °C. Ello provoca la destrucción de todas las trazas de alquitranes.

En este proceso se forma una pequeña fracción de coque, del orden del 6-8% sobre la masa de combustible entrado (considerando una biomasa con un contenido de cenizas del 3%), que también es combustible y debido a su naturaleza inerte puede valorizarse en una planta externa como, por ejemplo, una cerámica o una fábrica de cemento.

Esta variante de planta de gasificación es ideal para la minimización de la formación de alquitranes en el gas que invalidarían la posibilidad de producir energía eléctrica. Sin embargo, y para reducir a un mínimo su presencia, el sistema dispone de un simple y a la vez sofisticado y experimentado lavado de gases consistente en:

- Ciclón para la extracción del material particulado que pudiera contener el gas.
- Un lavador húmedo (*scrubber*). En él todos (o casi todos) los compuestos solubles se transfieren al agua. El agua se mueve en circuito cerrado y se refrigera.
- Un ventilador húmedo equipado con un ciclón húmedo para retener las gotas de agua de mayor tamaño.
- Un intercambiador que utiliza agua proveniente de un refrigerador para asegurar la condensación del vapor de agua presente en el gas (*demister*).
- Dos filtros adsorbentes.
- Un último filtro de seguridad, tipo filtro de mangas, que garantiza que el motor no reciba, en casos accidentales, contaminante alguno.
- Un ventilador de cola.

En la Figura 10.29 se puede observar el sistema de gasificación comentado.

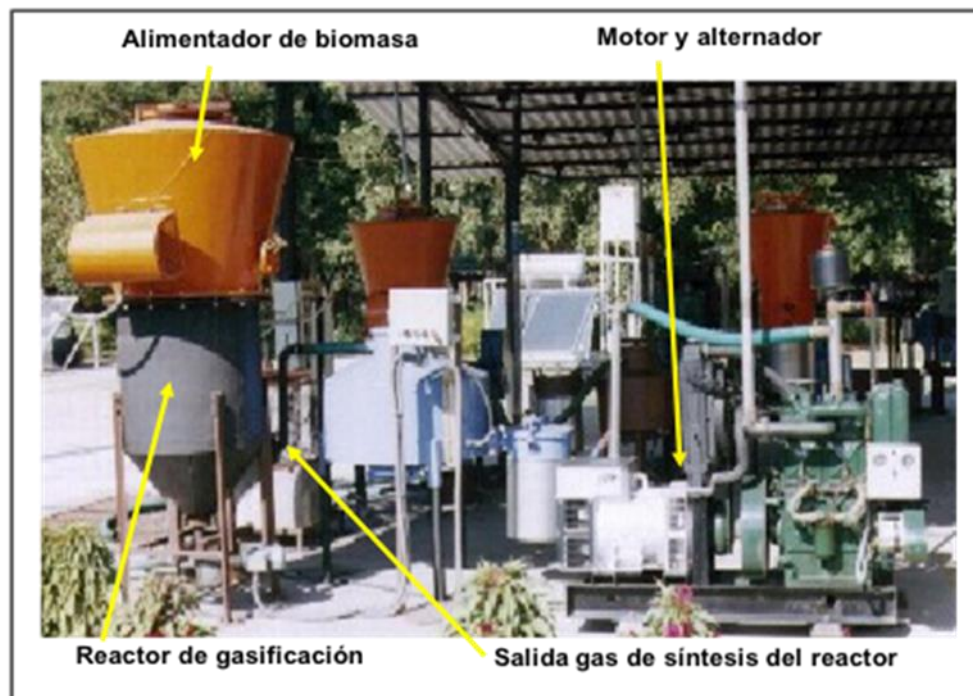


Figura 10.29. Gasificador comercial de baja potencia

3.2.2.3. Gasificador con ciclo BIGCC.

A partir de biomasa el ciclo BIGCC (*Biomasa Integrated Gasifier Cycle*) o que algunos casos se denomina BIG/GT (*Biomasa Integrated Gasifier/Gas Turbine*) genera el gas de síntesis, que luego se utiliza como combustible en una turbina. En realidad este ciclo consiste en la combinación de dos ciclos, con aspectos parecidos al de un ciclo combinado que se utiliza con el gas natural. En este caso la biomasa se le somete a un proceso de gasificación, produciendo gas de síntesis a alta temperatura. El gas es enfriado en un intercambiador y luego filtrado y purificado. A continuación, este es comprimido y se combustiona en una primera turbina, cuyos gases calientes se aprovechan en una caldera que a su vez produce vapor de agua que hace girar una segunda turbina de vapor. Todos estos aspectos se detallan en la Figura 10.30, en la que se utiliza bagazo como combustible. El intercambiador de calor utilizado en el enfriamiento del gas de síntesis se utiliza para recalentar el vapor de agua de un circuito de Rankine. Las dos turbinas van conectadas a sendos alternadores que generan electricidad. Este tipo de ciclo se ha experimentado en la central de Varnamo (Suecia), con 8,7 MWe, con la que se ha experimentado el ciclo BIGCC con gasificación a presión. En esta central se ha obtenido rendimiento del 30%. Sin embargo, en este proceso no está totalmente resuelto la limpieza del gas.

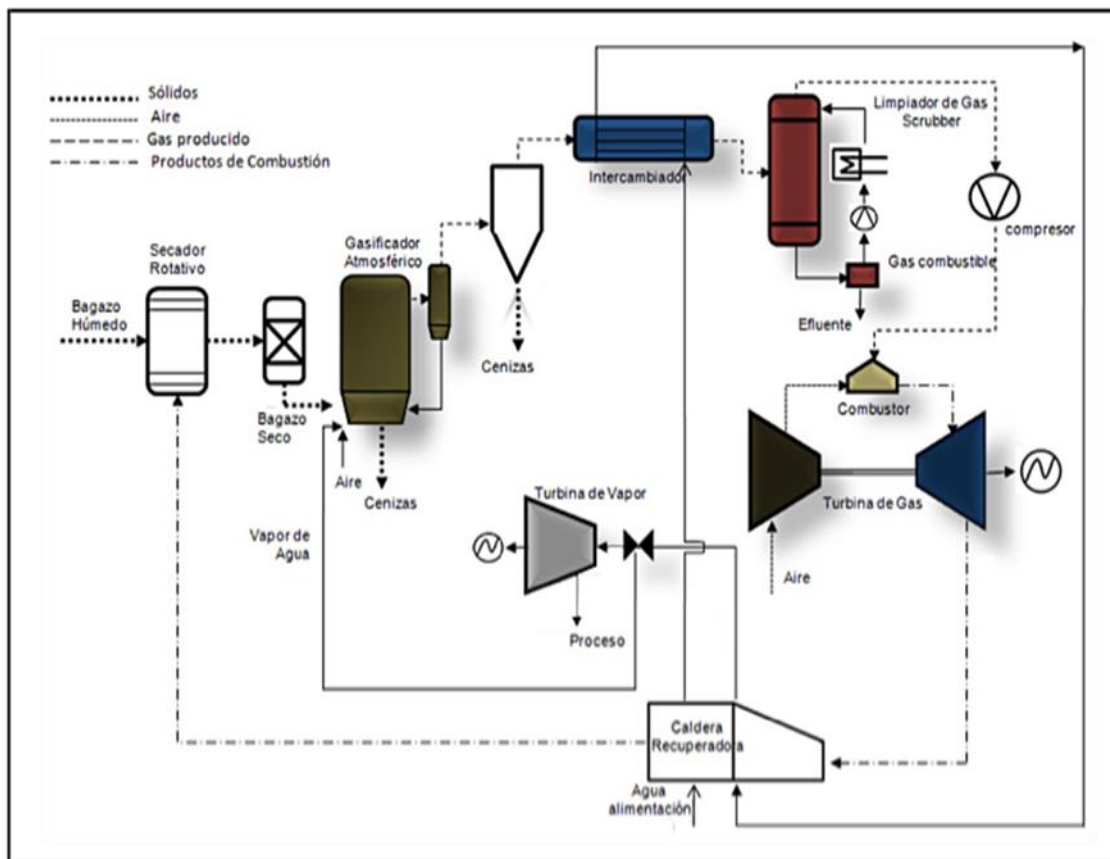


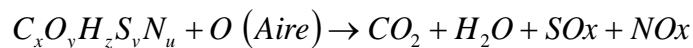
Figura 10.30. Esquema de funcionamiento de una central eléctrica de biomasa con ciclo BIGCC. (Fuente A.A. Lopez, Universidad Industrial Santander).

Esta tecnología sigue en parte a las de las centrales eléctricas de gasificación integrada a un ciclo combinado o GICC, como la central térmica de Elcogas en Puertollano. En esta se gasifica carbón con oxígeno y vapor de agua, el gas de síntesis se utiliza como combustible para la central eléctrica de ciclo combinado, en la

que los gases a la salida de la turbina alimentan una caldera conectada a segunda turbina.

3.3. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS A TRAVÉS DE LA COMBUSTIÓN O INCINERACIÓN

El proceso de combustión con exceso de aire o incineración es el método de aprovechamiento energético de la biomasa más antiguo y ampliamente utilizado. Es una reacción de oxidación donde el oxígeno presente en el aire actúa como elemento oxidante. La oxidación de la biomasa es un proceso altamente exotérmico que permite la autoalimentación para proseguir la reacción sin apoyo externo de energía. Esta reacción entrega calor y una serie de productos de la combustión. Se puede representar mediante la siguiente expresión general:



Por lo general la materia vegetal posee alto porcentaje de humedad, en muchas ocasiones dicha cantidad es mayor al peso seco de la materia, lo cual hace imprescindible la adecuación de la biomasa a niveles que aseguren la autocombustión.

Hay diversas técnicas para llevar a cabo la combustión de la biomasa, existe un amplio desarrollo de equipos y sistemas que permiten la obtención de altos niveles de eficiencia para la producción de electricidad y por lo tanto diversos autores coinciden en que dado el desarrollado tecnológico en que se encuentra dicha investigación, es difícil obtener mejoras sustanciales en dichos procesos. Las técnicas más utilizadas son la combustión en parrilla, la combustión en horno rotatorio y la combustión en lecho fluidizado. Un sistema completo de generación de electricidad a partir de combustión de biomasa se describe, en términos generales, por la siguiente secuencia de procesos y componentes:

- Sistema de alimentación de biocombustibles.
- Sistema de parrilla o lecho fluidizado
- Sistema de entrada de aire para la combustión
- Sistema de intercambio de calor con el ciclo vapor-agua
- Sistema de depuración de gases
- Sistema de retirada de las cenizas

En la Figura 10.31 se muestra un esquema del proceso de la generación de electricidad por combustión de diversos residuos de biomasa, u otros, mediante un horno, en este caso rotatorio. Siempre es importante realizar la mezcla antes de la alimentación del biocombustible a fin de conseguir una granulometría y potencia energética homogénea. El sistema de intercambio de calor mediante el ciclo vapor-agua está identificado con la caldera de recuperación-turbina de vapor, en la que el vapor toma la energía térmica de los gases, y después de aumentar su presión y temperatura, habitualmente con un sobrecalentamiento, se expande en la turbina y se condensa mediante aerotermos, un flujo importante de agua (si se emplea una torre de refrigeración), o algún sistema alternativo, no significados en el esquema.

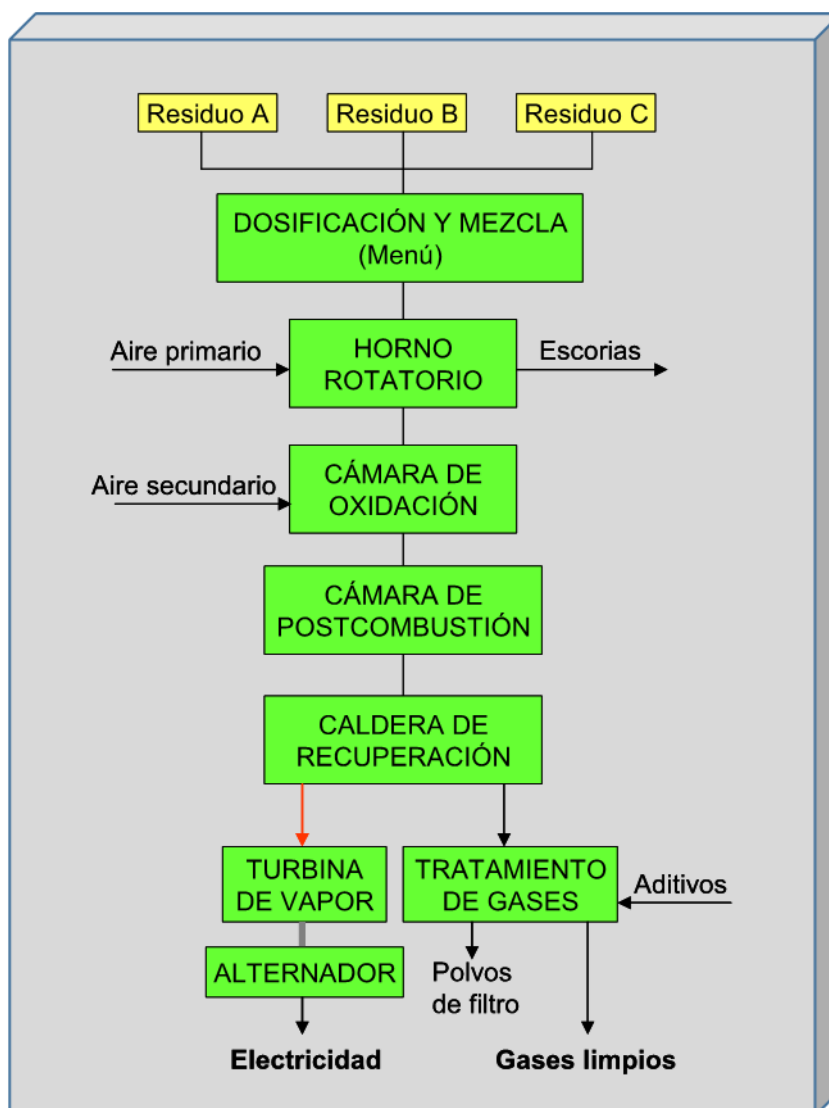


Figura 10.31. Esquema del proceso de generación eléctrica, por incineración, a partir de diversos residuos.

3.3.1. Descripción del proceso de incineración de la biomasa

Sistema de alimentación

La biomasa es almacenada y acondicionada en silos diseñados especialmente para esta labor, cuidando la prevención de accidentes (incendios) y preparándola para su introducción en el horno. La biomasa, una vez que ha sido sometida a un pretratamiento, se conduce hacia el sistema de combustión a través de cintas transportadoras cubiertas que evitan el contacto con elementos externos. Este sistema alimentador continuo deposita la biomasa en el interior del horno para iniciar el proceso de combustión.

Combustión sobre parrilla

La combustión en parrilla es el proceso tradicional de valorización energética de la biomasa. Existe, en la actualidad, un amplio desarrollo y en el mercado hay disponibles equipos a precios competitivos para su uso con fines energéticos a nivel industrial. Básicamente este proceso consiste en un hogar recubierto de material refractario y aislante en el que se introduce el combustible sólido y el comburente para producir el proceso de combustión. El aire, que actúa de comburente, en combinación con la temperatura produce la gasificación de los sólidos y luego la oxidación de los

gases resultantes del proceso. Es preciso distinguir entre el aire que actúa en primera etapa (generalmente por debajo la parrilla), denominado aire primario, que lleva a cabo las primeras reacciones (mayoritariamente de pirólisis y de gasificación, naturalmente también las hay de oxidación) y aire secundario, añadido posteriormente que permite la oxidación completa. El aire secundario representa alrededor (según diseño y/o proceso) del 30-70 % de las necesidades de aire total del proceso, lo que depende finalmente de la proporción total de carbono presente en la biomasa utilizada. Es necesario determinar una relación de aire que permita disminuir las emisiones, ya que un exceso de aire supone un mayor volumen de gases que deben ser tratados después de la caldera.

El inicio de la combustión debe ser auxiliado de forma externa, luego la energía liberada permite una sustentación del proceso. Dependiendo de la posición del combustible, de las entradas de aire y del flujo de los gases de combustión se pueden diferenciar tres tipos de hornos que se representan en la Figura 10.32.

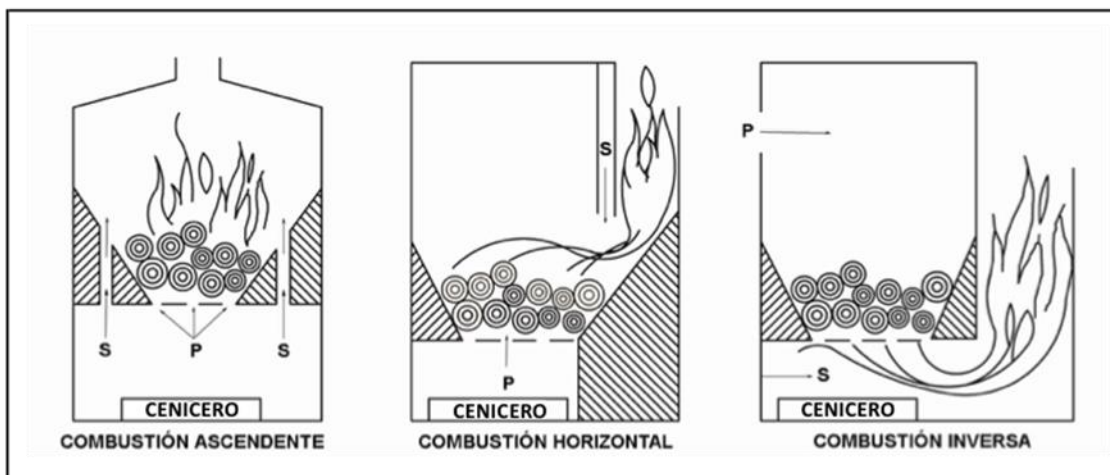


Figura 10.32. Diferentes hornos de combustión de biomasa en parrilla.

En el sistema de combustión ascendente, el aire primario (P) y el secundario (S) penetran por la parte inferior. En el diseño hay que procurar que la bóveda del horno, que a la vez hace de conducto de evacuación de gases, retenga a estos de manera que el hogar se ponga y mantenga incandescente.

El sistema de combustión horizontal, o inclinado, es el más usado para diseños de media y alta potencia. El aire primario penetra por el fondo (por debajo de la parrilla) y el secundario se añade más adelante, a veces precalentado por su contacto con la bóveda.

El tipo de tiro invertido es un sistema poco empleado para las aplicaciones de conversión energética.

El proceso de combustión comienza con el depósito del combustible en las parrillas, las cuáles pueden ser colocadas de manera horizontal o bien con una leve inclinación, lo cual permite una mayor versatilidad para el uso de distintos tipos de biocombustibles. Sobre estas parrillas el combustible desliza, produciéndose procesos de secado, volatilización y combustión de manera escalonada, lo que facilita la regulación del proceso. Si el proceso genera muchas cenizas, por las características propias del combustible (alta proporción de inertes en su composición) el uso de parrillas móviles facilita la limpieza y evita la formación de escorias y de esta manera la saturación de los pasos de la parrilla.

Combustión en lecho fluidizado

Una segunda alternativa para llevar a cabo la combustión de la biomasa, es la utilización de un sistema de lecho fluidizado, que consiste en un reactor en cuya parte inferior se deposita un material granular de naturaleza inerte, comúnmente arena de sílice, que es calentado con la ayuda de combustible auxiliar, hasta unos 650 °C, obteniéndose un lecho a una temperatura elevada que recibe, por la parte inferior del reactor, aire que permite el movimiento de este lecho, y aporta el oxígeno necesario para la combustión. El combustible es depositado por la parte superior del reactor, adquiriendo rápidamente el calor necesario para su combustión, facilitado por el mayor contacto que es posible por el movimiento del lecho. El aire secundario necesario para llevar a cabo la oxidación es inyectado en la denominada zona de oxidación o cámara de oxidación.

Algunos modelos desarrollados para la combustión de la biomasa bajo este sistema, presentan de forma independiente cada uno de los componentes, es decir: reactor de lecho fluidizado, cámara de oxidación y cámara de postcombustión.

Se distinguen principalmente dos tipos de lechos fluidizados:

- **Lecho fluidizado burbujeante:** presenta bajas velocidades de fluidización del aire. Se trata de una fluidización en fase densa.
- **Lecho fluidizado circulante:** elevadas velocidades de fluidización por lo que hay gran arrastre de sólidos que se pueden reciclar mediante un ciclón.

La utilización de tecnología de lecho fluidizado, requiere necesariamente que el combustible utilizado sea sometido a un pretratamiento, generalmente, para homogenizar su tamaño, ya que se comportará dentro del reactor de manera similar a un fluido. El tamaño del combustible guarda relación directa con la calidad de la combustión, ya que a mayor grado de micronización, mejor rendimiento del proceso. La dinámica originada en el lecho fluidizado conlleva unas ventajas que es necesario mencionar:

- Admite una variedad amplia de combustibles, ya que controlando la velocidad de entrada de aire se puede obtener la fluidización de partículas de tamaño y densidades diversas.
- Hay una alta transferencia de calor, lo que permite instalar un intercambiador de calor dentro del sistema de lecho fluidizado. A la vez, esta es una manera de mantener la temperatura por debajo de la establecida de consigna.
- Si la temperatura de trabajo se mantiene dentro de unos límites, las cenizas no se fundirán. Por lo que tampoco se forman escorias en los tubos del intercambiador y en las paredes de la caldera.
- Menor exceso de aire de combustión, ya que hay una mayor superficie de contacto entre combustible y comburente y por lo tanto un mayor rendimiento.
- La temperatura es uniforme dentro de todo el lecho, lo que facilita el control y evita que el nitrógeno del aire se oxide. (La temperatura del lecho debe mantenerse a un nivel inferior a 950 °C para evitar la fusión del árido. A esta temperatura el nitrógeno es completamente inerte).
- Se pueden introducir absorbentes que neutralicen en el lecho mismo el SO₂.

Uno de los inconvenientes de esta tecnología es el pretratamiento a que hay que someter los combustibles, y por lo tanto se debe disponer de una solución particular para cada tipo de biomasa utilizada. Un sistema homogeneizador podría solucionar este problema, en el caso de una biomasa heterogénea, mediante el astillado, secado, molido y posterior secado y peletizado del combustible. A pesar de ello el hecho de que el sistema de lecho fluidizado exija un determinado grado de pretratamiento no es

una limitación, debido a las ventajas, señaladas anteriormente, que proporciona. Un ejemplo del funcionamiento de este tipo de reactor aparece en la Figura 10.33.

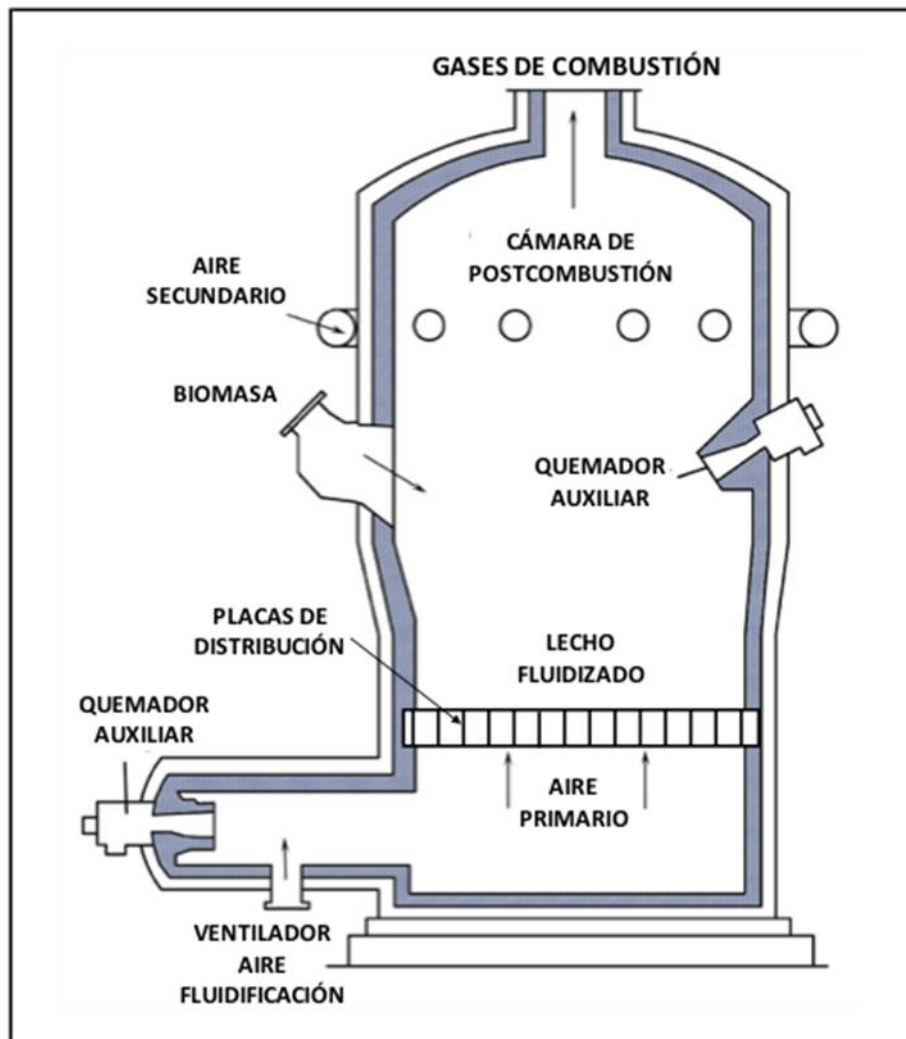


Figura 10.33. Sistema de combustión de lecho fluidizado.

Recuperación de calor

El calor producido por la combustión puede ser recuperado de manera integrada o bien por una unidad separada al horno de combustión. Para esto una caldera absorbe el calor contenido en los gases de combustión y lo transfiere al agua que pasa a una forma gaseosa y aumenta su entalpía a una presión determinada. El vapor se separa de la fase acuosa y fluye por tubos recalentadores donde aumenta su temperatura hasta los valores deseados. La combustión de la biomasa puede conseguir temperaturas de recalentamiento de vapor de 525 °C mientras los residuos sólidos urbanos por ejemplo, solo llegan a 450 °C. Se puede instalar un sistema en las paredes del horno o en la parrilla misma, recibiendo el calor directamente desde la cámara de combustión, para lo cual es necesario contar con un sistema de protección a la abrasión y corrosión. Si la caldera está fuera del horno se pierde parte del calor al transportarlo, pero disminuyen los efectos corrosivos y abrasivos. Otro aspecto importante a destacar es el bajo contenido de azufre en la biomasa, que llega a valores cercanos a cero y solo aparece cuando se emplean frutas, semillas y hojas, donde apenas se encuentra en concentraciones foliares cercanas a 0,2% en peso seco. Ello permite que los gases de combustión puedan ser utilizados para precalentar el agua de entrada o el aire secundario, sin temor a que se produzca formación de

condensaciones ácidas al bajar la temperatura de salida, y aumentando la eficiencia energética del sistema al aprovechar el calor residual de los gases de combustión.

Aprovechamiento del vapor

El vapor producido puede ser utilizado directamente como vapor para procesos industriales o bien para la generación de electricidad mediante el uso de una turbina de vapor, que conectada a un alternador permite la producción de energía eléctrica que posee una gran flexibilidad en su uso. El vapor entrega la energía cinética obtenida por la expansión del mismo y cede parte de su energía a la turbina, condensándose para luego reinsertarlo en la caldera, por lo que se obtiene un circuito prácticamente cerrado con mínimas fugas.

El sistema descrito anteriormente, el ciclo de Rankine, para potencias inferiores a 5 MW tiene un rendimiento bajo. Si la energía contenida en el vapor es el 100%, la parte que se convierte en energía mecánica (casi equivalente a la eléctrica) es del orden del 25% (al aumentar la temperatura de recalentamiento este porcentaje se incrementaría), el resto, es decir el 75%, es preciso disiparlo a la atmósfera puesto que corresponde a la condensación del vapor.

Rendimiento y potencia

Existe una clara correlación entre la presión del vapor y el rendimiento del ciclo de Carnot. El rendimiento del ciclo aumenta claramente cuanto mayor es la presión en la caldera y entrada de la turbina, es por eso que la tendencia en las instalaciones será elevar dicha presión.

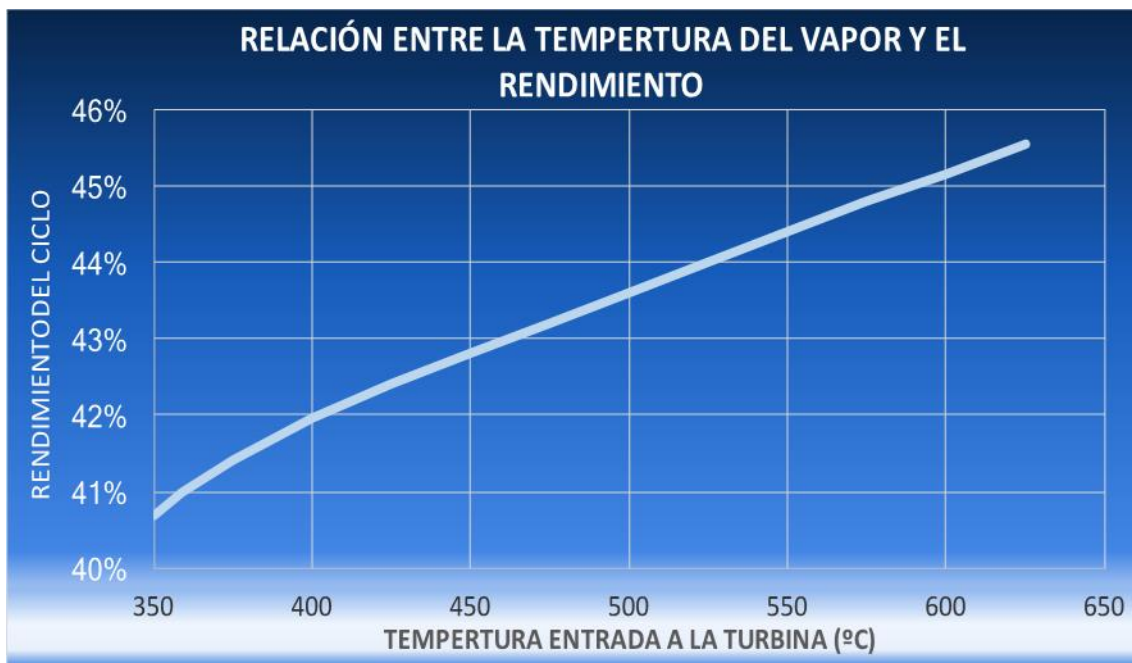


Figura 10.34. Relación entre la temperatura del vapor y el rendimiento.

Paralelamente, como muestra la Figura 10.34, el rendimiento del ciclo aumenta claramente cuanto mayor es la temperatura en la caldera y en la entrada de la turbina. Sin embargo esto, como se ha comentado, tiene claras interferencias con la corrosión (por la presencia de gases ácidos), por lo que se requiere buscar una solución de compromiso.

Por otra parte hay otro factor que afecta directamente a la efectividad de la conversión del trabajo mecánico (caudal y condiciones del vapor) y su transformación en

electricidad. La Figura 10.35 muestra que hasta alcanzar, aproximadamente, los 5 MW de potencia eléctrica, el rendimiento de un ciclo de Rankine convencional es inferior al de un ciclo orgánico de Rankine (ORC ver apartado 3.3.2.1).

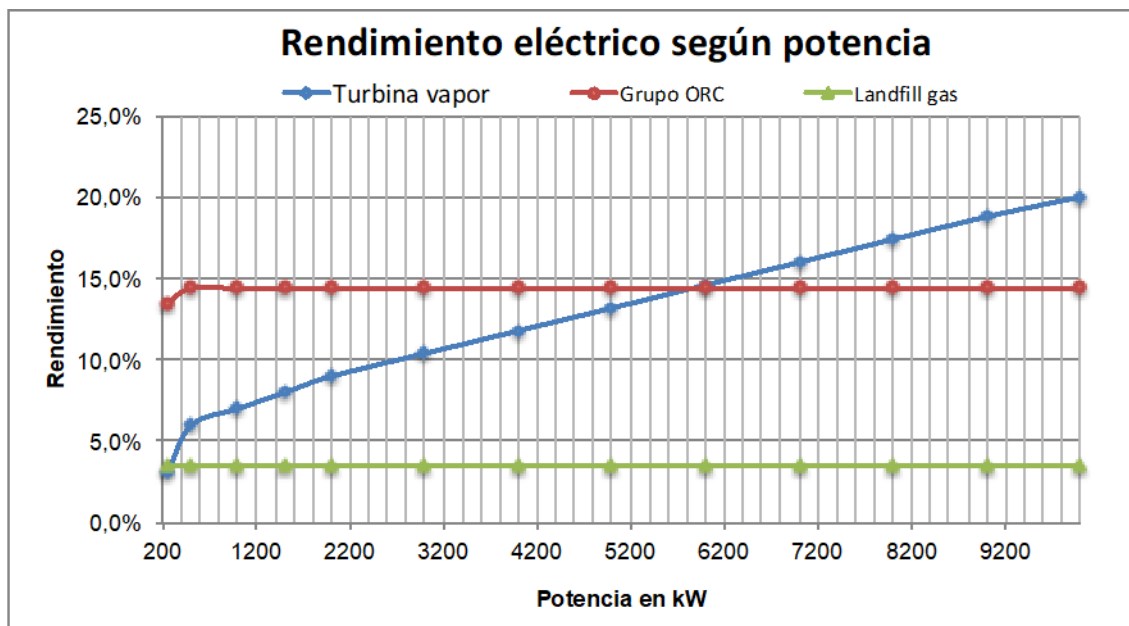


Figura 10.35. Rendimiento eléctrico de un ciclo de vapor en comparación con un OCR.

Sistema de depuración de gases

Como se ha mencionado, la biomasa vegetal posee un bajo contenido de azufre y por lo tanto la cantidad de emisiones de óxidos de azufre son mínimas. Con la tecnología disponible, la combustión de biomasa en grandes centrales no representa problemas significativos sobre la calidad de las emisiones, especialmente si se utiliza un adecuado control del proceso en combinación con la existencia de elementos filtrantes tales como ciclones, electrofiltros o filtros de mangas. Estos sistemas, en general, aseguran una emisión de gases, con niveles globales de contaminantes muy inferiores a los del carbón de buena calidad y el gasóleo.

En las grandes centrales de biomasa (>10MW), que en general son plantas de generación eléctrica o cogeneración, es preceptivo la instalación de sistemas de medición y control que aseguran condiciones precisas y estables de proceso, logrando una combustión más eficiente y una menor formación de CO. Estas tecnologías permiten, por otra parte, realizar el proceso de combustión a temperaturas más bajas que las convencionales parrillas, lo que causa una disminución de la formación de óxidos de nitrógeno y, por lo tanto, una combustión más limpia de la biomasa. En las calderas de última tecnología, de funcionamiento totalmente automatizado y mediante un control muy preciso de las condiciones de proceso, se han conseguido resultados satisfactorios en la reducción de emisiones de partículas y CO, lográndose eficiencias que pueden bordear el 90% de disminución de emisiones respecto a la combustión tradicional utilizando combustibles fósiles. Los niveles de emisiones no influyen ni en la calidad ni en la cantidad del vapor generado para el aprovechamiento eléctrico, sus únicas implicaciones son de carácter ambiental, que de acuerdo al tipo de biocombustible utilizado pueden requerir de esfuerzos adicionales en la reducción de contaminantes que permitan cumplir la normativa vigente.

La Tabla 10.211, muestra una comparación de las emisiones de un sistema de valorización energética de diversos tipos de biomásas, a través de su combustión, y

con el correspondiente sistema de generación de electricidad versus una instalación convencional de producción eléctrica a partir de combustibles fósiles.

Tabla 10.21. Emisiones totales en la generación de electricidad a partir de combustión de algunas biomásas y combustibles fósiles.

Combustible	Emisiones (g / GWh)		
	CO ₂	SO ₂	NO _x
Residuos forestales	29	0,11	1,95
Paja	13	0,88	1,55
Residuos avícolas	10	2,42	3,90
RSU	364	2,54	3,30
Gas Natural ¹	446	0,0	0,50
Carbón	955	11,8	4,30
Carbón ²	987	1,5	2,90

Sistema de recuperación de escorias

La recuperación de las cenizas de fondo dispone de un mecanismo automatizado que recoge las escorias desde el interior del horno de incineración, lo cual incluye un sistema para la disminución de la temperatura. Este generalmente se realiza haciendo pasar estas cenizas de fondo a través de agua. Las escorias que se producen debido a la combustión de biomasa poseen una diferencia fundamental con las generadas al utilizar carbón, ya que éstas últimas suelen presentar elevado contenido en cadmio y otros metales pesados, y por lo tanto requieren de tratamientos especializados para su almacenamiento y disposición final, siendo necesario su tratamiento como residuos industriales peligrosos. A diferencia de esto las escorias generadas en un sistema de valorización a partir de biomasa pueden ser devueltas al suelo como fertilizante, ya que no presentan dichas características de toxicidad.

Por otra parte existe una fracción importante de cenizas volantes que son recogidas en los sistemas de abatimiento de contaminantes (ciclones y/o filtros de mangas) que pueden representar cifras cercanas al 15 o 20% de las cenizas totales. Dependiendo de las características del proceso, en particular en el caso que la instalación no disponga de cámara de postcombustión, se generan cenizas con un alto contenido de alquitranes y productos orgánicos tóxicos, lo que impide su utilización como subproducto y por lo tanto deben ser tratadas como residuos peligrosos, debiendo ser depositadas en vertederos adecuados y autorizados para ello.

3.3.2. Centrales de producción eléctrica a partir de biomasa

Según indica, el *World Energy Outlook de 2008*, entre todas las energías renovables, la biomasa es la que más contribuye, a nivel mundial, al suministro de energía primaria con 1.186 Mtep en 2006, de esta, alrededor del 7%, es utilizada para producir 238 TWh eléctricos.

La producción de electricidad a partir de la biomasa se realiza básicamente por dos tecnologías: la térmica, que utiliza mayoritariamente el ciclo de Rankine, y con biogás de vertederos o plantas depuradoras, utilizando motores o microturbinas. Estas tecnologías están extendidas en todo el mundo. Se estima que en 2007 la capacidad instalada alcanzaba los 25.000 MW, de los que 11.000 MW corresponden a EE.UU., y a España 427 MW. También se estima que la producción mundial de generación eléctrica con biomasa está creciendo por encima del 4%, y que puede sobrepasar los 40.000 MW en 2020.

La UE seguirá siendo líder en aumento de capacidad anual instalada a medio plazo, si bien desde 2006 existe un incremento muy considerable en países emergentes, principalmente en el Extremo Oriente y Latinoamérica. En 2007 la producción de

bioelectricidad en la UE, según Observ'ER 2008, alcanzaba los 69,1 TWh/año, un 7,8% mayor que el año anterior. De esta energía el 71,5% correspondía a generación mediante centrales termoeléctricas, el resto corresponde a sistemas con biogás.

La tecnología de estas centrales de biomasa está, en los aspectos fundamentales, consolidada por las experiencias de las primeras centrales y las de incineración de residuos. Sin embargo consecuencia de que cada central tiene su propia y particular biomasa, resulta que cada una de ellas es especial y requiere de un diseño a medida y funcionamiento singular. Aunque actualmente con la experiencia acumulada, hay ingenierías y fabricantes que empiezan a construir centrales muy parecidas a otras que ya están en funcionamiento.

Sin embargo la producción de electricidad con biomasa mediante ciclos de Rankine de vapor no resulta, hoy día, directamente competitiva respecto a las instalaciones con combustibles tradicionales debido a la baja eficiencia y altos costes específicos de inversión y de operación casi como a los gastos de acopio de biomasa para grandes plantas. Los rendimientos en las grandes plantas se sitúan entre el 20 y 22%, y los costes de producción eléctrica con biomasa en la UE están entre 5 y 15 c€/kWh, mientras que con fuentes convencionales son de 4 a 6 c€/kWh. Sin embargo esta valoración puede cambiar radicalmente en el momento que se contabilizan económicamente las emisiones de CO₂ y otras externalidades de sostenibilidad.

La baja eficiencia de estas plantas es consecuencia, básicamente, de dos factores. Uno el de no poder utilizar ciclos de Rankine a elevadas temperaturas y presiones como los que se utilizan con los combustibles convencionales, por los problemas de corrosión que producen los biocombustibles en los que abundan la presencia de restos de halógenos. Precisamente para paliar estos efectos se ha recurrido a no forzar las temperaturas de los gases de combustión de la biomasa ni del agua-vapor que circula por los tubos de la caldera y por la turbina. (Este aspecto se comentará en el próximo apartado).

El segundo factor es consecuencia de la economía de escala de estas plantas. Las centrales térmicas convencionales sin ciclo combinado tienen un rendimiento tanto mayor cuanto mayor es su tamaño, por lo que las más pequeñas, habitualmente de unos pocos cientos de MW tiene rendimientos entre el 36% y el 40%, mientras que las más grandes, cerca del GW, este se acerca al 44%. En cambio las centrales eléctricas de únicamente biomasa raramente alcanzan los 30 MW, las más habitualmente están en torno 15 MW y las más pequeñas se sitúan en los 5 MW o menos. Consecuencia de este tamaño, las turbinas son más pequeñas y menos complejas, con un menor rendimiento, alrededor del 20-23% como máximo. En la Figura 10.36 se presenta un esquema de cómo se distribuye la energía inicial de la biomasa, supuesto con un valor 100, en los sucesivos procesos de una central térmica de biomasa con ciclo de Rankine, hasta aprovechar el 21% de aquella en forma de energía eléctrica en el alternador. En el condensador del ciclo de Rankine se debe condensar el vapor que sale de la turbina en una cuantía del orden del 64%, por lo que habitualmente se necesita una importante instalación de enfriamiento, aunque en muchas ocasiones se recurre a aerotermos.

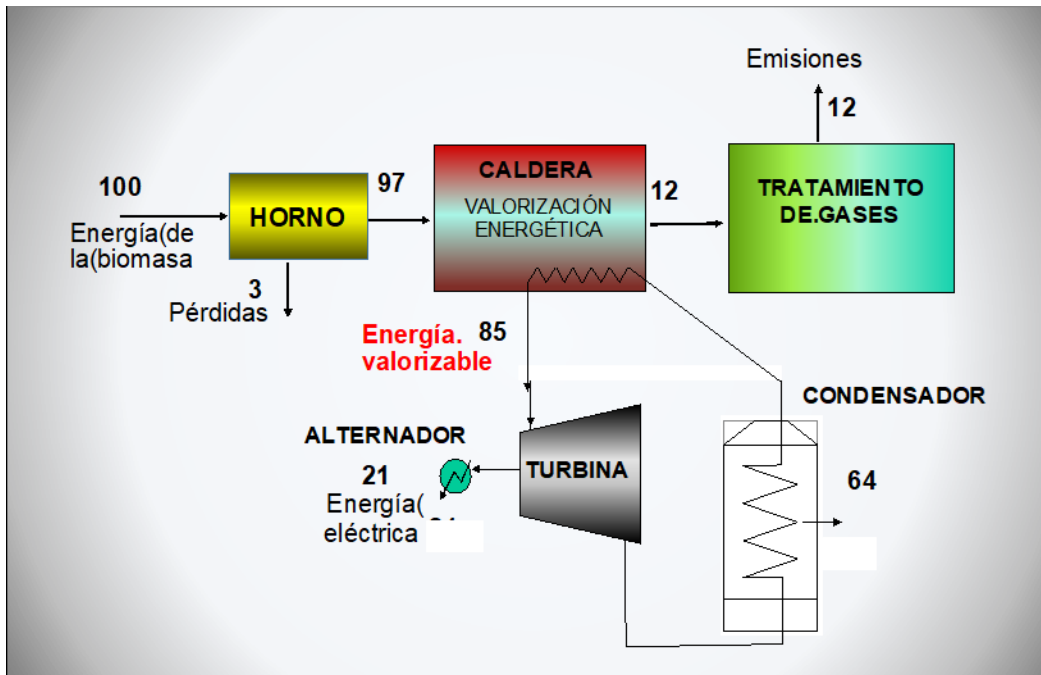


Figura 10.36. Esquema del tránsito y transformación de energía en una central térmica de biomasa con ciclo de Rankine, en el supuesto de que la energía de la biomasa a su entrada en el horno tenga un valor de 100 unidades.

El menor tamaño de las centrales de biomasa es consecuencia, en gran parte, de la capacidad de la biomasa accesible que tiene la central. Esta biomasa, hoy día, debe estar próxima a la central, pues tiene una baja densidad másica y energética por lo que el coste del transporte se convierte en una partida tanto más importante cuanto más lejos hay que ir a buscarla. Existen otros aspectos que también penalizan los costes de inversión y operación como es el análisis y tratamiento de gases de combustión, pues habitualmente suelen ser más estrictos en las centrales de residuos de biomasa que con los combustibles convencionales.

En la actualidad para evaluar la rentabilidad de una central de biomasa es imprescindible, por una parte, contabilizar lo que aporta la biomasa, normalmente un residuo, ya que con ello se compensa el coste de su vertido o de su valoración por otra tecnología, por lo que en muchos casos el coste del biocombustible es cero o negativo. Por otra parte la legislación vigente en cada país establece subvenciones, primas, según el tipo de biomasa o residuo consumido y la potencia de la central. Esta cuantía varía de unos a otros países.

En la Tabla 10.22 se adjunta, a modo de referencia, datos de algunas centrales de biomasa de diferente potencia. Esta información puede completarse con la de otras centrales que se comentarán en otros apartados con motivo del aprovechamiento de algún tipo concreto de biomasa como el alperujo o el bagazo, o compáralas con las de co-combustión o de gasificación.

Tabla 10.22. Características de algunas centrales eléctricas de biomasa que utilizan el proceso de combustión.

CENTRALES ELECTRICAS QUE UTILIZAN BIOMASA COMO COMBUSTIBLE					
Nombre y/o emplazamiento	Sangüesa	Bischofferode -Holungen	Wicker	Puente Genil	Wilmersdorf
País	España	Alemania	Alemania	España	Alemania
Potencia	25 MW	20 MW	14 MW	9,8 MW	5 MW

Tipo biomasa	Paja de cereal	Madera verde (70%)	Madera	Orujillo aceituna	Madera (80%)
Otra biomasa	Resid. forestales	Madera tratada (30%)			Residuos (20%)
Cantidad biomasa	160.000 t/año	160.000 t/año	90.000 t/año	75.000 t/año	55.000 t/año
PCI medio biomasa		10.100 kJ/kg	15.400 kJ/kg		14.200 kJ/kg
Tipo combustión	Parrilla vibratoria	Lecho fluidificado	Lanzado/suspensión	Parrilla movil	
Producción de vapor	48 t/h	59 t/h	55 t/h	18 t/h	25,8 t/h
Ciclo de vapor		135 bars y 535 °C	67 bars y 450 °C		44 bars y 425 °C
Gases de combustión		106.000 Nm ³ /h	92.400 Nm ³ /h		
Año puesta en marcha	2002	2006	2003	2006	2004

En la Figura 10.37 se muestra una fotografía de la central de biomasa de Sangüesa (Navarra, España), citada en la anterior tabla, y cuyo diseño, además de contemplar aspectos tecnológicos y ambientales, se realizó con un especial cuidado arquitectónico.



Figura10.37. Vista aérea de la planta de generación eléctrica de 25 MW a partir de paja cereal y otros residuos forestales de Sangüesa (Navarra, España) al final de su construcción en 2006. (Fuente Acciona Energía e IDAE)

Es especialmente completo el esquema del proceso productivo de esta planta, como muestra la Figura 10.38, en el que se detallan el sistema de almacenamiento, alimentación, parrilla vibratoria, recogida de inquemados, caldera de vapor con sus distintas partes, filtro de mangas de los gases, etc.

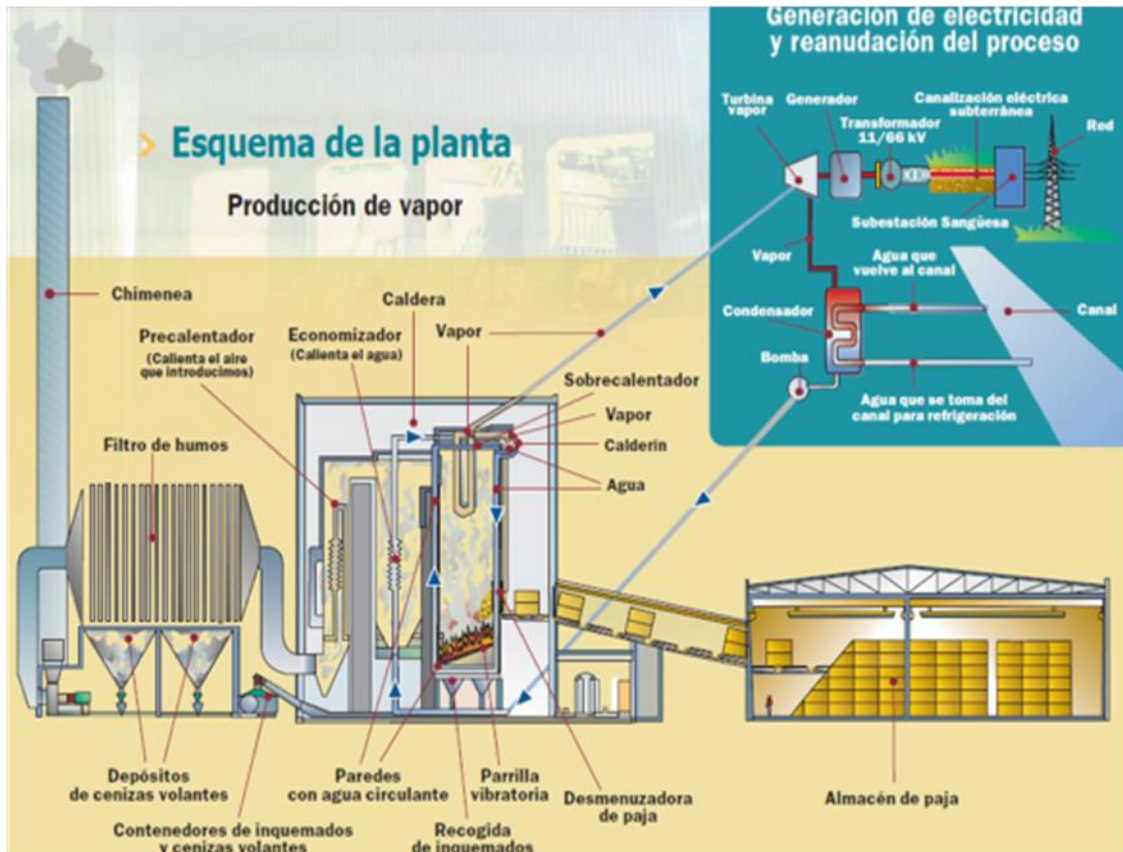


Figura 10.38. Esquema del proceso de la planta de generación eléctrica de biomasa de Sangüesa (Navarra, España). (Fuente Acciona Energía e IDAE)

Para realizar el proyecto de una central de biomasa, después de los comentarios básicamente técnicos y de rentabilidad realizados, hay que prever algunos aspectos que deben ser debidamente analizados, entre ellos:

- Emplazamiento adecuado respecto a las zonas donde se produce la biomasa a utilizar.
- Disponibilidad de la biomasa.
- Existencia de diferentes fuentes de biomasa y alternativas de suministro.
- Disponibilidad de suelo.
- Buena comunicación y acceso.
- Sistema de refrigeración y alternativa frente eventuales necesidades de agua.
- Evacuación y valoración de la electricidad generada.
- Posibilidad de interferencias con vecinos por almacenamiento y tráfico de camiones y emisiones.

La disponibilidad de biomasa, tipo y cantidad, son determinantes para la tecnología a emplear y la potencia de la planta. En algunos países la tramitación del proyecto puede alargar bastante el tiempo de su aprobación, y desde el punto de vista empresarial resulta un hándicap importante. En España hay que aprobar la instalación en el régimen especial, por lo que es preciso acreditar una serie de requisitos.

Para mejorar la rentabilidad de la generación eléctrica con biomasa se están desarrollando nuevas alternativas:

- Combinación de la combustión de la biomasa con otros combustibles convencionales, conocido como la co-combustión.

- Desarrollo de la gasificación a gran escala: ciclos BIGCC.
- Desarrollo de microgeneración.
- Incorporación al mercado de nuevas biomásas: mayor utilización de la biomasa agrícola y desarrollo de los cultivos energéticos
- Desarrollo del mercado internacional de la biomasa
- Ciclo orgánico de Rankine (ORC)

La co-combustión consiste en la combustión de la biomasa con otros combustibles convencionales, comúnmente el carbón. De esta forma se consiguen centrales de mayor tamaño, y con un mayor rendimiento, aparte de diluir los efectos corrosivos de la biomasa. Como ejemplo se puede citar la planta de azúcar de Mid Siam Sugar Co. Ltd., Tailandia, que utiliza carbón y bagazo de caña de azúcar, o la de Triveni, Deoband, (India), con 22 MW, que también utilizan el mismo tipo de combustibles. Los rendimientos de estas instalaciones rondan el 30%.

El ciclo BIGCC de biomasa, ya ha sido comentado en el subapartado 3.2.2.3. A grandes rasgos, este consiste en la combinación de dos ciclos, por un lado, la gasificación de biomasa, que da un gas de síntesis, este a su vez sufre su combustión en una turbina, y sus gases son aprovechados en otro circuito caldera-turbina. De las dos turbinas se obtiene energía eléctrica a través de los correspondientes alternadores. Es un tipo de ciclo aún en fase de desarrollo experimental.

La otra alternativa a estas grandes instalaciones es la microgeneración, que con potencias inferiores a los 3 MWe, puede ser cubierta por diversas tecnologías térmicas y biológicas como:

- Motores y microturbinas alimentadas por biogás.
- Gasificadores de pequeña capacidad con su correspondiente motor.
- Ciclo orgánico de Rankine (ORC).
- Motores de vapor, y muy raramente motores Stirling.

Estas instalaciones corresponden a una producción descentralizada o microgeneración, habitualmente con bajos rendimientos, inferiores en muchas ocasiones al 18-16%, y siempre por debajo del 20%, excepto en el ORC. Su instalación obedece al aprovechamiento de situaciones locales como ocurre en los gases de un vertedero o de una EDAR, y que en el caso de no utilizarlas, terminan por perderse.

Aparte del aprovechamiento de los residuos de biomasa, muchas centrales son consecuencia de los cultivos de biomasa de productos de alto rendimiento energético, como el cardo, colza, sorgo, etc., estas centrales en un futuro se aprovecharán de las economías de escala con los ciclos BIGCC, al igual que puede ocurrir con las biorrefinerías. También en un futuro se debe contar con la peletización de la biomasa, lo que puede facilitar el transporte a mayores distancias, incluso entre continentes tal como ocurre con los combustibles convencionales.

3.3.2.1. Ciclo orgánico de Rankine (ORC)

El Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) es un ciclo termodinámico de “no-sobrecalentamiento” que utiliza un fluido de trabajo orgánico para producir electricidad. Es similar al ciclo de Rankine aplicado a una turbina de vapor convencional, a excepción del líquido, que es un fluido orgánico de bajo punto de ebullición y elevado peso atómico. Algunos de los fluidos utilizados son: aceite, refrigerantes como el octafluoropropano (R-218), el isobutano (R600-A), algunos siloxanos, otros fluidos como el tolueno, el benceno, etc.

Durante el proceso, el fluido se calienta hasta la ebullición en el haz tubular de la caldera y el vapor en su expansión se utiliza para mover una turbina, que a su vez impulsa un generador que convierte el trabajo mecánico en electricidad. El vapor se vuelve a condensar en líquido, tras pasar por el condensador, y regresa al sistema al ser bombeado de nuevo a la caldera. Entre la turbina y el condensador puede instalarse un recuperador, como muestra la Figura 10.39, donde el fluido deja calor cuando sale de la turbina y lo recupera después de haber condensado.

Este ciclo presenta ciertas ventajas, en algunos casos, respecto a su homólogo de vapor de agua o de Rankine tradicional, por funcionamiento, puesta en marcha y paradas más simples, menor presión en el circuito, una mayor duración de la turbina por no existir erosión y trabajar a una menor velocidad de rotación.

Actualmente este ciclo tiene un gran interés en el aprovechamiento de la biomasa, y en particular en la que no puede convertirse en *pellets*, pues aplicando el ciclo ORC, los gases de combustión o el vapor no pasan por el interior del motor o turbina. Además, la introducción de los fluidos orgánicos da lugar a diferencias fundamentales en la concepción del ciclo ORC con respecto al ciclo Rankine tradicional, haciéndolo ideal para fuentes de baja temperatura, menor de 500 °C, pues los fluidos tienen bajas presiones y temperaturas críticas menores. Estas características los convierte en un complemento ideal para fuentes renovables como la energía solar o la combustión de biomasa, además de su posible aplicación en la cogeneración industrial, al poder ser expandidos a muy bajas presiones en la turbina, lo que permite un aumento en la eficiencia del ciclo.

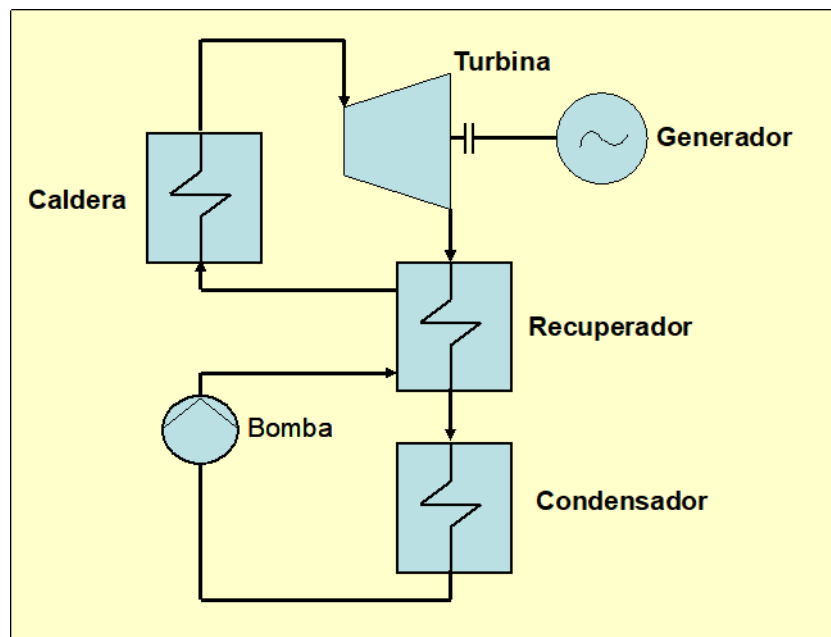


Figura 10.39. Ciclo Orgánico de Rankine (ORC).

Los ciclos Rankine que funcionan con agua y vapor habitualmente utilizan varias etapas de recalentamiento intermedio en las turbinas. Se distinguen, principalmente, la turbina de baja, media y alta presión, pues el agua al expandirse se enfría cayendo en la zona saturada y como una turbina solo puede soportar el desgaste por un porcentaje mínimo de "calidad del vapor" (aproximadamente el 95%), se deben de aplicar estas etapas intermedias de recalentamiento para poder aprovechar la energía que aún tiene el vapor y aumentar la eficiencia. Lo anterior no sucede en un ORC, pues el fluido no se enfría en la turbina, por lo que nunca se llega a la "calidad" o

condensación parcial en la expansión del fluido. De esta manera, se requiere una turbina de solo una etapa, reduciendo así la complejidad de la planta.

En conclusión, los ciclos ORC son mejores en el rango de algunos cientos de kW a los 5 MW, con mayor rendimiento, con un coste inferior y un funcionamiento más simple y versátil que una instalación con turbina de vapor del mismo tamaño con un ciclo Rankine tradicional, mientras que para potencias superiores los ciclos Rankine de vapor presentan mejores rendimientos. Así sus ventajas pueden resumirse en:

- Al operar a temperaturas y presiones relativamente bajas reduce significativamente los costos de mantenimiento porque no requieren tantas medidas de seguridad.
- Como las presiones en el proceso son bajas, el desgaste es menor y la expectativa de vida es mayor.
- La posibilidad de producir módulos completos, caldera-turbina de ORC, en serie, dada su versatilidad de funcionamiento y alimentación, permite costos de inversión bajos, como el de la Figura 10.40. Se adapta a la microgeneración eléctrica, tanto por el consumo de la biomasa como por la generación de electricidad.
- Debido a la posibilidad de trabajo con ciclos a baja temperatura, es posible el aprovechamiento del calor residual de otros procesos, de 250-300 °C, para la producción de electricidad.
- Pocas pérdidas, debido al trabajo a baja temperaturas, lo que permite una gran eficiencia energética.
- Utilización del calor a baja temperatura, en una aplicación de cogeneración, como agua caliente a una temperatura entre 80-120 °C, muy adecuada para industrias que necesitan agua caliente en estas condiciones o para procesos de secado, o incluso refrigeración (trigeneración).



Figura 10.40. Módulo completo caldera-turbina con ciclo ORC. (Fuente SEEGER ENGINEERING AG).

Actualmente ya hay funcionando diversos productos modulares en base al ciclo orgánico de Rankine, con potencias desde varios centenares de kW hasta el MW, en muy variadas industrias, como la del vidrio, cemento, madera, geotermia, etc. en muchos casos como complemento al proceso principal, recuperando la energía de los gases de escape a la salida del proceso, o de residuos, en algunos casos de biomasa, y produciendo electricidad y agua caliente.

3.3.3. Algunos aspectos sobre la corrosión en calderas de combustión de biomasa

Los sistemas de incineración de biomasa pueden ser muy variados y más o menos complejos, desde la simple y pequeña “caldera doméstica” dedicada a la calefacción a un sistema de incineración de biomasa para producir electricidad de varias decenas de MWe de potencia. Sin embargo, en todos ellos es muy importante la corrosión, pues influye en su duración y mantenimiento, especialmente en las instalaciones de medio y gran tamaño ya que trabajan a más altas temperaturas.

Técnicamente, la caldera propiamente dicha es la zona de la instalación de combustión en la que los gases de combustión a alta temperatura transmiten su energía en forma de calor al agua contenida en los tubos metálicos, calentándola o incluso evaporándola en las instalaciones medias y grandes. En estas últimas se diferencian perfectamente las distintas partes de la instalación: a) allí donde se inicia la combustión, el hogar; b) donde se desarrolla la combustión, cámaras de combustión y postcombustión, y c) la parte final de la instalación, la caldera propiamente dicha, donde se realiza el traspaso de energía térmica de los gases a alta temperatura al circuito de agua o agua-vapor. En las pequeñas instalaciones, estas distintas partes constituyen un todo, y por esta razón se las denomina, en muchas ocasiones, simplemente caldera. Los gases una vez han transferido el calor, y disminuye su temperatura, son depurados, si es necesario, y luego expulsados a la atmósfera a través de una chimenea.

En las calderas, grandes o pequeñas, existen dos circuitos totalmente diferenciados, uno, el del combustible-aire-gases y otro, el de agua o agua-vapor. En el primero, tiene lugar la combustión, en este caso de la biomasa que entra en el hogar y esta a su vez se mezcla con el aire insuflado, en una determinada proporción. Debido a la temperatura existente, la masa se gasifica y combustiona, se oxida, con el aire, dando lugar a gases a alta temperatura. Estos terminan por calentar todos los elementos de la instalación, hogar, cámaras de combustión y postcombustión, si existen, y sobre todo en la parte que es verdaderamente útil, la caldera propiamente dicha. En el segundo circuito, el agua circula por el interior de los tubos que constituyen la caldera acuotubular (o pirotubular si los gases circulan por dentro de los tubos), en el caso de calderas domésticas y/o de baja presión, o de agua-vapor en las instalaciones de mayores dimensiones, en la que el agua se evapora al recibir el calor de los gases de combustión.

A efectos de la corrosión de los tubos de la caldera tiene mucha importancia la temperatura a la que se encuentren, pues cuanto mayor es la temperatura, sobre todo por encima de los 450-500, la corrosión debida a los gases de la combustión de la biomasa es mucho más importante.

A lo largo de toda la caldera el agua o agua-vapor dentro de los tubos está a una temperatura inferior al de los gases, por lo que estos le transfieren su energía térmica. La temperatura del tubo, incluso de la pared del lado de los gases, está a una temperatura bastante próxima a la del agua, “casi” independiente de la temperatura de los gases, y por tanto puede ser muy inferior a la temperatura de los gases. Mientras que en los tubos que en su interior exista vapor sobresaturado, zonas de sobrecalentamiento de la caldera, la temperatura del tubo puede ser mucho más elevada, pues tiene un valor intermedio entre la de los gases y el vapor. En estos tubos, por su elevada temperatura, la corrosión debida a los gases de la biomasa puede ser muy activa.

Los combustibles fósiles convencionales cuando son utilizados en una instalación de combustión llegan, habitualmente, debidamente refinados, habiendo eliminado o restringido las proporciones permitidas de los elementos o compuestos más indeseables como, por ejemplo, el azufre. De esta forma los gases de combustión tienen unas características conocidas, que delimitan la corrosión, y las emisiones de determinados elementos o compuestos si la combustión ha sido la correcta.

En cambio en el caso de la biomasa, o de residuos de biomasa, la combustión es mucho más heterogénea, debido a su particular composición, tamaño y granulometría de la biomasa. Es por esta circunstancia que las instalaciones de incineración de biomasa de tamaño medio o grande, o de residuos urbanos, se hacen a medida de las características del biocombustible o biorresiduo utilizado.

Precisamente por estas características del combustible, las calderas de biomasa o sus residuos son distintas en muchos aspectos a las de residuos urbanos, aunque comparten algunos criterios conceptuales como los que se comentan en los próximos párrafos.

La biomasa más empleada es la de residuos agrícolas forestales, la de industria maderera y la alimentaria. Concretando, paja de cereal, astillas y aserrines de pino, chopo, sauce o encina, alperujos, cáscara de almendra o arroz, etc. En estos últimos años se están promoviendo en España cultivos energéticos, con experiencias en cultivos herbáceos como cardo, maíz, sorgo y cultivos leñosos, como el sauce, chopo y paulownia.

Aunque cada combustible tiene sus propias características, de forma general, en la biomasa leñosa, los troncos tienen poco cloro, las ramas tienen algo más y, de ellas las frondosas tienen ya cantidades considerables. En la biomasa herbácea, el maíz y el sorgo tienen más cloro que la madera y la paja de cereal, pero su bajo punto de fusión de cenizas permite adoptar medidas frente a la corrosión sin desaprovechar su contenido energético.

Los residuos madereros tienen poca fracción de cenizas y raras veces causan problemas en las calderas, mientras que la paja de cereal y los cultivos herbáceos contienen altas concentraciones de metales alcalinos y cloruros que aceleran la corrosión.

La mayor parte de combustibles de biomasa presentan baja concentración de azufre en comparación con el carbón. Los análisis, en base seca, de diversos tipos de biomasa revelan concentraciones de potasio entre 0,2% y 1,9%, contenidos en cloruros entre 0,025% y 2% y azufre entre 0,1-0,2%. Es importante resaltar que una concentración de 0,1% de cloruros en la biomasa se corresponde, aproximadamente, con 100 ppm de cloro en la fase gaseosa.

Los materiales de las primeras calderas de biomasa no sufrieron grandes problemas de corrosión, debido a que la temperatura de los tubos sobrecalentadores se mantenía baja, por debajo de 450° C. Esta decisión se tomó en base a la experiencia previa adquirida en las primeras plantas incineradoras de residuos urbanos, donde tuvieron graves problemas de corrosión originados por las especies cloradas provenientes principalmente de la combustión del PVC.

Podría resumirse que una característica muy importante de la biomasa, clave para su utilización y desarrollo a escala industrial, es que la fracción inorgánica del combustible causa graves problemas de deposición y corrosión, principalmente en los tubos de los sobrecalentadores, los de mayor temperatura.

Sin embargo, la tendencia a aumentar la temperatura del vapor de la zona de sobrecalentadores para incrementar la eficiencia de la planta de biomasa, ha

introducido graves problemas de corrosión. En la corrosión, sobre todo de los tubos sobrecalentadores, influyen varios factores de los que cabe destacar los siguientes: a) temperatura del metal de los tubos, que está influenciada en gran parte por la temperatura del agua o vapor que circula por su interior, b) la temperatura de los gases de la caldera, c) material de los tubos de la caldera y d) composición química de los depósitos formados sobre los sobrecalentadores. Varios de estos factores corresponden al diseño de la instalación, pero en parte están en contraposición a su rendimiento, y por ello hay que recurrir a condiciones de compromiso y en ocasiones utilizar materiales y diseños con materiales muy especiales y un ciclo del vapor a altas presiones.

3.3.3.1. Algunos mecanismos de corrosión en calderas de biomasa.

Los principales responsables de la corrosión de las calderas de biomasa son los metales alcalinos, el azufre y el cloro presentes, en mayor o menor cuantía, en la biomasa. Los metales alcalinos se encuentran asociados, bien químicamente a la parte orgánica ó bien como sales simples, como algunos cloruros. Esto significa que se pueden liberar fácilmente en la fase gaseosa durante la combustión, por tanto aparecer como KCl(g) , u otros cloruros, como los de sodio, calcio, etc., y también en forma de KOH(g) por la presencia de vapor de agua y oxígeno en estos gases.

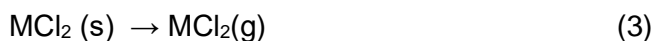
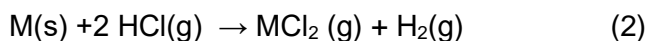
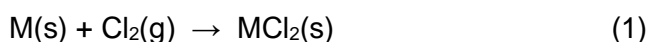
En la combustión también se generan $\text{Cl}_2(\text{g})$ y HCl(g) , formados por la presencia del vapor de agua durante la combustión. El $\text{Cl}_2(\text{g})$ también puede estar presente a altas temperaturas en ausencia de humedad y también formarse en ambientes reductores por descomposición térmica del HCl(g) . Todos ellos son responsables de la corrosión en una caldera.

Por otra parte el azufre y el cloro tienen una gran influencia en el comportamiento termodinámico del potasio durante la combustión de la biomasa. En general, el cloro incrementa la volatilidad del potasio, que se encuentra principalmente en los gases de combustión como KCl(g) y KOH(g) . A las temperaturas de trabajo de los sobrecalentadores, 400-600 °C, es decir en la zona de más alta temperatura de los gases en la caldera, 750-1000 °C, el potasio puede condensar como sulfato, cloruro y silicato, formando depósitos sobre los tubos de la caldera. El sulfato de potasio es la única fase sólida estable, y por tanto protectora, pero solo se formará si existe suficiente cantidad de azufre en el sistema (lo cual no es lo habitual en la biomasa) y transcurra el tiempo necesario para formarse.

Cuando un acero se expone a un ambiente oxidante a altas temperaturas, el metal se oxida gradualmente a óxidos termodinámicamente estables, formando una capa de óxido adyacente al metal. Esta capa de óxido es densa y poco porosa, lo cual proporciona una barrera para la posterior difusión de oxígeno y de otras especies gaseosas hacia el metal. En realidad constituye una protección, pues la oxidación no progresa, por lo que hay una capa más exterior de óxido y el resto del tubo continua siendo de metal con la composición inicial.

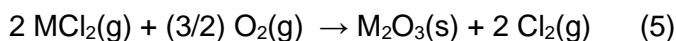
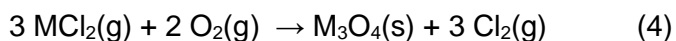
Aunque los tubos de acero de la caldera tengan, o se haya formado esta capa protectora de óxido o incluso de sulfato, el cloro tiene la capacidad de penetrar en esta capa de óxido protectora. El $\text{Cl}_2(\text{g})$ se difunde a través de la capa de óxido, presumiblemente por medio de poros y grietas, hacia la intercara metal/óxido donde reacciona con la aleación del acero del tubo para formar cloruros metálicos. En la intercara metal/óxido, existe un potencial de oxígeno muy bajo ya que se consume $\text{O}_2(\text{g})$ para producir óxidos metálicos. A bajos potenciales de oxígeno, los cloruros metálicos volátiles tales como el $\text{FeCl}_2(\text{s})$ y $\text{CrCl}_2(\text{s})$ son termodinámicamente estables. El HCl(g) y/ó $\text{Cl}_2(\text{g})$ pueden reaccionar con el metal según la reacción (1), donde, M es

Fe, Cr, o Ni, para formar cloruros metálicos, sobre todo entre 500 y 600 °C. Los metales pueden, también, reaccionar directamente con el HCl(g) según la reacción (2). Los cloruros metálicos tienen una presión de vapor alta en la intercara metal/óxido y tiene lugar una evaporación continua, reacción (3), sobre todo por encima de los 450 °C.

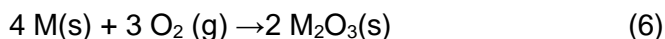


Estos cloruros metálicos volátiles se pueden difundir a través de la capa de óxido. La concentración de oxígeno se incrementa con el aumento de la distancia desde el metal hasta el gas circulante (gas proveniente de la combustión de la biomasa), conduciendo a la oxidación de los cloruros metálicos gaseosos a óxidos metálicos sólidos. Los óxidos resultantes, que precipitan a partir de esta reacción en fase gas, forman una nueva capa de óxido y, lo que es más dañino, poco adherida, lo que no proporciona protección contra futuros ataques.

Las reacciones (4) y (5) muestran que el cloro es liberado y puede difundir al gas circulante ó volver a la superficie metálica y, de esta forma, cerrar un ciclo que se realimenta y que provoca una corrosión continua del material.



Este ciclo supone un transporte continuo de los metales fuera de la superficie metálica hacia presiones parciales de oxígeno más altas con poco consumo de cloro. La reacción neta es (6), pero da lugar a una capa poco adherida, una verdadera cascarilla. Esta no protege de los nuevos ataques ya que las reacciones se producen de nuevo por debajo de esta, y además, con el paso continuo de los gases, vibraciones o cambios de temperaturas y sus dilataciones y contracciones, terminan por desprenderse del tubo, perdiendo el tubo material y disminuyendo su espesor.



Algunos autores indican que este mecanismo de difusión del cloro dentro el metal, formando los correspondientes cloruros metálicos, resultan demasiado rápidos para ser explicados como una simple difusión molecular, así concluyen que, de alguna forma, el cloro por sí mismo debe afectar a la creación de caminos de difusión rápidos, posiblemente a través de ranuras y fisuras en los límites de grano del metal o del óxido de metal.

También, se ha demostrado la importancia del NaCl, y otros cloruros en la corrosión. Su efecto es distinto si están en fase gaseosa o sólida. En forma gaseosa provoca la rotura de las capas de óxido del metal, pero la difusión es inicialmente insignificante en comparación con la de una atmosfera formada únicamente por aire. Por tanto por sí mismo la corrosión es poco intensa. Caso muy distinto es el de la forma sólida, NaCl(s), o de los otros cloruros sólidos, pues encima del acero causan una oxidación activa incluso a 500 °C, lo cual está muy por debajo del punto de fusión del NaCl(s) que es de 801 °C. La explicación se basa en que los cloruros en el depósito sobre el tubo, aleación de acero o en el óxido forman eutécticos de bajas temperatura, y causan la fusión de la capa de óxido, y que por su presión de vapor tienden a evaporarse. Aunque en las plantas de biomasa, el componente principal de los depósitos es el KCl(s), los estudios realizados con el NaCl(s) son válidos ya que, químicamente, son dos compuestos de comportamiento similar.

Como consecuencia de la reactividad de las distintas reacciones se puede concluir que la temperatura tiene una gran influencia en la corrosión y que a 450 °C, la velocidad de oxidación es bastante pequeña, incrementándose entre esta temperatura y los 550 °C, y siendo muchísimo más activa a más altas temperaturas

3.3.3.2. Minimización de la corrosión. Diagrama de corrosión.

Desde un punto de vista práctico para minimizar los efectos de la corrosión puede utilizarse el diagrama de corrosión de la Figura 10.41, que si bien corresponde a calderas de residuos, puede aplicarse con gran aproximación a las calderas de biomasa, incluso con mayor seguridad. En él se conjugan los mecanismos de corrosión y su cinética, y por ello aparecen además de la temperatura externa de los tubos de la caldera y la de los gases de combustión, la velocidad de estos al pasar entre los haces tubulares. Este diagrama ayuda al diseño y funcionamiento de una caldera, pues indica las temperaturas de operación de los gases de combustión, y su velocidad máxima, y su correlación con las temperaturas de los tubos para situarse en una zona de poca probabilidad de corrosión.

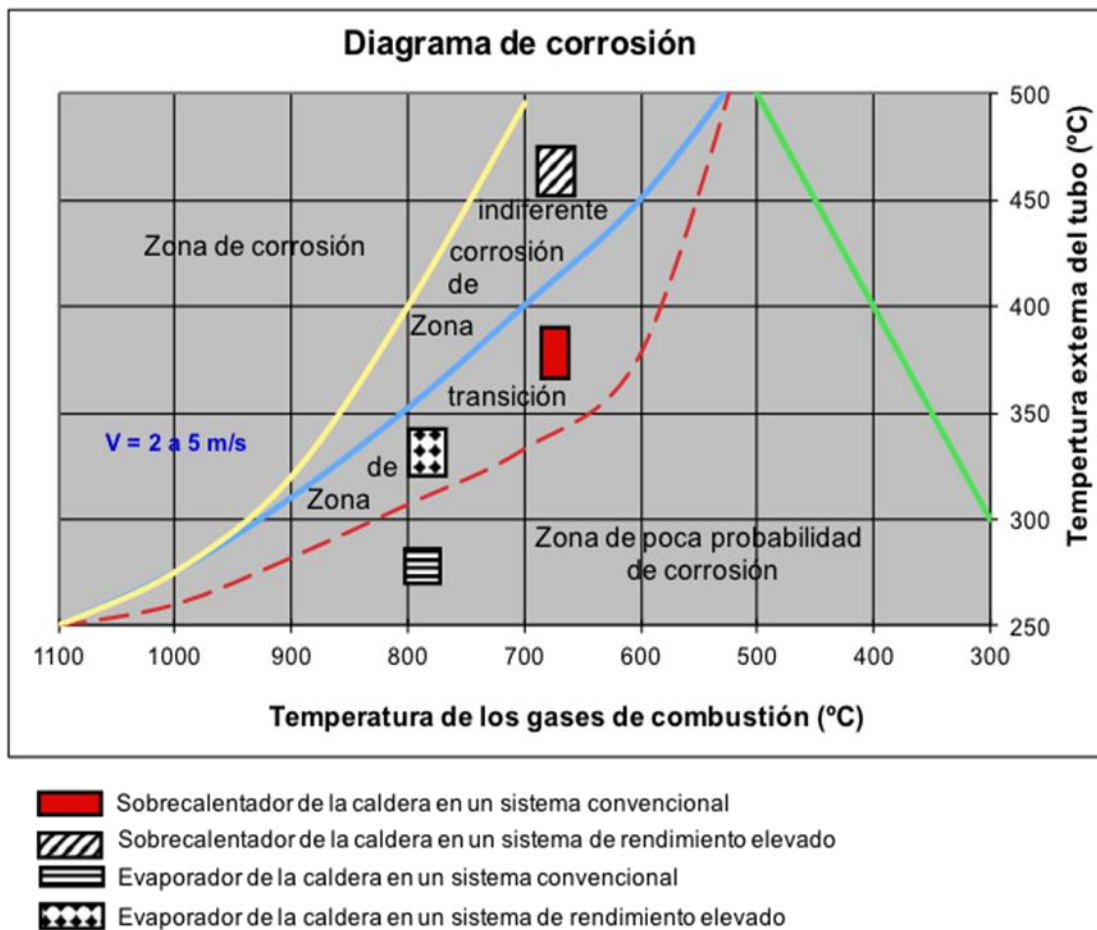


Figura 10.41. Diagrama de corrosión de los tubos de una caldera de residuos

La formación de adherencias en las superficies de los tubos y el efecto exotérmico de sulfatación pueden influir en las condiciones de las reacciones de corrosión antes expuestas y provocar que aparezca esta en zonas de baja probabilidad de corrosión, o a temperaturas más bajas de la indicada por la línea de puntos de la figura. Esta prolongación de la corrosión a temperaturas más bajas se da en casos de velocidades de gases superiores a los 10 m/s al pasar por los haces tubulares, y por tanto deberían ser evitadas

Del diagrama de la corrosión se deduce que, si la velocidad de los gases no llega a los 10 m/s y se mantiene en el orden de 6-7 m/s, se reduce considerablemente el riesgo de corrosión en la zona de evaporación.

Para evitar corrosión, en general, es aconsejable, en el caso de calderas horizontales, que en ninguna zona de la caldera se superen los 8 m/s (calderas de dos pasos de radiación) o los 5-8 m/s (calderas de 1-3 pasos). Mientras que en las antiguas calderas verticales se superaban los 10 m/s, en las calderas verticales modernas la velocidad de los gases es muy similar a las horizontales, sin sobrepasar los 7 m/s en el último paso de convección.

La conclusión de este diagrama, para minimizar el ataque corrosivo, es una buena dosificación del aire de combustión, evitando zonas con alta velocidad de circulación de gases y trabajar con temperaturas del circuito de agua y agua-vapor moderadas, que a su vez debe conjugarse con la temperatura de los gases.

Sin embargo si se disminuyen estas temperaturas, las de los gases y las del agua-vapor, el rendimiento o eficiencia de la caldera disminuye, es por ello que actualmente se está potenciando la utilización de presiones elevadas en el circuito de agua/vapor. Además, si se quiere considerar la instalación (de tratamiento térmico) como un tratamiento y no una eliminación, actualmente hay que cumplir unos requisitos de eficiencia, que en el caso de dedicar la caldera a la producción de energía eléctrica resultan inalcanzables. En el caso de un aprovechamiento térmico, como se realiza en muchos países del centro y norte de Europa, si puede alcanzarse la eficiencia requerida.

El rendimiento bruto de una instalación de biomasa de cierta magnitud para la producción de energía eléctrica se sitúa en el rango de 27 al 35%, algo más elevada que las de residuos urbanos, que varía entre 20 y 25%.

Debe realizarse un comentario especial respecto a la humedad de la biomasa, habitualmente presente, y en muchas ocasiones elevada. Debido a la heterogeneidad y humedad habitual de la biomasa y residuos, es frecuente que los gases de combustión sean pobres en oxígeno. Esta situación es una de las principales causas de la corrosión en el primer paso de la caldera. Por tanto una primera e imprescindible medida es inyectar aire secundario en los sitios adecuados, así como conseguir una buena mezcla del aire, asegurando una postcombustión adecuada.

Existen algunas medidas de carácter general, después de todo lo comentado y como resumen, que deben aplicarse siempre a fin de minimizar la corrosión:

- Homogeneizar en lo posible el combustible, mezclando los distintos componentes lo mejor posible.
- Dosificar y ajustar los caudales y temperaturas del aire primario y secundario, para realizar una correcta combustión y velocidades adecuadas de los gases.
- Recircular los gases por la caldera a una velocidad adecuada, lo que implica su correcto diseño.
- En el diseño de las calderas se debe incidir en que la velocidad de los gases, y la temperatura de los tubos sea la más baja posible, pero permita un rendimiento adecuado de la caldera. En este aspecto hay que tener en cuenta las temperaturas de las distintas partes de la caldera.

Además, resulta recomendable evitar el contacto de la llama o de los gases a alta temperatura con el metal, por lo que es recomendable, o preciso, revestir el primer tramo o primer paso de la caldera con un refractario cerámico (el SiC ha dado muy buenos resultados) que permita la transferencia de calor, hasta que la temperatura haya bajado a 800 °C. Sin embargo en esta zona no se puede evitar el ataque

corrosivo, pero esta será mucho menos enérgica y conduce a pérdidas de material, mucho menores.

Los materiales de los tubos deben ser de aceros inoxidable refractarios resistentes a la corrosión a alta temperatura, como el ANSI 310. Últimamente el principal metal aleado en los aceros que se está estudiando como alternativa al cromo es el aluminio, debido a que este elemento forma una capa de alúmina que se ha demostrado mejor protectora que la capa de $\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s})$. Así, se han estudiado el efecto de depósitos fundidos de NaCl-KCl en la degradación de aleaciones de Fe-Cr, Fe-Al y de Ni-Al. Los resultados indican, claramente, que un alto contenido en aluminio en las aleaciones Fe-Al y Ni-Al es muy efectivo para mejorar la resistencia a la corrosión por mezclas de sales fundidas de NaCl-KCl.

También se han realizado protecciones de estos elementos con recubrimientos de SiC u hormigón refractario con SiC o capas finas de soldadura, denominadas *cladding*, realizada con maquinaria muy especializada, con la que se aporta un material especial como Alloy 625, Sincromal 29/19, Nicrofer 45 TM. También se están utilizando la proyección térmica a alta temperatura o capas por arco eléctrico, también denominada *High Velocity Oxygen Fuel* (HVOF). En esta se emplea un material inoxidable en forma de pequeña partícula que se proyecta a gran velocidad y temperatura sobre el tubo y queda adherida en su superficie del material base del tubo.

3.3.4. Calderas de combustión de biomasa de uso doméstico

La generación de energía térmica con calderas de biomasa se aplica actualmente en España en viviendas aisladas, edificios, residenciales o no residenciales, tanto público como privados, e incluso en urbanizaciones, sin embargo su utilización es minoritaria. Aunque la gente que la usa está totalmente satisfecha de su funcionamiento, y a pesar de su mayor inversión inicial, esta se recupera por el menor precio de la biomasa respecto al de un combustible convencional. En Europa, hay muchos países centroeuropeos y nórdicos, que llevan utilizándola desde hace bastantes años. De hecho, es una alternativa real y consolidada y con indudables ventajas con los nuevos y modernos sistemas de combustión implantados en las calderas de biomasa. Las aplicaciones térmicas con producción de calor y agua caliente sanitaria son las más habituales, pero también puede utilizarse para alimentar un sistema de climatización (calor y frío) del mismo modo como se realiza con un sistema con gas, gasóleo o electricidad.

Hay innumerables ejemplos de viviendas y edificios, con potencias desde 40 kW a 580 kW o más. Se puede citar los Colegios Públicos de Quesada (Jaén, España en el año 2000) con tres calderas con un total de 645 kW, y utilizando orujillo y hueso de aceituna, el Hotel Flamingo de La Ampolla (Tarragona, España) con 200 kW.

Entre los que utilizan una red de calefacción centralizada se puede mentar la instalación de Cuéllar (Segovia, España), que depende del ayuntamiento. Fue realizada en 1999, con 6.000 kW, y utiliza residuos forestales, residuos de industrias forestales y otras fuentes de biomasa de la zona. Atiende a dos bloques de viviendas, un centro escolar, un polideportivo y un centro cultural. Otra instalación parecida es la de un barrio residencial La Granja, con 650 pisos, en Molins de Rei (Barcelona), instalación de 2001, que utiliza piña triturada, cáscara de frutos secos, orujillo, residuos forestales y de poda con una potencia de 3.884 kW.

Se han citado estos ejemplos del progreso de la utilización de la biomasa, pero existen numerosas razones que potencian la utilización de los actuales sistemas de calefacción y agua caliente sanitaria con biomasa, algunas de ellas son:

- Las instalaciones abastecidas con biomasa en sus diferentes formas (*pellets*, astillas, huesos de aceituna triturados, etc.) son respetuosas con el medio ambiente al presentar una emisión reducida de contaminantes a la atmósfera y no contribuir al efecto invernadero por tener un balance neutro de CO₂.
- El menor precio de la biomasa respecto a otros combustibles, y con una mayor estabilidad, al no depender de las fluctuaciones exteriores, aunque el coste de inversión inicial de los equipos es normalmente superior al de los equipos que utilizan combustibles convencionales. Actualmente hay redes de distribución de biomasa, y van en aumento.
- La operación y mantenimiento de estos nuevos sistemas es sencillo, son automáticos, con incorporación de control electrónico, similares a otros sistemas convencionales.
- La limpieza de las calderas con tecnologías avanzadas, es totalmente automática, tanto la alimentación, como la retirada de las cenizas, que además están minimizadas.
- Las calderas con biomasa tienen una alta resistencia al desgaste, larga vida útil y presentan un buen rendimiento energético, superando valores siempre del 75% y en muchas de ellas incluso el 90%, eficiencias similares o un poco inferiores, a sus homologas con combustibles fósiles.

En la Tabla 10.23 se indica algunas de las características de los diferentes tipos de biomasa más habitualmente utilizada, como el poder calorífico inferior (PCI), la humedad y su tamaño.

Tabla 10.23. PCI, humedad y tamaño de distintos tipos de biomasa para calderas de calefacción.

Tipo de biomasa	PCI (kJ/kg)	Humedad (b.h. %)	Tamaño habitual (mm)
<i>Pellets</i>	17.000 a 19.000	< 15	Diámetro < 25
Astillas	10.000 a 16.000	< 15	Dimensión mayor ≤ 63
Hueso de aceituna	18.000 a 19.000	7 a 12	Dimensión mayor 3 a 5
Cáscara de frutos secos	16.000 a 19.000	8 a 15	Dimensión mayor 12 a 15
Leña	14.400 a 16.200	< 20	Longitud 100 a 1.000
Briquetas	17.000 a 19.000	< 20	Diámetro > 25

Los *pellets* de biomasa son un biocombustible estandarizado a nivel internacional. Se conforman, como se comentará en un próximo apartado, en forma de pequeños cilindros procedentes de la compactación de serrines y virutas molturadas y secas, provenientes de serrerías, de otras industrias, o se producen a partir de astillas y otras biomásas de diversos orígenes, como los *agropellets*. En el proceso de peletización no se utilizan productos químicos sino simplemente presión y vapor, aunque es posible encontrar también un porcentaje reducido de aditivos biológicos. Se recomiendan los *pellets* producidos a partir de madera natural, con lo que el contenido de azufre y de cloro se puede situar entre el 0,02 y 0,05%, con una humedad incluso algo inferior al 10%. Debido a su PCI, de 2 a 2,2 kg equivalen a 1 l de gasóleo, lo que determina que el volumen de almacenamiento necesario en el caso de los *pellets* sea significativamente mayor que el del gasoil. Sin embargo hay que ponderar el menor precio y la mayor seguridad, ante un incendio, de los *pellets*. En España, el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios de 2007, conocido por RITE, determina los requisitos indispensables para los sistemas de almacenamiento de biocombustibles sólidos, como: ausencia de humedad, no estar permitidas las

instalaciones eléctricas, sistema de vaciado del local de almacenamiento, capacidad mínima, protección específica ante incendios, resistencia a la presión de los biocombustibles, sistema de mantenimiento del sistema de alimentación automático, etc.

Las astillas de madera son trozos pequeños de entre 5 y 100 mm de longitud cuya calidad depende fundamentalmente de la materia prima de la que proceden, su recogida y de la tecnología de astillado. Las de mejor calidad son las provenientes de la industria de la primera y segunda transformación de la madera o de maderas forestales muy limpias, habitualmente con humedades inferiores al 30%, aunque en ocasiones pueden alcanzar el 45%. Con menor calidad hay las astillas procedentes de tratamientos silvícolas, agrícolas y forestales (podas, clareos, entresacas, cultivos energéticos leñosos, etc.) con humedades de hasta un 45%.

La leña proviene de trocear troncos que no van a ser utilizados para producir madera, y pueden producirse localmente por los propios usuarios. Al igual que ocurre con el resto de la biomasa, la energía que se produce en la caldera va a depender del tipo de madera y de la humedad que contenga.

Por último, las briquetas son cilindros de biomasa densificada de tamaño superior al del *pellet*, con una densidad en torno a los 1.000 kg/m³, provenientes, normalmente, de serrines y virutas de aserraderos, y con un contenido en cenizas que no llega al 0,7%. Estos cilindros sustituyen normalmente a la leña en las calderas.

Como puede observarse la biomasa utilizada en las calderas de uso doméstico procede mayoritariamente de residuos, por lo que su consumo ayuda doblemente a la sostenibilidad, de una parte el aprovechamiento de residuos mediante su valoración energética y por otra la producción de CO₂ antropogénico que no contribuye a los gases GEI.

Las características de la biomasa determinan en gran parte el tipo de caldera, a igual como se comentó en las calderas de biomasa de las grandes instalaciones. En general las calderas de tipo doméstico comerciales van de 25 kW a varios cientos de kW y están preparadas para un determinado tipo de biocombustibles. Algunas están preparadas para poder cambiar de combustible, en cuyo caso, habitualmente, se requiere modificar la parrilla y el sistema de alimentación, normalmente constituido por un tornillo de alimentación. La leña y las briquetas son los biocombustibles menos utilizados, por la dificultad de su automatización total y menor rendimiento, que en ningún caso puede ser menor del 75% en España por el cumplimiento a que obliga el RITE. Las calderas que utilizan *pellets*, suelen ser pequeñas, de hasta unos 60 kW, muy eficientes e incluso del tipo de condensación, en cuyo caso se alcanzan rendimientos de hasta 103% respecto al PCI del biocombustible, ya que se aprovecha el calor latente de los gases al condensar dentro de la propia caldera.

En la Figura 10.42, se muestra una caldera de biomasa de uso doméstico. En la foto se observa el depósito de almacenamiento de la biomasa del que sale el tornillo de alimentación que permite un funcionamiento automático. En la parte inferior se observa el quemador, mientras que a la derecha se indica el esquema de la sección de la caldera, y en particular los tres pasos de los gases por los tubos de intercambio de la caldera. En este caso su potencia es de 48 kW, con un rendimiento mayor del 89% y con un depósito de alimentación de 750 litros de capacidad y la posibilidad de quemar *pellets*, cáscara de almendra, orujillo, hueso de aceituna.

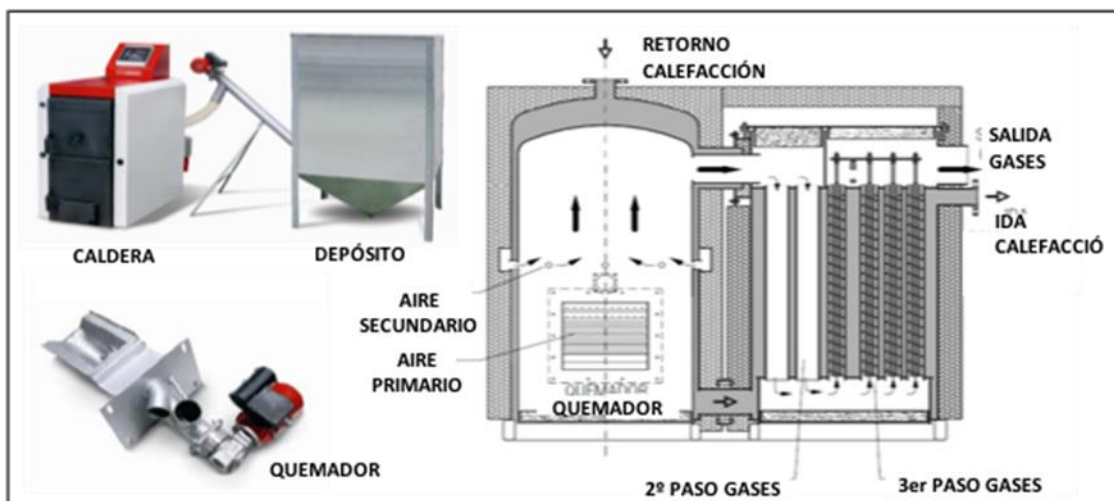


Figura 10.42. Caldera de biomasa de uso doméstico de 48 kW. Fotos de la caldera, depósito de alimentación y quemador, y esquema de una sección de la caldera. (Fuente Icaen).

Los productos de la combustión deberán cumplir con los requerimientos medioambientales de las autoridades nacionales, regionales o locales, que limitan los valores máximos de las emisiones de contaminantes. La norma europea UNE-EN-303-5 sobre calderas de calefacción, publicada en 1999 y aún vigente, establece los límites de emisión. La parte que corresponde a las calderas de biomasa con carga automática esta traspuesta en la Tabla 10.24. En esta se indican las emisiones máximas admisibles según la potencia y la distinta clase de calderas, clase 1, 2 y 3 que son las que respectivamente tienen un rendimiento entre 53-62%, 63-72% y 73-82%, esta última clase es la única admitida en España.

Tabla 10.24. Emisiones máximas admisibles en calderas de calefacción con biomasa y carga automática de potencia útil nominal de hasta 300 kW de potencia en mg/3 con 10% de oxígeno en los gases, según norma UNE-EN-305-5.

Límite de emisiones de calderas de calefacción de biomasa con alimentación automática norma UNE-EN-303-5									
Potencia útil (kWt)	CO			COV			Partículas		
	(mg/m ³ a 10% de O ₂)								
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 1	Clase 2	Clase 3
≤ 50	15.000	5.000	3.000	1.750	200	100	200	180	150
> 50 a 150	12.500	4.500	2.500	1.250	150	80	200	180	150
>1 50 a 300	12.500	2.000	1.200	1.250	150	80	200	180	150

3.3.5. Compactación de residuos de madera, serrín y virutas en pellets

En el anterior apartado se ha comentado la utilización de pellets y briquetas en calderas de biomasa de uso doméstico. Además, estos también se utilizan en la industria, en procesos en que interviene la combustión, gasificación o pirolisis, por la gran homogeneidad que representa este biocombustible. Un tamaño y PCI constante y homogéneo, como puede ofrecer un pellet, beneficia muchísimo el funcionamiento, rendimiento, y constancia del proceso de una instalación, lo que permite alargar los

periodos de funcionamiento entre paradas de mantenimiento, y en definitiva de la vida de la instalación.

La compactación es una tecnología que lleva realizándose desde hace muchísimos años, hay fábricas con más de 60 años, y se extienden por todo el mundo. Ello pone de manifiesto la importancia intrínseca en la utilización de los *pellets* en los procesos en los que interviene la combustión, aparte de mejorar la sostenibilidad, aspectos que se han puesto de manifiesto en estos últimos decenios con su continuo crecimiento.

Para la compactación de *pellets* se pueden utilizar diferentes tipos de maquinaria. Dependiendo del proceso y de la forma de producto, este se llama briqueta, *pellets* y miga. Aunque no existe una definición exacta de estos términos, se puede realizar una clasificación tal como se indica en la Tabla 10.25

Tabla 10.25. Tipos y características de los productos compactados de biomasa: Migas, pellets y briquetas.

	Migas	Pellets	Briquetas
Tamaño	0,5-3 mm	2 a 25 mm	25 a 60 mm
Forma	no definida, no pulverulenta	cilíndrica	geometría definida

De una forma general hay básicamente dos procesos de compactación:

- **Aglomeración por agitación.** La adherencia de las partículas no se produce por presiones mecánicas externas, sino por un movimiento con ayuda de líquidos y su secado posterior. Esta, no es apropiada para la compactación de biomasa basada en serrín y virutas, y madera en general.
- **Aglomeración por compresión.** La adherencia se logra mediante fuerzas externas. El producto es compactado con suficiente fuerza por las herramientas de compactación apropiadas, con lo que se forman aglomerados con una solidez suficiente. En este caso, la peletización siempre ha probado su eficacia y rentabilidad si se procesan grandes cantidades de producto, sobre todo si los aglutinantes naturales de los productos no son muy fuertes y no necesita la adición de aglutinantes, como es el caso del serrín, virutas y desperdicios de madera.

En este último proceso de compactación las prensas de peletización son construidas en base a dos tipos de diseños:

- **Prensa de matriz anular.** Un anillo que constituye la matriz gira alrededor de los rodillos. El producto es prensado desde el interior hacia fuera a través de los agujeros que presenta la matriz de forma anular, tal como se indica en la parte a) de la Figura 10.43.
- **Prensa de matriz plana.** Los rodillos giran sobre la matriz plana horizontal y el producto es prensado de arriba hacia abajo a través de los agujeros de la matriz plana, como muestra la parte b) de la Figura 10.43.

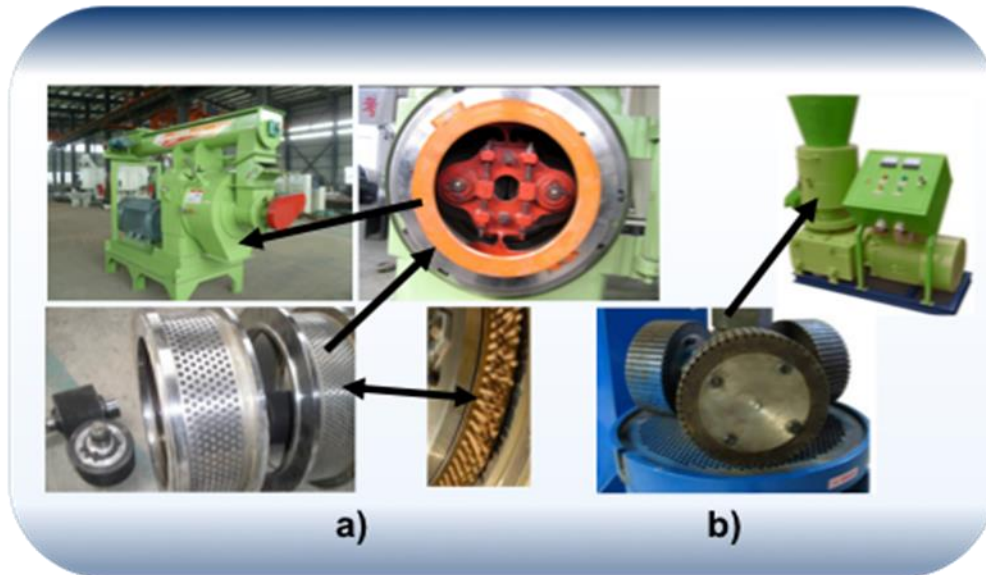


Figura 10.43. Tipos de prensas de peletización: a) prensa de matriz anular y b) prensa de matriz plana.

Las partes más importantes de la máquina de peletización son los rodillos y las matrices. El producto es compactado en los agujeros de la matriz que constituyen los canales de compactación abiertos en la matriz. La alimentación del producto es en caída vertical, desde arriba hasta la cámara de la prensa, y se reparte de manera uniforme. Los rodillos ruedan sobre la capa de producto que se forma sobre la superficie de la matriz y la compactan.

La fuerza de presión aumenta continuamente, a medida que los rodillos van llevando el producto hacia el canal de compactación, hasta tal punto que el cilindro de materia que se encuentra dentro del canal va siendo desplazado poco a poco. La fuerza de fricción dentro del canal de compactación no debe exceder la fuerza de presión de los rodillos. Sin embargo, la fuerza de fricción debe ser capaz de producir una compactación suficiente del producto aglomerado sólido. Una pequeña capa de producto se introduce en el canal de compactación, que está unida a un granulo por la presión y las fuerzas adhesivas del propio producto. El granulo sale del canal de compactación en forma de una cuerda sin fin, que se corta con cuchillas rotatorias en tiras cilíndricas de la longitud deseada.

En lo que se refiere a los rodillos, se necesita un gran diámetro exterior y un rodamiento sólido. Se puede variar el perfil de la superficie de rodadura, con variantes de forma ranurada, perforada o estriada, pero la influencia del diseño de la matriz es más importante. En las prensas se utilizan rodillos con un diámetro que, en los casos más extremos, pueden alcanzar los 450 mm y una anchura de 200 mm.

El cabezal de los rodillos gira con una velocidad que en algunos fabricantes es de unos 60 rpm a fin de que el equipo sea poco ruidoso, aunque puede ser más elevada. No obstante, el número de rodillos garantiza una alta frecuencia de paso sobre el producto, necesaria para lograr altos rendimientos.

El diseño de la matriz, plana o anular, tiene gran importancia. La relación entre el diámetro de los taladros y la longitud del canal de compactación se llama relación de compresión, y determina que las fuerzas de fricción sea la suficiente para la compactación del producto dentro el canal, pero a su vez también permitan su avance en el canal. Por tanto las características del producto son muy importantes pues determinan la fuerza de fricción producida. Por eso la relación de compresión debe

ser adaptada con exactitud al producto para conseguir unos resultados óptimos, en relación con la calidad de los gránulos y rendimiento de la máquina. Por eso normalmente no se pueden utilizar las matrices producidas para granular piensos compuestos, pulpa seca u otros productos para la compactación de madera.

Otro parámetro importante de la matriz es el número de agujeros y la superficie perforada abierta, que repercute directamente, junto con la potencia del accionamiento, en el rendimiento de la prensa.

El encaje de la hendidura entre los rodillos y la matriz, que tiene una influencia muy importante en la compactación, se ajusta con el sistema hidráulico, que a su vez soporta el empuje de los rodillos contra la matriz. Por eso es deseable poder cambiar esta distancia durante la producción y controlar el estado de funcionamiento de la prensa a base de la presión del producto contra los rodillos. Además, este está equipado con una válvula de presión de seguridad que permite que la prensa deje de actuar en el caso de que algún cuerpo extraño pueda haber entrado en la prensa.

El producto a compactar se va introduciendo en la prensa a través de un tornillo sin fin o cualquier otro sistema de alimentación apropiado. La gran cámara interior de la prensa ofrece espacio suficiente para productos voluminosos. No se requiere una alimentación forzada, pues causa bloqueos frecuentes. Cada máquina tiene su propio sistema de guías adaptada a las condiciones particulares de la máquina y producto para realizar una distribución uniforme del producto sobre la matriz. Sobre todo en el caso de productos con un alto contenido de fibras crudas, como es el caso de la madera, la prensa granuladora de matriz plana puede estar equipada con rodillos cilíndricos, que producen un efecto de cizalla al rodar sobre la órbita circular de la matriz. Este efecto conduce a la vez una torsión y una trituración preliminar del producto sobre la matriz de manera que luego se deja granular más fácilmente.

La condición para un funcionamiento óptimo es una alimentación continua en la prensa y un producto homogéneo y suficientemente pretriturado. El contenido de humedad tendría que quedarse en el margen constata entre 12 y 13% en el caso de la madera. Debido a la gran reducción del volumen al compactar madera y virutas de madera, habitualmente con densidades de 100 a 600 kg/m³, la capacidad volumétrica de la máquina debe ser lo más grande posible.

La industria maderera exige en las máquinas una construcción robusta y una alta disponibilidad de la planta para corresponder a la fiabilidad operacional requerida. Un rendimiento suficientemente alto, con el menor consumo de energía específica posible y una buena calidad de los gránulos o *pellets*, son otros requisitos, que van acompañados del objetivo de conseguir la vida útil más larga posible para las piezas de mayor desgaste.

Al comparar con otros productos, la madera no dispone de aglutinantes fuertes propios y las propiedades de deslizamiento tampoco son destacables, por lo que se necesita una gran fuerza de fricción en los canales de compactación. Maderas duras, como haya o roble, exigen mayores fuerzas de prensado que maderas blandas y maderas de coníferas. Las fuerzas de prensado conducen al consumo de energía específica, que se encuentra entre 40 y 60 kWh/t en el caso de madera.

Debido a la alta resistencia de fricción y la poca capacidad aglutinante de algunos tipos de madera, es muy importante un preacondicionamiento del producto antes de la granulación. La humedad, temperatura y grado de trituración del producto desempeñan un papel esencial. Si el producto llega húmedo este debe secarse hasta el intervalo de humedad adecuada, 10-15% para la maquinaria de compactación. Si el producto llega demasiado seco, se debe aumentar la humedad, o bien se mezcla con

producto húmedo o es aconsejable añadir una parte del agua en forma de vapor y esperar, en ambos casos, algún tiempo antes de granular la madera, para que pueda penetrar en el producto y homogeneizarse. Por eso una planta completa incluye un dispositivo para triturar el producto como, por ejemplo un molino de martillos apropiado, un secadero, un mezclador, sistema para añadir vapor y agua y un madurador para el tiempo de retención antes de la granulación, etc. En la Figura 10.44 se adjunta un posible proceso de una planta de peletización.

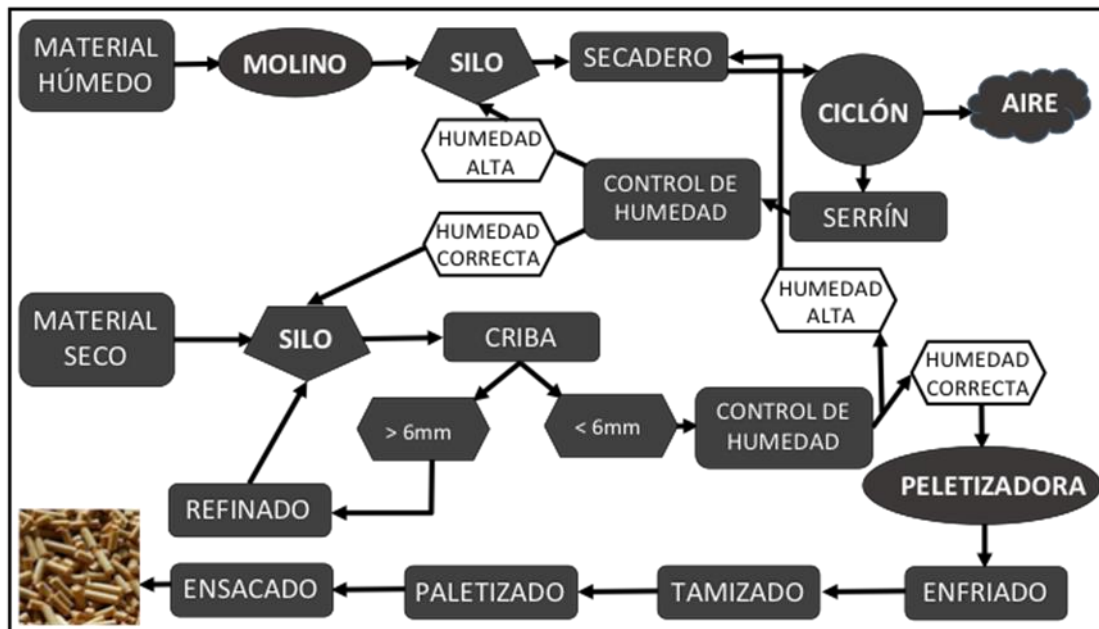


Figura 10.44. Esquema de una planta de peletización de residuos de madera, serrín y virutas.

La peletización se está convirtiendo en una tecnología muy prometedora para la eliminación de residuos y su aprovechamiento energético. Andalucía, región del sur de España, cuenta desde 2012 con cinco plantas operativas de fabricación de *pellets*, empleando como materia prima residuos de industrias forestales, poda de olivo y residuos forestales con una capacidad total de 21.000 toneladas equivalentes de petróleo en fábricas. Sin embargo el mayor productor español está en La Coruña (España). Como se comentará en el apartado 4.4.1 la producción española tiene una capacidad de 900.000 t/año, aunque solo produce alrededor de 300.000 t/año, de la que gran parte se exporta. Europa en 2012 alcanzó un consumo de 14 millones de toneladas al año.

La peletización se puede aplicar a muchos otros residuos, como puede ser el alperujo, a fin de convertirlos en un combustible con una “granulometría” estándar.

3.3.6. Combustión de bagazo de caña de azúcar en lecho fluidizado

En este y el próximo apartado se exponen sendos casos de aprovechamiento de residuos de biomasa como son el bagazo y el alperujo.

El bagazo de la caña de azúcar es un residuo que se genera en gran cuantía en este cultivo (que es uno de los de mayor capacidad para convertir la energía solar en biomasa). La caña de azúcar produce biomasa con un gran potencial como combustible, su generación tiene una amplia distribución geográfica, alcanza a más de 80 países, especialmente en centro y el sur del continente americano, sudeste asiático y en ciertas regiones de África, con volúmenes que ascienden anualmente a más de 1.200 millones de toneladas según datos de 2002.

En el caso de Cuba, este cultivo siempre ha tenido una gran importancia y, además, sus residuos siempre se han utilizado como combustible, siendo una verdadera alternativa, en realidad un sustituto, del petróleo, utilizándose en muchos casos para la generación de energía eléctrica. No obstante, el rendimiento de estas instalaciones es muy bajo, en gran parte por la obsolescencia de la tecnología utilizada. Es por ello que se han realizado muchos estudios, tesis y desarrollos industriales para un mejor aprovechamiento energético. Antiguamente en la industria azucarera el bagazo era considerado únicamente como un residuo que había que eliminar. Posteriormente se utilizaron instalaciones de cogeneración, que los quemaba, con lo que se generaba suficiente energía térmica, para secar el bagazo y energía eléctrica, para el autoconsumo de la propia industria. Se llegaba a producir desde 19,5 kWh a 27,5 kWh por tonelada de caña molida en función de las características del ciclo de Rankine de la central térmica. Actualmente, en muchas ocasiones el objetivo más importante no es fabricar el azúcar, sino el generar electricidad, por lo que se están cambiando los ciclos, utilizando turbinas mucho más eficientes, con ciclos de vapor a mayor presión y temperatura.

Un ejemplo de nuevas instalaciones se encuentra en el sudeste asiático, en India, Tailandia, Vietnam, donde existen varias instalaciones industriales. En la Figura 10.45 se muestra la instalación de Mid Siam Sugar en Tailandia, cuya caldera utiliza bagazo de su propia industria azucarera, con una producción 95 t/h de vapor en un ciclo que alcanza los 62 bars y 540 °C.



Figura 10.45. Caldera que utiliza bagazo en la planta de azúcar de Mid Siam Sugar Co. Ltd., Tailandia, 2009. (Fuente ISGEC Group).

Desde el punto de vista conceptual, en una planta de producción energética a partir de biomasa es imprescindible conocer la composición y propiedades del recurso biomásico utilizado. En este sentido en los próximos párrafos solo se comentarán algunos detalles sobre las características del bagazo y su combustión en lecho fluidizado.

La composición química del bagazo y de sus cenizas, se indica en la Tabla 10.26, estando constituida, aproximadamente, por celulosa (50%), y el resto, casi a partes

iguales de hemicelulosa y lignina, en realidad algo más de la primera a costa de la segunda.

Tabla 10.26. Composición química del bagazo de caña de azúcar y de sus cenizas en %.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL BAGAZO EN %					
Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Cenizas	Azufre	Nitrógeno
47-43%	6,5-5,2%	44-40%	5-2,5%	0,3-0%	0.6-0%

El poder calorífico superior del bagazo es de 16.700 kJ/kg y el inferior de 15.500 kJ/kg. Sin embargo su aprovechamiento energético está penalizado por la humedad que posee, que en condiciones normales se sitúa alrededor del 50%, mientras que las cenizas influyen relativamente poco ya que son del orden del 3%.

La granulometría con que se introduce el bagazo en una instalación depende del grado de preparación que tenga la caña en el proceso de extracción del jugo, el número de juegos de las cuchillas, desmenuzadoras y las características de los molinos. Estos últimos influyen mucho, pues determinan la cantidad de finos de la biomasa, y afectan en el caso de utilizar parrillas de combustión, perdiendo producto, y sobre todo en el caso de reactores de lecho fluidizado impidiendo la correcta combustión. Es por ello que la biomasa debe entrar en el reactor u hogar de combustión con una dimensión uniforme y lo más pequeña posible, pero nunca pulverulenta. El bagazo tiene una característica singular, para un mismo diámetro del bagazo presenta longitudes muy variadas, ya que existen partículas en forma de fibras muy alargadas y otras más cortas, lo cual lo hace un material muy polidisperso.

Muchas de las instalaciones en Cuba utilizaban reactores con lecho fluidizado. Para conocer su funcionamiento, como complemento, mucho más detallado, a lo explicado en el apartado 3.2.2.1, puede seguirse los estudios llevados a cabo en 2003 por la Universidad de Valladolid (España) junto con el CETER, Centro de Estudios de Tecnologías Renovables y el CIEMAT (Centro para el Desarrollo de Energías Renovables). En estos centros se ha analizado el comportamiento del bagazo en un reactor experimental atmosférico de lecho fluidizado burbujeante, de acero inoxidable, de 1MW de potencia, con 4.000 mm de altura y 1.370 mm de diámetro. El lecho estaba constituido por arena de sílice, con 90 kg con un tamaño promedio de partícula de 0,5 mm y de 40 kg con un tamaño promedio de 1 mm, con un espesor total de 190 mm. En este sistema se lograron consumos de hasta 195 kg/h de bagazo con una humedad del 22%, y con un molido y tamizado que pasaba por una luz de malla de 20 mm. Se logró estabilizar el lecho alrededor de los 800 °C, con unos 700 °C en su parte inferior, por donde entraba el aire de fluidificación a unos 250 °C. El bagazo se introducía automáticamente sobre el lecho mediante un tornillo sin fin, e inmediatamente entraba en combustión desprendiendo gases a unos 800 °C en la zona próxima al lecho. A medida que estos ascendían por el reactor se oxidaban con el aire burbujeante, que traspasaba el lecho, y alcanzaban un máximo cerca de los 1.000 °C. Luego, en su continuado ascenso por el reactor bajaban su temperatura, debido al intercambiador, hasta su salida, entre los 300 y 350 °C.

Sin realizar ninguna actuación sobre las emisiones, estas cumplían con la normativa española vigente. Como en el lecho fluidizado no se alcanzaban los 1.000 °C, las emisiones de NOx eran relativamente bajas, entre 138 ppm y 243 ppm. La combustión era uniforme, con un contenido de O₂ entre el 9,1 y 10%, un 5,9% y 6,3% de CO₂. La cantidad de CO variaba entre 1.100 y los 983 ppm, valores relativamente

altos, aunque admisibles (en España el límite se situaba en 1.445 ppm) y en general es recomendable que el bagazo contenga un contenido de humedad por debajo del 40%, pues con ello se consigue realizar una correcta combustión con baja emisión de CO.

Sin embargo, actualmente, las instalaciones más eficientes en las que se está utilizando el bagazo son de cogeneración y co-combustión con otros combustibles, como cáscara de arroz y sobre todo carbón, alcanzando potencias de 30MW, con rendimientos del orden del 30%. Un ejemplo la constituye la planta de Dhampur Sugar Mills en Asmoli, India, Figura 10.46, con una potencia de 30 MW, una producción de vapor de 170 t/h, y unas condiciones de ciclo que llegan a 105 bars y 540 °C. Otro ejemplo, la planta de cogeneración de 22 MW para Triveni, en Deoband, India, con 120 t/h a 86 bares y 515 °C.



Figura 10.46. Planta de generación eléctrica de 30 MW con co-combustión con carbón, bagazo y cáscara de arroz de Dhampur Sugar Mills en Asmoli, India.

3.3.6.1. Impacto ambiental de la quema del bagazo

En la mayoría de los países que cultivan caña de azúcar suelen quemar la caña antes de iniciar la cosecha. La Figura 10.47, muestra el aspecto antes y después de la quema de un cultivo de caña.



Figura 10.47. Aspecto del campo de caña. A la derecha una vez realizada la quema. (Fuente EMPA).

Esta operación se realiza por dos motivos:

- Reducir la humedad del material a procesar antes del ingreso en la instalación.
- Eliminar la hoja.

Es evidente que semejante quema a cielo abierto provoca una gran contaminación. La Tabla 10.27 muestra los resultados de varias tomas de datos.

Tabla 10.27. Contaminación provocada por la quema de la caña a cielo abierto.

SUSTANCIA	CANTIDAD	UNIDAD	FUENTE
NO _x	$1,7 \cdot 10^{-4}$	Kg/kg caña	Leal 2005
CH ₄	$3,03 \cdot 10^{-4}$	Kg/kg caña	Macedo1997; Jungbluth, Dinkel et al 2007
CO	$3,27 \cdot 10^{-2}$	Kg/kg caña	Leal 2005; Jungbluth, Dinkel et al 2007
Partículas >10 μm	$2,62 \cdot 10^{-3}$	Kg/kg caña	Leal 2005
Partículas >2,5 μm	$2,84 \cdot 10^{-4}$	Kg/kg caña	Leal 2005; Jungbluth, Dinkel et al 2007
NMHC	$5,3 \cdot 10^{-3}$	Kg/kg caña	Leal 2005

Las emisiones de la quema de bagazo en una caldera, controlada, se reflejan en la Tabla 10.28. La comparación entre esta tabla y la anterior muestra la gran diferencia entre ambos sistemas de proceder.

Tabla 10.28. Emisiones en las calderas por la combustión 1 kg de bagazo y t de azúcar. (Fuente informe “Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia”, Cap II).

Sustancia	Unidad	Cantidad por t caña de azúcar	Cantidad por kg bagazo
Residuos, calor	MJ	$1,0 \cdot 10^{+4}$	$5,8 \cdot 10^{-0}$
Dióxido de Carbono, biogénico	Kg	$1,2 \cdot 10^{+3}$	$7,1 \cdot 10^{-1}$
Óxido de nitrógeno	Kg	$4,9 \cdot 10^{+1}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
Partículas, < 2.5 μm	Kg	$2,5 \cdot 10^{+1}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Monóxido de carbono biogénico	Kg	$3,9 \cdot 10^0$	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Metano, biogénico	Kg	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$9,8 \cdot 10^{-7}$
NMVOC, distintos compuestos de metano de orgánicos volátiles, origen	Kg	$3,4 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$

no especificado			
Dióxido de azufre	Kg	$1,4 \cdot 10^0$	$5,6 \cdot 10^{-6}$
Monóxido de dinitrógeno	Kg	$1,3 \cdot 10^0$	$5,2 \cdot 10^{-6}$
Acetaldehído	Kg	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$
Hidrocarburos alifáticos a alcanos, sin especificar	Kg	$5,1 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$
Hidrocarburos alifáticos, insaturados	Kg	$1,7 \cdot 10^0$	$7,0 \cdot 10^{-6}$
Arsénico	Kg	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$
Benzo(a)pireno	Kg	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$
Benceno	Kg	$5,1 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$
Bromo	Kg	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$
Calcio	Kg	$3,3 \cdot 10^0$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
Cadmio	Kg	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$
Cloro	Kg	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$4,1 \cdot 10^{-7}$
Cromo	Kg	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-9}$
Cromo VI	Kg	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$9,0 \cdot 10^{-11}$
Cobre	Kg	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$
Dioxinas, medida como,3,7,8-tetraclorodibenzo-pdioxina	Kg	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$7,0 \cdot 10^{-14}$
Etil Benceno	Kg	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^{-8}$
Flúor	Kg	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
Formaldehido	Kg	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$
Hexacloro Benceno	Kg	$4,0 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-14}$

Para tener una idea del impacto que ello supone hay que tener en cuenta que una instalación regular/grande quema del orden de 50 t bagazo/h.

3.3.7. Tratamiento energético de alperujos

El alperujo u orujo es el principal residuo orgánico generado en las plantas de extracción de aceite de oliva o "almazaras". Está constituido por la pulpa y los huesos de aceituna, además de un porcentaje variable de agua y de aceite que depende principalmente del sistema de elaboración de aceite de oliva. La aceituna después de los procesos de lavado, molido y abatido, y en el sistema llamado de 2 fases, la centrifugación y la decantación, se obtiene por un lado aceite, y por otro el alperujo. El sistema de 2 fases o continuo, es el sistema mayoritariamente empleado en España, alcanzando el 80% de la producción. El alperujo por ser un producto natural no mantiene una composición constante. De forma aproximada contiene entre el 55 y el 70% de agua, con un 40 a 30% de materia orgánica y el resto de minerales. En la primera se encuentran azúcares, 20-88% en volumen, sustancias nitrogenadas, 12-24%, ácidos orgánicos, 5-15%, polialcoholes, 5-15%, fenólicos 3-8%, y aceite residual del 0,3-5,5%. Uno de los componentes más conflictivos son los productos fenólicos, por su poder antibacteriano, fitotóxico y color negruzco. El poder calorífico superior del alperujo es de unos 18.000 kJ/kg.

Dada la elevada humedad del alperujo, este ha dejado de ser rentable durante muchos años para la industria extractora, debido a los altos costes energéticos de la operación de secado térmico. Por tanto y ante la imposibilidad de su vertido a los cauces públicos, dado su elevado poder contaminante, la solución más generalizada ha sido la de su vertido en balsas de evaporación. Sin embargo ello supone disponer de

grandes superficies de terreno, que además produce malos olores, incremento de insectos, desbordamientos, filtraciones, impacto sobre la estética del entorno, etc.

Ante los graves inconvenientes de las balsas de evaporación, la Administración ha obligado a una adecuación de la gestión de este residuo, con objeto de minimizar su impacto social y medioambiental. Esto ha supuesto importantes inversiones a las empresas, que en la búsqueda de la competitividad han potenciado diversas alternativas.

En Chile, el Consejo Nacional de Producción Limpia, en un proyecto apoyado por la Unión Europea, en 2012 presentaba la “Guía de Mejores Técnicas Disponibles para la Valorización del Alperujo en la Obtención de Energía Calórica para las Operaciones de las Plantas Olivícolas”. Entre ellas propone:

- Valorización térmica en calderas de biomasa de uso doméstico.
- Peletizado.
- Técnicas emergentes, entre las que se indicaban la pirólisis, la gasificación y la digestión anaerobia.

Sin embargo en todas estas aplicaciones, exceptuando la digestión anaerobia, deben ser precedidas por un secado del alperujo, y este es un proceso complejo. La forma más conveniente es hacerlo en dos fases o incluso tres mediante un tromel. En la primera fase de secado se reduce la humedad del 55-70% hasta el 35-40%. Sin embargo esta operación es ciertamente problemática, pues debido a los compuestos orgánicos existentes, con azúcares, polialcoholes, y ácidos orgánicos, al entrar en contacto con la corriente de gases calientes tienden a formar bolas, por el efecto rotativo del tromel, quedando atrapada en su interior agua y en el exterior una película de estos compuestos caramelizados. Ello sucede a pesar de los alabes o distintos sistemas dispuestos en la superficie de tromel para potenciar el intercambio térmico. Por esta razón es preciso someter al alperujo a dos o tres etapas de secado, con una operación de triturado intermedio. La función del molino es la de romper las bolas, y permitir la eliminación del agua atrapada en el interior de las mismas, facilitando la operación del segundo secado. En esta se reduce la humedad del 35-40% hasta alrededor del 8-10%. El producto resultante, orujo seco, queda como subproducto que puede emplearse como combustible, para lo cual incluso puede peletizarse.

Una de las opciones más habituales del alperujo seco es utilizarlo como combustible para los propios secaderos de secado de alperujo. Hace unos pocos años el alperujo no aportaba suficiente energía para realizar el propio secado, pero con las mejoras tecnológicas ha sido posible cerrar el ciclo.

Las más modernas instalaciones recurren a soluciones más complejas. Un ejemplo singular lo constituye la Planta de Tratamiento Integral de Alperujo en Linares (Jaén, España) explotada por la Compañía Orujera de Linares, Figura 10.48. Construida en 2011, constituye un complejo industrial dedicado al secado de alperujo y a la extracción de aceite de orujo de oliva. Este supone un verdadero escaparate de aprovechamiento energético de la biomasa del olivar, y de aplicación de cogeneración de alta eficiencia. Básicamente está compuesta por un sistema de secado con motores de cogeneración de 24,9 MWe, una caldera de biomasa y una turbina de vapor de 15 MW.



Figura 10.48. Planta de Tratamiento Integral del Alperujo en Linares (Jaén, España) de 2009. Compuesta de secado de alperujo con motores de cogeneración con gas y caldera, de alperujo y otra biomasa, conectada a una turbina-alternador de 15 MW. (Fuente InfoEnviro –InfoPower julio/agosto 2011).

El proyecto consiste en una planta capaz de procesar entre 180.000 y 210.000 t al año de orujos de aceituna, con equipos para almacenamiento, secado y extracción de aceite de orujo, e instalaciones que permitan cubrir su demanda térmica y eléctrica, generando un excedente de energía eléctrica que se vierte a la red pública. Los procesos más importantes de la planta son: a) secado del alperujo con el calor (gases de escape) obtenido con 3 motores de cogeneración a gas, que a su vez producen electricidad, y b) con el alperujo seco, y otra biomasa, se alimenta una caldera de biomasa que produce vapor que es enviado a una turbina y alternador de 15MW.

La humedad media inicial del alperujo que llega a la planta es del orden del 65%, humedad que se reduce en un secadero con tres trómeles hasta un valor del 10%. La planta de secado de orujo es capaz de procesar 200.000 t/año, quedando disponibles finalmente 67.000 t/año de orujillo seco, lo que permite alimentar la planta de 15 MW durante 5.000 h. En realidad, del proceso de secado se obtiene orujo graso seco que, de manera externa al complejo, se somete a un proceso de extracción en el cual, mediante un tratamiento con hexano y vapor se obtiene el aceite de orujo y orujillo seco, que es devuelto a la planta.

Como se ha comentado anteriormente, lo habitual es que este orujillo seco se emplee como combustible de los secaderos y su combustión permita aportar la energía térmica necesaria para el secado. En cambio, en este proyecto para el secado se ha previsto el aprovechamiento de la energía térmica de los gases de escape de tres motores de gas de cogeneración en sustitución de este orujillo seco. La instalación de cogeneración consiste en tres motores de gas de ciclo Otto capaces de generar 8,33 MWe de potencia cada uno, con un total de 24,9 MWe en conjunto. El caudal de gases es de 39,16 kg/s a 395 °C, dirigidos al secado de orujo húmedo, con una capacidad de

17.000 kg/h de agua. Simultáneamente, estos tres motores generan energía eléctrica por medio de sendos alternadores acoplados a los motores.

El orujillo seco se utiliza para alimentar la caldera de generación eléctrica. Esta a su vez, quema, además del orujillo, otras 57 t/h de biomasa procedentes de cultivos de la zona como orujos de uva, poda del olivar, cáscara de almendra, rastrojos de algodón, girasol, ajos, etc., e incluso procedentes de cultivos energéticos, como es el sorgo. De esta forma es posible generar 15 MW durante al menos 8.000 h/año.

La caldera quema 16,5 t/h de biomasa, produciendo 69 t/h netas de vapor a 42 bar y 403 °C. El vapor se expansiona en una turbina hasta 0,1 bar que a su vez acciona un alternador que genera una potencia de 15 MWe. Se trata de una caldera soldada, de tipo vertical, acuatubular, de circulación natural y de estructura autosoportada en su zona inferior, con tubos en su totalidad de superficie lisa, diseñada para la generación de vapor sobrecalentado mediante la combustión de biomasa y la posterior recuperación de calor de los gases. Existe un módulo economizador, que va suspendido en la estructura en la zona de su tercio superior.

El mecanismo de alimentación de la biomasa es automático desde el punto de almacenamiento. Está compuesto por dos sistemas independientes de alimentación. La parrilla es del tipo vibrante, para mover y distribuir el combustible a lo largo de una gran área.

La extracción de cenizas se realiza mediante dos tipos diferentes de sistemas. El primero es húmedo para las cenizas de la parrilla y caldera, y un sistema seco para las cenizas volantes del economizador y del sistema de depuración de humos. Ambos están diseñados para evitar problemas con la propagación del polvo en el interior y exterior de la planta.

Para cumplir con los límites marcados por la legislación europea y local en materia de emisiones de partículas a la atmósfera, la caldera cuenta con un sistema de depuración de los gases de combustión consistente en un filtro de mangas de limpieza automático mediante aire comprimido. La instalación de depuración cuenta con un preseparador ciclónico entre la caldera y el filtro de mangas, cuya función es evitar la llegada de chispas al filtro de mangas, las cuales podrían dañar el material filtrante. El filtro, con mangas montadas verticalmente, tiene una superficie filtrante total de 4.065 m². El tejido filtrante es fibra de vidrio con membrana de PTFE de la firma Gore-Tex, presentando un excelente resultado de funcionamiento. Los gases depurados son enviados a través del ventilador de tiro inducido a la chimenea de evacuación de 40 m altura y 1,8 m de diámetro interior y se expulsan a la atmósfera.

Como resumen, toda la planta es capaz de consumir 120.000 t/año de biomasa seca y gas, unos 38 M Nm³/año (alrededor de 50 MW de potencia), y producir 315.000 MWh/año de energía eléctrica, alrededor de 40 MW de potencia. La energía consumida por el gas natural, supuesto un PCI de 10,2 kW/Nm³, es de 387,6 MWh/año y si se considera un PCI de la biomasa seca de 15.000 kJ/kg, resultan 500 MWh/año, con estos datos se obtiene una eficiencia del proceso completo del orden del 36%, próxima a la de una central convencional, a pesar de haber secado el alperujo en la que se ha invertido alrededor de 140.000 MWh/año.

En Puente de Genil (Córdoba, España) existe otra instalación semejante, con el consumo del mismo tipo de biomasa y proceso, tanto de secado como en la generación. La única diferencia estriba en que los 3 motores de cogeneración se han sustituido por una turbina. Como esta tiene un menor rendimiento eléctrico que un motor, los gases de escape son capaces de entregar, a igual potencia de consumo, una mayor potencia térmica, por lo que la instalación de secado con cogeneración

consume menos gas, pero también produce menos cantidad de energía eléctrica. En la región andaluza (sur de España) existen un total de 10 centrales eléctricas en base al tratamiento de alperujo

En el año 2008 España produjo 5,5 millones de toneladas de alperujo, por lo que aún queda una gran parte por tratar.

Aparte de su aprovechamiento energético, existen otras aplicaciones, como la valorización del alto contenido en potasio del alperujo. Así una vez liberado de las sustancias polifenólicas tóxicas, el alperujo se convierte en una alternativa natural de los fertilizantes químicos convencionales, o incluso el compostaje, aunque en este caso tiene una baja concentración de nitrógeno, fósforo y micronutrientes, una carencia que se resuelve añadiendo otros elementos ricos en nitrógeno como estiércol o gallinaza.

Otros investigadores de la Universidad de Granada (España) han podido aislar el hidroxitirosol a partir del alperujo en contacto con vapor a 150 °C, y con la incubación con *Corioloropsis rigida*. El hidroxitirosol es un potente antioxidante natural, soluble en agua y es un agente antiinflamatorio, antitrombótico, antiirritante, antimicrobiano (bacteriostático) y antienvjecimiento, y por tanto es adecuado para aplicaciones cosméticas y nutricionales.

Últimamente investigadores del CSIC de Sevilla (España) han presentado un estudio que evalúa el uso de alperujo, después de un proceso de descontaminación, para ser empleado como aislante para evitar que los pesticidas y residuos fitosanitarios lleguen al subsuelo y contaminen los acuíferos. También han comprobado que el alperujo tiene una alta capacidad de adsorción para inmovilizar vertidos de hidrocarburos aromáticos policíclicos en suelos contaminados. Por tanto, su adición como enmienda a suelos contaminados tiene un efecto remediador, ya que intensifica la capacidad inmovilizadora de los residuos peligrosos evitando la contaminación del subsuelo y las aguas subterráneas.

3.4. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO A TRAVÉS DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.

En forma natural la biomasa se degrada aerobiamente por acción de bacterias y microorganismos que, dependiendo del origen de la materia orgánica actúan de una forma u otra, siguiendo complejos mecanismos que terminan transformando la estructura original de la biomasa. En condiciones de presencia de oxígeno este proceso finaliza en los siguientes productos finales: CO₂, agua, sulfato, nitrito, nitratos y sales de amonio. Si un proceso análogo se lleva a cabo en condiciones anaerobias se obtiene como producto final un residuo húmedo de difícil degradación y un gas inflamable que se denomina biogás. Dependiendo de las características de la biomasa original este gas puede tener un contenido de metano de entre 50 y 70%, por lo que su potencial energético es muy elevado y permite una versatilidad de valorización amplia. Este biogás alcanza un poder calorífico de alrededor de 5.000 Kcal/m³.

En la naturaleza es posible observar este proceso con facilidad. Se presenta cada vez que se reúnen condiciones establecidas de biomasa, humedad y ausencia de oxígeno. Un ejemplo de ello son los vertederos de RSU donde los residuos son compactados con poca presencia de oxígeno, produciéndose un biogás que es utilizado en muchos lugares como combustible en sustitución del gas natural o el GLP.

La humedad presente en la biomasa es un factor muy importante para determinar su uso potencial en el proceso de metanización, ya que, a diferencia de otras técnicas de valorización de biomasa residual, un alto contenido de humedad favorece el proceso.

Lo anterior hace interesante el aprovechamiento energético de residuos ganaderos y de los fangos de depuración de aguas residuales urbanas.

3.4.1. Descripción del proceso de fermentación anaerobia de la biomasa

La degradación anaerobia transcurre en varias fases que se pueden resumir de la siguiente manera:

- **Hidrólisis:** Un gran número de microorganismos anaerobios excretan enzimas hidrolíticas que fraccionan los enlaces de los polisacáridos que forman la biomasa en unidades simples de azúcares, grasas y aminoácidos.
- **Acidogénesis:** Los compuestos son asimilados por algunos microorganismos y/o fermentados produciendo una gran cantidad de ácidos orgánicos. Se generan también gases como CO₂, H₂ y pequeñas cantidades de NH₃, H₂S, y también alcoholes en especial glicerol.
- **Acetogénesis:** Bacterias denominadas acetogénicas de lento crecimiento, metabolizan los alcoholes, el ácido láctico y los ácidos grasos volátiles, produciendo ácido acético e hidrógeno.
- **Metanogénesis:** El acetato, hidrógeno y CO₂ producido, son transformados por acción de las bacterias metanogénicas, que son un grupo primitivo y reducido de bacterias anaerobias, formando metano, CO₂ y agua.

En la fase de hidrólisis se produce una despolimerización de las macromoléculas que se transforman en moléculas más simples, a su vez, estas moléculas se convierten en ácidos grasos durante la fase de acidogénesis. En la etapa de hidrólisis las moléculas más frecuentes en la biomasa, son:

- Los lípidos que pasan a ácidos grasos.
- Los polisacáridos a monosacáridos.
- Las proteínas a aminoácidos.
- Los ácidos nucleicos a purina y pirimidinas.

Existe un gran número de tecnologías para la digestión anaerobia, en general se adaptan a las características de la biomasa que ha de ser tratada. La Figura 10.49 muestra algunas de ellas. En términos generales se pueden diferenciar por los siguientes aspectos:

- Sistema de carga y descarga que puede ser continuo o discontinuo
- Localización y conservación de la biomasa en el interior que puede ser:
 - a) con biomasa microbiana incluida en toda la masa a digerir (biomasa suspendida) o bien con la biomasa microbiana adherida a un soporte inerte fijo o móvil;
 - b) con digestores de dos fases en cada una de las cuales se optimizan las condiciones para la fase acidogénica y la metanogénica respectivamente.

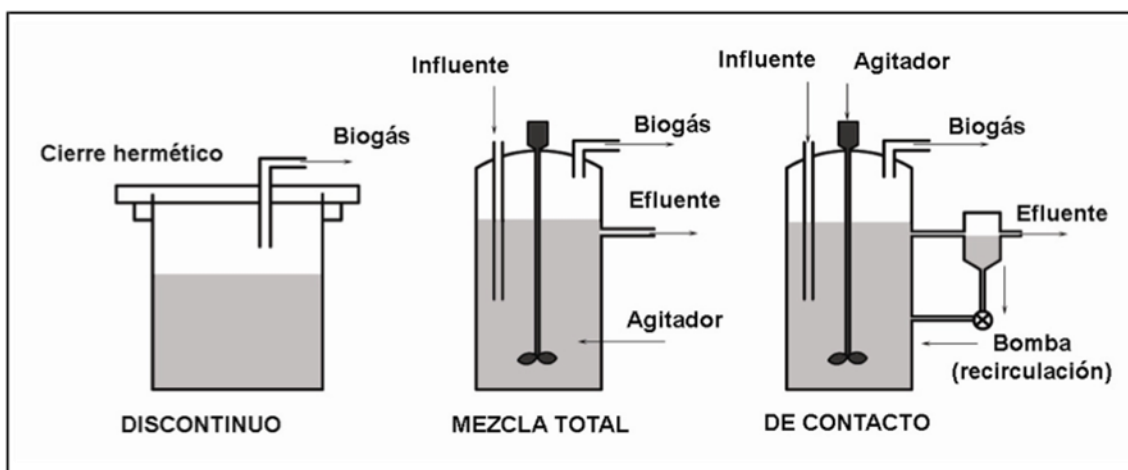


Figura 10.49. Diversos sistemas de digestores anaerobios.

Los principales parámetros que deben considerarse en el establecimiento y diseño de un digestor son los siguientes:

- **Características del efluente:** concentración de sólidos en porcentaje, demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno, contenido total de nitrógeno, pH, conductividad, relación carbono/nitrógeno, alcalinidad, inhibidores (metales pesados o antibióticos).
- **Parámetros de diseño:** Sistema de operación, forma de carga, sistema de descarga, modo de agitación, sistema de calefacción, aislamiento térmico, forma, volumen necesario según la carga diaria y el tiempo de retención.
- **Instalaciones complementarias:** depósito de almacenamiento previo, unidad de calefacción, gasómetro, unidad depuradora del biogás, unidad tratamiento de fangos y efluentes, unidad de compresión del biogás.
- **Parámetros de la digestión:** características del efluente, temperatura de digestión, pH, alcalinidad, potencial redox (debe ser lo más reductor posible, para eliminar las sustancias oxidantes), factores nutricionales, nitrógeno, relación C/N (debe estar entre 25 y 35) y contenido de azufre.
- Es necesario un especial cuidado con la cantidad de ácido sulfhídrico del biogás, ya que es un agente altamente corrosivo pudiendo dañar irreversiblemente los equipos utilizados.

La Tabla 10.29 muestra los rendimientos típicos de algunos residuos en la producción de biogás.

Tabla 10.29. Producciones medias de biogás de diferentes residuos.

Tipo	Rendimiento (m ³ gas/t MS)	Producción (kg/día y animal)
Residuos urbanos (Materia orgánica)	116	-
Estiércol de ovino y caprino	300	1,6
Estiércol de vacuno	320	49
Paja	330	
Paja de cebada	360	

Contenido estomacal cerdo	380	
Melaza	380	
Prensado de patata	390	
Gallinaza	390	
Purín de cerdo	400	
Hojas	410	
Contenido del rumen	420	
Paja de trigo	440	
Hoja de remolacha azucarera	480	
Vegetales, trébol	500	
Estiércol de aves	500	0,1
Ensilado de maíz	550	
Grano de cebada y lúpulo	580	
Estiércol de caballo	590	
Estiércol de cerdo	700	9,5
Pulpa de remolacha azucarera	750	
Grasa de desnatado	1.100	
Lodos de EDAR	110	

El gas generado por el proceso de digestión anaerobia, es utilizado generalmente como combustible para alimentar motores o microturbinas a gas, produciendo electricidad. En términos generales los sistemas de metanización para la producción de energía eléctrica deben contar con un proceso de depuración y tratamiento de residuos orgánicos para que se pueda conseguir una viabilidad técnica que asegure el abastecimiento de las materias primas, y comercial, disminuyendo los costos de transporte, tratamiento y disposición final de residuos de origen orgánico. Es una alternativa altamente recomendable para la valorización de residuos de la industria ganadera y la combinación con procesos de depuración de aguas residuales urbanas. Un claro ejemplo del uso de biomasa y aprovechamiento de residuos urbanos se tiene en el municipio de Västerås en Suecia. En este municipio de 170.000 habitantes, el gobierno local ha establecido un convenio con los ciudadanos para que hagan la primera selección y separación de residuos orgánicos en los domicilios y los negocios locales, en el programa participa activamente el 90% de la población. La recogida selectiva de los residuos se realiza con vehículos basureros especialmente adaptados para tal fin y que además funcionan con el biogás obtenido mediante digestión

anaerobia del residuo. Para optimizar el proceso de obtención del gas, el municipio ha firmado otro convenio con los agricultores para que entre los ciclos de cultivo de productos comerciales tengan un ciclo de producción de pastura de rápido crecimiento. Este se cosecha escalonadamente para asegurar el abastecimiento regular del material vegetal (residuo) a las plantas de digestión. Esta pastura recién cortada se introduce en mangas plásticas de hasta 90 metros de largo donde se inicia el proceso de ensilaje y fermentación. De estos tubos se obtiene un residuo líquido con un alto poder fertilizante que emplean los agricultores en una primera etapa; el residuo sólido es dosificado para su aplicación en los tanques de digestión donde se mezcla con la fracción orgánica de los RSU que, previamente, han sido separados y recolectados.

La planta de digestión consta de varios tanques unidos en serie para mantener la presión del gas y la recirculación del mismo para acelerar el proceso. Con este sistema se han alcanzado producciones de hasta 350 Nm³/hora de biogás. Este gas es presurizado y lavado a contraflujo en agua para obtener finalmente el metano limpio. El agua de tratado es después desgasificada a presión atmosférica obteniéndose CO₂ y restos de metano que es reintroducido al circuito de alta presión (10 a 12 bar).

El volumen de biogás obtenido es suficiente para mantener la flota de 40 buses municipales y los 10 carros adaptados para la recolección de los residuos orgánicos, además de otros 500 vehículos pequeños de transporte ligero. Los agricultores que participan de este proyecto reciben además el fertilizante sólido de alta calidad que les permite mantener y mejorar 1.500 hectáreas de cultivo intensivo.

3.5. PRODUCCIÓN BIOLÓGICA DE HIDRÓGENO MEDIANTE ALGAS, BACTERIAS Y RESIDUOS

El anterior apartado ha tratado sobre la valorización energética de residuos orgánicos y de biomasa obtenida, fundamentalmente, mediante la digestión anaerobia. Como resultado de este proceso se genera biogás, mezcla de metano y dióxido de carbono, con un poder calorífico del orden de 5.500 kcal/m³, que puede ser transformado en energía eléctrica y calorífica. Sin embargo, una proporción importante de la energía generada es dedicada al automantenimiento del proceso anaerobio mesófilo, con temperaturas de 35 °C o incluso termófilo, con 55 °C. Además, en muchas instalaciones, ante la imposibilidad de almacenar adecuadamente el biogás, éste es quemado en una antorcha sin aprovechamiento alguno.

En este apartado, en contraposición a la digestión anaerobia, se presentan unos novedosos procesos, también biológicos, basados en la fermentación o fotosíntesis, con los que es posible también obtener un gas, en este caso, hidrogeno.

El hidrógeno es un vector energético y se presenta en muchas ocasiones como una alternativa a los combustibles fósiles. Sin embargo, en la actualidad, el hidrógeno se utiliza básicamente como producto industrial, y resulta imprescindible, entre otros sectores, en la industria química, en la de alimentos y en la producción de derivados electrónicos. En consecuencia existe una creciente demanda de hidrógeno que debería ser sostenible y económicamente viable. Pero su forma de obtención actual más económica es a partir de los combustibles fósiles, por reformado del gas natural. Existen otras metodologías como la descomposición electrolítica del agua, reformado del metanol, pila de combustible, etc., pero todas ellas terminan por consumir energía que, en gran parte, procede de combustibles fósiles, y aún son más costosas, menos sostenibles, tanto desde el punto de vista económico como energético.

El uso de energía solar para separar el agua en hidrógeno y oxígeno o en otros procesos, eminentemente biológicos, pueden producir este vector energético de una forma renovable. Estas reacciones ocurren naturalmente, y pueden ser manipuladas en propio beneficio. Existen microorganismos, unos fotosintéticos y otros no, pero todos al fin son microalgas y/o bacterias, capaces de producir biohidrógeno en procesos como fotobiólisis, fotofermentación y sobre todo la fermentación oscura.

Las características químicas y físicas del hidrógeno son muy particulares. Es el elemento más abundante del universo y está presente en el 75% de toda la materia. La atmósfera contiene cerca del 0,07% de hidrógeno y la superficie de la tierra el 0,14%. A pesar de ser el elemento más liviano que se conoce, con una densidad de 0,09 g/l, posee una elevada densidad energética (122.000 kJ/kg o 29.137 kcal/kg), es decir cerca de 7 veces la densidad energética de una biomasa. Por tanto encontrar un sistema de obtener hidrógeno de una fuente renovable es uno de los objetivos de muchos científicos y tecnologías. Una de las vías más prometedoras es a partir de la biomasa, como materiales de desecho, residuos de biomasa y algas.

Los principales métodos actuales para la producción de este biohidrógeno son:

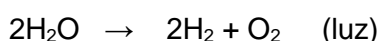
- Biofotólisis directa.
- Biofotólisis indirecta.
- Fotofermentación.
- Reacción de intercambio gaseoso o *Water gas shift reaction*.
- Fermentación oscura.

Todas ellas están en fase de experimentación, pues aún requieren de un significativo avance científico y tecnológico, con el fin de desarrollar métodos que mejoren tanto las tasas de producción de hidrógeno como sus rendimientos. Sin embargo su desarrollo presenta grandes posibilidades por producir energía renovable y tratar sustratos que en muchas ocasiones son desechos, lodos y aguas residuales.

De los distintos sistemas biológicos de producción de hidrógeno, con la visión actual, en primer lugar se sitúa la fermentación oscura. Sin embargo todas son alternativas muy atractivas por trabajar con un amplio rango de microorganismos y sustratos renovables, algunos con la capacidad de llevarse a cabo en procesos continuos, y controlar las condiciones de operación como pH, la retención hidráulica y la presión parcial de gases, entre otras, permitiendo optimizar el proceso de producción de hidrógeno.

3.5.1. Biofotólisis directa

Este es un proceso de producción de hidrógeno y oxígeno fotosintéticamente a partir de agua y luz solar. Se utilizan algunos microorganismos que constituyen las algas verdes. Estas requieren de un tiempo de incubación anaerobia en oscuridad para inducir la síntesis o la actividad de enzimas involucradas en el metabolismo del hidrógeno, como las hidrogenasas reversibles e irreversibles. Éstas canalizan la producción de dos protones ($2H^+$), a hidrógeno gaseoso (H_2) mediante la siguiente reacción

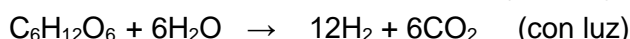
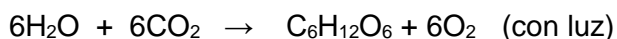


Las hidrogenasas constituyen una parte de una maquinaria genética y enzimática en el transporte de electrones para generar hidrógeno y producir ATP (trifosfato de adenosina, nucleótido fundamental en la obtención de energía celular) durante la fotosíntesis. Teniendo en cuenta que la hidrogenasa en este proceso no es tolerante al oxígeno y que el proceso genera hidrógeno y oxígeno en forma

simultánea, no es viable a lo largo del tiempo. Por lo que se recurre a una separación tempo-espacial, donde primero el CO₂ es fijado en sustratos ricos en hidrógeno durante la fotosíntesis normal y luego se incuban el alga anaeróbiamente con luz, produciéndose hidrógeno gaseoso.

3.5.2. Biofotólisis indirecta

Esta se lleva a cabo por cianobacterias y algas verde-azules. A partir de un sustrato (carbohidrato) en condiciones anaerobias se produce H₂ y CO₂. En el proceso fotosintético el CO₂ es fijado a sustratos ricos en hidrógeno endógeno generando luego hidrógeno molecular cuando estos microorganismos se incuban en condiciones anaerobias. Las reacciones más significativas se pueden sintetizar en



En el proceso se requiere un sistema de cultivo inicial para la fotosíntesis normal y otro sistema aparte para la generación de hidrógeno. Las cianobacterias poseen varias enzimas involucradas directamente en el metabolismo del hidrógeno, como la nitrogenasa y la hidrogenasa. La producción de hidrógeno por cianobacterias ha sido estudiada desde hace más de tres décadas y se ha revelado que la eficiente fotoconversión de agua en hidrógeno es influenciada por muchos factores, siendo la intensidad de luz el más importante. Sin embargo el interés en este proceso ha decaído debido a las bajas tasas de producción, 13 µL/mg (peso seco/h). Además existen desventajas en la producción de hidrógeno con cianobacterias, que se deben fundamentalmente a que es necesario desplazar el O₂ producido, pues éste actúa también como inhibidor de la nitrogenasa y la hidrogenada.

3.5.3. Fotofermentación

En este proceso se utilizan bacterias púrpuras no sulfurosas que producen hidrógeno a partir de sustratos de tipo carbohidrato o residuos orgánicos. El proceso es catalizado por la nitrogenasa bajo condiciones deficientes en N₂, usando luz y compuestos como ácidos orgánicos, que muchas veces están contenidos en sustancias de desecho. La reacción es:



En este proceso también interviene la hidrogenasa captadora de hidrógeno, la cual compete por el hidrógeno disponible en el medio, reduciendo la actividad de la nitrogenasa al quedar sin sustrato. Uno de los parámetros que más afectan la fotofermentación es la intensidad de luz, pues un incremento en ésta se ha visto que afecta de forma simultánea a la velocidad de producción y al rendimiento del hidrógeno.

3.5.4. Reacción de intercambio gaseoso o *Water gas shift reaction*

Ciertas bacterias fotoheterotróficas, dentro de la superfamilia *Rhodospirillaceae*, pueden crecer en oscuridad usando CO como única fuente de carbono para generar ATP, con liberación de hidrógeno y CO₂.



En estos microorganismos, la producción de hidrógeno es promovida por reacciones enzimáticas, las cuales se dan a temperaturas y presiones ambientales. La enzima que se encarga de atrapar el CO y oxidarlo es la óxido-reductasa-CO-deshidrogenasa (CODH), y es parte de un complejo enzimático unido a la membrana. Este proceso aunque puede ser muy prometedor aún debe desarrollarse.

3.5.5. Fermentación oscura

Este proceso se basa en la producción de H₂ por medio de bacterias anaerobias que crecen en la oscuridad y usan sustratos ricos en carbohidratos, que pueden muy bien ser residuos o desechos. Esta variedad, como se ha comentado, es posiblemente la de mayor futuro.

Los subproductos de la fermentación lo constituyen el ácido acético y el butírico con rendimientos de hidrógeno de alrededor de 2 mol H₂/mol glucosa. Las reacciones se pueden sintetizar en:



Las fermentaciones se llevan a cabo a diferentes temperaturas, desde mesófilas, 25-40 °C, hasta termófilas, mayores de 50 °C, produciéndose biogás que contiene H₂, CO₂, CO, H₂S y, en algunos casos, CH₄. Las especies bacterianas que producen hidrógeno por este sistema, y que son más conocidas, son las que corresponden a los géneros *Enterobacter*, *Bacillus* y *Clostridium*. La producción de hidrógeno por estas bacterias depende de condiciones del proceso como pH, entre 4 y 12, tiempo de retención hidráulica y presión parcial del gas. La formación de los productos obedece a las condiciones ambientales en las cuales los microorganismos crecen.

La producción de biohidrógeno por fermentación oscura se puede llevar a cabo tanto con cultivos puros como en cultivos mixtos. En los primeros se ha utilizado carbohidratos simples como xilosa, arabinosa, galactosa, celobiasa, sacarosa, y fructosa, o la más habitual glucosa o incluso otros más complejos como almidón, celulosa y hemicelulosa. La microalga *Clostridium* es una de los microorganismos más estudiados y con mejor rendimiento, aunque también se ha investigado otras cepas como las de los géneros *Spirocheta*, *Anaerocellum*, *Caldicellulosiruptor*, *Dictyoglomus*, *Fervidobacterium*, *Thermoanaerobacter* y *Thermotoga*, por citar algunas.

Con cultivos mixtos, se pueden utilizar varias fuentes de desechos como compost, lodos y suelos, aunque estos, a veces contienen bacterias no deseadas para la producción de hidrógeno como son los metanógenos, los cuales consumen el hidrógeno producido y lo convierten en metano. Generalmente se utilizan pretratamientos con calor y/o pH extremos para enriquecer la microflora, los cuales inhiben la actividad de los consumidores de hidrógeno.

Una de las ventajas del uso industrial de los cultivos mixtos, con respecto a los cultivos puros, es que estos últimos son más sensibles a la contaminación de bacterias consumidoras de hidrógeno. Se ha reportado, con buenos resultados, la utilización de cultivos mixtos con lodos activados, lodos digeridos anaerobiamente, compost de desechos, sedimentos de lagos y suelos de cultivos agrícolas.

En la Figura 10.50 se muestran los resultados obtenidos a escala de laboratorio de la fermentación de diferentes sustratos puros como glucosa, sacarosa y almidón junto a otros de biomasa como trigo, mezcla de cereales, harina cárnica, almidón de maíz, etc. Los resultados son significativos, los mejores en cuanto a la generación de hidrógeno, se obtienen con sustratos de glucosa y sacarosa, aunque también se pueden observar buenos resultados en sustratos de fécula, mezcla de cereales y trigo. Sin embargo, con los sustratos protéicos, harinas carnicas, la producción de hidrógeno es nula o poco significativa, al igual que con la metilcelulosa. Estos rendimientos indican que esta tecnología pueda ser competitiva con la producción de metano en la digestión anaerobia. La velocidad de producción de hidrógeno es relativamente más rápida que la biometanización, obteniéndose la producción total de hidrógeno en un plazo inferior a los tres días de proceso, mientras que en la digestión anaerobia el

tiempo habitual de residencia del residuo en el reactor oscila entre un valor mínimo extremo de diez días y veinticinco días.

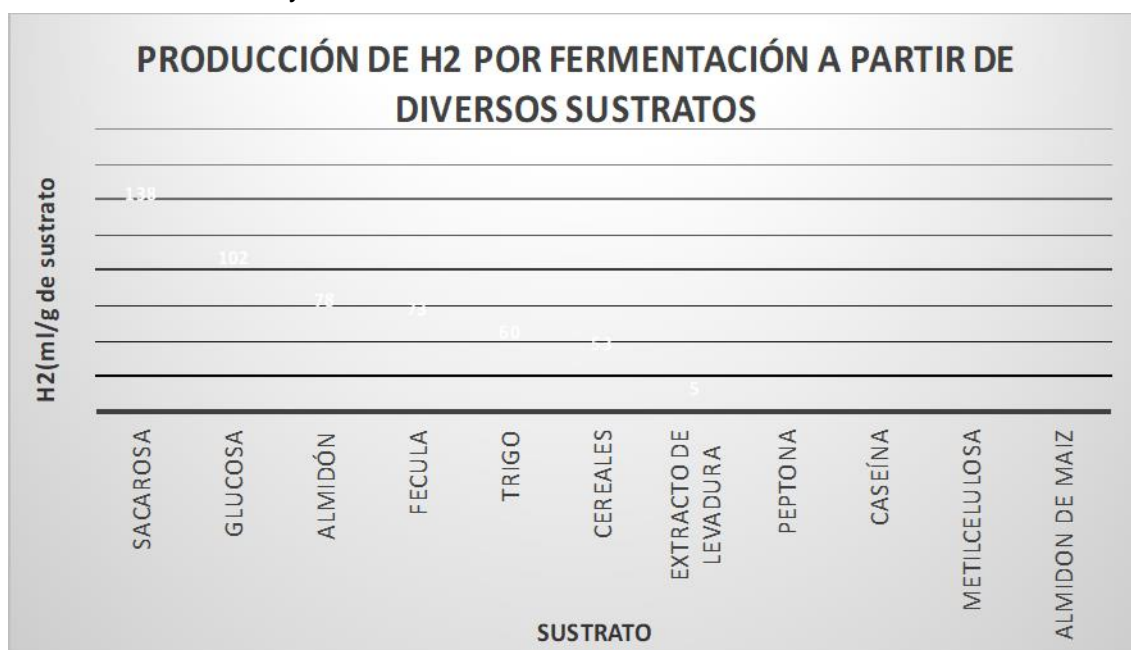


Figura 10.50. Producción de hidrógeno por fermentación a partir de diversos sustratos (Fuente E. López et al. INASMET)

Para que la producción de biohidrógeno sea un proceso sostenible, los sustratos utilizados deben ser de suficiente cantidad y/o concentración para que la fermentación ocurra de forma eficiente y se produzca hidrógeno de una forma energéticamente favorable, y que los pretratamientos sean mínimos y de bajo costo.

Las investigaciones más recientes se enfocan en la utilización de desechos de residuos orgánicos, como sustratos aptos para un proceso sostenible. El rango de los sustratos orgánicos que se podrían usar es tan amplio como el rango de microorganismos utilizados en la producción de hidrógeno por vía fermentativa. Existe gran variedad de sustratos provenientes de recursos renovables como los azúcares contenidos en productos agrícolas como maíz, arroz, trigo, sorgo o material lignocelulósico de la biomasa. Aunque algunas bacterias del género *Clostridium* contenidas en cultivos mixtos han presentado actividades celulolíticas, no se han encontrado bacterias que produzcan hidrógeno a partir de materiales celulósico y hemicelulósico.

También los residuos biomásicos de las industrias de alimentos poseen gran contenido de carbohidratos en forma de azúcares simples, almidón y celulosa que pueden ser utilizados en la producción de biohidrógeno. Estos desechos sólidos contienen cantidades de carbohidratos y proteínas que varían en concentración y de esta manera deben ser ajustados para obtener las condiciones óptimas del bioproceso. Así mismo, pueden utilizarse las aguas residuales de estas industrias procesadoras de alimentos, pues son ricas en carbohidratos, como las aguas residuales de productos lácteos, restos de la industria de la oliva, desechos de panadería, melazas y cervecería.

Igualmente los lodos de plantas de tratamiento que contienen gran cantidad de carbohidratos y proteínas, y que se usan tradicionalmente para la producción de metano, se ha encontrado que con pretratamientos adecuados pueden ser utilizados como sustratos para la producción de biohidrógeno, teniendo en cuenta los debidos cuidados en cuanto a esterilidad.

Cuando se utilizan sustratos de naturaleza compleja, su capacidad de ser biodegradables disminuye. Para aumentarla, se tienen que someter a ciertos procesos de pretratamiento. Generalmente se aplican procesos térmicos, temperaturas de ebullición por ciertos periodos de tiempo, químicos, con ácidos y bases a pHs extremos, o enzimáticos, con el fin de hidrolizar el almidón y la celulosa y dejar el medio con carbohidratos libres para la fermentación. Debido a que gran parte de estos residuos están constituidos por material lignocelulósico, se les debe someter a pretratamientos más enérgicos. Mientras la celulosa y la hemicelulosa pueden seguir pretratamientos más suaves y luego utilizarlas en la fermentación, aunque la degradación de la lignina inhibe el crecimiento microbiano. En resumen, se deben aplicar algunos pretratamientos que permita obtener sustratos más fácilmente fermentables y que no causen efectos dañinos en el proceso.

En el caso de los pretratamientos de las aguas residuales industriales, ricas en compuestos orgánicos, consistirán en la eliminación de ciertos componentes indeseables. Así, puede ser conveniente la desnaturalización de proteínas y sustancias orgánicas complejas, la dilución de la carga orgánica, la regulación del pH y la adición de algunos componentes necesarios para llevar a cabo el proceso fermentativo.

Se debe tener cuidado con los requerimientos de nutrientes inorgánicos para una producción óptima de biohidrógeno a partir de sustratos que contienen carbohidratos. El nitrógeno y el fósforo son muy importantes en la producción de hidrógeno, el azufre y el hierro son componentes esenciales en la producción de las hidrogenasas, las cuales son las encargadas de generar el hidrógeno. Se ha visto también que la limitación de hierro en el medio promueve la formación de metabolitos no asociados al metabolismo del hidrógeno, obteniéndose menor producción de hidrógeno.

La producción de biohidrógeno por fermentación oscura se puede llevar a cabo en el laboratorio en modos de operación por lotes, en continuo o por lotes alimentados. Sin embargo, aunque la fermentación oscura en continuo es factible, no se ha hallado aún un proceso económicamente factible.

Los biorreactores más utilizados para la producción de biohidrógeno por fermentación es el reactor continuo de tanque agitado. En estos se retienen las bacterias productoras para conseguir una mayor capacidad catalítica y permitir grandes tasas de carga orgánica, lo que a su vez permite llegar a altas tasas volumétricas de producción de hidrógeno, sin dejar de lado que se debe evitar la retención de bacterias metanógenas o productoras de propionato. También se han utilizado reactores biológicos secuenciales, en los cuales los microorganismos son retenidos durante un periodo mediante su inmovilización.

En ocasiones se han utilizado métodos para retener la biomasa en el reactor, con matraces de etilén-vinil-acetato, celulosa, capas de alginato-polivinil-acetato, carbón activado y alginato de calcio, aprovechando la formación de biopelículas en estos soportes.

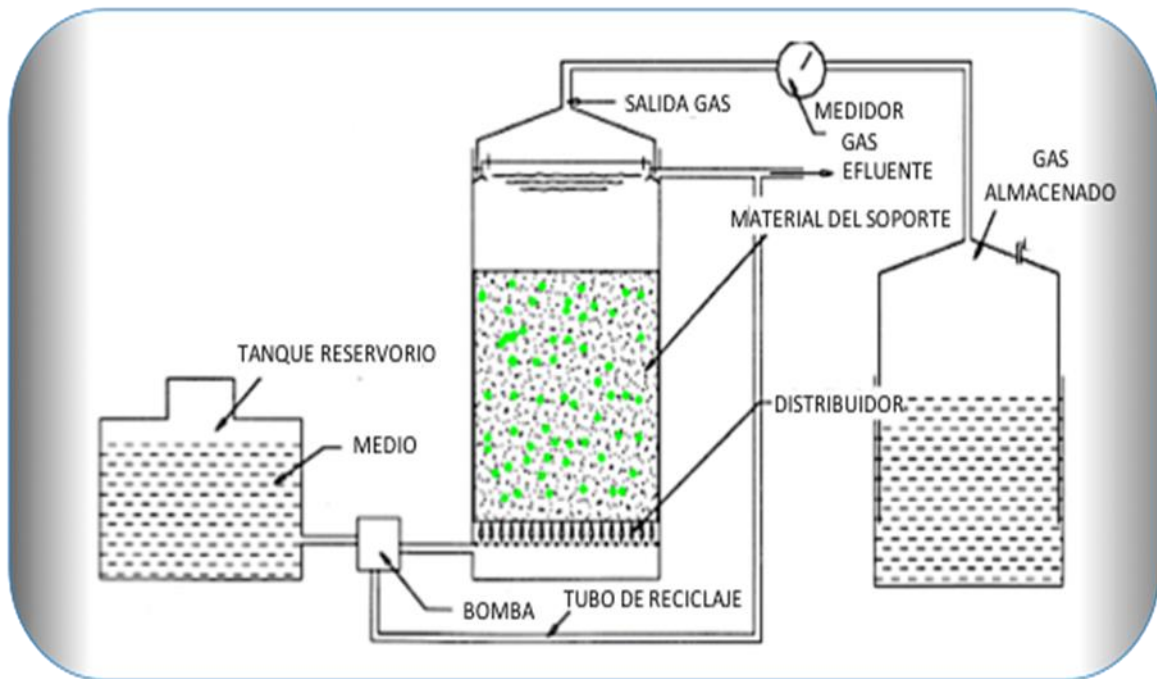


Figura 10.51. Esquema de principio de la fermentación oscura.

En la fermentación oscura se produce, en el biorreactor, una mezcla de gases H_2 , CO_2 , CO , H_2S , de la que se quiere separar el biohidrógeno. Pues esta mezcla no es apta para ser utilizada directamente, debido a que la concentración de hidrógeno en la mezcla no es lo suficientemente alta y los otros gases producidos en el proceso, como el CO_2 , impiden su utilización en aplicaciones como las pilas de combustible. De esta forma, las mejoras en la separación del gas contribuirán de forma directa a aplicaciones económicamente viables del biohidrógeno.

La separación continua del hidrógeno es de suma importancia para un modo de operación en continuo pues su acumulación, y la de los otros gases producidos en el proceso de fermentación oscura, generalmente reducen la tasa de producción debido al aumento de la presión parcial y total de estos gases. Al incrementar la concentración de hidrógeno en la mezcla su síntesis decae. Además pueden suceder cambios metabólicos en la comunidad bacteriana y producirse sustratos reducidos no deseables, como el propionato. La concentración de CO_2 también puede afectar la tasa de producción de hidrógeno; a partir de éste, en un cultivo mixto, las células pueden producir otros metabolitos, cuyas reacciones pueden competir con el requerimiento de NADH (nicotinamida adenina dinucleótido en su forma reducida, su función principal es el intercambio de electrones e hidrogeniones en la producción de energía de todas las células) necesario para una buena producción de biohidrógeno.

También pueden producirse otros gases CH_4 , H_2S , NH_3 , producto de la fermentación, que deben ser separados para obtener hidrógeno con una pureza mayor del 99%. Además, se debe tener en cuenta que la purga con gases inertes, como el nitrógeno y el argón, para garantizar la anaerobiosis, afecta el proceso de separación.

Existen varios métodos de separación y purificación selectiva de hidrógeno usando tecnologías de membranas solas o combinadas con otros métodos. El proceso más usado es la separación con membranas porosas o no porosas, basándose en la permeabilidad y selectividad de los gases. A $25\text{ }^\circ\text{C}$ se han utilizado membranas no porosas de polímeros que tienen gran permeabilidad del hidrógeno y selectividad en mezclas hidrógeno-nitrógeno. En las membranas porosas la permeabilidad de los

gases se ve influenciada sólo por los pesos moleculares y la separación se determina por la relación entre éstos.

Si la fermentación oscura se compara con la digestión anaerobia, hay un aspecto distinto muy significativo respecto al residuo sólido o líquido que se genera en cada uno de estos dos procesos. Éste, en el caso de la digestión anaerobia, no es energéticamente valorizable mediante procesos biológicos. Sin embargo, en el caso de la fermentación oscura, además de la producción de hidrógeno, se obtiene un efluente con una elevada concentración de ácidos simples como el acético, butíricos, etc., que posteriormente pueden ser valorizados energéticamente a través de un proceso, a cola de la fermentación, de digestión anaerobia. Además, dicho proceso de digestión anaerobia tendría un alto rendimiento, ya que el sustrato estaría preparado para una transformación directa por metanogénesis, sin necesidad de pasar por las fases de hidrólisis y acetogénesis. Esto reduciría en gran medida el tiempo de residencia del residuo en esta segunda fase y, por consiguiente, el tamaño de los reactores posteriores.

Como conclusión principal se puede extraer que el proceso de producción de hidrógeno puede ser competitivo con la biometanización. La competitividad vendría determinada por tres parámetros:

- a) una obtención de rendimientos energéticos de hidrógeno comparables con el proceso de digestión anaerobia.
- b) el potencial de acoplamiento del proceso de digestión anaerobia a cola del proceso de generación de hidrógeno, para realizar un aprovechamiento completo de los subproductos generados durante la fermentación, como diversos ácidos orgánicos.
- c) la disminución del tiempo de tratamiento debido a que el proceso de generación de hidrógeno es un proceso más rápido que el proceso de digestión anaerobia y, por lo tanto, los costes de equipamiento serán menores.

3.6. RESUMEN DE ALTERNATIVAS PARA LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA BIOMASA

A título de resumen, la Figura 10.52, expone los diversos procesos que permiten la valorización energética de la biomasa.

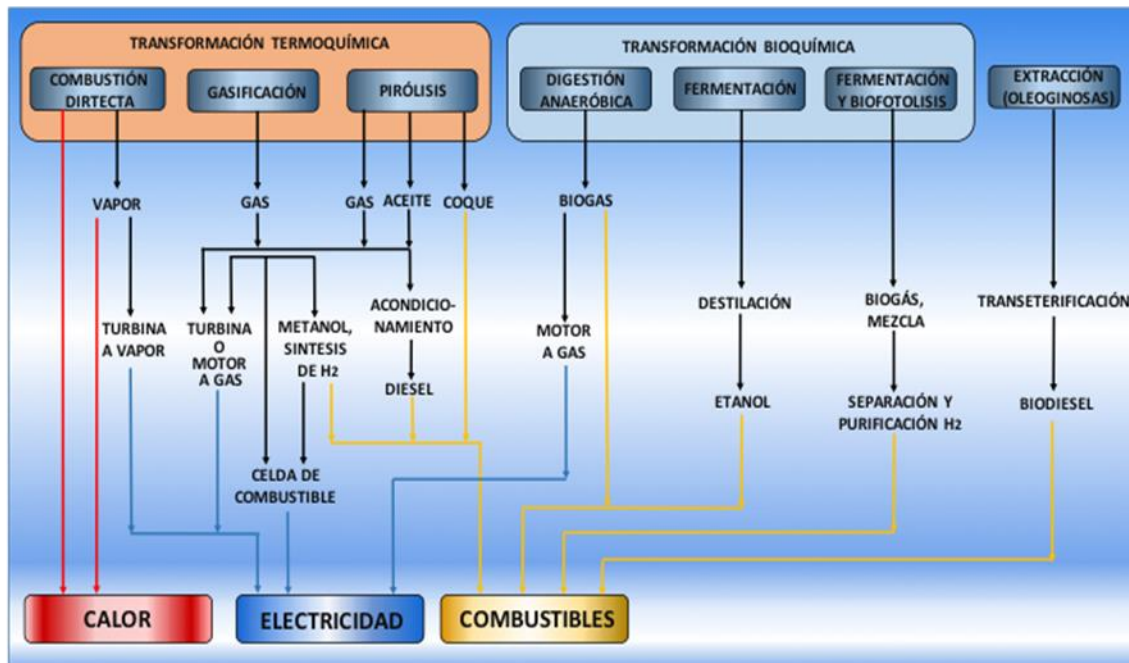


Figura 10.52. Resumen sintético de los procesos de producción y aprovechamiento de los biocombustibles.

3.7. OTRAS VALORIZACIONES DE LA BIOMASA RESIDUAL

La valorización energética es una de las alternativas más interesantes para el aprovechamiento de los residuos de origen orgánico y los restos de cultivos agrícolas, forestales y de la industria alimenticia. Pero existen otras opciones que pueden ser consideradas al plantear un manejo integral de este tipo de residuos.

En el caso de los RSU, el material combustible (papeles, plásticos, etc.) se puede incinerar pero con la fracción orgánica (si es muy abundante) es preferible producir compost o biometanizar.

Sin embargo, desde hace unos años y en cumplimiento con la legislación vigente en España (Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y Suelos Contaminados), muchos eco-parques que no reciben materiales de la recogida selectiva no pueden fabricar compost, sino material bioestabilizado. Este se define como un material orgánico obtenido de las plantas de tratamiento mecánico biológico de residuos mezclados, y se diferencia del compost en que este procede de una recogida selectiva, y un tratamiento específico biológico aerobio y termófilo. También, consecuencia de la citada legislación, el material bioestabilizado tiene contadas aplicaciones, por lo que en muchas ocasiones termina en los vertederos.

3.7.1. Compostaje

El compostaje es una de las opciones más utilizadas en la actualidad, permite la obtención de un sustrato rico en nutrientes y que puede ser utilizado para mejorar la calidad de suelos agrícolas o forestales, nutriendo cultivos y permitiendo la valorización de residuos, principalmente agrícolas e industriales, que difícilmente pueden tener otro uso. Vale la pena citar una variante de compostaje que se inauguró en 2007 en Denia (Alicante, España) con una planta de compostaje de algas marinas con restos de poda de jardín, con producción de 20.000 t/año de compost. Desde el punto de vista de la valorización, el compostaje se considera un sistema de reciclaje interno del proceso completo de producción de agroalimentos. En general los sistemas de compostaje se clasifican en sistemas abiertos y sistemas cerrados.

3.7.1.1. Sistemas de compostaje abierto

Los sistemas abiertos son los tradicionales de compostaje. Los residuos a compostar se disponen en montones o pilas que pueden estar al aire libre o en naves. La aireación de la masa fermentable puede hacerse por volteo mecánico de la pila o mediante ventilación forzada. Los sistemas más utilizados son los descritos a continuación.

Compostaje en pilas por volteo

La pila es oxigenada periódicamente, por lo que con el objetivo de lograr buenos niveles de estabilización e higienización el control del nivel interno de la oxigenación y la temperatura es fundamental. Bajo este sistema usualmente se utilizan alturas de pila de entre 1,5 y 2 metros y anchos de base de entre 2,5 y 3 m. El tiempo de fermentación o de residencia en la zona de volteo suele ser de dos a cuatro meses, transcurrido este tiempo el compost deberá pasar a la zona de maduración antes de proceder a su afino y preparado para la comercialización.

Compostaje en pilas estáticas con aireación natural

Es el sistema más antiguo que se conoce y se realiza en pilas, de altura reducida, y no se mueven durante el compostaje. La ventilación es natural a través de los espacios de la masa a compostar. Las dimensiones de los montones deben estar en función de los equipos utilizados para compostar, no interesa que sean más altos de 1,5 m, con una anchura en su base de unos 2,5-3 m, de la longitud deseada y de frente triangular, debiendo presentar mayor pendiente en los lugares o épocas más lluviosas. Este tipo de compostaje tiene como principal desventaja el largo período de proceso requerido y que es sólo posible con materiales o mezclas muy porosas en que la aireación pasiva se da naturalmente. En la mayor parte de las experiencias de compostaje industriales se prefieren sistemas con volteo o aireación forzada.

Compostaje en pilas estáticas con ventilación forzada

La pila de fermentación es estática y en su formación se ha dispuesto un sistema mecánico de ventilación por tuberías perforadas o por un canal empotrado en la solera. Las tuberías se conectan con un ventilador que asegura la entrada de oxígeno y la salida de CO₂. Esta ventilación puede hacerse por succión o inyección de aire o bien mediante sistemas alternantes de succión e inyección. Con el fin de reducir los problemas de olores, el aire se pasa a través de una pila de compost maduro que actúa como filtro.

3.7.1.2. Sistemas de compostaje cerrados

Los sistemas cerrados de compostaje se utilizan de manera industrial generalmente para compostar residuos en las proximidades de ciudades de tamaño medio o grande. En estos sistemas la fase inicial de fermentación se realiza en reactores que pueden ser de dos tipos: horizontales o verticales, mientras que la fase final de maduración se hace al aire libre o en naves abiertas. Son sistemas desarrollados para reducir considerablemente las superficies de compostaje y lograr un mejor control de los parámetros de fermentación y controlar los olores de forma más adecuada. Aunque estos sistemas requieren costos de instalación superiores a los anteriores, presentan la ventaja de ser más rápidos y por tanto requerir menos espacio.

Reactores verticales para compostar

Los reactores verticales pueden operar de forma continua o discontinua. En el primer caso, el material a compostar se encuentra en forma de masa única, mientras que en el segundo caso, la masa del compostaje se sitúa en distintos niveles.

En los sistemas cerrados continuos se utilizan reactores de 4-10 m de altura, con un volumen total de 1.000 a 3.000 m³. El biorreactor consta de un cilindro cerrado, aislado térmicamente, que en su parte inferior posee un sistema de aireación y extracción de material. Éste se introduce por la parte superior mediante un tornillo alimentador. A medida que se va extrayendo el material compostado, el material fresco va descendiendo. El control de la aireación se realiza por la temperatura y las características de los gases de salida (éstos son aspirados por la parte superior del reactor). El tiempo de residencia es de, aproximadamente, dos semanas.

Los reactores verticales discontinuos constan de un depósito cilíndrico de grandes dimensiones dividido en varios niveles (cada nivel tiene de 2 a 3 m de altura). La materia a compostar se coloca en lo más alto y mediante dispositivos mecánicos se voltea la masa a la vez que va descendiendo al piso inferior. La humedad requerida para llevar a cabo el proceso se consigue por evaporación del agua del material situado en los niveles inferiores, la cual se encuentra a una mayor temperatura, o bien se dispone de sistemas de suministro de agua. Cuando la fracción orgánica ha descendido al último piso se da por concluida la fermentación y el compost sale al parque de maduración. El tiempo de residencia en el fermentador es de una semana. El inconveniente de este tipo de reactores es el elevado coste de instalación y de mantenimiento de la planta.



Figura 10.53. Reactores verticales de compostar.

Otra variante de reactor vertical lo constituye el reactor circular. Los que existen actualmente tienen un diámetro de 6 a 36 metros y una altura de 2 a 3 metros. El material a compostar se introduce por la parte superior del reactor y la masa se voltea mediante un brazo giratorio. La salida del material se realiza por el centro de la base. La aireación tiene lugar por la parte inferior. El tiempo de retención es de 10 días, transcurridos los cuales pasan al parque de maduración.

Reactores horizontales de compostar

En los reactores horizontales la materia orgánica, generalmente preseleccionada (libre de inertes), se somete al proceso de compostaje durante 15 a 30 días en condiciones estáticas (reactor túnel) o de volteo periódico (reactor rectangular dinámico). Un tipo de reactores son los denominados reactores de túnel, los cuáles tienen forma de caja rectangular de 4 m de altura, 5,5 m de ancho y longitud variable según el volumen a tratar. La agitación se logra mediante mecanismos hidráulicos y la aireación se realiza por sistemas situados en la parte inferior. El tiempo de reacción es de 14 días y el producto requiere generalmente un tratamiento posterior.

El reactor rectangular tiene forma de caja rectangular de 3 m de altura y 6 m de ancho, y longitud variable según las necesidades. El material es descargado por la parte

superior y con un dispositivo que penetra en el reactor, parecido a una fresa, se mezcla y se descarga en otra zona del reactor mediante una cinta transportadora y una grúa móvil. Con el mismo sistema se extrae el material una vez compostado. La aireación se realiza por la parte inferior. El tiempo de retención es de 14 a 21 días y normalmente no necesita un tratamiento posterior.

3.7.2. Características de los residuos utilizados para el compostaje

Existen parámetros que deben ser considerados para que los resultados obtenidos en los procesos de compostaje permitan un producto en condiciones óptimas para su utilización como sustrato fertilizante. Entre ellos los más relevantes son:

a) **Equilibrio relación Carbono / Nitrógeno**

El principal objetivo de mezclar diferentes residuos o materiales para iniciar una faena de compostaje es equilibrar la relación carbono nitrógeno (C/N) a valores entre 25/1 y 35/1 en forma ideal. Valores menores a 25 ocasionan la pérdida de nitrógeno en forma de NH_3 y concentraciones mayores a 35 retrasan el proceso haciéndolo más lento de lo esperado.

b) **Contenido de humedad**

Los microorganismos, al igual que cualquier ser vivo, necesitan agua para vivir. Los hongos, bacterias y actinomicetes que participan en el compostaje no son la excepción. El contenido de humedad ideal para una pila de compostaje es entre 50 y 60%. Un exceso de humedad, mayor al 60%, dificulta el proceso y por lo tanto esto debe ser evitado para no alterar las condiciones esperadas de funcionamiento.

c) **Tamaño de partícula**

El tamaño de partículas tiene gran influencia en las características del compostaje. No puede ser demasiado grande (> 2 o 3 cm.) por la lenta degradación que sufrirán esos materiales debido a la escasa superficie para el ataque microbiano. Tampoco puede ser muy pequeño ya que no habría aireación pasiva y la aireación forzada o externa sería necesaria con mayor frecuencia.

d) **Aireación**

Los microorganismos que participan en el compostaje son aerobios o facultativos (actúan en condiciones aerobias y anaerobias). Sin embargo está comprobado que el proceso se optimiza bajo condiciones netamente aerobias, además de generarse mínimos problemas de olor y atracción de vectores. Un déficit de aireación provoca que la pila se torne anaerobia, se generen malos olores, la temperatura baje y el proceso se alargue. Por ello una forma de conocer el momento en el cuál es necesario efectuar la aireación de la pila es midiendo el contenido de O_2 en el espacio poroso al interior de la pila, así cuando éste es limitante (< 2%) es recomendable la aireación.

e) **Temperatura**

Es el mejor indicador del proceso ya que la curva de temperatura se ve afectada por numerosos factores tales como la humedad, el contenido de oxígeno y la calidad de la mezcla inicial (C/N). La curva típica teórica de temperatura en el compostaje describe claramente tres etapas, una etapa mesofílica, con temperaturas ascendentes de entre 20°C y 50°C, luego una etapa termofílica, con temperaturas estables de entre 50°C y 60°C y finalmente una etapa de enfriado y maduración, donde la temperatura desciende y estabiliza en torno a los 20°C. La temperatura se debe medir al menos una vez por semana cada 20 m a ambos lados de la pila en la zona de mayor temperatura. Todos los registros de una pila se promedian para dar el valor de temperatura en esa fecha.

f) Duración

El compostaje puede demorar desde 3 meses a 1 año. El promedio en el sistema de pilas volteadas es de entre 6 y 8 meses. Esto depende de las condiciones iniciales, la frecuencia de las aireaciones, la humedad presente en el sustrato, el tipo de residuos utilizados y la técnica aplicada.

4. POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO Y COSTOS DE LA BIOMASA

Los sistemas descritos son económicamente sustentables en el tiempo si se asegura obviamente una provisión de biomasa que permita el establecimiento de una industria para la valorización de estos recursos. Si bien la biomasa es un recurso renovable y que en forma continua se genera en los sistemas naturales, su aprovechamiento a nivel industrial debe contemplar una serie de factores que permitan predecir de manera concreta el potencial real que dichos recursos poseen para su inclusión en sistemas productivos y de valorización. Esto tiene especial sentido en el caso de los cultivos agrícolas y forestales, ya que la necesidad creciente como fuente de energía tiene como limitante la disponibilidad de suelo y los demás recursos necesarios para su establecimiento, como el agua de riego, fertilizantes y mano de obra calificada.

En este apartado se realiza una revisión general del potencial de aprovechamiento que posee cada uno de los cultivos descritos considerando en ello la productividad y los efectos esperados sobre los recursos que son necesarios para asegurar su valorización.

4.1. CULTIVOS ENERGÉTICOS

Los cultivos energéticos se definen como aquellos que han sido planificados específicamente para la obtención de energía a partir de la biomasa que es cultivada. Estos cultivos pueden proceder de especies herbáceas, arbustivas o forestales, y la biomasa producida puede ser utilizada como materia prima de diversos procesos de valorización, como los que han sido descritos en el apartado 3. Las aplicaciones energéticas más comunes de este tipo de cultivos son la producción de biocombustibles líquidos a partir de cereales y oleaginosas y el establecimiento de cultivos de especies leñosas de rápido crecimiento, para la obtención de biocombustibles sólidos.

4.1.1. Cultivos para bioaceites

La obtención de aceites vegetales, seguida de su transformación en bioaceite a través del proceso de esterificación, se lleva a cabo a partir de cultivo de especies oleaginosas, específicamente el aceite contenido en semillas de los cultivos, que es extraído a partir del fraccionamiento y prensado de estas semillas. Su contenido energético es elevado y puede ser quemado directamente en motores de combustión, pero esto puede significar problemas en el proceso, lo que justifica su transformación en biodiésel.

Los principales cultivos utilizados para la obtención de aceites vegetales y la producción de biodiésel, son las semillas de girasol, colza y soja. El biodiésel es mezclado luego con diésel, en una proporción, aproximada, del 5% como se ha comentado en el apartado 3.1, sustituyendo parte importante del petróleo consumido en la automoción, aunque muchos motores lo admiten en un 100%.

La extracción de aceites contenidos en las semillas de los cultivos de oleaginosas, posee rendimientos menores a otros cultivos agrícolas, ya que las semillas representan en promedio cerca de un 30% de la biomasa total del cultivo. Considerando que, en promedio, las semillas contienen alrededor de 40% de peso en aceite, y la transformación en biodiésel posee una eficiencia de 97%, la productividad final de un cultivo como la colza ronda los 1.300 litros de biodiésel por hectárea.

Los promedios de productividad de los principales cultivos se presentan en la Tabla 10.30.

Tabla 10.30. Productividad de cultivos energéticos para producción de biodiésel.

Cultivo	Productividad del cultivo (t/ha)	Rendimiento en Biodiésel (l t/ha - año)
Colza	3,3	1.300
Girasol	1,9	950
Soja	3,1	446
Olivos	1,0	1.200

Otra fuente importante de aceites vegetales para la producción de biodiésel son aquellos provenientes de la recolección de los aceites utilizados de manera doméstica. En el Reino Unido son producidos anualmente alrededor de 100.000 toneladas de aceites de cocina residuales, los cuales son susceptibles de convertir en biodiésel con una eficiencia cercana al 97%. Esta problemática se expone detalladamente en el capítulo 4 de esta obra.

La producción de biodiésel en el mundo y desagregada por los principales países productores y según la materia prima utilizada se muestra en la Tabla 10.31. En el apartado 2.2 de este mismo capítulo se indicaba la evolución de la producción del biodiésel de UE de 2003 a 2013.

Tabla 10.31. Producción mundial de biodiésel desagregada por materia prima utilizada y por países de 2008 a 2014. (Fuente Oil World Statistic Update).

PRODUCCIÓN MUNDIAL DE BIODIÉSEL EN MILLONES DE TONELADAS, DESAGREGADO POR PAISES Y MATERIA PRIMA UTILIZADA

MATERIA PRIMA	RANKING 2014	PAIS	AÑO						
			2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014*

PRODUCCIÓN MUNDIAL BIODIÉSEL	14,18	16,2	18,37	22,31	24,19	27,06	29,12
------------------------------	-------	------	-------	-------	-------	-------	-------

BASE	PRODUCCIÓN MUNDIAL		4,53	4,38	5,34	7,37	6,83	7	7,29
	SOJA	1º	USA	1,62	0,96	0,52	1,88	1,83	2,5
2º		BRASIL	0,85	1,1	1,74	1,91	1,8	1,89	2,16
3º		ARGENTINA	0,71	1,18	1,82	2,43	2,46	2	2,05
4º		UE	1,14	0,85	0,97	0,84	0,44	0,27	0,4

ACEITE DE COLZA	PRODUCCIÓN MUNDIAL		4,98	5,71	6,34	6,23	6,25	6,23	6,41
	1º	UE	4,7	5,42	6,07	5,64	5,64	5,64	5,76
	2º	USA	0,18	0,15	0,11	0,38	0,36	0,29	0,33

ACEITE	PRODUCCIÓN MUNDIAL		2,28	3,37	3,99	5,12	6,82	8,59	9,56
	1º	INDONESIA	0,32	0,4	0,68	1,38	1,99	2,63	3,8
DE	2º	UE	0,94	1,54	1,45	1,42	1,93	2,51	2,28
	3º	TAILANDIA	0,4	0,57	0,65	0,79	0,92	0,95	1
PALMA	4º	MALASIA	0,2	0,24	0,19	0,17	0,25	0,47	0,63
	5º	COLOMBIA	0,04	0,17	0,34	0,44	0,49	0,5	0,54
	6º	SINGAPUR	0	0,05	0,12	0,34	0,55	0,41	0,42

ACIETE GIRASOL	PRODUCCIÓN MUNDIAL	0,13	0,2	0,14	0,15	0,18	0,19	0,18
-----------------------	--------------------	------	-----	------	------	------	------	------

BASE SEBO	PRODUCCIÓN MUNDIAL	0,87	1,03	0,98	1,43	1,52	1,94	2,17
------------------	--------------------	------	------	------	------	------	------	------

OTRAS Mat. Prim.	PRODUCCIÓN MUNDIAL	1,33	1,51	1,55	2,03	2,61	3,16	2,52
-------------------------	--------------------	------	------	------	------	------	------	------

* Estimado

4.1.2. Cultivos para bioalcoholes

Los bioalcoholes son biocombustibles obtenidos a partir del fraccionamiento de la biomasa para la obtención de un alcohol, como por ejemplo el etanol. Su uso puede ser puro, o bien en mezclas de entre 5 y 10% con gasolina normal, alcanzando valores de sustitución que pueden alcanzar hasta el 20% o 25%.

Los principales cultivos utilizados para la obtención de alcohol, suelen ser agrupados de acuerdo a las características de la biomasa generada, y de esta manera el sustrato que se forma para la obtención del alcohol de forma industrial.

En primer lugar, cultivos como la caña de azúcar y el sorgo azucarero, poseen un alto contenido de azúcares, en forma de glucosa y/o sacarosa. Le siguen los cultivos como cereales o tubérculos, donde destacan la remolacha y el maíz, que producen una biomasa rica en almidones. Finalmente se encuentran los cultivos con alto contenido de celulosa, que permiten la obtención de alcohol a través del fraccionamiento de la biomasa, generalmente representadas por especies forestales de rápido crecimiento.

Los rendimientos esperados de estos cultivos, son mucho mayores a las tasas de disponibilidad asociadas al uso de fracciones residuales de cultivos agrícolas y forestales, ya que la totalidad de la biomasa fijada en ellos se dispone para su transformación energética. La Tabla 10.32 reproduce valores promedio de productividad para cultivos asociados a la obtención de alcoholes.

Tabla 10.32. Productividad de cultivos energéticos para producción bioalcoholes.

Cultivo	Productividad del cultivo (t/ha y año)	Rendimiento en etanol (lt/ha y año)
Remolacha	55	5.900
Sorgo azucarero (grano)	35	3.000
Maíz	10	2.400
Caña de azúcar	50	3.500
Patata (tubérculo)	62,5	5.000
Cereales	7,5	2.500

Pino (crecimiento anual)	7	2.500
--------------------------	---	-------

En la actualidad el etanol es producido en varios países del mundo que utilizan los cultivos que mejor se adapten a las condiciones climáticas y que permitan la obtención de mayores rendimientos y de esta forma una tasa mayor de etanol producido por hectárea. Los principales productores de etanol a nivel mundial son Brasil y EE.UU. utilizando caña de azúcar y maíz respectivamente. La UE en su conjunto sería el tercer productor del mundo, a muchísima distancia de aquellos, lo mismo que ocurre con cualquier otro país del mundo. En la Tabla 10.33 se presenta la producción mundial de etanol para los principales países productores al año en 2015.

Tabla 10.33. Producción de etanol en los principales países productores (2015).

País	Miles de millones de litros
EE.UU.	54,5
Brasil	27,8
China	2,7
Canadá	1,8
Tailandia	1,2
Francia	1,2
Alemania	1,1
Benelux	1,0
Argentina	0,8
TOTAL MUNDIAL	97.0

4.1.3. Cultivos de leñosas de rápido crecimiento

Si bien el crecimiento de las especies forestales es más lento que el de cultivos agrícolas, la acumulación final de biomasa que se obtiene en dichos sistemas es varias veces mayor. La obtención de biomasa residual se asocia entonces a períodos de tiempo mayores, pero con tasas de extracción de biomasa más elevadas. Dicha biomasa se extrae principalmente una vez que el bosque es intervenido con fines comerciales, ya sea como productor de madera para aserrío o de trozas para la industria papelera y de tableros.

En rotaciones de plantaciones de especies forestales de rápido crecimiento, 15 o 20 años hasta la maduración del bosque, es posible obtener rendimientos de entre 300 y 450 m³ por hectárea. Un ejemplo de ello son los rendimientos obtenidos en zonas mediterráneas de Chile para plantaciones de Pino de Monterrey (*Pinus radiata* D. Don), con incrementos anuales máximos de 15 a 25 m³ / hectárea y año.

En el caso de bosques naturales, o para especies de lento crecimiento los rendimientos son menores y las rotaciones de entre 80 y 120 años, con incrementos anuales de 5 a 10 m³ por hectárea y año y productividades que alcanzarían alrededor 1.000 m³ por hectárea, en el caso de bosques naturales del sur de Chile.

Una de las especies leñosas con mejor potencial para su aprovechamiento energético es el chopo (*populus spp.*) ya que se ha avanzado significativamente en la creación de clones modificados genéticamente, obteniéndose híbridos con tasas de crecimiento bastante altas comparadas con otros cultivos forestales, alcanzado entre 25 y 35 m³/ha y año.

La Tabla 10.34 indica la productividad promedio de especies forestales de rápido crecimiento en climas mediterráneos.

Tabla 10.34. Rendimientos promedio de especies forestales de rápido crecimiento.

Espece	Productividad del cultivo (m ³ /ha y año)	Rotación del cultivo (años)
<i>Pinus taeda</i>	21 – 35	18 a 25
<i>Pinus elliotti</i>	30	18 a 25
<i>Eucalyptus grandis</i>	38 – 42	7 a 12
<i>Eucalyptus saligna</i>	30 – 35	10 – 12
<i>Eucalyptus globulus</i>	30	10 – 15
<i>Populus deltoides</i>	22	12
<i>Populus nigra</i>	29	12
<i>Populus x euroamericana</i>	29	12
<i>Populus spp.</i>	20	10 – 12
<i>Salix spp.</i>	15 – 20	10 – 12
<i>Pinus radiata</i>	15 – 25	15 – 25
<i>Acacia melanoxylon</i>	30 – 60	25 – 35

Una especie tropical que parece tener un gran futuro es la jatropha (*eutropha eurcas*). Se trata de un arbusto original de India y Madagascar, capaz de producir grandes cantidades de biodiésel. A diferencia de otras oleaginosas, como la soja, la jatropha no es apta para el consumo humano ni animal, debido a su elevada toxicidad. Otra ventaja es que su fruto, semejante a una nuez, con tres semillas en su interior, genera diez veces más aceite que la soja. También tiene una cantidad de azufre inferior a las oleaginosas citadas anteriormente, lo que le permite ser usada en los motores diésel modernos.

Desde el punto de vista ambiental la jatropha tiene la virtud de crecer en suelos desérticos o baldíos, como los impregnados o saturados de pesticidas. Ello constituye un acicate para países con pocos recursos. La India ha diseñado un plan para cultivar esta planta en el estado de Andra Pradesh, en el sudeste del país, después de que la compañía estatal de ferrocarriles lo probara en sus locomotoras diésel. En estas condiciones, una superficie de 1.000 hectáreas puede producir dos millones de litros de biodiésel al año. Además, el gobierno hindú está trabajando para lograr una variedad genéticamente modificada que produzca más del 40% de aceite que produce la planta actual.

Una planta de características semejantes a la citada jatropha es el cardo (*Cynara cardunculus*) ya que se trata de una planta de secano bien adaptada al clima mediterráneo, mientras que la colza precisa latitudes más altas. Su cultivo masivo permitiría recuperar tierras abandonadas y dar rentabilidad a los agricultores. De las semillas, por prensado, se extrae el aceite y el resto de la planta, una vez seca, o semiseca, se usa como materia orgánica para biocombustible.

Otros cultivos que se han promovido y desarrollado en los últimos años han sido la carinata, de la que se obtiene una semilla con aceite para biodiésel y crece bien en zonas semiáridas de Extremadura y Andalucía (España), y la paulonia, de crecimiento ultrarrápido que puede soportar sequías de hasta dos años.

En línea semejante, un grupo de investigadores chilenos del Instituto Forestal INFOR, entre los años 2001 y 2005, han desarrollado unas variedades de eucaliptos que se adaptan bien a las zonas áridas y sema-áridas (IV y VI región del país andino). El proceso seguido pasa por la propagación clonal del eucalipto a través de un cultivo *in*

vitro, lo que permite facilitar la clonación de individuos de características superiores. Gracias a ello el crecimiento favorable ha permitido el retorno de la inversión sobre los 10 años.

4.1.4. Costos de producción de los biocombustibles

Existen diferencias significativas en los costos de producción de los biocombustibles en los países productores, debido a factores económicos internos, a políticas específicas de subvención y la productividad específica de cada cultivo para la producción del biocombustible que se pretende producir. Es posible estimar en promedio los costos de producción del biodiésel y del bioetanol presentados en la Tabla 10.35, que muestra el costo de producción por productividad del cultivo, en euros (€) por litro y por unidad de energía potencial en € por GigaJoule (GJ) (datos del año 2005).

Tabla 10.35. Costos de producción del biodiésel y el bioetanol (2005).

Fuente	Biocombustible	Costo de producción (€ / litro)	Costo de producción (€ / GJ)
Caña de azúcar	Etanol	0,25 – 0,35	11,6 – 16,6
Maíz	Etanol	0,35	15,0
Trigo	Etanol	0,53	25,0
Remolacha	Etanol	0,60	28,3
Cereales	Etanol	0,71	34,1
Madera	Etanol	0,44	20,8
Girasol	Biodiésel	0,60 – 0,73	17,5 – 21,6
Soja	Biodiésel	0,33 – 0,70	10,0 – 21,0
Aceites usados	Biodiésel	0,20 – 0,40	6,1 – 12,2
Colza	Biodiésel	0,33 – 0,66	10,2 – 19,1

Los costos de otros biocombustibles como los residuos agrícolas y forestales, poseen precios que varían dependiendo del tipo de cultivo, la tecnología utilizada y la fracción de la biomasa que es utilizada. Se puede establecer que en términos generales poseen un costo de entre 33 y 41 €/t, año 2005. En promedio es posible determinar además que la inversión necesaria para la construcción de una instalación industrial que permita el aprovechamiento energético de estos residuos, bordea los 1.600 € por KW instalado, con un costo de producción por unidad de energía de 66 € por MWh.

Una estimación para ejemplificar el desglose de costos de producción de etanol a partir de biomasa celulósica de origen forestal se presenta en la Tabla 10.36.

Tabla 10.36. Costos de producción de etanol a partir de biomasa celulósica (2005).

Etapas	Costo de (€ / litro)	% del total
Materia prima	0,15	34
Energía producción	0,11	25
Productos químicos	0,025	6
Costos de producción	0,04	9
Costos de capital	0,11	26
TOTAL	0,43	100

4.2. GENERACIÓN DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA AGRÍCOLA Y GANADERA

Corresponde a la biomasa residual presente en los residuos generados por la industria agrícola, a través de los remanentes de cultivos o bien por medio de actividades industriales de transformación de alimentos, donde dichas fracciones no son consideradas como parte del cultivo cosechado propiamente como tal. Es una de las fuentes donde la disponibilidad de biomasa para su valorización posee uno de los más importantes potenciales, ya que se trata de actividades que se distribuyen en un amplio espectro de situaciones climáticas, económicas y tecnológicas.

Como es característico en la biomasa residual, estos residuos poseen una variabilidad que depende de cada cultivo y sus propiedades intrínsecas. Pueden tener malas condiciones fitosanitarias derivadas de plagas presentes en el cultivo original, que hay que considerar en los tratamientos posteriores que se realizarán.

De acuerdo a los datos entregados por la FAO, los más importantes cultivos agrícolas a nivel mundial son los cultivos de cereales que alcanzan casi un 50% de la superficie cultivada, siguiendo luego los cultivos de oleaginosas con un 16% y las forrajeras con 13%. Los cultivos de árboles frutales, que aportan una cantidad importante de residuos leñosos por las podas, alcanzan una superficie equivalente al 3,4% de la superficie mundial de cultivos.

Una estimación, de acuerdo a los datos recopilados de los principales cultivos, permite establecer la biomasa residual disponible susceptible de ser valorizada, y que son resultantes de las labores de manejo y aprovechamiento tradicional de cada cultivo, resultados que son presentados en la Tabla 10.37.

Tabla 10. 37. Biomasa residual de principales cultivos agrícolas.

Cultivo	Biomasa residual (t/ha)
Almendro	2,0
Arroz	8,0 – 8,5
Cereales	2,5 – 5,5
Cítricos	2,0
Frutales	1,3 – 3,0
Maíz	20 – 35
Olivos (podas anuales)	1,4 – 1,7
Patata	3,5 – 4,5
Remolacha	8,5
Viñedos	2,0

Existen diferencias apreciables en las tasas de producción de biomasa residual, lo cual se explica por diferencias en rendimientos y la intensidad de cultivo. Es necesario identificar que existe, además, una diferencia entre cultivos anuales y perennes que deben ser considerados, ya que el esfuerzo productivo necesario para establecer plantaciones anualmente es claramente superior al necesario en cultivos de carácter

perenne. Ello determina productividades diferentes, pero también una intensidad mayor en el uso de recursos para el establecimiento de los cultivos. Este condicionante puede ser relevante desde el punto de vista ambiental dada la extracción masiva de nutrientes a que es sometido el suelo y las cantidades importantes de agua de riego que son necesarias para mantener los cultivos anuales.

4.2.1. Residuos industriales ganaderos

En este apartado se analizan las posibilidades de valorización de determinados residuos industriales procedentes de la explotación intensiva ganadera.

4.2.1.1. Los estiércoles

El estiércol es una mezcla de las camas de los animales con sus deyecciones, que ha sufrido fermentaciones más o menos avanzadas primero en el establo y luego en el estercolero. Se incluye en este apartado ya que, básicamente, el potencial de valorización energética se debe a la presencia de los residuos de celulosa (camas).

El estiércol es un abono compuesto de naturaleza órgano-mineral, con un bajo contenido en elementos minerales. Su nitrógeno se encuentra casi exclusivamente en forma orgánica y el fósforo y el potasio, al 50%, en forma orgánica y mineral, pero su composición varía entre límites muy amplios, dependiendo de la especie animal, la naturaleza de la cama, la alimentación recibida, etc. Por término medio, un estiércol con un 20 - 25 % de materia seca contiene 4 kg/t de nitrógeno, 2,5 kg/t de anhídrido fosfórico y 5,5 kg/t de óxido de potasio. Por lo que hace referencia a otros elementos contiene, por tonelada, 0,5 kg de azufre, 2 kg de magnesio, 5 kg de calcio, 30 - 50 g de manganeso, 4 g de boro y 2 g de cobre. El estiércol de caballo es más rico que el de oveja, el de cerdo y el de vaca. El de aves de corral o gallinaza es, con mucho, el más concentrado y rico en elementos nutritivos, principalmente nitrógeno y fósforo.

Los estiércoles que producen un mayor enriquecimiento en humus son aquellos que provienen de granjas en las que se esparce paja u otros materiales ricos en carbono como cama para el ganado, y se espolvorean sobre ellos rocas naturales trituradas (fosfatos, rocas silíceas, etc.) y tierra arcillosa para una mejora de la calidad. Un animal en estabulación permanente produce anualmente alrededor de 20 veces su peso en estiércol. El procedente de granjas intensivas se reconoce fácilmente por su desagradable olor a putrefacción, que da lugar a la formación de sustancias tóxicas para el suelo debido a su alto contenido en nitrógeno proteico y a sus elevadas tasas de antibióticos y otros fármacos. Por tanto estos residuos deben utilizarse con mucha precaución.

El estiércol fresco puede ser utilizado en compostaje de superficie directamente. Se usa sobre todo en cultivos exigentes en abonado que toleran bien la materia orgánica fresca, como es el caso de patata, remolacha, tomate, etc., así como en los cultivos plurianuales como frutales y viñas, sobre los abonos verdes y las praderas permanentes para los aportes de otoño y comienzos de invierno.

Se utiliza en dosis importantes; un estercolado medio supone 30 t/ha, pero a menudo se utilizan dosis mayores, 40 - 45 t/ha cuando se busca mejorar el suelo. De acuerdo con las cifras medias de su composición, un estercolado de 30 toneladas supone un aporte por hectárea de 120 kg de nitrógeno, 75 kg de anhídrido fosfórico y 165 kg de óxido de potasio. Por tanto, puede decirse que el estiércol es, a la vez, una enmienda y un abono.

En clima seco el aporte debe realizarse dos meses antes de la siembra y en caso de que sea húmedo, tres meses antes. En suelos arcillosos se debe aplicar estiércol muy

maduro y con bastante anticipación a la siembra, mientras que si son arenosos puede ser menos elaborado y las estercoladuras serán más frecuentes y en menor cantidad. Los aportes en suelos calizos deben ser frecuentes y débiles y en suelos ácidos se ha de realizar una enmienda caliza que active y favorezca la descomposición de la materia orgánica.

4.2.1.2. Alternativas para el uso de la gallinaza y la palomina

La gallinaza está compuesta por las deyecciones de las aves de corral, junto con el material usado en las camas y, a veces, cal en pequeña proporción (ésta es utilizada sobre el piso para mantener unas condiciones sanitarias permisibles en los corrales). La palomina procede del excremento de las palomas. Ambos abonos son muy estimados por su elevado contenido en elementos fertilizantes.

La gallinaza fresca es muy agresiva a causa de su elevada concentración en nitrógeno. Caso de usarla como fertilizante y para mejorar el producto conviene que se composte en pilas (al igual que la palomina). Con más razón se compostará si procede de granjas intensivas, mezclándose con otros materiales orgánicos que equilibren la mezcla, enriqueciéndolo si fuera necesario con fósforo y potasio naturales. Ciertos autores aconsejan rechazar el estiércol procedente de la cría industrial de pollos y gallinas debido a que, frecuentemente, contiene residuos de antibióticos.

El sector avícola en España supone algo más del 10% de la producción final de la ganadería nacional. España contaba, en 2006, con más de 6.500 cebaderos de aves cuya producción alcanza la cifra de 550 millones de unidades al año. Además, no hay que olvidar las cifras aportadas por la avicultura, que sitúan un número medio de aves ponedoras en cuarenta millones al año. La generación de residuos se estima en 150 g de residuo por gallina y día.

Estos datos confirman la existencia de un problema grave de contaminación, ya que la generación de millones de toneladas de gallinaza, presentan un importante problema medioambiental debido a su alto nivel de toxicidad. Si bien, estos pueden ser utilizados directamente como abonos debido a su alto contenido en nitrógeno, fósforo y un excesivo vertido de los mismos puede ocasionar importantes riesgos de contaminación, produciendo efectos negativos en el entorno que es utilizado.

Respecto a la composición de la gallinaza, es una tarea realmente complicada debido a la variabilidad con la que se pueden presentar los residuos de excrementos de animales. En primer lugar influirá el tipo de animal, pero además lo hará el tipo de alimentación del mismo, así como su edad, el clima, etc. Gran parte del nitrógeno, fósforo y potasio que son ingeridos por los animales estarán presentes en sus residuos. Para el porcino estos valores son del 76%, 83% y 86% respectivamente. De esta forma se hace referencia a la capacidad digestiva del animal, ya que en caso de aparecer el 100% del elemento en el residuo se podrá asumir que nada es retenido y, por tanto, asimilado. En la gallinaza este fenómeno es agudo. Los valores para el N, P y K son de alrededor de 81%, 88% y 95% respectivamente, lo que indica claramente el pobre rendimiento digestivo de estos animales.

El contenido en humedad es variable según la explotación y el tipo de cama. Sin embargo valores del 20% se aceptan como normales. Tiene un contenido en azufre superior al 1%, lo que supone que, en caso de valorización energética va a dar lugar a gases ácidos. En caso de apilamiento se transforma en ácido sulfhídrico, debido a las transformaciones anaerobias, tal como acontece en los criaderos.

El mayor problema es, sin duda, el olor. La gallinaza fresca contiene una serie de compuestos (tales como el H₂S y algunos compuestos orgánicos) que causan un verdadero perjuicio a las personas que habitan en las proximidades.

Más genéricos son los problemas que los residuos de gallinaza producen en el medio ambiente. Estos efectos se dividen en tres bloques: los causados a la atmósfera, los causados a los suelos y, finalmente, los causados a las aguas:

- Atmósfera: malos olores, gases asfixiantes, gases irritantes, desnitrificación, aerosoles.
- Suelo: variación de pH, efectos depresivos, salinidad, metales pesados, patógenos, exceso de nitratos y nitritos, retención de agua.
- Aguas: lixiviación, carga orgánica, eutrofización, patógenos y fecales.

En un periodo en el que la búsqueda de alternativas energéticas ocupa un papel protagonista en las políticas globales de los estados industrializados, es preciso encontrar soluciones que sean capaces de integrar las nuevas tecnologías con las necesidades en busca del correcto camino hacia el desarrollo sostenible. La gallinaza tiene un poder calorífico del orden de 13,5 MJ/t (3.200 kcal/kg). Es decir, un PCI nada despreciable que induce a la valorización energética.

El proceso de valorización energética de la gallinaza más conocido consiste en un ciclo simple de vapor, ciclo Rankine, constituido básicamente por una caldera de combustión equipada con parrilla y un grupo turboalternador de vapor a condensación. La energía química contenida en el residuo se convierte en energía térmica mediante su combustión. El calor generado a partir de la combustión del residuo será transferido a un fluido agua-vapor, de forma que se calienta el agua, se evapora y se sobrecalienta el vapor generado.

Este vapor sobrecalentado a alta presión será inyectado a una turbina de vapor donde su expansión provocará la transformación de la energía térmica en energía mecánica que hace mover de forma circular los alabes de una turbina que a su vez se transforma, mediante un alternador, en electricidad.

En este sistema es necesario disponer de un foco frío o condensador que puede ser por medio de aerorrefrigeradores, o a través de una torre de refrigeración de tipo forzado.

En Suffolk (Reino Unido) se construyó una planta que trata 130.000 t/año de gallinaza y genera 12,7 MW de electricidad. En el mismo país se construyó, en 1995, otra planta que generaba 13,5 MW (Glanford) y en Thetford otra mayor de 38,5 MW de potencia eléctrica. Es decir un rendimiento, aproximado, de 1MW(e) / t de gallinaza.

4.2.1.3. Los guanos

Los guanos de aves, del Perú y Mozambique provienen de acumulaciones de deyecciones de aves marinas, y constituyen excelentes abonos orgánicos naturales, libres de todo tipo de contaminación.

Se trata de estiércoles extremadamente concentrados y por tanto deben emplearse en dosis muy moderadas (menos de 1 t/ha).

4.3. POSIBILIDADES DE APROVECHAMIENTO DE LAS ALGAS

Como se ha comentado en el apartado 3.1.5 el término alga comprende a un grupo muy heterogéneo de organismos, unos 50.000 aproximadamente, que se caracterizan por realizar la fotosíntesis, es decir el proceso que convierte la energía lumínica en energía química necesaria para la síntesis de moléculas orgánicas. En los próximos

apartados se aportan algunos conceptos, que por una parte se apoyan en aquellos y por otra los complementan, haciendo hincapié a otras vías de aprovechamiento de las algas, que además de la obtención de biodiésel, bioalcohol o bihidrógeno sobre las que ya se ha tratado en apartados precedentes, tienen una aplicación en la agricultura, alimentación, industria farmacéutica o cosmética.

En caso de su valorización con fines agrícolas, deben usarse en el estado más fresco posible, y para acelerar su descomposición, se les puede añadir estiércol u otro abono orgánico rico en nitrógeno.

Comparándolas con los estiércoles, las algas, son más pobres en fósforo y nitrógeno, aunque más ricas en potasio, sodio y magnesio, y disponen de una gran cantidad de oligoelementos, entre los que cabe destacar el zinc, el hierro y el cobre. Así su composición media es:

N..... 0,20 - 0,80 %

P₂O₅..... 0,05 - 0,20 %

K₂O..... 1,00 - 3,00 %

Las dosis empleadas normalmente son de 30 - 40 t/ha.

En el comercio también pueden encontrarse harinas y extractos líquidos de diversos tipos de algas, entre los que destaca el alga calcárea (*Lithothamnium calcareum*) como Lithothamne, o Algomin (en Alemania) que se recolecta a lo largo de las costas marinas del oeste de Francia. Esta alga es muy rica en calcio (42 - 47% de CaO), magnesio (3 - 8% de MgO) y oligoelementos, y se utiliza pulverizada, sola o mezclada con fosfatos naturales, en la enmienda de suelos ácidos a dosis de 0,1 – 0,6 t/ha. Con cantidad tan importante de CaO se podría pensar en su valorización como materia prima para fabricar clínquer.

Para resaltar la importancia de las algas en el contexto de la biomasa total, vale la pena recordar que:

- Los océanos cubren el 70% de la superficie de la Tierra.
- Más del 90% de la biomasa viviente del planeta se encuentra en los océanos.
- La muerte y las enfermedades causadas por las aguas costeras contaminadas tienen un costo de 10.000 millones de euros para la economía mundial. El impacto económico anual de la hepatitis causada por alimentos marinos contaminados asciende a 6.000 millones de euros.
- La proliferación de algas nocivas debido a un exceso de nutrientes, principalmente el nitrógeno proveniente de los fertilizantes utilizados en la agricultura, ha creado casi 150 'zonas muertas' costeras desoxigenadas de una superficie de 1 a 70.000 kilómetros cuadrados.
- La contaminación, las especies exóticas y la alteración de los hábitats costeros representan una amenaza creciente para importantes ecosistemas marinos como los manglares, los lechos de zosteras, las algas marinas y los arrecifes de coral.

Las algas y sus derivados forman parte de vida cotidiana en alimentos, fármacos, pinturas y tejidos. Las algas son fuente de muchos productos útiles. Tal es el caso de los ficoloides o hidrocoloides polisacáridos, que son unos polisacáridos complejos obtenidos de las algas *Phaeophyceae* (feofitas) y *Rhodophyceae* (rodófitas), que forman sustancias coloidales cuando son dispersadas en agua. Los polisacáridos recuperados de algas más importantes son: los alginatos, el agar, la laminarina, fucoidina, galactanos y la carragenina. Que tienen diversos usos. Por sus aplicaciones, de estos polisacáridos destacan los alginatos y el agar.

Los alginatos son usados para hacer impresiones dentales, y como excipientes de medicinas que deben ser lentamente absorbidas por el cuerpo. Son empleados para emulsionar fármacos y también son ampliamente utilizados en la industria alimenticia. El alginato de sodio es considerado el mejor coloide usado como estabilizador y agente cremoso.

Otro polisacárido que tiene de origen a las algas es el agar. Aparte de los derivados del ácido algínico, la producción de agar es considerada la otra gran industria basada en el uso de algas. El agar es un polisacárido muy complejo, que en realidad es la mezcla de dos polisacáridos, agarosa y agarpectina. El agar seco, es insoluble en agua fría y soluble en agua caliente. Diluido en agua (en dilución del 1 al 2%), forma un gel que a una temperatura menor a 35 °C es un sólido y a una temperatura mayor a 50 °C se hace líquido. El agar es utilizado en la microbiología como medio cultivo por que tiene la propiedad de no poder ser digerido ni atacado por los microorganismos cultivados y como ingrediente principal en la elaboración de conservas de carne y pescado, evitando el desagradable “sabor a lata”. También es usado como emulsionante de la mayoría de los laxantes en el mercado. Es muy usado en la industria textil, ayudando a dar forma a la tela y así garantizar la talla. Las películas fotográficas usan el agar como aglutinante de los polvos receptores de luz. El agar es incluso usado para la elaboración de ciertos pegamentos y pinturas, como óleos.

4.3.1. Aplicaciones de las algas

Actualmente las algas tienen usos industriales, agropecuarios, alimentarios, médico-farmacológicos y en restauración medioambiental. La cantidad de algas transformadas en todo el mundo es del orden de 7 billones de toneladas de peso fresco, siendo los países asiáticos los productores de casi el 80 % de las materias primas.

En España los agricultores del norte y noroeste han empleado algas como abono de las tierras de cultivo, en algunos lugares se han consumido y finalmente existen industrias de extracción de agar muy importantes a nivel mundial

4.3.1.1. Usos industriales: ficocoloides

De las paredes de las algas rojas se extraen los polisacáridos agar y carragenatos, mientras que de las algas pardas se extraen los alginatos.

El agar se emplea en la elaboración de medio de cultivo en laboratorio por tener un gran poder gelificante a temperaturas de 34-38 °C (agar extraído de *Gelidium*) y 40-52 °C (agar extraído de *Gracilaria*) lo que permite añadir los organismos que se quieren cultivar de un modo homogéneo. El agar se puede esterilizar a temperaturas superiores a 100 °C sin que pierda el poder gelificante.

El agar se añade como aditivo gelificante y espesante (Código E-406) en gran cantidad de alimentos (confituras, merengues, helados, etc.). También se emplea en la industria fotográfica (estabiliza la nitroglicerina), industria biotecnológica (agarosa para separaciones cromatográficas y electroforéticas). Las especies más empleadas en la extracción de agar pertenecen al género *Gelidium*, *Pterocladia*, *Gelidiella* y *Gracilaria*.

Los carragenatos, son poligalactanos, polímeros lineales de moléculas alternadas de D-galactosa y 3-6 anhidro-D- galactosa unidas por enlace a 1-3 y b 1-4. El carácter hidrofílico y la solubilidad lo dan los grupos sulfatados en las moléculas de galactosa. Las propiedades espesantes y gelificantes las hacen muy útiles en la industria alimentaria, el 80% del carragenato extraído en el mundo se emplea como espesante y agente estabilizante (E-407), en productos lácteos, postres de tipo gelatina, jugos de

fruta, mermeladas, helados etc. Otros usos se hallan en cosmética (pasta de dientes, barras aerosoles) e industria farmacológica (contra úlceras gástricas e infecciones víricas). Se usan unas 15 especies en la extracción de carragenatos destacando *Chondrus crispus*, *Mastocarpus stellatus*, *Euchema sp*, esta última se cultiva en Filipinas e Indonesia y contribuyen alrededor de un 80% de la producción mundial.

Los alginatos, son polisacáridos constituidos por unidades de b-D-manurónico y a-L-Gulurónico. Disueltos en una pequeña cantidad de agua tienen un gran poder espesante, gelificante y estabilizante. El 50 % del alginato extraído se emplea en la industria textil, un 30% en la industria alimentaria con los códigos: E-401, E-402, E-403, E-404, E-405 y E-405, ya que aportan textura y consistencia evitando la formación de cristales de hielo, el resto se usa en la industria de la celulosa (para suavizar la superficie del papel), industria farmacéutica (excipientes y preparación de apósitos) e industria cosmética (jabón, champús, barras de labios, espumas de afeitar). De las 300 especies potencialmente útiles se utilizan unas 12, destacando *Macrocystis pyrifera*, *Laminaria hyperborea*, *Laminaria digitata*, *Saccorhiza polyschides*, *Ascophyllum nodosum* y *Fucus sp*.

4.3.1.2. Usos agropecuarios

Las algas han constituido una fuente de abono para las tierras de cultivo. Al margen de esta misión, las algas mejoran las características nutritivas del suelo e impiden el crecimiento de malas hierbas. Se emplean también como complemento en la dieta del ganado. Actualmente hay empresas que fabrican harinas de algas para ser suministradas al ganado.

Por último se han desarrollado fertilizantes basados en extractos líquidos de algas ya que se ha comprobado que aumentan la resistencia de los cultivos a las heladas y plagas y además estimulan el crecimiento de la producción vegetal.

4.3.1.3. Usos alimentarios

Son apreciadas por sus propiedades nutritivas y características organolépticas. Algunas algas poseen características nutritivas de gran interés en comparación con vegetales terrestres.

4.3.1.4. Usos farmacológicos

La aplicación en la medicina tradicional es muy común en el sudeste asiático. En la industria farmacológica su uso está relacionado con su poder gelificante, sin embargo también se han encontrado actividad antitumoral, antioxidante, anti-úlceras etc.

Se ha demostrado que dieta rica en *Porphyra tenera* reduce la incidencia de tumores intestinales y cáncer de mama en animales de laboratorio. Esta propiedad parece estar relacionada con el contenido de ésteres y con el contenido en Vitamina A y b-caroteno. Por otro lado reduce el nivel de colesterol siendo la sustancia activa la b-homobetaina.

La utilización terapéutica de las algas está extendida en homeopatía: así el musgo de Irlanda (*Chondrus crispus*) produce una gran cantidad de mucílago que le confiere propiedades emolientes, laxantes y expectorantes y contra el estreñimiento crónico, los extractos de laminaria (*Laminaria sp.*) dilatan los conductos del organismo (p.e. cuello del útero) y el sargazo vejigoso (*Sargassum sp. Fucus vesiculosus*) combate paperas, infartos glandulares, la gota y la obesidad. Se está investigando la eficacia de las algas contra ciertas afecciones y enfermedades: trombosis, colesterol, trastornos gástricos y vesiculares, astenias, reumatismo y espermofilia.

4.3.1.5. Usos cosméticos

Las aplicaciones cosméticas son las más conocidas. Se emplean en cremas, mascarillas, champús, lociones etc. La acción benéfica de las algas se manifiesta sobre todo en el tratamiento de uñas rotas, acné, caída del cabello, antiarrugas, seborrea y barros.

También constituyen un excelente complemento en las curas de rejuvenecimiento de la piel o incluso contra la obesidad y la celulitis. También está creciendo su uso en dietética y talasoterapia.

4.3.1.6. Usos en restauración medioambiental y acuicultura

Actualmente se investiga el uso de las algas en la depuración de efluentes de piscifactorías cargados de compuestos de nitrógeno (amonio y urea) y carbono que al ser consumidos por las algas reducen la eutrofización de aguas costeras. Por otro lado también se están desarrollando sistemas de poli-acuicultura integrada en el que las algas crecidas en efluentes de granjas de cultivo de peces o moluscos sirven de complemento dietético para los propios animales.

4.3.1.7. Usos energéticos

En el sur de la costa Argentina se han descubierto y cultivado algas de aplicación energética. Una hectárea de soja produce 400 litros de aceite, mientras que estas algas, en igualdad de superficie, pueden producir más de 100.000. Es decir una productividad 250 veces superior sin interferir en un doloroso debate ético que cuestiona el destino de plantas alimenticias, soja, a la fabricación de biocarburantes.

4.4. GENERACIÓN DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA FORESTAL

De una manera análoga a los cultivos agrícolas, existe una dispersión importante en la generación de biomasa forestal residual, ya que plantaciones forestales de una u otra especie, o bosques naturales multiespecíficos, poseen características propias de estructura y crecimiento, que condicionan la cantidad de biomasa disponible en los bosques.

La utilización de biomasa residual de origen forestal posee un potencial mayor en plantaciones, sin perjuicio de la biomasa que puede ser aportada desde un manejo forestal sustentable de bosques naturales, donde a partir de cortas intermedias, programadas por especialistas, se pueda extraer pequeños volúmenes.

Las importantes reservas en los bosques naturales, que desde siglos han sido fuente energética principalmente por el uso de leña como combustible, con bajos rendimientos energéticos, han visto amenazada su existencia por la sobreexplotación no racional de extensas zonas, que luego se degradan y pierden el potencial productivo.

Los parámetros de disponibilidad de la materia prima, deben responder a las características de la especie forestal que se utilizará como fuente principal de biomasa y también al origen que esta tenga, ya que puede provenir tanto de plantaciones con fines energéticos, como de residuos de procesos industriales o de explotación maderera en los bosques. La explotación de un bosque genera una cantidad de residuos importante, ya que buena parte de un árbol que es cosechado corresponde a secciones no aprovechables desde el punto de vista de la industria forestal y es abandonado en ocasiones como residuo en los propios bosques, aunque actualmente está prohibido. Si se abandona habrá implicaciones en ciclos de nutrientes. Habitualmente esta parte de biomasa no directamente explotada puede ser

aprovechada como energía. Este material leñoso corresponde principalmente a ramas, hojas y secciones de diámetro menor del tronco puede alcanzar un porcentaje importante del volumen total de un árbol y por ende del volumen total de un bosque. Si bien los inventarios de biomasa total aún no son tan extendidos en el campo de la actividad forestal, existen en la actualidad proyectos que buscan desarrollar fórmulas matemáticas que permitan estimar con mayor exactitud el volumen total de un bosque. Hasta ahora lo que interesaba a la industria era el volumen comercial que posee un árbol, es decir, descontando todos los residuos que se generan al extraerlo desde el bosque. Es posible establecer la composición genérica que caracteriza un árbol promedio, donde el mayor porcentaje de la biomasa total corresponde al tronco, esta estimación se presenta en la Tabla 10.38.

Tabla 10.38. Composición promedio de un árbol.

Sección del árbol	% de volumen total
Tronco	67
Ramas	16
Hojas	3
Tocones	14
Total	100

Es posible establecer, en una región mediterránea, plantaciones de especies de *pinus sp.*, aproximadamente con un 16% de volumen energéticamente aprovechable, correspondiente a residuos de los procesos de extracción. Además se estima que un 5% del volumen es biomasa residual que permanece en el bosque y se incorpora al ciclo de nutrientes. Este último aspecto es importante de analizar ya que puede presentar algunas alternativas de aprovechamiento sin dejar de lado la nutrición del suelo forestal, pero considerando por ejemplo algunos beneficios que pueden obtenerse al despejar superficies importantes de terreno que ciertos meses del año se transforman en focos de frecuentes incendios forestales, ya que se trata de gran cantidad de materia orgánica que con las altas temperaturas de la época estival se puede inflamar fácilmente y afectar seriamente las condiciones edáficas y biológicas del lugar.

Si se considera la productividad de un bosque de *pinus sp.* promedio, de unos 300 m³/ha a la edad de cosecha, en una zona mediterránea, es posible obtener alrededor de 48 toneladas de biomasa residual por hectárea recolectando sólo la biomasa remanente de las actividades de cosecha forestal. A esto es posible agregar 40 a 50 toneladas de biomasa residual que puede ser obtenida de las cortas intermedias del bosque.

Es necesario considerar la temporalidad de las rotaciones de cultivos forestales, ya que especies de rápido crecimiento pueden tener ciclos productivos de 8 a 10 años, las especies habituales de 15 a 25 años, y especies de lento crecimiento, pero con mayor biomasa acumulada en el bosque, pueden alcanzar ciclos de 90 a 120 años.

4.4.1. Pellets y briquetas

En los últimos tiempos la industria de producción de biomasa densificada ha experimentado un gran auge, en particular con la fabricación de *pellets*. Ello ha sido

posible debido a la aparición de estufas domésticas e industriales de pequeño tamaño diseñadas para consumir estos prefabricados, ya que permiten unas buenas condiciones de almacenaje y alimentación automática del combustible, así como la extracción de cenizas (suele ser del 1 al 1,5%). En el caso de España, el poco desarrollo de esta industria se atribuye a la escasez de viruta y aserrín generada en las plantas que fabrican palets para embalaje.

La biomasa sólida, tal y como se obtiene en origen no presenta características adecuadas para aplicaciones energéticas como las comentadas en el párrafo anterior: baja densidad física y energética, contenido variable de humedad y falta de homogeneidad. Aquí es donde aparece el interés de la densificación, con o sin aditivos, tal como se ha comentado en el apartado 3.3.4. Una ventaja muy importante de la biomasa densificada es la conservación de la misma con el tiempo, no se degrada.

Se suele hacer una distinción entre briquetas que pueden tener formas geométricas variadas (diámetro de 25 a 60 mm y longitud variable de hasta 150 a 500 mm, si bien también las hay de secciones poliédricas) en función de la máquina que las produce y los *pellets* que tienen forma de cilindro (diámetro de 4 a 25 mm y longitud de 10 a 70 mm). En general las briquetas tienen un mercado reducido destinado, mayoritariamente, a aplicaciones domésticas.

Para la fabricación de briquetas se precisan presiones del orden de 100 Mpa, que conduce a un calentamiento de la masa entre 100 y 150 °C, lo que provoca la plastificación de la lignina, por lo que normalmente no es necesaria la adición de otros aglomerantes. La humedad está limitada entre el 8 y el 15%. La densidad aparente final obtenida oscila de 900 a 1.400 kg/cm².

Por lo general, la peletización es un proceso de granulado por extrusión. Durante este proceso la fricción genera un calentamiento, del orden de 70 °C, que se utiliza para la aglomeración. La distribución granulométrica de la materia prima es fundamental: el polvo no es adecuado pero las partículas tampoco pueden ser muy grandes ya que perjudican la cohesión. La humedad debe ser del 8 al 15%. Los *pellets* presentan una densidad aparente (dato importante para el transporte) del orden de los 600 - 700 kg/cm².

En 2012 en España existían 42 fábricas de *pellets* con una capacidad superior a las 10.000 t/año, algunas de hasta 40.000 t/año, aparte de un número indeterminado de plantas de pequeña producción, de 4.000 t/año, normalmente ligadas a aserraderos o carpinterías. La capacidad potencial total se estimaba a noviembre de 2011 en 900.000 t/año, según BioPlat, Plataforma Tecnológica Española de Biomasa. Sin embargo, solo se producían alrededor de las 300.000 t/año, pues según los productores no había suficientes calderas instaladas para absorberla.

Además de esta última cantidad en España, con cifras de 2010, se consumían entre 60.000 t/año y 90.000 t/año, ya que no existían cifras oficiales y el resto se exportaba principalmente a Italia, además de Portugal, Irlanda, Reino Unido, Francia, Bélgica y Suecia. Italia, el principal destino, se llevaba el 60% de toda la exportación. En cuanto al *pellet* industrial, los clientes se encontraban principalmente en el Reino Unido, Bélgica y Suecia. En España el consumo continua en aumento.

El precio del *pellet* español se mantuvo en el mismo nivel entre 2008 y 2012. El precio a granel doméstico era bastante estable en estos años, situándose según las estadísticas en 122 €/t, precio algo inferior al de otros países europeos como por ejemplo Holanda con 135 €/t. Sin embargo, en el mercado podían encontrarse el *pellet* doméstico en sacos de 15 kg entre 0,190 a 0,238 €/kg, en big-bag de 0,167 a 142 €/kg

y a granel de 0,152 a 0,188 €/kg y el *pellet* industrial en big bags a 157 €/t y a granel a 142 €/t. Sin embargo las últimas estadísticas de AEBIOM, de julio de 2014 a junio de 2015, indican que el precio medio en Italia, el país de la UE con el montante más alto, se había situado por encima de los 300 €/t, y en la mayoría de países de la UE se superaban los 200 €/t.

El poder calorífico superior del *pellet* se sitúa en los 16,5 MJ/kg, con cenizas inferiores al 0,5%. Según los productores sería deseable mejorar algunos aspectos físicos tales como la durabilidad y el contenido de finos.

En España, el principal productor se encuentra en La Coruña con una capacidad de 80.000 t/año, otros centros importantes se encuentran en Toledo, Burgos, Albacete, Soria, Asturias y Huesca.

Según el Plan de Acción en Energías Renovable, REAP, España debería consumir de 9 a 11 millones de toneladas anuales de biomasa para calefacción en el año 2020. Si bien el objetivo, quizás, es asumible si se atiende a la capacidad de los bosques, pero parece del todo inviable y realista desde el punto de vista de la evolución del mercado.

El mercado mundial de *pellets* no ha parado de crecer en la anterior década, tal como se visualiza en la Figura 10.54, y continua en la actual. AEBIOM, Asociación Europea de Biomasa, dio a conocer en la 3rd *AEBIOM European Bioenergy Conference 2012* celebrada en Berlín, que Europa consumía ya 14 millones de toneladas de *pellets*. Del total, 7 millones correspondían a consumo industrial, mientras que los otros 7 correspondían al ámbito doméstico.

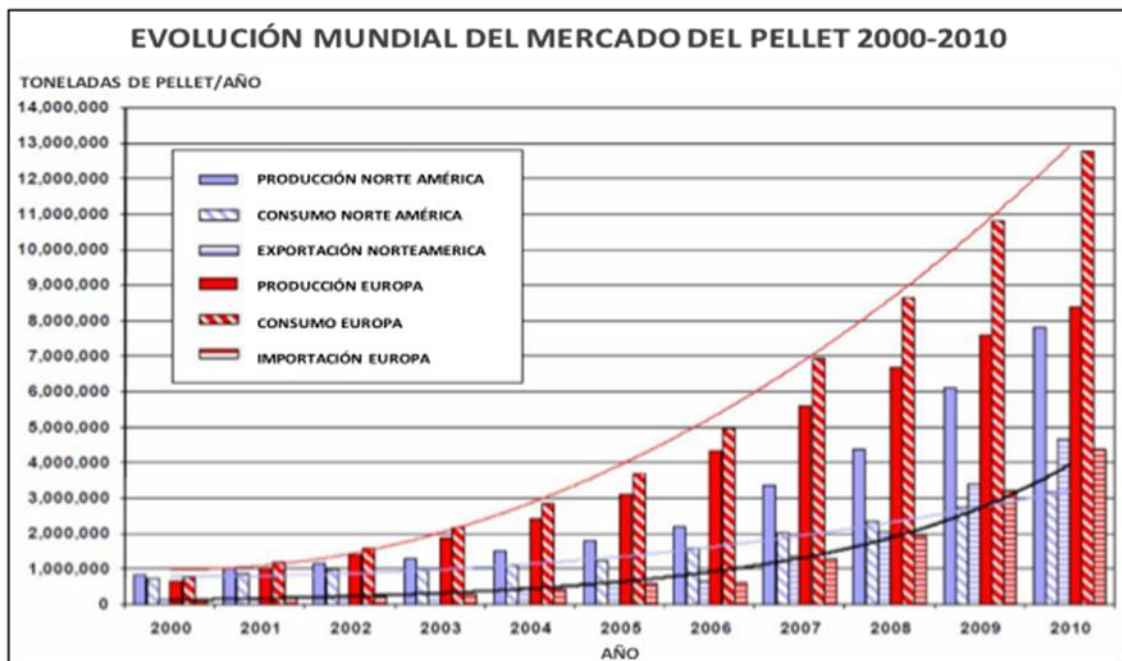


Figura10.54. Evolución mundial del mercado del *pellet* de 2000 a 2010.

AEBIOM indicaba, en su informe anual de 2015, que la producción de *pellets* en 2014 de la UE-28 continuaba aumentando significativamente, alcanzando los 13,5 millones de toneladas, prácticamente el 50% mundial (estimada en 27 Mt). En este año, el consumo en la UE era, siguiendo la tónica de los años anteriores, mucho mayor, 18,8 Mt (el 75% de la demanda mundial), con importaciones de 5,15 Mt de América del Norte, y casi 1 Mt de Rusia, y 0,35 Mt de otras áreas. La producción en América del

Norte fue de 8 Mt, con un consumo de 2,8 Mt. En la UE, Alemania era el país que mayor cantidad producía con 2,1 Mt, le seguían Suecia con 1,6 Mt, Lituania 1,3 Mt y Francia y Portugal, ambas con 1 Mt. Mientras que atendiendo al consumo, en primer lugar continuaba Italia con 2,9 Mt (aunque había disminuido su consumo en los dos últimos años), le seguían Alemania 2 Mt, Suecia 1,4 Mt, Francia 0,9 Mt y Austria 0,8 Mt.

4.5. FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Los residuos sólidos urbanos (RSU), poseen alrededor (de media en la UE) de un 40% de materia orgánica, de la cuál una parte importante es valorizable a través de procesos de conversión energéticos. Los RSU pueden ser valorizados energéticamente a través de la incineración o gasificación. Este proceso se integra generalmente con una etapa de clasificación de los residuos donde son extraídos los residuos inertes, metálicos, vidrio e industriales, los cuáles son normalmente incorporados a procesos de reciclaje. La fracción restante, compuesta principalmente por residuos orgánicos, se lleva al horno incinerador donde se oxida y se recupera la energía en forma de calor.

Otra alternativa es el compostaje, siendo uno de los procesos de valorización de residuos orgánicos más utilizados en la actualidad. Aunque en el caso de los RSU, como ya se ha comentado, esta solo puede realizarse sobre la fracción de recogida selectiva (FORM) de acuerdo con la Ley 22/2011. Este proceso permite la obtención de un sustrato rico en nutrientes que puede ser utilizado para mejorar la calidad de suelos agrícolas o forestales, nutriendo cultivos y permitiendo la valorización de residuos, que difícilmente pueden tener otro uso. Esta variante es solo recomendable a partir de la fracción fermentable recogida selectivamente.

Aproximadamente la tasa de generación de RSU en un país como España es de 1,4 kg/persona y día (de los que hay que deducir los que van a recogida selectiva), con lo cual la cantidad de residuos orgánicos producidos diariamente es de gran magnitud y precisa el establecimiento de numerosas instalaciones dedicadas a su tratamiento.

Efectuando un cálculo simple a partir de la generación media de RSU en una ciudad europea, es posible realizar una estimación del potencial de aprovechamiento de la fracción orgánica de los RSU. Si un 40% de los residuos generados son materia orgánica susceptible de ser valorizada, en una ciudad de 1 millón de habitantes, se generaría un total de 600 toneladas de materia orgánica. La tecnología disponible hoy en día permite obtener alrededor de 330 litros de etanol a partir de 1 tonelada de residuos orgánicos, por lo que en una ciudad de 1 millón de habitantes potencialmente podría producirse un total de 198.000 litros diarios de bioetanol lo cual significa más de 72 millones de litros anualmente. Este combustible es el suficiente para cubrir las necesidades de carburantes de 160.000 personas.

Otra alternativa es la valorización energética a través de la incineración de los RSU, lo cual tiene un costo elevado, pero permite obtener aproximadamente 450 kWh de electricidad por tonelada de residuo, con un costo de producción de alrededor de 0,16 € por kWh. Esta temática está ampliamente desarrollada en el capítulo 11.

5. IMPACTO AMBIENTAL DEL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS AGRÍCOLAS Y FORESTALES

La valorización energética de residuos agrícolas y forestales, así como el establecimiento de plantaciones de especies vegetales como cultivos energéticos,

suponen una serie de beneficios que han sido expuestos en los apartados anteriores. Principalmente su aporte a la sustitución de combustibles fósiles, la generación de alternativas productivas en zonas rurales y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero son, sin lugar a duda, beneficios significativos desde el punto de vista ambiental, social y económico.

También es obvio que la utilización extensiva de biomasa para su aprovechamiento energético, produce efectos sobre los sistemas naturales, pudiendo alterar procesos biológicos con la consecuente afectación al medio ambiente. El primer y principal impacto ambiental que podría pensarse al proponer la utilización de biomasa es la explotación misma de los recursos, si bien este apartado no incidirá en este aspecto sino en los problemas derivados de su valorización, que se asocian principalmente a tres cuestiones claves: emisiones a la atmósfera, utilización del suelo y balance energético.

5.1. EMISIONES CAUSADAS POR EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA

La emisión de gases contaminantes a la atmósfera, la emisión de partículas y de hidrocarburos volátiles, son los principales efectos ambientales asociados a proyectos de obtención de electricidad a partir de biomasa. Además, la formación de compuestos aromáticos policíclicos (PAH's), algunos de los cuales, particularmente los de mayor peso molecular, son potentes agentes carcinogénicos, constituyen uno de los impactos más preocupantes.

Trabajos realizados sobre la presencia de dioxinas y furanos en las emisiones de combustión de la biomasa han podido determinar que las concentraciones de estos compuestos son muy pequeñas, situándose, por lo general, en niveles unas 100 veces inferiores a las permitidas por la legislación vigente en la Unión Europea para incineradoras de RSU. De todas maneras, las instalaciones productivas modernas poseen un detallado control de emisiones y contemplan el uso de filtros de partículas y la depuración de los gases de combustión. Sin embargo, por otro lado, también hay que considerar que son muy importantes las emisiones de organoclorados en los incendios forestales.

Las emisiones de partículas y CO pueden representar graves problemas de contaminación atmosférica, si bien sus repercusiones pueden ser menores a los producidos en instalaciones homólogas con combustibles fósiles, las medidas de abatimiento y control de estas emisiones deben ser consideradas en todo aprovechamiento industrial que se pretenda realizar a partir de la valorización de biomasa como fuente energética. Estudios llevados a cabo por la Agencia Danesa del Medioambiente han podido constatar la estrecha relación existente entre la aparición de dioxinas y PAH's, con los niveles de CO en las emisiones. Dicho Organismo recomienda mantener la concentración de CO en los gases de combustión de biomasa por debajo de un 0,05% en volumen (para un 10% de exceso de oxígeno en los gases secos), asegurando de esta forma la casi desaparición de los compuestos que generarían problemas.

Las emisiones de CO₂ de las plantas generadoras de electricidad a partir de biomasa no poseen importancia, puesto que en términos absolutos el balance general es cercano a cero, ya que se espera que el carbono liberado a la atmósfera sea capturado nuevamente para su inserción en el ciclo de fijación a través de la fotosíntesis y solo existe una tasa de emisiones asociada a labores anexas del proceso de combustión propiamente como, por ejemplo el transporte, la construcción de las instalaciones o la fabricación de los insumos productivos. El CO₂ no es

considerado un contaminante, aunque posee efectos a nivel global por sus implicaciones en el efecto invernadero.

En cualquier caso, las emisiones gaseosas originadas por la combustión directa de la biomasa hay que analizarlas en función de parámetros tales como la composición del biocombustible utilizado y, sobre todo, la tecnología de combustión y la eficiencia energética de las plantas térmicas. En este sentido estimaciones de valores promedios de emisiones asociadas a grandes centrales de biomasa, son presentadas en la Tabla 10.39, donde se contraponen las emisiones de la combustión de dos de los biocombustibles más utilizados con las producidas por un carbón de buena calidad y contenido moderado de azufre, la gasolina y el diésel bajo en azufre.

Tabla 10.39. Emisiones de diferentes combustibles fósiles en relación a la biomasa, antes y después de los sistemas de depuración más comunes (García 1998).

Combustible	SO _x como SO ₂ (g/GJ)	NO _x como NO ₂ (g/GJ)	Partículas (g/GJ)
Carbón	584	200	1.100*-120(C)
Diésel	495	150	60*
Gasolina	90	100	0,5*
Gas natural	0	150	0
Paja	130	130	1.100*/800(C)/20(B)
Madera	130	130	500*/300(C)/20(B)

El contenido en partículas de los gases a la salida de caldera, en el caso de la biomasa presenta valores más altos incluso comparables a los del carbón, aunque la instalación de sistemas de control y abatimiento de contaminantes permite la reducción en más de un 98%. Las partículas generadas dependen directamente del contenido de cenizas del biocombustible y por lo tanto los valores son fácilmente estimados a partir de la composición elemental de cada combustible. También son muy dependientes de la concepción del horno ya que según el diseño se facilita el arrastre de partículas.

Respecto a óxidos de nitrógeno, responsables junto al dióxido de azufre de la lluvia ácida y de una parte significativa del efecto invernadero, las emisiones por unidad de energía producida a partir de la combustión de biomasa son algo superiores a las de la gasolina, comparables a las del gas natural y el diésel y netamente inferiores a las del carbón. Dichos valores también son cuantificables al conocer la cantidad de nitrógeno presente en la biomasa. Estas cifras, no obstante, son tan solo indicativas y no generalizables a la totalidad de los casos, debido a la gran diversidad en la composición de los combustibles existentes y a las condiciones de operación de las plantas térmicas. En términos generales se pueden estimar los rangos de emisiones de NO_x para los distintos tipos de biocombustibles utilizados que muestra la Tabla 10.40.

Tabla 10.40. Emisiones de NO_x de diversos biocombustibles (Koch, 2005).

Combustible	Emisión de NO _x (mg/Nm ³)
Madera	100 – 250

Biomasa herbácea	250 – 520
Astillas de madera	500 – 900

Referente al SO₂ el contenido de este elemento por unidad de energía en el biocombustible es muy pequeño, generalmente inferior a 60 g/GJ de combustible. La biomasa produce emisiones específicas de SO₂ muy inferiores a combustibles como el carbón. El origen de SO₂ procede del contenido de azufre en la biomasa (se forma SO₂ por la combustión del azufre de la biomasa y el oxígeno del aire), pero el contenido de azufre en la biomasa es relativamente bajo si se compara a un combustible tradicional como el carbón. Normalmente no se requieren medidas particulares para eliminar el SO₂ cuando se combustiona biomasa, ya que gran parte del SO₂ se queda en el sistema de eliminación de partículas (40-90% del total).

Es posible afirmar que, en términos generales, con la tecnología disponible, la combustión de biomasa en grandes centrales no representa problemas de relevancia en lo que a cumplimiento de normativa de emisiones se refiere y que un buen control de las condiciones de proceso en combinación con la existencia de elementos filtrantes comunes tales como ciclones y electrofiltros o filtros de mangas, son suficientes para, en general, asegurar una emisión limpia, con unos niveles globales de emisiones muy inferiores a los del carbón, incluso el de buena calidad, y el petróleo.

De la experiencia alemana en este sentido se pudo recopilar, ver Tabla 10.41, la siguiente información que muestra las emisiones para la generación eléctrica a pequeña escala en una situación en particular.

Tabla 10.41. Emisiones típicas de una planta de generación de biomasa (Koch, 2005).

Potencia térmica instalada	Combustible	Emisiones (mg/Nm ³)		
		SO ₂	NO _x	Partículas
5 MW	Astillas de madera	50-500 (media: 170)	100-400 (media: 250)	200-800 (media: 500)

Las emisiones referidas al aprovechamiento térmico de la biomasa son análogas a las de cualquier instalación industrial, pero si se comparan con los resultados aparecidos en la Tabla 10.40, existe una reducción significativa de las emisiones por unidad de energía producida. Además de las emisiones referidas, la combustión de la biomasa, análogamente a lo que ocurre con los combustibles fósiles, produce otros efluentes de naturaleza líquida y sólida.

Entre los primeros se encuentran los líquidos que resultan de la limpieza de los gases de combustión por métodos húmedos antes de su salida a chimenea, así como de la limpieza periódica de las calderas y que poseen un contenido importante de productos orgánicos tóxicos y una demanda de oxígeno elevada. Las cantidades generadas de estos productos son, no obstante, relativamente pequeñas, su producción muy localizada y su tratamiento se está realizando satisfactoriamente por métodos biológicos, aerobios y anaerobios y, por ello, su impacto sobre el medioambiente debe considerarse de muy escaso o nulo alcance.

Los efluentes sólidos están constituidos por las cenizas recogidas en los propios hornos (habitualmente denominada escoria), en los ciclones y demás sistemas de filtración de gases.

A diferencia de lo que ocurre con las cenizas del carbón que suelen presentar valores elevados de algunos metales pesados, las obtenidas en la combustión de biomasa se consideran que, en general, pueden ser devueltas al suelo como aporte de nutrientes al mismo, por lo que es una posibilidad de ahorro de fertilizantes en los cultivos y superficies forestales en vez de ser un problema real, aunque bajo una estricta reglamentación y control en lo referente a cantidad y composición de la ceniza de acuerdo al tipo de suelo en el que se depositan.

La producción, recolección y transporte de biomasa para su utilización energética determina además algunas emisiones parecidas a las originadas por la industria agrícola. Principalmente el CO y partículas, liberados como consecuencia de la utilización de combustibles fósiles en maquinarias de cosecha y transporte además de las derivadas del empleo de fertilizantes nitrogenados (N₂O) y pesticidas volátiles.

5.2. RECURSO SUELO

El suelo es un cuerpo natural que forma parte de la capa superficial de la corteza terrestre de espesor variable. Está integrado por componentes minerales y orgánicos (sólidos), además de agua y aire, configurando un sistema de tres fases, aire, sólidos y agua, y constituye un recurso vital para el desarrollo de las actividades humanas, y como ecosistema integrado de organismos, que interactúan mediante procesos físicos y biológicos que ayudan a mantener los ciclos ecológicos.

Se puede establecer que el suelo es un componente básico de los ecosistemas productivos, sirviendo de soporte para las plantas y árboles, actuando como regulador del intercambio de agua y nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas, lo que determina en gran medida la calidad de un sitio y la productividad de los cultivos que allí se desarrollen, por lo que las características del suelo, condicionan la vegetación que allí pueda desarrollarse y de esta manera el ecosistema que pueda configurarse en estas condiciones. Una de las principales funciones del suelo es la liberación de nutrientes a los ecosistemas agrícola o forestal, que determinan, entre otras cosas, la tasa de fotosíntesis y la producción de biomasa.

Existen tres ciclos importantes en la generación de la biomasa, en los cuáles el suelo juega un rol preponderante:

- Ciclo geoquímico, que incluye entradas de la atmósfera y el suelo, y las pérdidas por cosecha, lavado y erosión.
- Ciclo biogeoquímico, que incluye la absorción de nutrientes desde el suelo, y su retorno por la hojarasca y la biomasa en descomposición.
- Ciclo interno, que es la conservación y movimiento interno de los nutrientes al interior de las plantas.

5.2.1. Principales efectos ambientales sobre el suelo

En el caso de las cosechas agrícolas o forestales, el suelo y los procesos para los cuáles este elemento sirve de soporte, pueden verse afectados de diversas formas, siendo algunas de las principales el aumento de la insolación, cambios en la temperatura del suelo y alteraciones a la disponibilidad de agua, alterando de manera significativa cada uno de los procesos químicos involucrados en el balance nutricional del ecosistema vegetal que se desarrolla (bosque, cultivo o plantación).

Otro de los efectos significativos es el quiebre del balance de elementos nutritivos, producto del agotamiento por el consumo por parte de las especies vegetales de elementos nutritivos, sin que se desarrollen mecanismos de reposición que garanticen su reposición en el suelo. Esta situación se acentúa al utilizar sistemas de cosecha

que extraen completamente la biomasa generada en el bosque o en el cultivo agrícola, por lo que elementos nutritivos que pueden estar presentes en esta biomasa residual no son devueltos al suelo.

En el caso de las plantaciones forestales al tratarse generalmente de especies de rápido crecimiento y con ciclos cortos de rotación, claramente el reemplazo de los nutrientes perdidos no puede ser compensado mediante mecanismos naturales de reposición, por lo que el mantenimiento de un suministro constante de estos elementos de manera artificial se hace, evidentemente, necesario.

La sustitución del suelo para el establecimiento de plantaciones con fines energéticos es uno de los problemas que recurrentemente se está investigando, ya que la instalación de proyectos de generación de energía a partir de biomasa supone necesariamente la disponibilidad de grandes extensiones del territorio que aseguren un abastecimiento continuo del recurso. Esto genera un incentivo a la sustitución de praderas naturales o cultivos extensivos de bajo rendimiento y su transformación en tierras arables para el cultivo de plantaciones energéticas. Existen impactos sobre el recurso suelo que deben ser cuantificados, para generar una estimación del potencial real de utilización de biomasa como combustible, siendo de especial preocupación los efectos erosivos y sobre la disponibilidad de agua, sobre todo en países mediterráneos donde las lluvias se concentran en épocas bien definidas del año.

El uso extensivo de la biomasa puede producir una presión y sobreexplotación de los nutrientes de los suelos, y en el caso de aprovechamiento de residuos generar una tendencia contraria a la que se busca actualmente propiciando la disminución total de residuos generados por unidad productiva. En el caso de los bosques puede favorecer también la extracción de biomasa residual que antes permanecía en el sitio y permitía la entrega gradual de nutrientes al suelo, por lo que el aprovechamiento de esta biomasa residual debe ser compatible con las características del suelo y adaptarse a situaciones específicas para lograr un adecuado manejo.

En los países desarrollados esta situación puede ser aún más frágil, ya que el suelo es un bien relativamente escaso, y por lo tanto un uso extensivo podría generar además otros problemas económicos y sociales que deben ser considerados.

Una cuantificación de la superficie teórica disponible para el establecimiento de programas de utilización de biomasa como fuente energética en la Comunidad Europea, asumiendo restricciones ambientales planteadas sobre la base de los problemas descritos, determina que es posible incrementar la producción de energía a partir de biomasa hasta un total de 190 Mtep en el año 2010 y 295 Mtep en el 2030.

La calidad del sitio puede ser cuantificada mediante métodos directos e indirectos, ya sea por la determinación de un volumen y altura promedio por unidad de superficie, como por la medición de factores del medio que se consideren íntimamente relacionados con el crecimiento de los árboles y plantas.

En el caso de los bosques, la cuantificación de la productividad está directamente ligada con el volumen de madera alcanzado por unidad de tiempo y en una superficie dada. En muchos casos se considera el Índice de Sitio (IS), como un indicador de la productividad que posee una zona. Este expresa el crecimiento promedio, en términos de la altura dominante, que experimentan los árboles de una zona determinada, a una edad clave constante, que permita comparar distintas situaciones.

Los efectos en las propiedades físicas del suelo se refieren principalmente a las alteraciones directas sobre la fracción mineral del suelo, provocando una pérdida material desde la superficie, ya sea por fenómenos naturales propios del entorno, o

bien por la ejecución de labores productivas. En general los principales impactos que se generan son los siguientes:

- Alteración de la estabilidad del suelo
- Erosión hídrica y producción de sedimentos
- Compactación del suelo
- Remoción o desplazamiento del suelo.

Los efectos en el ciclo de nutrientes y la fertilidad del suelo, representan aquellos impactos que muchas veces no son visibles, debido a que se producen en el balance de nutrientes propios del suelo y por tanto no generan un efecto físico apreciable superficialmente. Los efectos sobre el ciclo de nutrientes, compuesto por tres etapas o ciclos (ciclo geoquímico, ciclo biogeoquímico y ciclo interno) pueden afectar de diversas formas, principalmente por el aumento de la insolación, de la temperatura y de la disponibilidad de agua en el suelo. Además, como ya se ha comentado, se puede producir un quiebre en el balance de elementos nutritivos, debido al agotamiento por un consumo por parte de los árboles o plantas de los principales elementos nutritivos, sin que se desarrollen mecanismos de reposición que garanticen su reposición en el suelo.

La situación anterior se acentúa al utilizar sistemas de cosecha que extraen una parte considerable de la biomasa desde el cultivo, sobre todo cuando se extraen ramas, hojas y flores, ya que son las estructuras que concentran gran parte de los nutrientes de una planta.

5.2.2. Cultivos energéticos y efectos sobre el suelo

Al analizar lo descrito anteriormente, se colige que claramente existe un efecto negativo de plantaciones intensivas en producción de biomasa (todo ello también debe hacerse extensivo a las plantaciones para obtención de alcoholes y biodiésel y que ya se ha comentado específicamente en el apartado 3.1 y en especial en 3.1.3 y 3.1.4), como las necesarias para el desarrollo de una industria de aprovechamiento de la biomasa como fuente energética.

En el caso de plantaciones bioenergéticas, al tratarse generalmente de especies de rápido crecimiento y con ciclos cortos de rotación, provoca que el reemplazo de los nutrientes perdidos y las demandas de estas plantas no puedan ser compensados mediante mecanismos naturales de reposición. Por lo que para mantener un suministro constante de estos elementos, se hace necesaria una entrada artificial de éstos, con lo cual es posible resolver parte importante del problema.

Pero si esto se compara a las actuales condiciones de los cultivos agrícolas o forestales, este efecto posee algunas aristas que es necesario enumerar. En primer lugar si los cultivos se desarrollan sobre suelos que anteriormente estaban descubiertos y/o carentes de vegetación, cualquier impacto que se genere es menor al que naturalmente se produce en ese sistema, ya que los fenómenos erosivos y de nutrición del suelo, son claramente menores, puesto que se incorporan importantes sistemas radiculares en los primeros centímetros de la superficie, aumentando la protección sobre un suelo que anteriormente estuvo descubierto. Este fenómeno es especialmente favorable en el caso de plantaciones o cultivos perennes, a los cuáles corresponden muchos de las especies utilizadas como fuentes de biomasa con fines energéticos.

Cuando se plantea, por ejemplo, el aprovechamiento de los residuos de una plantación forestal o de un cultivo agrícola, se generan también beneficios, ya que disminuye considerablemente los riesgos de incendio y la necesidad de quemar artificialmente los

residuos, fenómenos que destruyen por completo los ciclos de nutrientes naturales del suelo.

Un manejo integral de los cultivos energéticos deberá incorporar entonces las variables ambientales desde un inicio tomando, por ejemplo, medidas para una elección adecuada de las especies, preferentemente perennes, la incorporación de los residuos de los cultivos en el suelo, la rotación de cultivos, la utilización de suelos pobres o erosionados y la adecuada ejecución de labores de cosecha y producción. Con lo cual los esperados efectos negativos sobre el suelo son mitigados de manera considerable, generándose incluso beneficios atribuibles al desarrollo de una industria de los biocombustibles. En este sentido, especialmente la industria forestal, ha reconocido al suelo como parte importante de su ciclo productivo y por lo tanto ha creado una serie de normas y reglamentaciones, agrupadas en las denominadas mejores prácticas forestales, que incluyen no solo prohibiciones y restricciones al uso de ciertas técnicas, sino que además suministran pautas claras de prácticas y actividades que mitigan y controlan los efectos ambientales sobre el suelo, mejorando su productividad y la sostenibilidad de los cultivos en el tiempo.

Es importante finalizar este apartado teniendo en cuenta que pueden existir otras consideraciones ambientales, como por ejemplo la presión sobre la superficie cultivable disponible y la competencia entre los recursos alimenticios, y las políticas de promoción de las energías alternativas. Es decir, sobre lo que se llama el cambio de uso de las tierras que, en el caso de Europa, está legislado por la Directiva 2008/28/CE ya comentada en el apartado 3.1, que en su artículo 17 indica que no podrán utilizarse las “tierras de elevado valor en cuanto a biodiversidad” para los cultivos energéticos.

5.3. BALANCE ENERGÉTICO

Uno de los aspectos relevantes que deben ser considerados al plantear el desarrollo de programas de aprovechamiento extensivo de la biomasa como fuente de energía es el balance energético que estos sistemas poseen, ya que su utilización a gran escala supone la necesidad de suministro de una serie de materias primas, bienes y servicios que consumen energía antes y durante el ciclo productivo de los cultivos que originan la biomasa que será utilizada.

Un concepto clave en este sentido es el cálculo de las unidades de energía utilizadas por unidad de energía potencial contenida en el biocombustible. En este sentido la utilización de cultivos energéticos de especies leñosas, para la generación de calor y electricidad, alcanzan una relación de entre 10:1 y 20:1, es decir generan 10 o 20 veces más energía de la necesaria para su cultivo y procesamiento, por lo que el balance energético es favorable y su utilización permite una eficiencia en el uso de los recursos naturales. Los residuos de una industria maderera alcanzarían, incluso relaciones de 30:1, ya que se favorece de otros procesos y solo una fracción de la energía es atribuida de manera específica al residuo.

El caso del biodiésel y los bioalcoholes presentan rendimientos bastante diferentes y ha sido debatido en profundidad en apartado 3.3.1. Únicamente remarcar que algunos cultivos como la caña de azúcar, yuca, sorgo, palma, girasol, colza, etc. tienen claramente un rendimiento energético positivo.

A pesar de lo anterior y lo comentado en los apartados 3.1, 3.3.1 y 3.3.2 sobre biocombustibles, al plantear la utilización de biomasa como combustible, sobre todo cuando se trata de cultivos con fines energéticos se requiere de un detallado análisis

del flujo de energía y los insumos necesarios para la transformación, además de cumplir con la legislación vigente.

5.4. OTROS EFECTOS AMBIENTALES

La utilización de biomasa genera además otros efectos sobre el medio ambiente que es necesario analizar. En primer lugar el uso extensivo de cultivos con fines energéticos, favorece la sustitución de ecosistemas naturales y por lo tanto la biodiversidad de otras especies puede verse amenazada. Esta situación se aprecia con mayor intensidad debido al establecimiento de cultivos monoespecíficos de corta rotación. De igual manera la extracción de residuos de biomasa abandonada en el bosque puede afectar a otras especies adaptadas a estos sistemas y que se benefician de esta materia orgánica para su desarrollo.

Hay además una serie de situaciones asociadas, claramente, a la construcción y operación de instalaciones industriales para la valorización de la biomasa que en términos generales se pueden resumir de la siguiente manera:

Etapa de construcción

- Pérdida de suelo por la instalación.
- Efectos sobre el paisaje por la construcción de obras y servicios como caminos y tendidos eléctricos.
- Ruido y polvo asociado a las obras de construcción.

Etapa de operación

- Emisiones de CO, gases y partículas por la combustión de la biomasa.
- Aumento del flujo de camiones por transporte de materias primas y emisiones asociadas a la combustión de sus motores y polvo al transitar por caminos no pavimentados.
- Alteración de la calidad del suelo por la utilización de residuos agrícolas y forestales que pueden causar una disminución en la cantidad de nutrientes aportados al medio.
- Impacto visual sobre poblaciones vecinas tanto por las instalaciones industriales como por la necesidad de levantar tendidos eléctricos en la zona.
- Generación de cenizas, escorias y residuos de los sistemas de filtración y depuración de los gases de la combustión.
- Impacto visual de los tendidos eléctricos para la conexión a la red de distribución y la electrocución de aves en las líneas de alta tensión.

5.5. CONSIDERACIONES AMBIENTALES GENERALES

Los impactos descritos anteriormente no difieren a los que puede presentar cualquier proyecto industrial y por lo tanto no son exclusivos al aprovechamiento de los recursos de biomasa.

Existen también beneficios ambientales que es necesario cuantificar, ya que la utilización de biomasa como fuente de energía, a través del aprovechamiento de residuos y un manejo integral de los recursos naturales, genera situaciones que favorecen los sistemas naturales, ya que disminuyen los riesgos de plagas e incendios forestales, permite la valorización grandes extensiones de territorio abandonadas o que han sufrido deterioro por acción de agentes erosivos, genera beneficios sociales al mejorar las condiciones de zonas rurales y fomenta la protección de sitios degradados a través del establecimiento de plantaciones.

Las estrategias para un uso sustentable de la biomasa como fuente energética, debe considerar entonces tanto los beneficios ambientales que aporta a los sistemas naturales como también un control de los impactos, a través de los siguientes aspectos que permiten evitar la presión sobre el medio ambiente:

- Definir claramente zonas de protección y uso de extensiones importantes del territorio para el desarrollo de agricultura de bajo impacto ambiental.
- Favorecer el establecimiento de plantaciones energéticas de bajo impacto ambiental, fomentando las especies perennes y que presenten mayor productividad por unidad de territorio utilizada.
- Fomentar la utilización de especies adaptadas a condiciones ambientales en los cuáles se establecen los cultivos energéticos, por ejemplo utilizando especies de bajo consumo de agua que no requieran sistemas de riego.
- Establecer rotaciones mixtas de especies, que disminuyan los riesgos de enfermedades o plagas y fomenten la creación de ecosistemas con una estructura análoga a los sistemas naturales, por ejemplo a través de la integración de especies arbustivas perennes y especies forestales de rápido crecimiento.
- Un análisis del ciclo de vida de los proyectos es fundamental, incluyendo un detalle del balance energético esperado y que justifique los esfuerzos llevados a cabo para desarrollar la industria del aprovechamiento de los residuos agrícolas y forestales.

Es necesario constatar las ventajas asociadas ya que el solo hecho de postular un nuevo uso a la biomasa de origen residual, permite disminuir la cantidad de residuos que en la actualidad no poseen una finalidad y generalmente terminan en vertederos donde ocupan grandes extensiones de terreno, además de generar impactos ambientales significativos durante este ciclo.

Las técnicas propuestas han permitido constatar la posibilidad de utilizar dicha biomasa residual para una variedad de fines, en los que además de dar un uso a estos residuos, permite obtener beneficios adicionales que son claramente cuantificables en el caso de la producción de energía. La generación de energía permite solucionar un problema que en la actualidad se relaciona a la disponibilidad de recursos energéticos, y a la utilización de combustibles fósiles, tal como se comentó en el inicio de este capítulo.

Finalmente es necesario enfatizar que el empleo de biomasa como fuente energética evita la producción de grandes cantidades de CO₂ de origen antrópico, al sustituir la utilización de combustibles fósiles, reservorios confinados de carbono que se encontraban fuera del ciclo natural durante millones de años, cuya liberalización ha provocado un aumento sostenido en la concentración de CO₂ en la atmósfera.

A efecto de la emisión de CO₂, las directivas de la UE citan, de manera expresa, la lista de biomasa que se consideran neutras respecto al CO₂:

- Plantas y partes de las mismas: Paja, heno, hierba, madera, cultivos, etc.
- Residuos, productos y subproductos de la biomasa: madera residual industrial, subproductos de operaciones de tratamiento de la madera, residuos a base de madera de las industrias de fabricación de papel y pasta de papel (por ejemplo, licor negro), desechos de silvicultura, harinas de animales, pescado, grasa, aceite y sebo. Desperdicios de la fabricación de alimentos y bebidas. Estiércol. Desperdicios de plantas agrícolas. Fangos de depuradoras. Biogás procedente de procesos de fermentación anaerobia, gas de vertedero, etc.
- Fracción de biomasa de desperdicios mezclados procedente de fabricación de alimentos y bebidas, parte de biomasa de compuestos que contienen madera,

papel, textiles. Fracción de biomasa de los RSU y residuos industriales, ya sean tratados o no.

- Combustibles cuyos componentes y productos intermedios han sido obtenidos a partir de biomasa (biocombustibles, biocarburantes, productos de pirólisis, gasificación, etc).

6. FUNCIONAMIENTO ESPERADO EN LA INSTALACIÓN DE VALORIZACIÓN DE RESIDUOS FORESTALES

En el presente apartado, se presentan los resultados de una modelación esperada de una instalación de valorización energética de residuos provenientes de la industria forestal. Considerando para ellos los parámetros de disponibilidad comentados y la incineración como proceso de aprovechamiento energético de la biomasa residual.

Se considera el abastecimiento de materias primas provenientes en mayor proporción de desechos de la industria procesadora de madera y restos de podas y cosechas de plantaciones forestales. Se integrará como parte de este proyecto el transporte de las materias primas necesarias considerando una continuidad y seguridad en el flujo necesario para mantener el normal funcionamiento de la instalación.

La Tabla 10.42 muestra las principales características de los biocombustibles que serán considerados en esta instalación.

Tabla 10.42. Características principales de los biocombustibles utilizados.

Biocombustible	% Humedad promedio	PCI útil (kcal/kg)	Procedencia
Ramas, corteza y madera de <i>Pinus sp.</i>	50	2.800	Restos de podas, raleos y cosecha de plantaciones forestales
Aserrín	45	3.000	Barracas y aserraderos Etapas de aserrado y reproceso

Respecto de los requerimientos, en términos de cantidad de los biocombustibles utilizados, se debe estimar a partir de las necesidades energéticas del horno de combustión y la caldera instalada, y según la eficiencia y el PCI, permite estimar la cantidad de biomasa necesaria para suplir la demanda energética que permita el funcionamiento de la turbina en condiciones normales.

Se plantea la evaluación de una turbina de 5 MW de potencia eléctrica instalada. Se puede establecer para esto que, en términos generales, los rendimientos (de la conversión en electricidad) en este tipo de proyectos son de alrededor de un 20% de la energía contenida en el biocombustible. Con estos datos es posible realizar una cuantificación de la biomasa necesaria para alimentar los hornos y también determinar las características de la caldera asociada y el flujo de agua necesaria.

Con el rendimiento estimado, los 5 MW de potencia eléctrica representan un total de 25 MW necesarios para aprovisionar la energía necesaria al horno, con tal de obtener el 20% de rendimiento eléctrico esperado disponible para ser distribuido al final del proceso. Asumiendo los PCI que se han dado en la Tabla 10.42, se puede determinar lo siguiente:

En un primer cálculo se considera que toda la biomasa es pino, entonces, si el PCI útil, a partir de un 50% humedad, es 2.800 Kcal/Kg y como 1 kW = 860 Kcal/h, este poder calorífico en unidades de kWh/kg será:

$$\frac{2.800}{860} = 3,256 \text{ kWh/kg}$$

Que es la energía aportada por kilogramo de biomasa, pino.

Luego sabiendo que es necesario aportar energía equivalente a 25.000 kW por hora de funcionamiento a la central, es posible determinar el requerimiento de materia prima necesario para la instalación. De esta forma se obtiene lo siguiente:

$$\frac{25.000}{3.256} = 7.678 \text{ kg/h}$$

Es decir alrededor de 7,7 toneladas de biomasa por hora de funcionamiento, si se abastece únicamente la instalación con residuos de la cosecha forestal.

Considerando que es posible hacer una combinación de biocombustibles, utilizando una proporción de un 20% del total necesario, de la industria secundaria de la madera, es decir de aserraderos y plantas procesadoras de madera, se puede aumentar la eficiencia del sistema y disminuir la biomasa necesaria. Las estimaciones para esta situación serían las siguientes:

Si el aserrín posee un PClu de 3.000 kcal/kg:

$$\frac{3.000}{860} = 3,5 \text{ kWh/kg}$$

Cantidad que es la energía aportada por kilogramo de biomasa, aserrín.

Si se quiere que el aserrín aporte la energía equivalente al 20% de las 25.000 kW, es decir 5.000 kW por hora de funcionamiento a la central, es posible determinar el requerimiento de materia prima necesario para la instalación. De esta forma se obtiene lo siguiente:

$$\frac{5.000}{3,5} = 1.429 \text{ kg/h}$$

Cantidad que representa alrededor de 1,4 toneladas de biomasa por hora de funcionamiento.

A esto se debe sumar el requerimiento del 80% de energía restante mediante la biomasa de pino proveniente de las faenas forestales, que se estima de manera similar donde:

PCI útil de la madera de pino con un 50% humedad es 2.800 Kcal/Kg o su equivalente en 3,256 kWh/kg, que es la energía aportada por kilogramo de biomasa.

Luego sabiendo que es necesario aportar energía equivalente a 20.000 kW por hora de funcionamiento a la central, es posible determinar el requerimiento de materia prima necesario para la instalación. De esta forma se obtiene lo siguiente:

$$\frac{20.000}{3,256} = 6.142 \text{ kg/h}$$

Es decir, alrededor de 6,1 toneladas de biomasa por hora de funcionamiento.

En resumen se puede establecer una tabla donde se presentan las estimaciones de necesidades de materia prima para diversos escenarios de disponibilidad de biomasa para la combustión. Siguiendo el mismo procedimiento anterior se determinaron los valores mostrados en la Tabla 10.43, para distintas proporciones de utilización de los dos biocombustibles.

Tabla 10.43. Necesidades aproximadas de biocombustibles para la instalación en estudio.

Biocombustibles	%	Proporción de utilización de los biocombustibles			
		100 % pino	80 % pino 20 % aserrín	60 % pino 40 % aserrín	40 % pino 60 % aserrín
Residuos de pino radiata (t/h)	50	7,7	6,1	4,6	3,1
Aserrín y virutas (t/h)	45	0	1,4	2,9	4,3

Si se estima que la instalación funcionará un total de 335 días al año, es decir alrededor de 8.040 horas, es posible determinar los requerimientos totales de biocombustibles y la generación esperada de electricidad para el período. Asumiendo el caso del abastecimiento de 80% de pino y 20% de aserrín, se obtiene la Tabla 10.44.

Tabla 10.44. Requerimientos totales de biocombustibles y generación de electricidad esperada.

Biocombustibles	Requerimiento aproximado	Procedencia	Producción de electricidad
Pino	51.858 t/año	Restos de cosechas, cortas intermedias y podas de bosques de alrededores	40.200 MWh / año
Aserrín Seco	12.100 t/año	Aserraderos e industrias forestales	

Se ha estimado un 5% adicional de biocombustible necesario para asegurar el normal abastecimiento

6.1. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO Y DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN

A partir de la descripción típica de una instalación industrial para la valorización energética de la biomasa, como algunas de las descritas a lo largo del apartado 3 de este capítulo, y las características propias de los biocombustibles que se utilizarán en este nuevo ejemplo, es posible estimar los parámetros de funcionamiento de la instalación, el flujo de materias de cada etapa del proceso y los requerimientos de

materiales. La composición elemental de la biomasa, siempre en seco, es aproximadamente la presentada en la Tabla 10.45.

Tabla 10.45. Composición elemental de los biocombustibles.

Biocombustible	%C	%H	%O	%S	%N	%Cl	%Cenizas
Residuos Pino	51,0%	6,3%	41,4%	0,1%	0,1%	0,2%	1,0%
Aserrín	51,0%	6,3%	41,4%	0,1%	0,1%	0,2%	1,0%

También se ha determinado que la mezcla que se utiliza en esta instalación, tiene un 32,7% de humedad, mediante el correspondiente análisis. Por otra parte se toma como dato que el consumo total de biocombustibles húmedos es de 8.623 kg/h. Este valor se podría haber calculado a partir de la potencia eléctrica que se quiere producir en la instalación siguiendo el mismo procedimiento expuesto en el apartado anterior. A partir de esta información es posible determinar los porcentajes totales de material combustible, la cantidad de cenizas contenida en los biocombustibles utilizados por cada hora de funcionamiento, Tabla 10.46, y evaluar la cantidad de aire necesario para su correcta combustión.

Tabla 10.46. Análisis racional de la mezcla de biocombustibles.

Componente	Cantidad (kg/h)	% Respecto del total
Combustible	5.745	66,63%
Cenizas	58	0,67%
Agua	2.820	32,70%
Total	8.623	100,0%

Con estos datos es posible determinar que anualmente se producirán un total de 465 toneladas de cenizas y/o escorias en la caldera, que deberán ser extraídas y tratadas. A partir de la fracción combustible y su composición elemental se puede calcular la cantidad de oxígeno necesario para el proceso de combustión, mediante la correspondiente reacción de oxidación, y a partir de esto estimar el flujo de gases de combustión.

La Tabla 10.47 muestra los cálculos con una relación del 50% de exceso de aire sobre el valor estequiométrico.

Tabla 10.47. Cálculo de masa de aire necesario.

Necesidad de O ₂ /aire	Flujo másico (kg/h)
O ₂ para oxidar C	7.861
O ₂ para oxidar H ₂	2.913
O ₂ para oxidar S	6
O ₂ para oxidar Cl (HCl)	9
O ₂ para oxidar N (como NO ₂)	10
Total O ₂ estequiométrico	10.800
O ₂ en combustible	2.393
Total O ₂ exterior (aire)	8.407
Aire estequiométrico	36.550
Exceso de aire	1,5
Aire necesario	54.826

La Tabla 10.48 muestra un análisis de los gases (gases húmedos) de combustión.

Tabla 10.48. Cálculo de masa de gases de combustión.

Componente de los gases de combustión	Flujo másico (kg/h)
N ₂ en gases	42.216
O ₂ en gases	4.203
CO ₂	10.809
H ₂ O	3.277
SO ₂	12
HCl	8
NO ₂	38
Gases de combustión (parcial)	60.563
Cantidad de agua de humedad	2.820
Total gases combustión	63.383

6.1.1. Balance de materia del sistema

La Tabla 10.49 muestra el balance de masas del sistema.

Tabla 10.49. Balance de masa de la instalación.

	Entrada kg/h	Salida kg/h
Combustible	8.623	
Aire	54.826	
Gases de combustión		63.383
Cenizas		58
TOTAL	63.449	63.441

De la tabla precedente vale la pena destacar que:

- En la incineración de 8.623 kg/h de combustible se genera una masa de gases a tratar de 63.449 kg/h. Por tanto el combustible solo representa el 13,6% de la cantidad de gases generados.
- La cantidad de cenizas es pequeña.

6.1.2. Estimación de la cantidad de contaminantes

Estimando la temperatura del horno, es posible determinar el flujo de gases que se produciría.

Tabla 10.50. Caudal de gases producido.

Temperatura horno	950 °C
Densidad	0,26786 kg/m ³
Caudal gases	236.622 m ³ /h

De esta forma el caudal de gases en la chimenea y los contaminantes generados por este proyecto se reflejan en la Tabla 10.51.

Tabla 10.51. Volumen de gases en la chimenea.

Masa de gases	63.383	kg/h
Temperatura de referencia	20	°C
Densidad	1,2047	kg/m ³
Volumen de gases	52.611	m ³ /h

A partir del caudal de gases, a condiciones normales, la Tabla 10.52 calcula los contaminantes, en términos de masa (mg/Nm³) o en volumen

Tabla 10.52. Volumen de contaminantes.

Contaminante	kg/h	mg/Nm ³	% Volumen	ppm (Vol)
Masa de SO ₂	11,6	220	0,01%	81
Masa de NO ₂	38,0	722	0,04%	371
Masa de HCl	8,5	161	0,01%	106

Estos datos permiten estimar las necesidades de abatimiento en las emisiones, que deben ser necesarias para cumplir la legislación vigente en el lugar de emplazamiento de la planta de generación de electricidad, encontrándose valores en los promedios presentados en el apartado 5 que son fácilmente controlables con las actuales técnicas de depuración de gases y son similares a las que puede presentar cualquier otra instalación ambiental, considerando además los beneficios ambientales descritos para los sistemas de aprovechamiento energético de la biomasa. El aporte esperado de estos proyectos estriba en la disminución de emisión de gases de efecto invernadero y la sustitución de los combustibles fósiles tradicionales, situaciones que deben ser cuantificadas para impulsar con mayor fuerza el desarrollo de este tipo de proyectos sostenibles.

6.2. RESUMEN DE LA GENERACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

Por biocombustible se entiende toda aquella materia orgánica de origen no fósil con potencial para producir energía mediante procesos que generen gases o líquidos combustibles. La biomasa se puede valorizar energéticamente para la obtención de electricidad, energía térmica o puede ser utilizada para la elaboración de otros biocombustibles.

El empleo masivo de los biocarburantes no está exento de polémica bajo otros puntos de vista bien diferentes de los ambientales como pueden ser los éticos ya que muchas voces alertan que la apuesta por los biocombustibles podría provocar hambrunas en el tercer mundo al derivar gran parte de los cereales y oleaginosas a la fabricación de los biocarburantes. De hecho este efecto perverso ya se ha notado puesto que el precio de los cereales se ha disparado en las bolsas de contratación. Por esto desde ciertos foros se alienta a la fabricación de biocarburantes a partir de plantas no comestibles, como la jatropha. Como ejemplo, a primeros de 2007, la gran demanda de maíz en EE.UU. hizo disparar los precios de este cereal en España, pasando de 130 a 180 €/t (en la actualidad el 90% se destina a la elaboración de piensos). En términos de productividad: por cada kilo de maíz se obtienen 0,4 de bioetanol.

Algunos investigadores apuntan a la posibilidad de cultivar en gigantescas piscinas de agua salada un tipo de alga capaz de conseguir un rendimiento por hectárea muy superior, centenares de veces, al girasol, colza o soja. En este sentido toma pleno sentido el desarrollo de variedades transgénicas. Casi cada día sale a luz pública la obtención de una nueva variedad transgénica. A primeros de 2007, la Universidad de Gainesville (Florida, EEUU) obtuvo un tomate que contenía 25 veces la cantidad de ácido fólico de un tomate normal. Así el consumo de un solo tomate al día es suficiente para la aportación de folatos vía alimentos.

La Figura 10.55 muestra de manera simplificada y a título de resumen las vías de obtención de los diferentes biocarburantes a partir de los tipos de biomasa específica y, a continuación, se hace un pequeño repaso a los biocombustibles con mayores perspectivas.

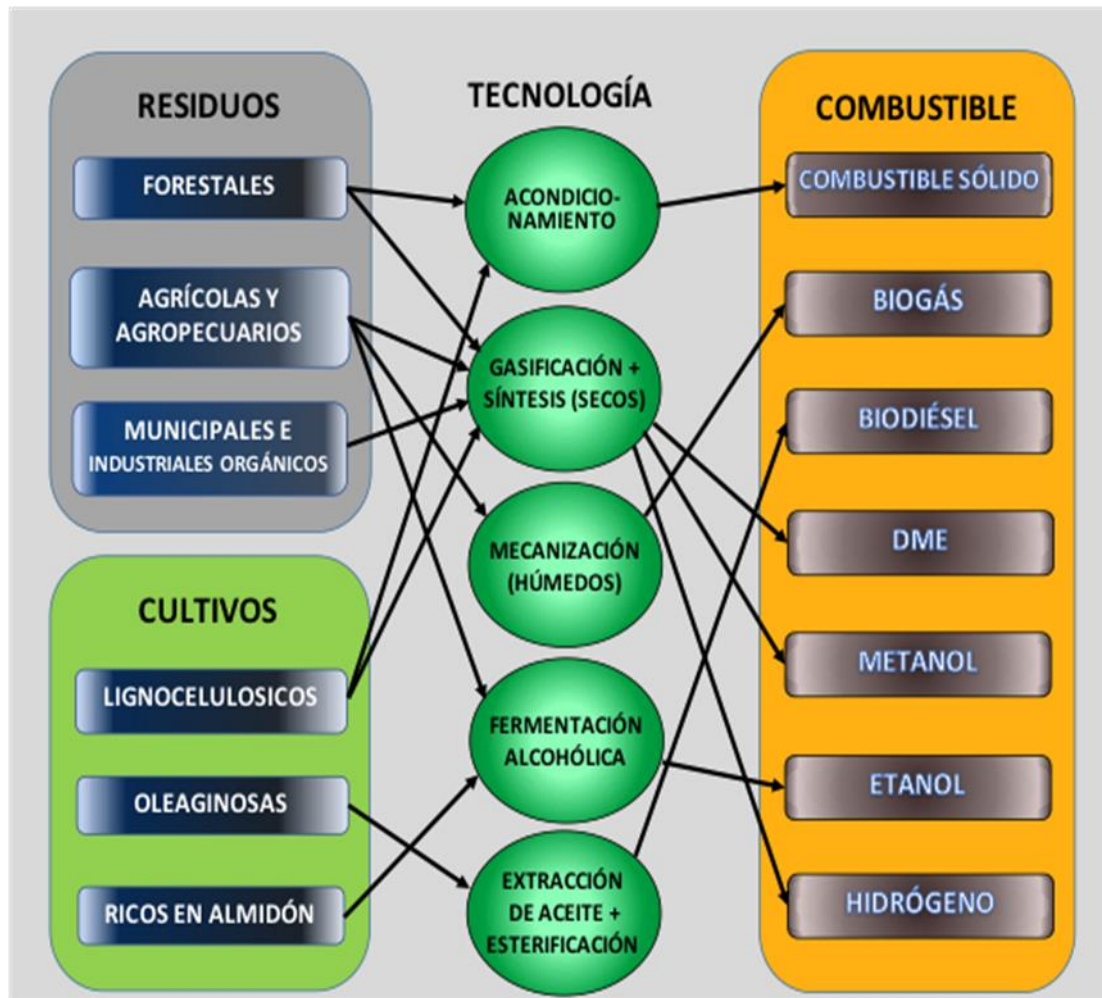


Figura 10.55. Vías de obtención de biocarburantes.

6.2.1. Resumen práctico para el conocimiento de los biocarburantes

Las dos grandes familias de biocarburantes existentes están basados en compuestos químicos diferentes: alcoholes y ésteres. Por tanto el destino va a ser diferente: alcoholes para motores de ciclo Otto y ésteres para motores diésel. Seguidamente se indica una pequeña "guía" sobre ellos:

- **Qué coches, técnicamente, pueden usar bioetanol.** Todos los de gasolina pueden admitir hasta un 10% de bioetanol (E10). Para usar mayor cantidad, el E85 que está compuesto del 85% de bioetanol, hay que emplear los vehículos *flexibles (flexible fuel vehicle)*. En España hay modelos de Ford y General Motors preparados para ello. Lamentablemente, en España no se comercializa el bioetanol (al haber cada día más coches de gasóleo, hay excedente de gasolina en las refinerías y las petroleras ponen dificultades a la distribución del bioetanol). Sin embargo las gasolinas convencionales contienen etanol a través del aditivo ETBE.
- **Qué coches pueden usar biodiésel.** Todos los vehículos de gasóleo fabricados en los últimos diez años pueden funcionar con el 100% de biodiésel. De momento, en las gasolineras hay mezclas del 10% o 20% de biodiésel con gasóleo (B10 o B20) y alguna de B100. Hoy día ya es un tema superado.
- **Aspectos económicos de los biocarburantes.** En España, los biocarburantes estaban exentos de los impuestos de hidrocarburos, lo que

permite un precio de venta igual al procedente de los combustibles fósiles. Se espera que fabricados en grandes cantidades, los precios se equiparán. La moratoria en la exención de impuestos cesó en 2011.

- **Qué cantidad produce España.** Hasta 2006, España no era un gran productor de biocarburantes. Según datos de la APPA, España producía en este año 71.000 t/año de biodiésel, de los cuales exporta el 61% y 238.000 t/año de bioetanol de las que exporta el 26%. Curiosamente, se exportaba y no se cumplían los objetivos de la Directiva europea que obliga a unos mínimos de consumo. En 2011, España produjo solo 609.000 t de biodiésel, lo que representaba el 14% de su capacidad de producción instalada, evaluada en 4 Mt, mientras que en el bioetanol la producción nacional era de 365.000 t, con una capacidad instalada de 464.000 t, y exportándose el 46%. En este año se cumplían los objetivos, después de varias reducciones, pero a base de importaciones, básicamente de Argentina. En 2012 y en 2013 la producción aún fue inferior a 2011, con 445.000 t y 580.000 t respectivamente, con la que se sitúa en el cuarto lugar de Europa, en parte por la exclusión de las importaciones argentinas decretada por el Gobierno español. Pero en consumo España es uno de los países con menor cuota a consecuencia de la rebaja de los objetivos obligatorios decretada por el Gobierno español para 2013 y años sucesivos, Real Decreto Ley 4/2013 de 22 de febrero, que reducía el objetivo global de biocombustibles en gasóleo de automoción del 7% al 4,1% (y el bioetanol en la gasolina de 4,1% a 3.9%). Por otra parte hay que recordar que a nivel de la legislación europea en 2015 se rebajó la utilización de los agrocombustibles hasta un máximo del 7%.

6.2.2. Aspectos económicos en la fabricación de biocarburantes

Por lo que hace referencia a las materias primas precisas para fabricar biodiésel a partir de semillas vegetales de soja, colza y palma, en una cantidad de 200.000 t/año de biodiésel y 23.000 t/año de glicerina, los consumos previstos de materias primas son:

- Aceite vegetal: 210.000 t/año.
- Metanol: 20.000 t/año.
- Metilato sódico: 3.350 t/año.
- Hidróxido de sodio: 1.300 t/año.
- Ácido clorhídrico: 1.900 t/año.
- Ácido fosfórico: 672 t/año.
- Ácido cítrico: 150 t/año.
- Otros: 40 t/año.
- Nitrógeno: 210 Nm³/año.

El consumo eléctrico puede estimarse en 1 kWh/t de biodiésel y se precisa energía térmica para producir vapor y agua para refrigeración.

Por lo que hace referencia a los residuos del proceso, el más importante es la glicerina. Esta es una mezcla de alcoholes que sale de la planta con una humedad del 50% y determinadas concentraciones de otros productos. Para transformarla en

glicerina de valor para la industria química básica, generalmente a la industria cosmética, se debe concentrar hasta el 99,8% y purificarla (glicerol medicinal). El problema real es que las cantidades que se generan son tan elevadas que el coste de adecuación lo hará inviable y se deberá buscar otro medio de valorización que, en buena lógica, no es otro que la valorización energética.

El residuo alcalino se puede valorizar como abono

6.3. VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS FORESTALES DE PODA Y TALA

Las nuevas posibilidades de valorización de la biomasa derivan de las acciones impulsadas para volver a usar la biomasa, principalmente la forestal, como se hacía antaño pero con nuevos procedimientos, espoleados por el Protocolo de Kyoto y siempre teniendo presente la sostenibilidad de la masa forestal. Una de las iniciativas fue el Proyecto Europeo *Bio-South*, promovido por la Energía Renovable de Florencia (Región de la Toscana, Italia) y un consorcio de Navarra (España), en el que participa, entre otros, el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER), que pretende demostrar la viabilidad económica de la valorización de la fracción leñosa comúnmente denominada residuo que se abandona en el bosque, y aunque data de 2005 ahora estaría totalmente vigente.

La Tabla 10.53 muestra las principales características de ambas regiones en 2003.

Tabla 10.53. Características forestales de las regiones de la Toscana y Navarra (Fuente modificada del Proyecto Bio-South).

	Toscana	Navarra	Unidad
Habitantes	3.461.000	570.000	
Superficie	22.977	10.390	km ²
Superficie forestal	862.336	462.664	Ha
% De superficie forestal	37,5%	44,5%	%
Madera anual talada	1.359.868	199.482	m ³
Madera anual exportada	392.860	0	m ³
Madera anual importada	517.850	139.231	m ³
Madera anual elaborada	1.484.858	338.713	m ³
Potencial residuo forestal	580.000	90.000	t/año

Las cantidades de material combustible que se desprenden de la tabla son importantes (obviamente las posibilidades son mayores en las regiones, como Cataluña, donde la masa forestal se acerca al 70% en término de ocupación de territorio) y su sistema de valorización no presenta inconvenientes desde el punto de vista técnico. El problema estriba en su viabilidad económica, en particular en la logística de alimentación a la planta de conversión energética.

La viabilidad económica viene condicionada por los siguientes parámetros:

- Viabilidad inadecuada, por la dificultad de acceso de los medios mecanizados para las labores de tala y recogida. Los sistemas manuales, al menos en Europa, son inviables por el elevado coste de la mano de obra.
- Superficie irregular, con pendientes pronunciadas o morfología del territorio poco o nada aceptable para la mecanización.

- Propiedad forestal de pequeño tamaño y/o no agrupado. La excesiva fragmentación del territorio suele hacer inviable el establecimiento de redes de gestión de las labores, de la recogida y de la posterior venta.
- Falta de un mercado apropiado, en particular en las regiones del sur de la UE donde la escasez de calderas y estufas, privadas o públicas, conlleva la imposibilidad de establecer unos precios estables y/o asequibles.
- Dificultades administrativas, tanto por lo que hace referencia a la propia explotación como a los posibles usos en la valorización, sobre todo si se trata de plantas de cierto tamaño.

El resultado de todo ello es el abandono de la biomasa en el bosque, con las pérdidas de oportunidades económicas y ambientales y el peligro de los incendios forestales.

Toda la serie de ensayos, derivados del estudio *Bio-South* han demostrado que en rango de viabilidad económica se obtiene para un precio de venta de 40 – 50 €/t (con una humedad del 25%), para elaborar *pellets* con un diámetro máximo de 12 mm. La Tabla 10.54, muestra los resultados de estos ensayos.

Tabla 10.54. Datos finales de los ensayos preliminares (Fuente Proyecto BIOSIT).

	Distancia	Cantidad	Coste	Coste	Material	Vehículo
Ensayo	km/viaje	t	€/MWh	€/MWh/km		
1	5,00	2,70	13,12	2,62	Pellet	Tractor + remolque
2	1,00	6,00	2,42	2,42	Pellet	Tractor + remolque
3	0,25	13,0	0,75	3,00	Pellet	Contenedor

La tecnología usada en el proyecto consiste en una caldera de biomasa (de hecho dos modelos, para tratar diferentes cantidades), con alimentación continua, en forma de *pellets*, y con potencias entre 20 y 1.200 kW. Regulación independiente y regulación del aire primario y secundario. Uno de los resultados afirma que España podría afrontar el 50% del gasto de calefacción a base biomasa forestal.

En ciertas partes del planeta, concretamente en el sudeste asiático, se ha comenzado una tala indiscriminada de árboles para plantar cultivos energéticos de rápido crecimiento, como la palma (para producir biocarburantes que se venden en la UE). Es obvio que esta práctica resulta inaceptable, y la UE es totalmente contraria a ella con el llamado ILUC, *indirect land use change*, ya que no es sostenible y el balance de emisión de CO₂ resulta claramente desfavorable.

7. LA SOSTENIBILIDAD

Es difícil aplicar un término como sostenibilidad a un sistema tan complejo como el de la utilización de la biomasa, ya que depende de muchísimos factores, muchos de ellos relacionados entre sí.

La Tabla 10.55 da una idea del consumo de energía en la UE (28 países) entre 2003 y 2014, de su producción y de su dependencia de las importaciones. De esta información puede extraerse indicadores claros como:

- El incremento continuo de la dependencia energética exterior.
- El incremento continuo del consumo, hasta la crisis de 2007 en la que el consumo disminuyó drásticamente, continuando el descenso.
- La capacidad de producción ha descendido continuamente.

- El incremento constante de la producción de las energías renovables. Se ha doblado desde los 98,2 millones de Tep del año 2000 y a los 195,8 millones de Tep de 2014.
- La disminución de la capacidad de producción de todas las energías no renovables.

Son datos que muestran la grave problemática energética de la UE y su tendencia. Todos son aspectos trascendentes, pero lo más preocupante es, sin duda, la tendencia a la baja de la producción europea y al alza de la importación. Esta dependencia energética del exterior es otro de los factores que impulsan a las administraciones públicas a incentivar los sistemas de producción energética a partir de fuentes propias, pero ante la disminución de las convencionales habría que potenciar aún más las renovables. El caso de España es mucho más preocupante, en especial la dependencia energética.

Tabla 10.55. Consumo y producción de energía primaria en la UE-28, en millones de tep. (Fuente EUROSTAT).

UE-28. CONSUMO INTERIOR BRUTO Y PRODUCCIÓN DE ENERGÍA PRIMARIA POR FUENTE												
ENERGÉTICA Y DEPENDENCIA ENERGETICA EN LA UE- 28 (EN MILLONES TEP)												
AÑO	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014

FUENTE	CONSUMO INTERIOR BRUTO POR FUENTE ENERGÉTICA											
PETRÓLEO	677,0	680,4	680,0	676,5	656,6	653,7	617,0	611,7	590,5	569,1	555,7	553,2
GAS	424,8	435,5	445,3	440,4	435,1	444,0	415,6	447,3	403,4	393,4	387,4	342,9
CARBÓN	330,3	327,5	318,3	329,7	328,5	305,4	269,0	282,8	287,1	293,8	286,2	268,5
NUCLEAR	257,0	260,3	257,5	255,5	241,4	241,9	230,8	236,6	234,0	227,7	226,2	226,1
RENOVABLES	107,5	113,7	121,0	128,3	138,3	148,7	156,8	173,7	170,9	187,3	197,9	201,2
OTRAS (NO RENOVABLES)	6,7	7,1	7,8	8,4	8,9	9,8	10,5	11,0	11,5	11,7	12,2	12,8
TOTAL	1803,3	1824,5	1829,9	1838,8	1808,8	1803,5	1699,7	1763,1	1697,4	1683	1665,6	1604,7

DEPENDENCIA ENERGÉTICA EN %												
TOTAL	48,8%	50,2%	52,2%	53,6%	52,8%	54,5%	53,5%	52,6%	54%	53,4%	53,1%	53,5%

FUENTE	PRODUCCIÓN DE ENERGÍA PRIMARIA POR FUENTE ENERGÉTICA											
PETROLEO	142,3	132,3	119,4	109,0	108,2	100,0	95,0	88,8	78,0	70,3	66,4	64,6
GAS LIQ.	11,3	10,9	10,5	9,6	8,5	8,2	7,1	5,5	4,1	3,7	3,2	3,5
GAS	201,6	204,9	190,6	182,5	171,3	172,2	157,3	157,0	141,6	133,1	131,8	117,0
CARBÓN	207,5	200,4	194,9	190,5	184,6	176,8	166,2	164,0	166,6	166,1	155,8	149,3
NUCLEAR	257,0	260,3	257,5	255,5	241,4	241,9	230,8	236,6	234,0	227,7	226,2	226,1

RENOVABLES	107,5	113,7	119,6	125,9	135,1	145,4	152,3	167,9	164,3	180,6	192,8	195,8
TOTAL	927	923	893	873	849	845	809	820	789	782	776	756

De acuerdo con estas tablas, las energías renovables han pasado de representar el 6% al 12,5% del consumo, pero en las que la biomasa además juega un papel muy secundario respecto al total, pero muy importante respecto a las renovables. Así por ejemplo en 2003 esta representaba 69.000 ktep, es decir un 3,9% del total, pero equivalía al 66% de las renovables. Este tanto por ciento apenas ha variado en el transcurrir de los años, así en 2010 era del 68%.

Según un estudio de la EEA (Agencia Europea de Medio Ambiente) en 2003, se evaluó la cantidad de energía renovable que se podía obtener a partir de la biomasa, de una forma sostenible, en Europa (25 países). En este se cifraba y estimaba el consumo y potencial de energía primaria en forma de biomasa:

- Uso de biomasa en 2003: 69 Mtep
- Potencial en 2010: 190 Mtep
- Potencial en 2030: 295 Mtep

El uso de biomasa para alcanzar el objetivo europeo de energía renovable en 2010 era de 150 Mtep, cuando en realidad se alcanzaron 104 Mtep, aunque había capacidad para alcanzar aquel valor. El uso del potencial de biomasa en 2030 supondría evitar la emisión de 400-600 Mt de CO₂.

El potencial de extracción de biomasa de manera ambientalmente sostenible se puede dividir en bioresiduos, cultivos energéticos y masas forestales. Los datos de potencial energético de estos residuos están elaborados por la EEA y reflejan las políticas de la UE y las realidades geográficas de todos los países, aunque no incluye datos de Malta, Grecia, Chipre ni Luxemburgo. La Figura 10.56 muestra el potencial de los denominados bioresiduos.

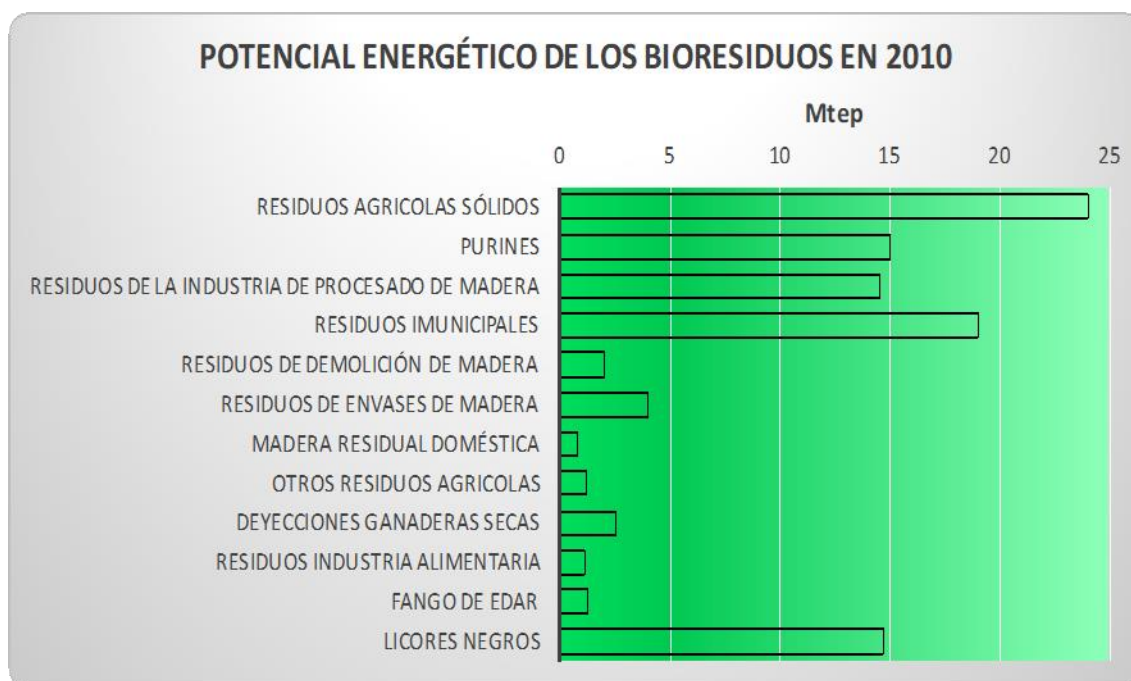


Figura 10.56. Potencial de los bioresiduos

Las cifras que aparecen en la Figura 10.56 equivalen a 103 Mtep, valor que prácticamente se alcanzó debido al crecimiento cada vez mayor de todas las tecnologías que se van exponiendo en esta obra. La tecnología es ambientalmente

segura, pero en muchas ocasiones tropieza con la actitud de algunos grupos radicales ecologistas que, incomprensiblemente, hacen una distinción entre “biomasa” (se entiende la forestal, a la que permiten y alientan su valorización energética por medio de la incineración) y los “residuos” (aunque sean también de biomasa, no están dispuestos a aplicarles la misma lógica).

La Figura 10.57, reproduce el potencial valorizable de las masas forestales en 2010, de acuerdo con la estimación de las autoridades ambientales citadas.

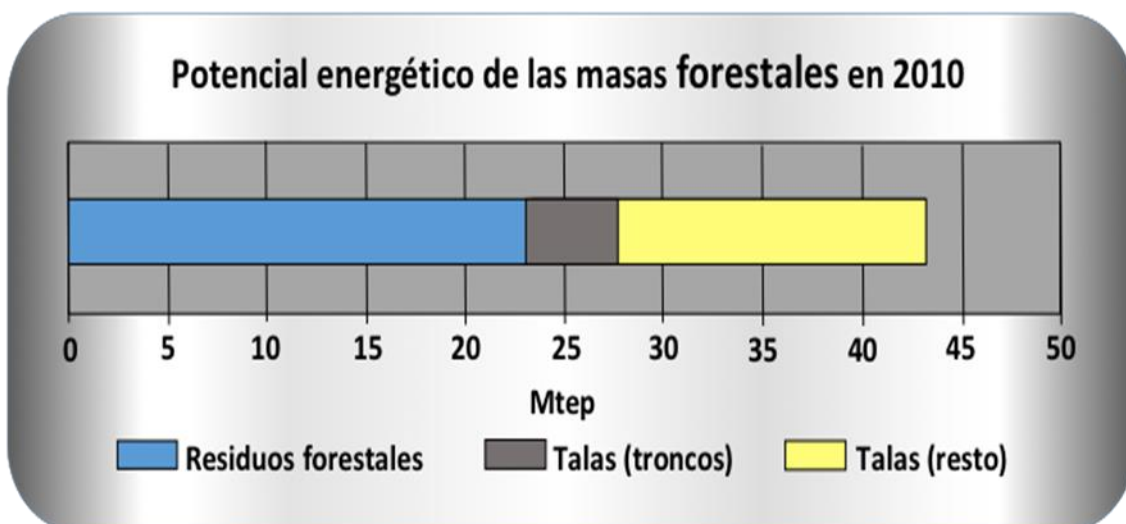


Figura 10.57. Estimación, en Mtep, de los recursos procedentes de las masas forestales en la UE.

La Figura 10.58 muestra el potencial energético agrícola, en Mtep, de la UE-25 para 2010 y 2020. En este sentido, el libro Blanco de la Energía señala a España como el país de la UE con mayor potencial de recursos de biomasa.

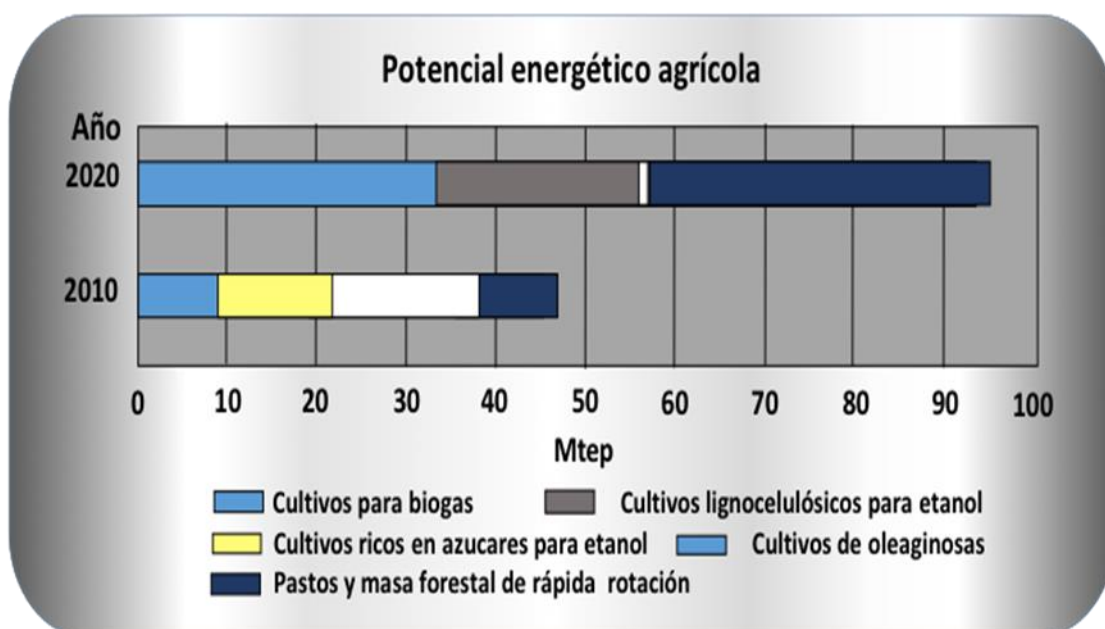


Figura 10.58. Estimación, en Mtep, de los recursos procedentes de la agricultura.

Obsérvese que la UE prevé un aumento del cien por cien en las explotaciones agrícolas de carácter energético.

La UE ha dado un impulso al uso de la biomasa al aprobar el Plan de Acción Europeo sobre la Biomasa, en diciembre de 2005 en el seno de la Comisión Europea. La propia

Comisión, en 2006, aprobó un Plan de Acción de la UE para los Bosques (SEC, 2006, 748). También, para la potenciación de la biomasa, en la UE, existen dos comités:

- Comité CEN/TC 335 Solid Biofuels que trata de los biocombustibles sólidos.
- Comité CEN/TC 343 Solid Recovery Fuels, el cual trata de los combustibles sólidos recuperados a partir de residuos combustibles no peligrosos.

El Plan de Energías Renovables 2005-2010, elaborado por el Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía de España (IDAE), plantea que la biomasa debe aportar el 45% de la energía renovable en España. Estos objetivos son difíciles de alcanzar si se tiene en cuenta que en 2006 había una capacidad de 354 MW, muy lejos de los 2.039 MW que se habían fijado para 2010. El primer lugar del ranking europeo lo encabezaba Francia con 8,6 Mtep, seguido por Suecia (7,9) y Alemania (7,8). España se situaba por detrás de Finlandia y Polonia con 4,4 Mtep.

En junio de 2010 se publicaba el Plan español de Energías Renovables 2011-2020, PANER, según el cual la aportación de las energías renovables al consumo final bruto de energía sería del 22,7% en 2020, frente al objetivo para España del 20% en 2020 que había marcado la Comisión Europea. En este documento, se tomaba como referencia el consumo de energía primaria en España 2009, con 125,7 Mtep, en el que las energías renovables participaban con el 9,4%. Dentro estas adquirirían especial significado la aportación que suponía la biomasa y residuos renovables y los biocarburantes, respectivamente con el 3,9% y 0,8%, cuya suma, 4,7%, se indica en la Figura 10.59.

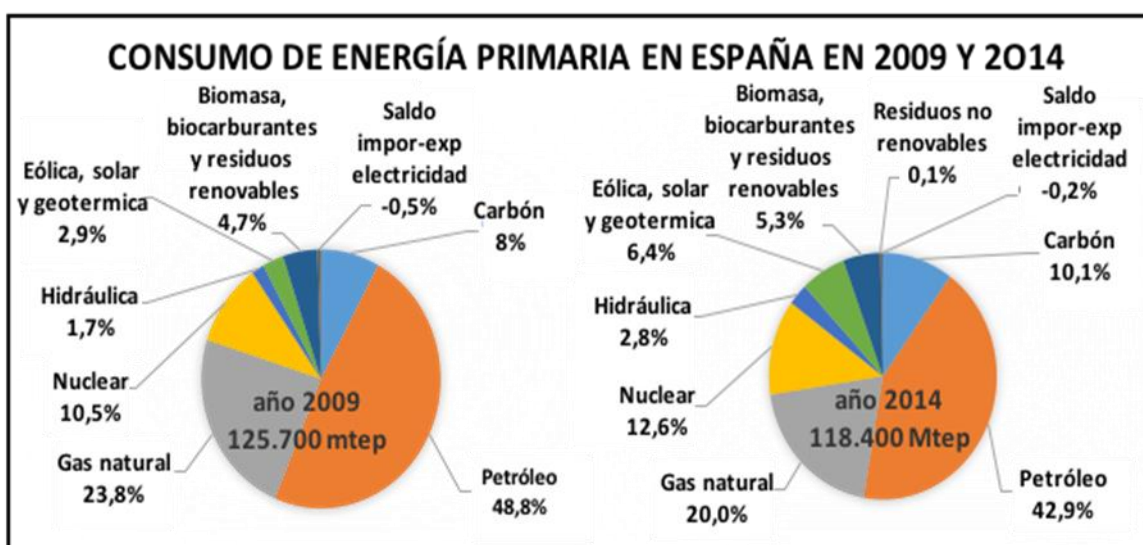


Figura 10.59. Distribución del consumo de energía primaria en España 2009. (Fuente Ministerio de Industria, Energía y C/IDAE).

Las previsiones del citado plan en cuanto a la biomasa para 2015 y 2020 quedan sintetizadas en la Tabla 10.56.

Tabla 10.56. Previsiones para el suministro nacional de biomasa en 2015 y 2020 según el Plan español de Energías Renovables 2011-2020, PANER. Recursos en m3 para Biomasa en A) y toneladas en B) y C. (Fuente PANER, MIT y C/IDAE).

SECTOR ORIGEN		2015		2020	
		Cantidad prevista de recursos nacionales	Producción de energía primaria (ktep)	Cantidad prevista de recursos nacionales	Producción de energía primaria (ktep)
A) BIOMASA PROCEDENTE DE LA SILVICULTURA	1) Suministro directo de biomasa de madera procedente de bosques y otras superficies forestales para generación de energía.	6.327.647	1.582	8.322.328	2.081
	2) Suministro indirecto de biomasa leñosa para generación de energía.	5.595.619	1.679	5.674.765	1.702
B) BIOMASA PROCEDENTE DE LA AGRICULTURA Y LA PESCA	1) Cultivos agrícolas y productos de la pesca proporcionados directamente para la generación de energía.	2.442.108	733	4.355.772	1.307
	2) Subproductos de la agricultura/residuos transformados y subproductos de la pesca para la generación de energía.	14.876.096	1.529	30.852.890	1.933
C) BIOMASA PROCEDENTE DE RESIDUOS	1) Fracción biodegradable de residuos sólidos urbanos, incluidos los residuos biológicos (residuos biodegradables de jardines y parques, residuos de comida y de cocina domésticos, residuos de restaurantes, de empresas de comidas por encargo y de establecimientos minoristas y residuos comparables procedentes de centrales de transformación alimentaria) y gases de vertedero.	6.310.422	532,3	6.693.515	726
	2) Fracción biodegradable de residuos industriales (incluidos papel, cartón, paletas)	547.763	158	626.963	194
	3) Lodos de depuración	2.840.000	52,6	4.760.000	86

Sin embargo si se analiza la Figura 10.59 se observa un avance, global, muy bajo en biomasa, biocarburantes y residuos renovables, pues se pasa del 4,7% en 2009 al 5,3% en 2014, dentro del consumo de la energía primaria de España. Pero si además se analiza en cifras absolutas, de 5.908 ktep en 2009 a 6.296 ktep en 2014, lo que representa un crecimiento en términos absolutos del 6,6% en todo este periodo. Se

trata de un crecimiento muy bajo, que refleja la gran crisis padecida, en la que muchos planes y proyectos se han ralentizado, en muchas ocasiones parado o anulado totalmente. En un aspecto positivo, queda mucho por hacer.

A la espera del seguimiento de una política común, la mayoría de los gobiernos de la UE han desarrollado sus propios modelos. Algunos ejemplos son:

- En enero de 2006, el Parlamento sueco aprobó una ley cuya finalidad era aumentar la electricidad generada a partir de fuentes renovables en 12 TWh ($10,32 \cdot 10^6$ tep) entre 2007 y 2016.
- En Alemania una ley de apoyo a las renovables permitió pasar de 1,5 TWh en 2003 a 5,4 TWh en 2005. Ello se logró gracias al otorgamiento de una prima ligada a los diversos tipos de biomasa desde 25 €/MWh hasta 60 €/MWh, para el uso y desarrollo de nuevas tecnologías de conversión energética. Además este país, como consecuencia de accidente nuclear de Fukushima del 11 de marzo de 2012, ha cambiado profundamente su programa de producción de energía, eliminando progresivamente la energía nuclear y potenciando las energías renovables.
- En Austria solo en 2005 se instalaron 136 MWh, casi un 60% más que en 2004. Ello ha provocado que el precio de una tonelada de *pellets* aumente de 178 a 265 €. Tomando un valor intermedio de 200 €/t, la prima supone un pago de 0,050 €/th, es decir el doble del gas natural.

7.1. LOS INCENDIOS FORESTALES

En España, solo en el año 2005, ardieron 153.446 ha. Por lo general esta cifra incluye matorral y monte abierto, siendo masa forestal la mayoría. En Cataluña (España), las cifras acumuladas de 13 años se indican en la Tabla 10.57.

Tabla 10.57. Incendios en Cataluña.

EL FUEGO EN CATALUÑA		
Período	1992 a 2005	Años
Total	13	Años
Total hectáreas quemadas	146.611	ha
Promedio anual	11.278	ha/año
Superficie replantada	7.072	ha
Promedio anual	544	ha/año
Superficie arbolada	2.277.121	ha
% de superficie ocupada por la masa forestal	69%	

En Cataluña, hace un siglo, la superficie ocupada por la masa forestal no llegaba al 30% del territorio, ello se explica por la ocupación masiva de la mano de obra en el campo. Sin embargo en 2013 alcanzaba el 64%, en gran parte debido a que el sector primario no alcanza el 3% de la fuerza laboral. Esto se traduce en que los cultivos tradicionales han sido abandonados y su lugar ha sido ocupado por el bosque. Sin embargo, la primera reflexión debería ser: Si la distribución del trabajo ha cambiado: ¿porqué no aplicar la misma filosofía al territorio? Es decir, ¿Por qué no se planifica el territorio de manera que una parte de esta masa forestal se aproveche racional y sosteniblemente? Si se planificara la tala de una parte de la masa forestal se evitarían muchos incendios o bien estos no tendrían la envergadura que reflejan las estadísticas.

En cuanto a la actividad de replantación, en muchas ocasiones, si bien es necesaria, al cabo de 20 años el “nuevo bosque” se muestra, por lo general, raquítrico y presenta un desarrollo muy deficiente. Todo lo cual avala la hipótesis de que es mejor talar y planificar a que se produzca un incendio. Los expertos añaden que una buena planificación podría reducir los incendios, como mínimo a la mitad. Por otra parte hay que señalar que, en España, las Comunidades Autónomas, han creado una estructura en torno al fuego que emplea a 40.000 personas y destina más de 700 millones de € al año.

A primeros de 2007 salieron a la luz pública numerosos informes derivados del principal “El cambio climático”. ¿De qué manera puede afectar el progresivo aumento de las temperaturas en cuanto a los incendios? El problema no es directo. La subida de temperaturas va asociada a una carencia de lluvias en la mayor parte de España, lo que hace aumentar mucho el riesgo de incendios forestales. El informe concluye que zonas de España que no eran de riesgo, a partir del 2040 o antes, lo serán. Se calcula que la zona de riesgo, en estos años, habrá aumentado un 40-50%. No hace falta decir que el incendio conlleva pobreza del suelo y erosión, lo que a su vez, realza el riesgo.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) presentó en Roma el 18^a informe de su Comité forestal. En él se informó que España había aumentado, en el período 2000-2005, la superficie forestal en 296.000 hectáreas anuales de promedio. El mismo informe señalaba un dato inquietante para España, pues afirmaba que una quinta parte de su territorio sufre un elevado índice de desertificación (proceso de degradación de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, es decir una pérdida de productividad del suelo a la que contribuye decididamente la actividad humana).

Paralelamente, la asociación Europea de la Industria de la Biomasa y el Fondo Mundial para la Naturaleza, afirmaban que la utilización energética de la biomasa permitiría reducir las emisiones de CO₂ en cerca de mil millones de toneladas anuales y podría satisfacer, dentro de quince años, el 15% de la demanda eléctrica de los países industrializados.

7.1.1. Producción de biomasa en un bosque mediterráneo

El término biomasa forestal, habitualmente empleado por extensión, es diferente conceptualmente al de los residuos forestales y, por tanto no equivalentes: mientras que los residuos forestales proceden de forma exclusiva de las actividades forestales (cortas finales, talas, claras, clareos, desbroces de matorral, etc.), la biomasa forestal, en cambio representaría toda la materia viva presente en el monte, incluyendo, obviamente la no maderera.

Desde el punto de vista de la valorización energética, el aprovechamiento de los residuos forestales presenta las siguientes ventajas:

- Aumento de la productividad del sector forestal, al aportar una nueva fuente de ingresos para los materiales habitualmente considerados como residuales.
- Generación de puestos de trabajo, en toda la cadena productiva.
- Menor dependencia de los combustibles fósiles.
- Disminución del riesgo de incendios y plagas forestales.

La Tabla 10.58 muestra las principales características de producción de un bosque típico mediterráneo. Se sobreentiende que la tala se va a llevar a cabo sobre zonas diferentes ya que una tala anual del 10% sería insostenible.

Tabla 10.58. Producción de biomasa de un bosque mediterráneo.

DATOS DE UN BOSQUE MEDITERRANEO		
Producción media	300	t/ha
Humedad media de corte	55%	
Tala total	Cada 25 años	
Rendimiento de tala total	84%	
Cantidad cosechada	252	t/ha
Desechos abandonados en bosque	48	t/ha
Tala parcial (anual)		
Intensidad aconsejada	10%	
Cantidad cosechada	30	t/ha año
Desechos abandonados en bosque	25,2	t/ha año

Es evidente que aunque se trate de una biomasa de rápido crecimiento, no se puede pensar en una tala total (aunque existen disposiciones oficiales que obligan a cortar la masa arbolada en las cercanías de pueblos y urbanizaciones como medida de seguridad, pero solo a la zona de seguridad de 25 m). El ejemplo presente postula una tala muy moderada.

Tabla 10.59. Actuación sostenible en un bosque mediterráneo.

EJEMPLO DE ACTUACIÓN SOSTENIBLE		
Superficie (ha) de tala total	3.500	ha/año
% Biomasa recuperada (tala + desechos)	90%	
Cantidad de biomasa obtenida por tala total	945.000	t/año
Superficie (ha) de tala parcial y limpieza	1.000	ha/año
% Biomasa recuperada (limpieza)	70%	
Cantidad de biomasa	210.000	t/año
TOTAL BIOMASA RECUPERADA	1.155.000	t/año

La superficie que se propone de talar de manera total (3.500 ha), equivale al 30% de la superficie quemada anualmente (valor medio entre 1992 y 2005). Las ventajas son evidentes:

- Se recuperaría una cantidad de biomasa importante, para diferentes métodos de valorización.
- La energía primaria que representa esta biomasa equivale a 500.000 tep.
- Se evitaría, en parte, el gasto en extinción de incendios.
- Reducción de daños personales y al ecosistema.

7.1.2. Energía disponible de forma sostenible

Siguiendo con los datos del ejercicio de las tablas anteriores, la Tabla 10.60 muestra el potencial energético que representa la biomasa extraída.

Tabla 10.60. Potencial energético de la biomasa extraída.

ASPECTOS ENERGÉTICOS				
PCI estimado	4.131	Kcal/kg	4,80	kW/kg
Tiempo almacenamiento	6	meses		
Humedad de trabajo	44%			
PCI útil de la biomasa a usar	2.050	Kcal/kg	2,38	kW/kg

Con los datos obtenidos en la Tabla 10.60, se construye la Tabla 10.61, la cual propone un ejemplo consistente en la construcción de una planta de generación de electricidad a partir de la biomasa recuperada. Como se ha indicado, se trata de un ejemplo, ya que:

- No es operativa una planta de la potencia resultante. Se deberían construir plantas con potencias teóricas entre 1 y 5 MWe (por las razones de logística ya expuestas).
- Hay que analizar bien la situación para solventar y racionalizar los abastecimientos y transportes.

Tabla 10.61. Capacidad de generación de electricidad.

PLANTA DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA		
Tiempo estimado de funcionamiento	7.500	h/año
Biomasa precisa para el proceso	154	t/h
Energía primaria disponible	367.026	kW
Rendimiento eléctrico de la conversión	19%	
Potencia eléctrica generada	69.735	kW
Energía eléctrica generada	523.012.123	kWh/año

Como se desprende de la Tabla 10.61, se trata de una energía generada muy importante y rentable teniendo en cuenta que la prima que aplica a la energía eléctrica procedente de biomasa es muy elevada (casi el doble de la hidráulica, hasta 2012).

En España hasta 2012 se aplicaba el R.D 661/2007, que regulaba la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, en la que podían entrar todos los sistemas productores de energía eléctrica de fuentes renovables, como la biomasa, así como otras como la cogeneración que no lo era. Debido al elevado montante total que supuso esta subvención (7.066 M€ en 2013, 8.870 M€ en 2014, cuando antes de 2007 nunca había alcanzado los 3.000 M€, y rondaba los 2000 M€ en 2001 a 2003) y muy en especial a la energía fotovoltaica (en 2011 la prima fue de 2.392 M€, a la que le correspondía 39,12 c€/kWh, lo que representaba una prima de casi 10 veces la de la eólica o 5 de la biomasa) el Gobierno español realizó un cambio radical.

Este cambio de régimen legal y económico comenzó con el R.D. 9/2013, de 12 de julio, normativa que fija las bases del nuevo sistema. Este fue refrendado por la Ley 24/2013. Posteriormente se publicó el R.D. 413/2014, que regulaba la actividad de producción de energía eléctrica a partir de energía renovables, cogeneración y residuos, y que desarrollaba el citado R.D 9/2013. Con toda esta normativa el sistema de primas por producción de energía eléctrica ha cambiado drásticamente, y pasa a llamarse "Régimen Retributivo Específico" (RRE) y consta de dos sumandos: retribución a la inversión (Rinv) y retribución a la operación (Ro). Su evaluación es

compleja. A grandes rasgos, las instalaciones adscritas tienen derecho a vender la electricidad que producen a las distribuidoras que le corresponda, recibiendo por ello un precio fijado reglamentariamente. Este, depende de la opción de venta elegida: a) ceder la electricidad al sistema con la tarifa regulada, o b) venta de la producción al mercado, con precio del mercado, más prima.

Calcular estas retribuciones resulta muy complejo, y es específico de cada tipo de instalación. En primer lugar en la normativa se realiza una clasificación de las instalaciones que pueden optar a estas subvenciones en tres categorías, que a su vez se subdividen en varios grupos y estos en subgrupos. Así, las centrales de generación de electricidad, o de cogeneración, que utilicen como combustible principal (como mínimo el 90% de la energía primaria utilizada) "*biomasa procedente de cultivos energéticos, de actividades agrícolas, ganaderas o de jardinerías, de aprovechamientos forestales y otras operaciones silvícolas en las masas forestales y espacios verdes*" pertenecen a la categoría b y grupo 6, o simplemente grupo b.6. Mientras que las que utilicen un "*biolíquido producido a partir de biomasa, o que utilicen biogás procedente de la digestión anaerobia de cultivos energéticos, de restos agrícolas, de deyecciones ganaderas, de residuos biodegradables de instalaciones industriales, de residuos domésticos y similares o de lodos de depuración de aguas residuales u otros para los cuales sea de aplicación el proceso de digestión anaerobia (tanto individualmente como en co-digestión), así como el biogás recuperado en los vertederos controlados*" corresponderán a la categoría b y grupo 7, o sea b.7. este además se subdivide en dos subgrupos, b.7.1 y b.7.2, según las características del biolíquido o biogás.

7.1.3. Impacto ambiental de los incendios forestales

El incendio forestal es un fuego que se extiende sin control por un hábitat, afectando a la vegetación que no estaba destinada a arder. La destrucción de biodiversidad, el aumento de la desertificación o la disminución de la calidad de las aguas y la atmósfera son algunas de las consecuencias negativas posteriores a un incendio. La recuperación de los bosques afectados, si es que se consigue, puede llevar décadas. En la actualidad, entre un 80% y un 90% de los incendios son causados por el ser humano.

Cambios de especies y pérdida de conectividad

La biodiversidad de la zona incendiada sufre cambios en su estructura y composición. La fauna del lugar con menor movilidad padece el mayor impacto en un primer momento. El resto de especies que ha sobrevivido refugiada en la zona, o que ha conseguido huir y regresa, se enfrenta a un proceso de regeneración muy difícil: las condiciones extremas posteriores provocan graves daños en el ecosistema y la cadena trófica. Las especies que escapan y se asientan en otras zonas alteran el equilibrio de su nuevo hogar.

Las especies vegetales de tipo leñoso son sustituidas por otras que colonizan este hábitat. Las especies animales propias de estas zonas boscosas dejan paso a otras adaptadas a espacios más abiertos. El tipo de bosque generado tras un incendio (sobre todo matorrales) es idóneo para aves.

Además de perder parte de su hábitat, los bosques fragmentados por los incendios generan problemas de conectividad. Los seres vivos ven peligrar su reserva genética viable y su supervivencia a largo plazo.

Impacto en el suelo, el agua y la atmósfera

El suelo y el agua son dos caras de la misma moneda, así que un incendio les afecta

de forma relacionada. Las zonas mediterráneas destruidas por el fuego son víctima de un fenómeno conocido como "sabanización". La tierra queda casi estéril y limita la recolonización de las plantas autóctonas. El suelo se vuelve más impermeable e impide la penetración del agua en su interior. La actividad bacteriana y de los hongos, trascendentales en los procesos biológicos del suelo, se ven también muy afectados. La sucesión de nuevos fuegos y lluvias torrenciales incrementa la erosión y la pérdida del suelo fértil.

En las zonas mediterráneas esta erosión ocurre, en general, en los dos primeros meses tras el incendio. El manto vegetal desaparece y, con él, la barrera natural que retiene el agua y frena las inundaciones. Es la denominada "desertificación del paisaje", el daño ecológico más grave causado por este desastre natural, según diversos expertos. Greenpeace asegura que más de un tercio de la superficie española padece este problema.

Contaminación

Los incendios forestales generan contaminación de diversas formas. Durante los primeros momentos después del fuego, la mineralización de la materia orgánica vegetal provoca una efímera fertilidad del suelo. Pero la gran mayoría de estos nutrientes es muy volátil y pasan a la atmósfera o disueltos en corrientes de agua. Y como efecto derivado de la combustión de las masas forestales, diversas partículas y gases, incluidos los de tipo invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂), acaban también en la atmósfera.

Pérdidas económicas considerables

Los costes económicos de un incendio forestal son considerables. La madera y sus productos derivados, desde papel hasta combustible, y los productos alimenticios de la zona, ya no pueden aprovecharse. El ecosistema pierde su atractivo para las actividades de ocio y turismo. Las labores de regeneración de las zonas afectadas suponen un gran desembolso económico que no siempre se ve recompensado.

La capacidad natural de los ecosistemas no es suficiente

Los incendios forestales naturales han ocurrido desde siempre como un elemento normal en el funcionamiento de los ecosistemas. El fuego ha permitido una serie de hábitats en los que distintos organismos pueden prosperar, como el pino piñonero, el alcornoque, los robles o las encinas. El problema ha surgido con el aumento de la cantidad de incendios, que sobrepasa la capacidad de recuperación natural.

7.2. LOS BOSQUES COMO SUMIDERO DE CO₂

La biomasa, al menos durante su etapa de crecimiento, actúa como sumidero de CO₂. Por esto aunque el balance de CO₂ por el uso de biomasa sea neutro debe de existir un balance entre el empleo de biomasa y la replantación de masa forestal. Llevando este razonamiento al extremo se demostraría que: si se talara toda la biomasa, no existiría vegetación para absorber el CO₂ generado en la conversión energética.

Por ello la Tabla 10.62, siguiendo el mismo ejemplo anterior, muestra que la cantidad de tala prevista es sostenible ya que la biomasa cortada no sobrepasa el valor que los expertos consideran biológicamente sostenible de 20 t CO₂/ha. Es decir, no es conveniente llevar a cabo una tala tal que su poder de fijación supere la cifra indicada.

Tabla 10.62. Sostenibilidad de la biomasa talada.

ASPECTOS DE SOSTENIBILIDAD		
Cantidad de CO ₂ global emitida	1.090.935	t CO ₂ /año
Total superficie (ha) tratadas	13.500	ha/año
Cantidad de CO ₂ global emitida por ha	80,8	t CO ₂ /año·ha
% de biomasa que dejará de captar CO ₂	26%	
Cantidad de CO ₂ a efectos de sostenibilidad	21,0	t CO ₂ /año·ha
CANTIDAD DE CO ₂ CONSIDERADA SOSTENIBLE	20,0	t CO ₂ /año·ha

7.2.1. Aspectos económicos

En el sentido de la sostenibilidad de los ecosistemas, el Protocolo de Kyoto, propone la plantación masiva de masa forestal para obtener bonos de CO₂. Sin embargo, esto, como se ha visto en el apartado anterior, es compatible con la tala sostenible de los bosques.

En algunas partes de España, lamentablemente, se promueve la quema con finalidades especulativas. Algunas comunidades, como Cataluña, ya decretó hace años, que una superficie quemada no podría recalificarse para otro uso. De esta manera se corta de raíz la especulación inmobiliaria y se preserva el medio ambiente. Sin embargo, existe otra variante de la desaparición de la biomasa forestal que puede resultar igual de perversa. Muchos propietarios forestales no obtienen rendimiento económico alguno de la explotación de sus bosques y, si se queman pueden obtener una indemnización.

Es en ésta última hipótesis que el ejemplo propuesto quiere demostrar que la valorización energética de un bosque es más rentable de lo que a primera vista parece. La Tabla 10.63 presenta las conclusiones.

Tabla 10.63. Aspectos económicos de la conversión energética de un bosque.

ASPECTOS ECONÓMICOS		
Energía por superficie (ha)	38.742	kWh/ha y año
Precio estimado de venta de esta energía	0,095	€/kWh
Ingreso por ha	3.680	€/ha y año
Pago por madera calcinada	12,0	€/t
Madera por ha	300	T
“Beneficio total”, en 25 años	3.614	€/ha y 25 años

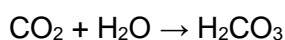
Como se desprende de la tabla, el beneficio de la venta de energía eléctrica, en un año, supera la indemnización que se puede obtener en los 25 años en que se ha estimado la recuperación del bosque.

Actuaciones drásticas, como la que recientemente ha aprobado el Congreso del estado de California, que obligará a pagar a las industrias por las emisiones de CO₂, fomentará el uso de la biomasa, ya que al margen de la conversión en electricidad

(como el indicado en el ejemplo anterior), la conversión energética térmica es mucho más efectiva puesto que es fácil conseguir una tasa de aprovechamiento del 85%.

7.2.2. Nuevas aplicaciones del CO₂

Los gases de combustión de las calderas de las centrales térmicas, y en general cualquier combustión, contienen cantidades de dióxido de carbono que oscilan del 10 al 16% en volumen. Si el gas se disuelve en agua se convierte en ácido carbónico, ácido débil, susceptible de reaccionar con compuestos alcalinos y lograr la neutralización. La reacción básica es:



El ácido formado puede tener diversas aplicaciones:

- Neutralizar los residuos con elevado contenido en sosa cáustica: 2
 $\text{NaOH} + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O}$
- Otro sistema es el empleo directo del carbónico en el agua de las piscinas. Por lo general el agua tiene tendencia a aumentar de pH. Para hacer disminuir el pH se disuelve el ácido en el agua.

En todos los casos el único gasto estriba en el sistema de extraer el gas de la chimenea que contiene CO₂, dentro de la masa de agua.

En Austria se está investigando la introducción de los gases de síntesis oxidados (CO₂, H₂O con trazas de NO_x) en los reactores de fangos activados. El CO₂, durante el día, acelera la generación de biomasa, se recupera el agua y el NO_x, no producen ningún efecto nocivo.

7.2.3. Importancia de las hojas verdes

Las hojas de las plantas son verdes porque tienen mucha clorofila, el pigmento principal que captura la luz solar para el proceso de fotosíntesis. Hay dos tipos de clorofila y entre ambas absorben todos los colores de la luz excepto el verde, que es reflejado y por eso la mayoría de las hojas tiene ese color. Las hojas también producen otros pigmentos que absorben y reflejan otros colores, pero generalmente tienen tanta clorofila que los demás pigmentos quedan ocultos. Cuando la hoja se apresta a morir, la clorofila es eliminada y comenzamos a ver los colores reflejados por los otros pigmentos, que pertenecen a dos grupos principales: carotenoides (amarillo, anaranjado y pardo) y antocianinas (rojo y morado).

La fotosíntesis es un proceso que transforma la energía luminosa en energía química para aprovechar el agua (H₂O) que captan las plantas por sus raíces y el dióxido de carbono (CO₂) que entra por unos poros que poseen las hojas llamados estomas y transformarlos en un alimento llamado glucosa (C₆H₁₂O₆), que a su vez formará otros tipos de sustancias más complejas y las reservas alimenticias para que el vegetal conserve su vida.

La clorofila está presente en raíces, tallos, hojas y frutos, y no desaparece, si bien en ocasiones, por ejemplo en otoño, es solapada por otros pigmentos, lo que provoca que los parajes naturales que nos rodean adquieran tonos más amarillentos y rojizos. Queda claro que la clorofila tiñe a las plantas de verde, aunque no es ésta su principal misión. En realidad, esta sustancia permite a las anteriores respirar y alimentarse, no en vano se encarga de absorber la luz necesaria para la realización de la fotosíntesis. Cabe destacar que la clorofila está especialmente indicada para el consumo humano, entre otras bondades, se le atribuye las siguientes: desintoxicar y oxigenar nuestras células, ser fuente de vitaminas y minerales, reducir el colesterol y ayudar a fortalecer los sistemas circulatorio e intestinal.

Algunos organismos acuáticos conquistaron tierra firme. Quizás muchos lo intentaron pero hubo un vencedor, las algas verdes. Todas las plantas terrestres proceden de este grupo. Si hubieran sido las algas rojas o las moradas, el Amazonas, los árboles de la ciudad y el césped serían rojos o morados. Seguramente si hubieran sido algas rojas las que hubieran conquistado la tierra, el verde sería el color que nos resultaría raro. Por otro lado la idea más aceptada es que los organismos fotosintéticos han optimizado sus sistemas de captación de luz visible de los fotones, en consonancia con lo que tenían disponible. La luz solar no siempre ha sido tan intensa, por tanto, la cantidad de fotones que ha llegado al planeta ha sido diferente (de hecho, la luminosidad solar aumentó bastante al principio de su historia). Además, la filtración de la luz que realiza la atmósfera ha ido cambiando también junto con la composición química de esta, teniendo un papel relevante el oxígeno y el ozono, dos componentes ausentes en la atmósfera primitiva. Finalmente, también hay que considerar el efecto de filtración del agua sobre la calidad y cantidad de luz que llega a diferentes profundidades bajo la superficie.

La luz solar es muy rica en fotones de luz roja y menos en los fotones más energéticos, los azules. Los fotones de energía intermedia (los verdes), no son ni muy energéticos, ni abundantes. Las clorofilas (moléculas responsables del color de las plantas y, lo que es más importante, las verdaderas «inventoras» de la fotosíntesis) están destinadas en capturar esa parte del espectro solar más abundante (la roja) y la más energética (la azul): por eso nosotros vemos las clorofilas de color verde. Son verdaderas antenas con una orientación óptima para capturar los tipos característicos de luz que nos llega del sol.

Otros organismos fotosintéticos acuáticos cuentan con un repertorio de pigmentos diferente, de otros colores, que les permiten capturar mejor aquellas regiones del espectro solar que penetra a través del agua. Pero no es nada sorprendente que los organismos fotosintéticos que emergieron del mar y conquistaron la tierra firme fueran aquellos mejor adaptados para captar la luz solar que llega a la superficie terrestre. Es decir, los organismos verdes.

Una medida de su éxito en ambientes terrestres es la capacidad de las hojas para soportar condiciones climáticas extremas entre los trópicos y la tundra, mientras que al mismo tiempo facilitan la fijación neta de aproximadamente 207 mil millones de toneladas de CO₂ al año (lo que equivale a $56,4 \times 10^{15}$ gramos de carbono al año) a escala global.

Composición química de las hojas

Los contenidos de proteínas varían en el follaje para diferentes especies y géneros, en el de *Picea abies* (abeto) oscilan entre 9,1% y 9,8% (Kolodidinskaia, L. A., 1982), mientras que en el *Pinus silvestris* entre 9,4% y 11,8% (Polis, O., 1986) y en *P. caribaea Morelet* de 6,1% según Leyva, B. (1990).

La celulosa se encuentra dentro del grupo de carbohidratos de alto peso molecular. Sus contenidos varían de una a otra especie. Smite, L. (1989) encontró valores de 29,1% y 27,9% en acículas y brotes, respectivamente, de la fracción foliar de *Pinus pallasiana*, resultados ligeramente inferiores se plantean para *P. caribaea Morelet* de 21,03% (Díaz, S., 1998).

Los lípidos son las sustancias orgánicas insolubles en agua que pueden extraerse de las células y de los tejidos mediante disolventes de baja polaridad (Lehninger, A. L., 1981). Se han publicado diferentes trabajos donde se plantean distintos contenidos de lípidos en el follaje de especies de coníferas. Weichun, Z. (1989) señala porcentajes de lípidos en follaje de pino de 9,8%; Kolodinskaia, L. A. (1982) destaca valores de

9,8% en el *Picea abies* (abeto); Polis, O. (1986) en *Pinus silvestres* se refiere a valores que oscilan en los límites de 9,3% y 14,8%; Leyva, B. (1990) y Díaz, S. (1998), para *Pinus caribaea Morelet* obtienen valores de 5,5% y 14,9%.

Los compuestos fenólicos representan un grupo amplio de sustancias orgánicas, muy heterogéneas de acuerdo a su composición y estructura química. Las acículas de *Pinus silvestris* contienen 15,6% de lignina, según Polis, O. (1986), valores diferentes se presentan en el *Pinus silvestris* y *Picea abies* (abeto) con 21,3% y 30,8%, respectivamente (Kolodiskaia, L. A., 1984); mientras que en *Pinus caribaea Morelet* se observan valores de 25,93% y 28,42% para el *Pinus tropicalis Morelet* (Díaz, S., 1998).

El grupo de vitaminas en el follaje verde determina gran parte de su actividad biológica y la de los productos que se obtienen de él, dentro de las que se encuentran las vitaminas E, K, C, B1, B2, B6, entre otras. Los contenidos de las vitaminas presentes en el follaje varían entre géneros y especies, encontrando contenidos de vitamina C de hasta 711 mg/%, vitamina E 36,4 mg/% (Repiax, C. M., 1988).

Las sustancias minerales expresadas como cenizas, contenidas en las hojas, son mayores que en las contenidas en la madera. Muchos de estos minerales se encuentran combinados con compuestos orgánicos como sales de oxalatos, fosfatos silicatos, etc., desempeñando un papel fisiológico en las plantas. En el follaje, existen contenidos mínimos para acículas de pino de 2,02% y máximos de 3,48% según Yagodin, V. I. (1981); valores de 3,6% para el *Picea abies* (abeto) fueron obtenidos por Kolodinskaia, L. A. (1982); en *P. tropicalis Morelet* y *P. caribaea Morelet* de 3,56% y 2,82% (Díaz, S., 1998).

Las sustancias minerales o compuestos inorgánicos varían con la especie, en árboles de una misma especie, con la edad, fertilidad del suelo y la parte del árbol que se estudie. Valores superiores que en la madera pueden encontrarse en las hojas, corteza, ramas y raíces. Es común encontrar diferencias en los contenidos de minerales en las coníferas y las latifolias (Carballo, L. R., 1990).

La Tabla 10.64 muestra la composición media de hojas de coníferas.

Tabla 10.64. Composición media de hojas de coníferas.

COMPUESTO	% BASE SECA
Proteínas	13%
Celulosa	32%
Lípidos	16%
Lignina	29%
Otros	6%
Minerales	4%
TOTAL	100%

7.3. UN NUEVO CONCEPTO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA

El apartado 3.2.2 versó sobre la obtención de biocombustibles por medio de la gasificación y en el 3.2.2.2 como de podía producir electricidad a partir de la

gasificación de biomasa. En este, además, se comentó el caso singular de la instalación de Güssing en Austria. Aquí se insistirá en esta, ya que realmente es un ejemplo de una instalación moderna sostenible.

Realmente se trata de una gasificación muy especial y con un funcionamiento excelente, único. El agente gasificante es, exclusivamente, vapor de agua. De entrada ello conlleva la ventaja de que el gas de síntesis generado es muy rico en hidrógeno, monóxido de carbono e hidrocarburos.

El sistema de gasificación desarrollado por Repotec, en Austria, consiste en una gasificación con cogeneración y aprovechamiento total del calor residual, bajo los siguientes parámetros:

- Alimentación: “chips” de biomasa (recién cortada) con un tamaño máximo de 50 mm.
- Generación de 2.000 kW (eléctricos) que básicamente se envían a la red pública si bien abastece a las necesidades de electricidad de la localidad y el polígono industrial allí instalado.
- Producción de 4.500 kW (térmicos), procedentes de calores residuales, que se utilizan en el “*distric heating*” de los habitantes de la localidad y el polígono industrial.

Como muestra la Figura 10.60, el principio de funcionamiento de la instalación es como sigue:

- En el gasificador, de lecho fluidizado, la biomasa es gasificada con vapor a una temperatura de 850 °C, con la ventaja de una baja generación de alquitranes.
- La parte de coque generado, así como restos de madera sin gasificar, y, naturalmente también los áridos son introducidos en un reactor de oxidación (Combustor) donde se oxidan completamente los compuestos carbonosos. Los áridos son devueltos al gasificador.
- El árido usado en el lecho es olivino, que hace las veces de catalizador y neutralizador de los gases ácidos.
- Los gases de combustión son enviados a la chimenea, después de pasar por un intercambiador de calor y un filtro.
- Los impropios se evacúan por la parte inferior como cenizas.
- El gas de síntesis atraviesa un primer intercambiador de calor, donde la temperatura desciende hasta unos 450 °C, temperatura a la que no puede condensar ningún hidrocarburo. El calor es recuperado y se emplea.
- El gas de síntesis pasa por un filtro de mangas de alta temperatura, básicamente para la retención de material particulado. Éste se devuelve al combustor para la valorización total.
- Seguidamente el gas entra en un *scrubber* para la limpieza final.
- El gas de síntesis depurado, y frío, es impulsado por un ventilador hacia el motor de cogeneración. Una pequeña parte del gas es reintroducido en el sistema, como aportación de calor al combustor.
- Finalmente el gas se oxida en un motor que, con un rendimiento cercano al 25%, genera electricidad (2 MWe) y una serie de caudales residuales de calor. Incluyendo la electricidad y el calor la eficiencia del sistema supera el 85%.
- Los gases de escape, atraviesan primero un catalizador y después un intercambiador de calor, hasta recuperar todo el calor posible antes de ser emitidos a la atmósfera.

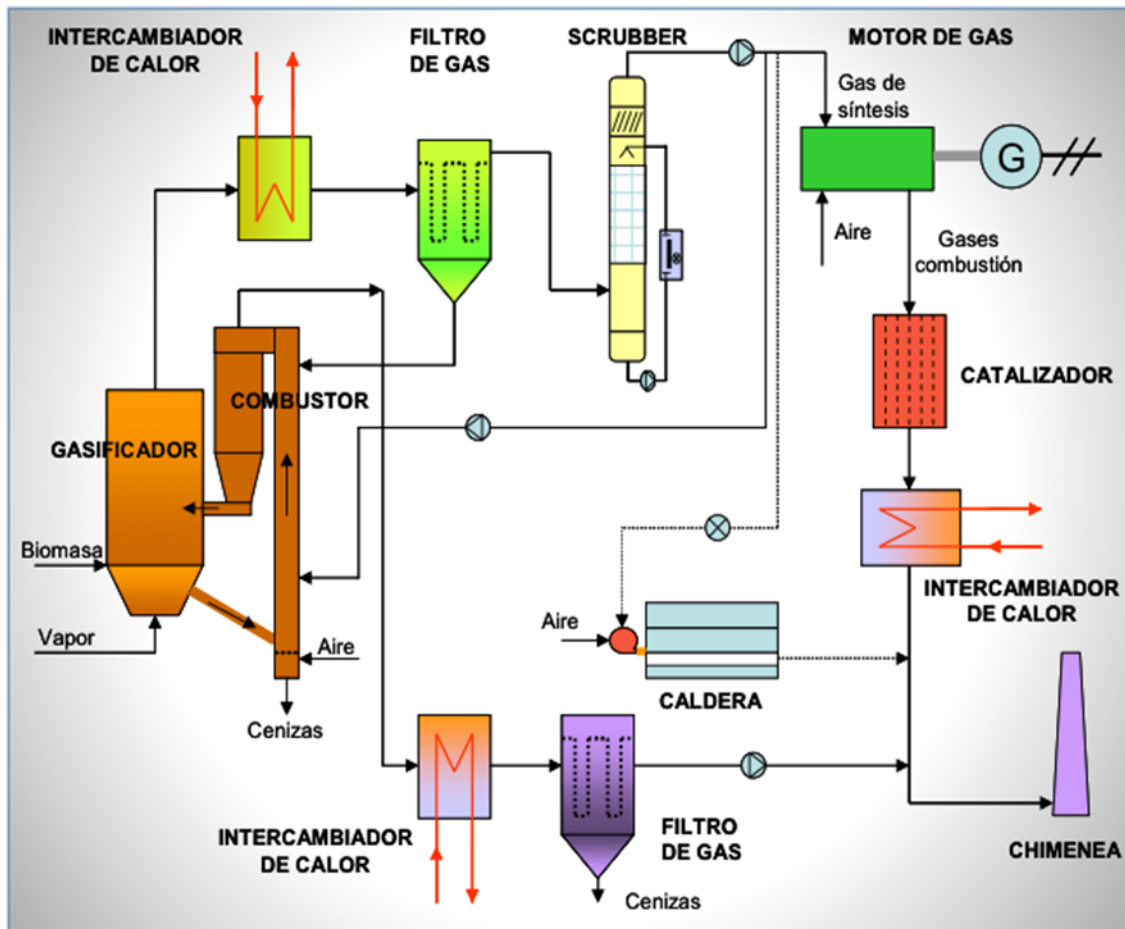


Figura 10.60. Sistema avanzado de gasificación de biomasa.

La reacción exotérmica que tiene lugar en el combustor genera el calor para la vaporización del agua, cuyo vapor se usa en la gasificación.

7.3.1. Otras posibilidades de gasificación de diversas biomosas

Uno de los sistemas de gasificación más adecuado para la biomasa es el desarrollado por ITI Energy Limited, que se trata de un lecho fluidizado fijo patentado como gasificador *down-updraft*, incluyendo los equipos necesarios para acondicionar el gas de síntesis para que su valorización sea compatible con motores de combustión interna convencional o del tipo "dual fuel", así como con ciclo convencional caldera-ciclo vapor, para la producción simultánea de electricidad y energía térmica.

Los residuos densos, debidamente desmenuzados, o los *pellets*/briquetas son cargados, mediante una válvula rotativa que asegure la estanquidad del proceso, y son introducidos por la parte superior del reactor donde caen dentro de la primera sección secadora del gasificador. A continuación, los residuos fluyen durante un cierto tiempo hasta las zonas de pirólisis y gasificación; la temperatura del proceso crece de manera progresiva hasta llegar a un máximo dentro de la zona central del reactor.

Un anillo secundario de inyección de aire, situado en la parte inferior de la sección cónica superior del reactor, asegura la aportación de la cantidad de aire necesaria para mantener activos los procesos de gasificación, pirólisis y secado.

En el cuello de la parte cónica superior la temperatura alcanza un máximo del orden de los 1.200 °C; a continuación se produce la oxidación del carbono residual. Las cenizas fluyen, por gravedad hasta la parte inferior del reactor donde se enfrían y se

extraen mediante un transportador de tornillo. El gas de síntesis abandona el reactor a relativa baja temperatura (350-500 °C), el calor cedido se emplea en precalentar la masa entrante, lo que, a la vez, sirve para eliminar alquitranes.

Un ventilador, situado en la parte fría del flujo descendiente inyecta el aire necesario al proceso a una presión inferior a la atmosférica. La cinética del proceso de gasificación está controlada por medio de la velocidad del ventilador.

El gas de síntesis resultante se trata, en primer lugar en un ciclón y, a continuación, en un scrubber húmedo asegurando la separación de las partículas, cenizas y gases solubles en el agua. Las partículas con tamaño inferior a 10 micras son separadas en un filtro electroestático húmedo (WESP) lo que permite garantizar la producción de un gas frío y limpio.

El “*syngas*” alimenta, vía un filtro de limpieza, el motor de combustión interna acoplado con un generador eléctrico. Una antorcha completa el equipo para la destrucción del mismo durante las puestas en marcha o paros no programados. La Figura 10.61, muestra el esquema del reactor y perfil de temperaturas.

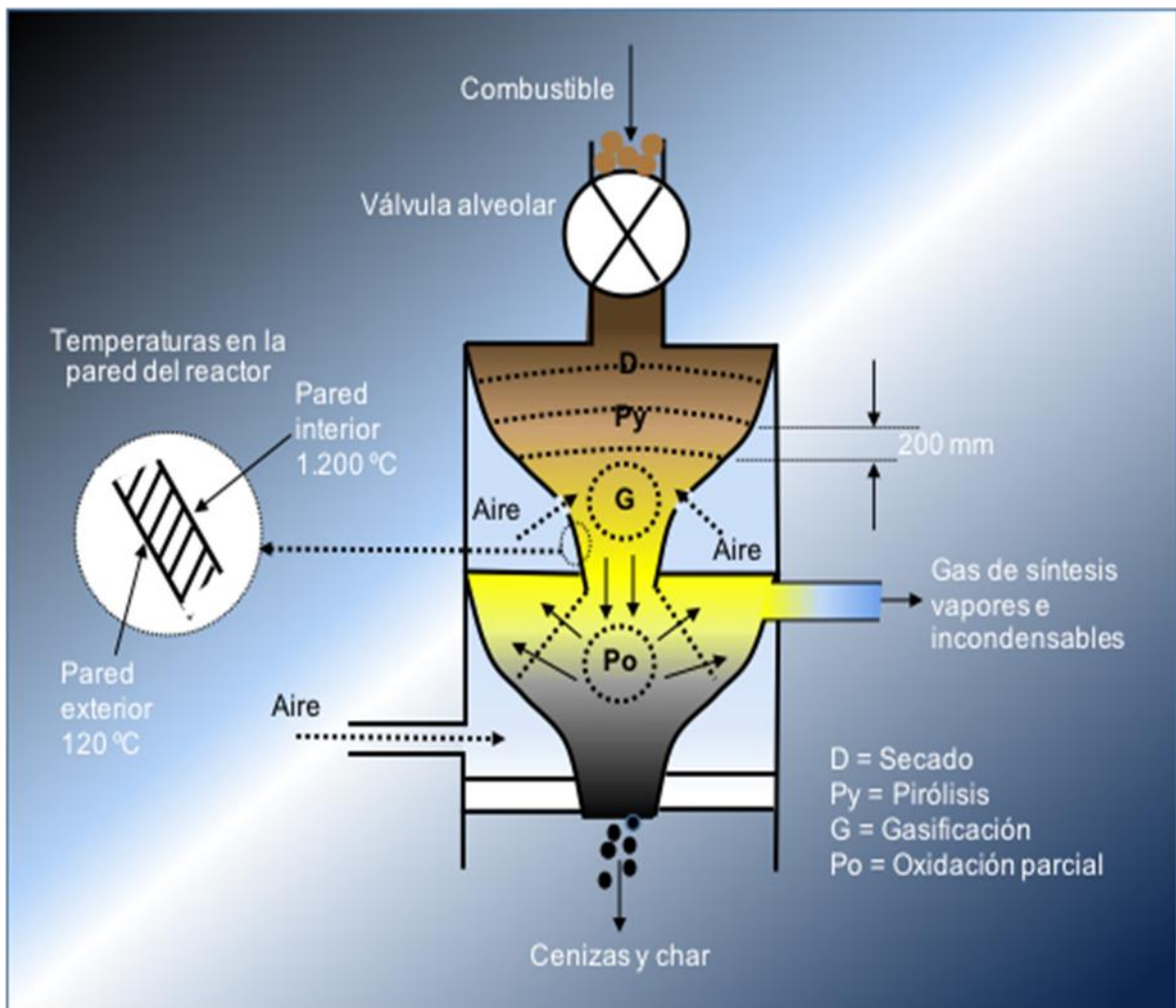


Figura 10.61. Esquema reactor de gasificación *down-updraft*.

La Tabla 10.65 muestra una composición típica del gas de síntesis oxidado.

Tabla 10.65. Composición del gas de síntesis una vez oxidado (ND = No Detectado).

Párametros	Unidad	Nivel de emisiones
H ₂	Vol %	ND
CO ₂	Vol %	2 – 12
O ₂	Vol %	5 – 14
N ₂	Vol %	60 – 90
H ₂ O	Vol %	5 – 10
CO	ppmv	200 – 500
NO _x	ppmv	0 – 200
SO ₂	ppmv	0 – 300
SO ₃	ppmv	0 – 20
CH ₄	ppmv	ND
H ₂ S	ppmv	ND
HCl	ppmv	ND
NH ₃	ppmv	ND
THC	ppmv	0 – 0,2
Dioxinas y furanos	ppmv	ND

La Tabla 10.66, muestra las características del gas de síntesis resultante de la gasificación de diversos residuos.

Tabla 10.66. Análisis de diversos residuos combustibles.

Parámetro	Fangos deshidratados	Cáscaras de almendras	Residuos de madera	Residuos de cuero
Tamaño (mm)	35x10x5	18x16,5x8,5	50x30x8,5	70x50x50
Densidad absoluta (kg/m ³)	315	944	836	945
Densidad aparente (kg/m ³)	230	319	250	537
C (%)	39,5	46,7	43,4	43,6
H (%)	6,2	5,7	6,1	6,9
O (%)	25,5	45,8	46,3	32,3
N (%)	3,9	0,22	0,7	10,8
S (%)	1,5	0,7	0,4	1,5

Cenizas (%)	23,5	0,7	3,1	4,9
Humedad (%)	11,7	12,4	14,8	11,2
Fracción volátil (%)	53,5	62,7	64,8	65,7
Carbono fijo (%)	11,3	24,1	17,2	18,2
PCS (IGT) (MJ/kg)	17,86	18,08	17,20	20,54

La Tabla 10.67 muestra la caracterización de los gases de síntesis obtenidos a partir de la gasificación de los residuos antes citados

Tabla 10.67. Composiciones de los diversos gases de síntesis.

Componentes del gas	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	PCI (MJ/Nm ³)
	(% seco)	(% seco)	(% seco)	(% seco)	(% seco)	(% seco)	(% seco)	(% seco)	
Fangos deshidratados	9,25	1,28	63,04	1,83	13,39	9,63	1,13	0,43	4,82
Cáscaras	13,13	0,93	53,33	2,18	20,66	9,52	0,15	0,11	5,40
Madera	16,58	0,07	53,38	2,04	14,32	13,22	0,27	0,13	5,11
Cuero	10,12	0,28	56,39	1,11	21,43	10,16	0,23	0,28	4,92

La Tabla 10.68 muestra las temperaturas registradas durante el proceso de gasificación.

Tabla 10.68. Distribución de temperaturas durante el proceso.

Temperatura	Centro reactor	Pirolisis	Secado	Salida del gas	Entrada al motor
	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)
Fangos deshidratados	1.100	500	150	300	35
Cáscaras	1.250	560	170	320	40
Madera	1.150	500	130	280	30
Cuero	1.280	590	180	350	45

El grado de humedad aceptable para el proceso ITI se sitúa entre 10 y 25%. Este intervalo se estima óptimo para el proceso. Cuando se segrega la fracción fermentable mediante un tromel, la fracción residual de los RSU, o sea los RDF, compuestos por una mezcla de papel, cartón, plásticos, textiles, embalajes diversos, madera, etc., presentan un grado de humedad compatible con estos rangos.

La firma IGT también ha publicado los resultados obtenidos en la gasificación de otros residuos, especificados en la Tabla 10.69 que si bien todos no son biomasa (neumáticos) por su interés se reproducen.

Tabla 10.69. Análisis de diversos residuos.

Componentes	Neumáticos	Hueso aceituna	RDF (RSU)
-------------	------------	----------------	-----------

Tamaño (mm)	1,5x0,5x1,5	70x50x70	20x30x20
Densidad absoluta (kg/m ³)	NA	897	NA
Densidad aparente(kg/m ³)	NA	502	NA
C (%)	NA	48,0	46,7
H (%)	NA	5,9	6,2
O (%)	NA	32,6	29,9
N (%)	NA	1,5	0,7
S (%)	1,9	0,5	0,3
Cenizas (%)	3,6	11,8	16,9
Humedad (%)	1,2	10,1	5,4
Materia Volátil (%)	65,8	58,7	61,1
Carbono fijo (%)	29,4	19,3	16,6
PCS (IGT) (MJ/kg)	35,01	18,03	20,25

La Tabla 10.70 muestra el análisis del gas de síntesis obtenido así como el PCI del gas, mientras que la Tabla 10.71 indica los parámetros de funcionamiento del reactor durante los ensayos con los diversos residuos.

Tabla 10.70. Composiciones de los diversos gases de síntesis.

Gas de síntesis	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	PCI
	(% seco)	(% seco)	(% seco)	(% seco)	(% seco)	(% seco)	(% seco)	(% seco)	(MJ/Nm ³)
Neumáticos	10,60	1,01	40,06	2,80	25,13	19,53	0,98	0,71	6,77
Hueso de Aceituna	10,01	1,80	61,10	2,50	12,90	10,10	1,30	0,17	5,04
RDF	12,15	1,20	52,00	2,73	18,17	12,23	1,09	0,43	6,05

Tabla 10.71. Distribución de temperaturas durante el proceso.

Temperatura	Centro reactor	Pirolisis	Secado	Salida del gas	Entrada a motor
	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)
Neumáticos	1300	700	300	450	42
Hueso Aceituna	1150	450	140	250	37
RDF	1210	600	230	300	40

7.3.2. Posibilidades del gas de síntesis

El sistema de gasificación de Repotec antes descrito tiene otras posibilidades que están siendo desarrolladas por la Universidad Politécnica de Viena. En la propia planta hay tres anexos, con sendas plantas piloto para:

- Producción de SNG (*Substitute Natural Gas*), es decir, se produce un gas compuesto solo por H₂, CO e hidrocarburos ligeros que es un auténtico sustituto del gas natural. Para ello el gas ha de tener un porcentaje de CH₄ superior al 96%, menos de un 0,5% de O₂ y menos de 0,5 ppb de H₂S.
- Obtención de hidrógeno para su empleo en una pila de combustible.
- Obtención de biocombustible, muy semejante al gasóleo, a través de la síntesis de Fischer-Tropsch.

En resumen, las posibilidades del gas de síntesis procedente de una planta de gasificación de biomasa no se reducen simplemente a la generación de energía sino, como se ve, existen otras alternativas.

7.3.3. Ejemplo de sostenibilidad energética en una población

Güssing es una pequeña localidad situada en el sudeste de Austria (en el estado de Burgenland) tradicionalmente con una economía deprimida puesto que su principal fuente de riqueza es la ganadería y la explotación forestal. Las autoridades regionales y estatales decidieron, con la ayuda de la UE, instalar un centro de conversión energética de la biomasa, en colaboración con los propietarios forestales, bajo los siguientes principios:

- Se instalaría una fábrica para la producción de parquet, a partir de los troncos de los árboles de mejor calidad (mejora de la explotación forestal).
- La fábrica de parquet se abastecería de calor y electricidad de la planta de generación de energía.
- Todos los habitantes de la localidad de Güssing tendrían calefacción y energía eléctrica procedente exclusivamente de la planta de generación de energía.
- Se crearía un centro de investigación y desarrollo de energías renovables en el municipio.

El proyecto, que comenzó en 2000, culminó en 2003 con la planta de gasificación (la planta de energía entró en funcionamiento en 2002). Luego, en 2006, se terminó la planta de biogás y de biodiésel. Actualmente la población de Güssing es excedentaria en energía, es decir, no solo su propia biomasa cubre sus necesidades energéticas, sino que además inyecta en la economía local 13 M€ y reduce en un 95% las emisiones de CO₂, pues se ha pasado de 36.000 a 2.000 t/año en 14 años.

Además la planta puede funcionar con *pellets* a base de biomasa y plásticos residuales con lo que se abre la posibilidad de emplear otros residuos de difícil reciclaje pero de alto PCI. La Figura 10.62 muestra una foto de la mencionada planta de valorización energética de Güssing.



Figura 10.62. Planta de gasificación de biomasa.

7.4. POSIBILIDADES DE LA PIRÓLISIS DE LA BIOMASA

Hay otra manera de valorizar energéticamente la biomasa: la pirólisis flash. El sistema comienza por una pirólisis a alta temperatura con un tiempo de residencia de los gases muy corto. El resultado del proceso es, en términos de porcentaje de masa, aproximadamente:

- 25% de gases y vapores ligeros, que se emplean para calentar el reactor puesto que las reacciones de pirólisis son endotérmicas.
- 65% de aceites pirolíticos. Que una vez purificados se combustonan en una turbina para generar electricidad.
- 10% de coque.

Una aplicación idónea de este sistema consiste en su implantación en una industria cerámica donde el gas, o coque de petróleo (combustibles usualmente empleados en esta industria) pueden ser sustituidos por el aceite pirolítico, ya que se comporta como un gasóleo ligero.

El coque generado se puede valorizar en la formulación de la propia pasta cerámica, lo que transforma el sistema en un proceso de residuo cero. A la vez, el coque aporta calor durante el proceso cerámico, lo que conduce a un ahorro de energía adicional en la cocción del material.

El sistema más racional parece ser el de generar aceite para la sustitución de los combustibles fósiles, con lo que se evita el recargo debido al Protocolo de Kyoto con que está gravada esta industria. Una parte del aceite se puede almacenar y, durante

las horas en que la energía eléctrica se paga mejor, vender electricidad. La Figura 10.63 muestra una foto de la turbina Orenda, de 4 MW (eléctricos), especialmente diseñada para consumir este combustible.

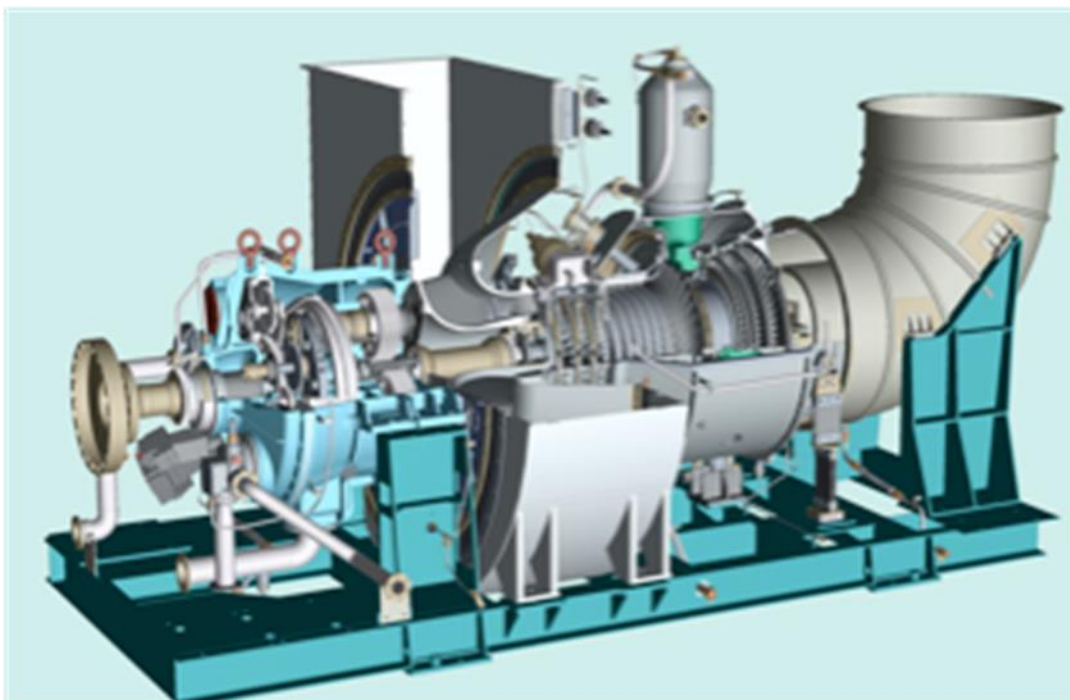


Figura 10.63. Turbina Orenda: producción de electricidad a partir de aceite pirolítico.

La turbina tiene un rendimiento eléctrico del orden del 30%. Sin embargo presenta la ventaja que los efluentes solo se producen en forma de gases calientes (a 450 °C), lo que representa una gran mejora para su aplicación en el secado de la industria cerámica.

Por otra parte, la generación y empleo de aceite en lugar de gas presenta la ventaja de un fácil almacenamiento y transporte.

7.4.1. Pirólisis avanzada de la biomasa

Al igual que sucede con la gasificación, en los últimos tiempos, básicamente a partir de 2000, se han desarrollado una serie de sistemas de pirólisis avanzados para valorizar la biomasa y otros residuos.

En concreto el sistema “btg” (*Biomass Technology Group*) consiste, como muestra el esquema de la Figura 10.64, en un craqueo de la biomasa gracias a la entrada de arena caliente procedente del reactor de lecho fluidizado. La arena entra a 550 °C junto a la biomasa a una cámara de mezcla. En el primer reactor ambos elementos se mezclan, en una proporción aproximada de 20 a 1 a favor de la arena, esto supone que se mantenga una temperatura elevada, suficiente para romper las largas cadenas celulósicas (craqueo) y obtener dos productos elementales: el char (mezcla de coque e hidrocarburos complejos) y aceites pirolíticos (mezcla de gases y vapores).

El char sale junto a la arena y se envía a un reactor de lecho fluidizado donde combustiona. Por la parte superior del reactor salen los gases: Básicamente CO₂ y H₂O, pero también gases inquemados (CO) y los impropios que llevaba el combustible. Estos últimos son separados en un ciclón. La combustión que tiene lugar genera mucho calor y como es conveniente no superar los 800 °C, dentro del lecho existe un serpentín que genera vapor de agua y así se mantiene la temperatura interior dentro de unos límites preestablecidos.

Los aceites en fase vapor a 500° C, que es la temperatura de la cámara de mezcla, se envían a un condensador. Al condensar, los gases se separan del aceite y se juntan con los procedentes del reactor hacia una caldera de recuperación.

El aceite se valoriza en una turbina. La turbina Orenda tiene un rendimiento eléctrico del 30%, el resto son gases a 500 °C, que pueden, también, enviarse a la caldera de recuperación para generar más vapor. No obstante esta turbina tienen la particularidad de que una parte del vapor puede inyectarse en las propias cámaras de combustión de la turbina con lo que el rendimiento eléctrico se aproxima al 35%.

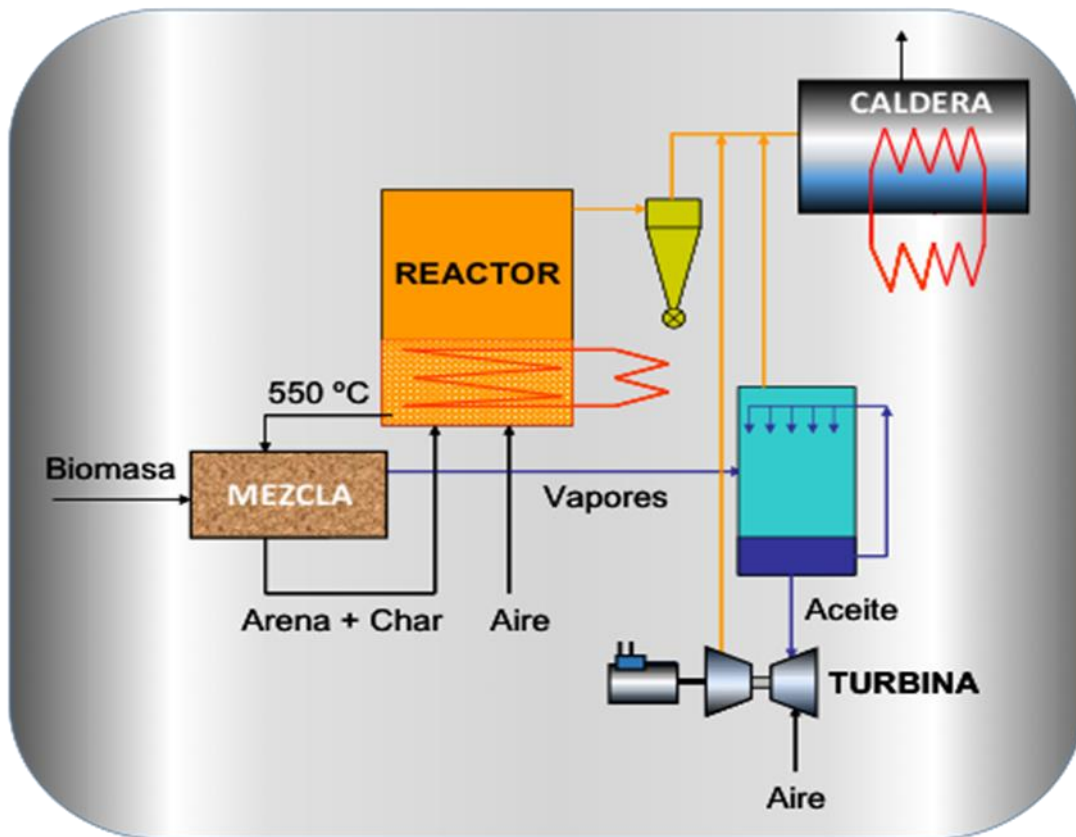


Figura 10.64. Configuración básica de un sistema avanzado de pirólisis de biomasa .

La configuración que aparece en la Figura 10.64 puede alcanzar un rendimiento global (electricidad más calor) del 85%. En comparación con la gasificación avanzada antes descrita presenta unas diferencias:

- El sistema de gasificación presenta mayor rendimiento eléctrico (del orden del 35% sobre la energía entrante en el sistema), mientras que la pirólisis descrita y turbina de aceite, en ciclo abierto y sin vapor, difícilmente alcanza el 20%.
- La gasificación no permite almacenar el gas de síntesis, mientras que el aceite pirolítico se puede almacenar y poner en marcha la turbina cuando sea conveniente.

Obviamente la elección de uno u otro sistema, con rendimientos energéticos globales muy similares, dependerá de las necesidades energéticas de cada caso: relación energía térmica/eléctrica.

7.5. EL HIDRÓGENO COMO UN VECTOR ENERGETICO SOSTENIBLE

Conceptualmente este apartado ya ha sido desarrollado a lo largo de varios apartados de ese capítulo, en especial en el apartado 3.5. En este párrafo se pretende dar una

visión rápida y global de como el hidrógeno, como vector energético, se está dirigiendo hacia la sostenibilidad, en la que la biomasa es la fuente primaria y de proceso.

En primer lugar es preciso insistir en que el hidrógeno no es un recurso natural, hay que producirlo, y ello a partir de recursos naturales, como agua, fósiles, biomasa, mediante una serie de procesos como electrólisis, reformado, gasificación, ... en los que se consume energía primaria que puede ser fósil, renovable, nuclear, etc. Por tanto el hidrógeno es un portador de energía no un recurso.

En las Figuras 10.65 y 10.66, se muestra de forma sintética y global la obtención de hidrogeno a partir de una fuente primaria de energía, y del aporte de energía térmica o eléctrica o fotónica respectivamente para producirlo.

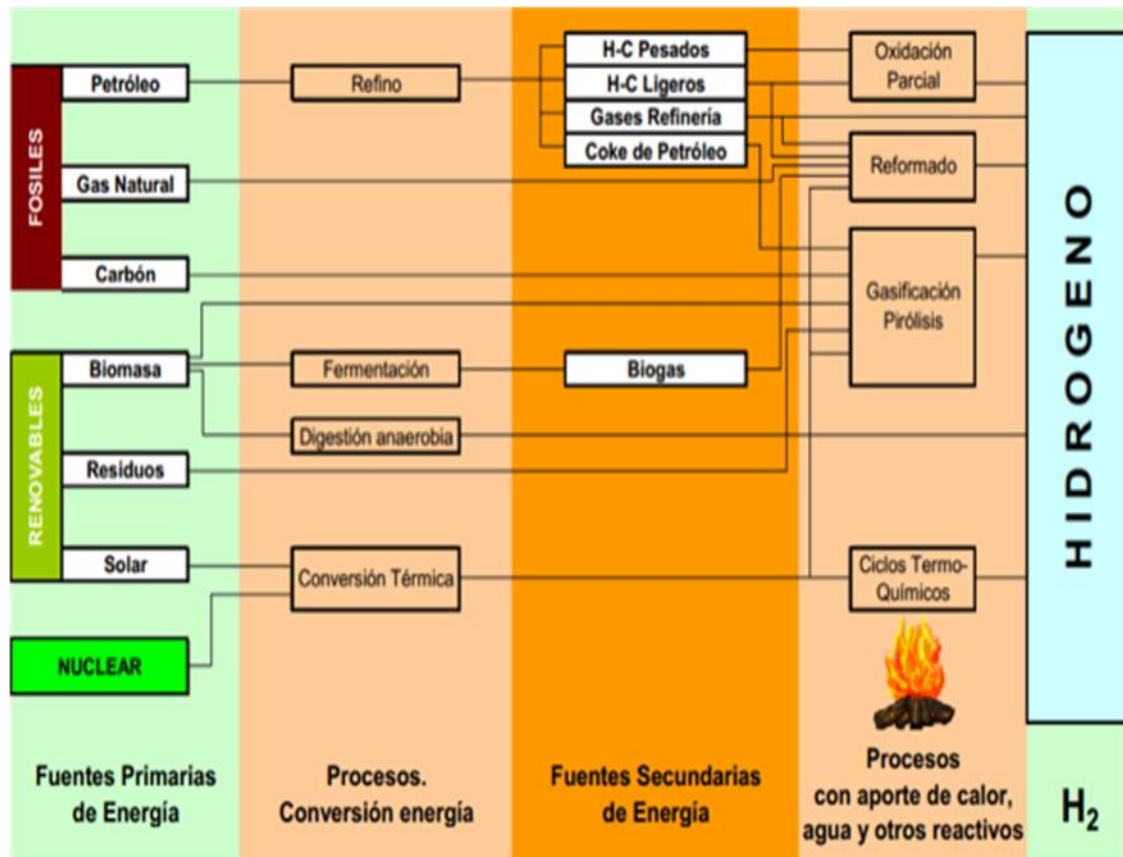


Figura 10.65. Procesos de producción de hidrógeno que requieren aporte de energía térmica (Fuente A. González García-Conde, 2013).

Sin embargo, actualmente, la aplicación del hidrógeno es industrial, no energética. Además el 96% se produce a partir de fuentes fósiles y el 95% se consume *in situ*, es decir casi no hay almacenamiento ni transporte. En gran parte es consecuencia de que la producción no es cara, pero si termina siéndolo su transporte y almacenamiento. Por tanto, el futuro que se prevé de la utilización del hidrógeno es absolutamente distinta de la actual, pues se pretende cambiar de un uso industrial, local y de origen fósil a ser un vector energético, producido en una central de cierto tamaño, almacenarlo y transportarlo y de origen renovable. Es por ello que hay muchas vías de investigación abiertas para su producción, pero también respecto a toda la problemática de su almacenamiento y transporte.

En las Figuras 10.65 y 10.66 puede observarse como hay varias líneas de producción sostenibles, pues a partir de distintas fuentes renovables, entre ellas la biomasa, y después aprovechar la energía solar para su transformación, como son los procesos de biofotólisis directa o indirecta, fotofermentación o fermentación oscura, que han

sido desarrolladas en el apartado 3.5 de este capítulo. Sin embargo, también a partir de la biomasa puede obtenerse hidrogeno por fermentación, gasificación y pirolisis con aportación de energía térmica o a través de energía eléctrica para realizar electrolisis. Desde un punto de vista de sostenibilidad, la térmica puede ser totalmente sostenible, aunque para producirla también se deberá utilizar biomasa. En cuanto a la energía eléctrica, esta corresponde a un mix, en la que solo una pequeña parte, que depende de cada país es de origen renovable, aunque localmente y para una instalación determinada pueda obtenerse de una fuente renovable como la minihidráulica, eólica, o fotovoltaica.

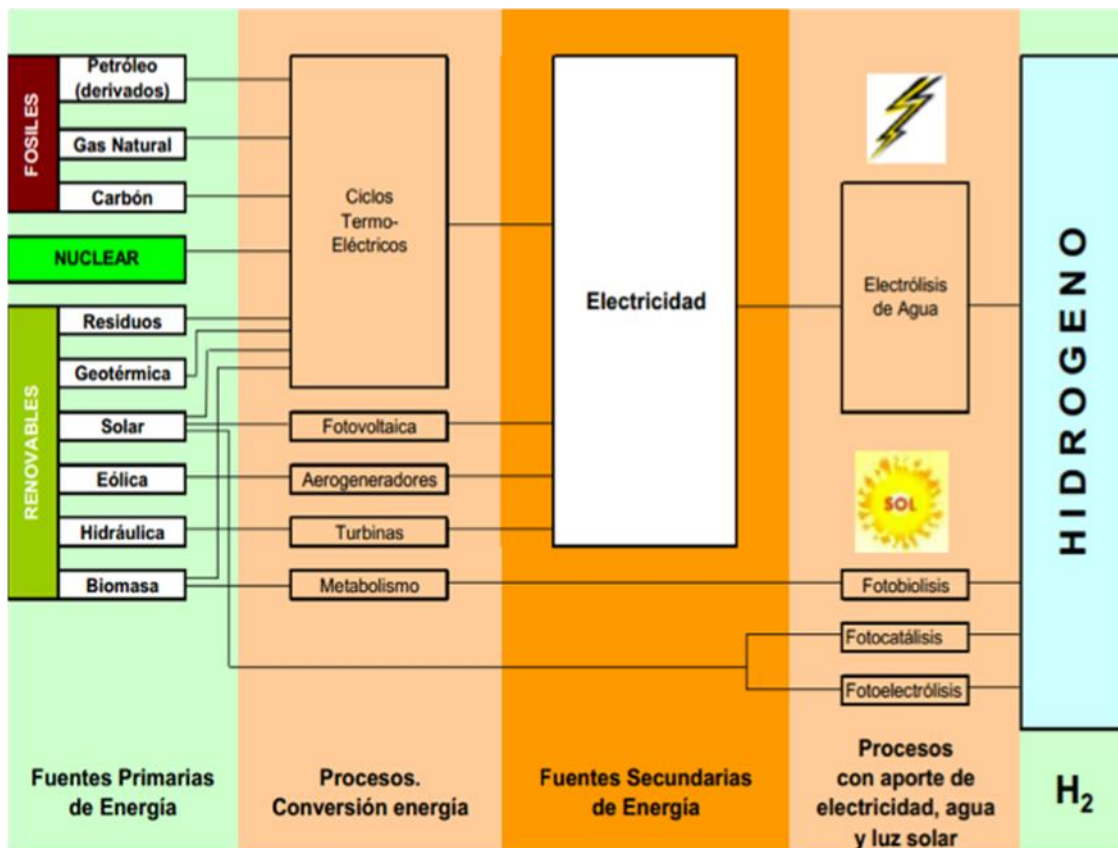


Figura 10.66. Procesos de producción de hidrógeno que requieren aporte de electricidad o luz solar (Fuente A. González García-Conde, 2013).

Como complemento, puede añadirse el esquema de la Figura 10.67. Este da una información parecida a la comentada, aunque restringida únicamente a la biomasa, como fuente primaria de energía, y a partir de ella producir hidrógeno y otros gases según procesos termoquímicos como la gasificación y la pirólisis, o biológicos como la digestión anaerobia, entre los cuales pueden destacarse los de biofotólisis, etc.

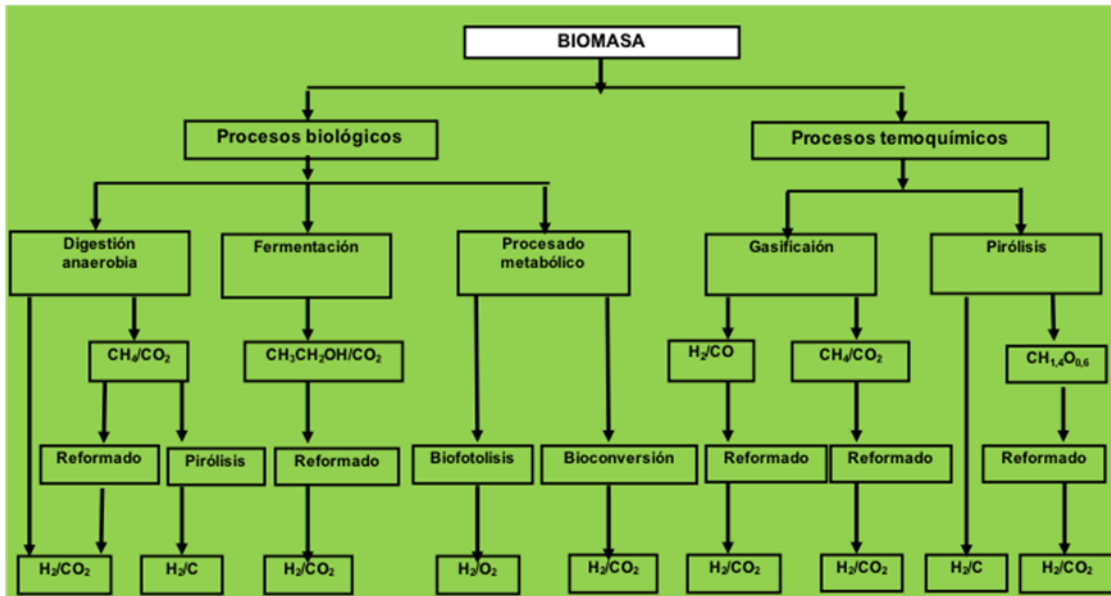


Figura 10.67. Procesos de producción de hidrógeno y otros gases a partir de biomasa (Fuente Milne T.A. et al 2001).

8. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS PARA SU VALORIZACIÓN ENERGÉTICA

En la parte final de este capítulo se ha escogido la combustión, como tecnología de valorización energética de la biomasa en contraposición a la pirólisis y la gasificación, porque es la técnica más utilizada hoy en día. Una vez elegida, se analiza la importancia de la composición de la biomasa en la elección como combustible para dicha técnica. Así mismo, en la parte final de este capítulo, se ahonda en la vertiente técnico/científica de la combustión para justificar los aspectos tecnológicos de implantación.

La ventaja que presentan los residuos forestales y agrarios frente a los residuos urbanos e industriales es su alta componente orgánica y menor presencia de contaminantes. Por tanto, es muy importante que en la elección del residuo tenga un bajo contenido de inorgánicos, puesto que éstos generan más inquemados y gases contaminantes a la atmósfera conllevando mayores costes de operación en la etapa de limpieza de gases.

Para hacer un estudio sobre valorización energética de los residuos forestales y agrarios en primer lugar se debe llevar a cabo una evaluación exhaustiva de la zona geográfica. En este punto hay que preguntarse, dependiendo de la cantidad de residuo y tipo del mismo cuánta energía se puede generar, por ello es tan importante hacer un análisis de la composición del residuo. Se puede poner de ejemplo de este tipo de instalaciones, la planta de Sangüesa (Navarra, España) que es alimentada por 160.000 toneladas/año de paja de cereal de donde se obtienen 2.000 GWh al año, en las 8.000 horas anuales de funcionamiento de la planta, lo cual demuestra que este tipo de combustible es rentable para la producción de electricidad.

Una vez analizada la zona de emplazamiento de una planta hay que realizar un estudio de la composición de los posibles residuos a usar, mediante la determinación de sus características físico-químicas. De este análisis se obtendrán las conclusiones para ver si es viable técnico y económicamente la combustión de dicho residuo. En términos de conversión energética, esta mezcla de residuos se denomina “menú”. Las

máquinas térmicas se diseñan en términos de energía, si bien son alimentadas en unidades de masa a la hora. El menú significa que la energía entrante al horno será, en términos de kWh o kcal/h, siempre la misma.

El análisis de la composición tanto química como física es de suma importancia en el proceso de estudio, puesto que es la base de partida para elegir los equipos, su diseño, las condiciones de operación y la factibilidad del residuo.

8.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LA BIOMASA

En este apartado se lleva a cabo una ligera descripción de las principales propiedades de la biomasa para que pueda ser tratada como combustible alternativo a los fósiles convencionales.

8.1.1. Propiedades físicas de la biomasa

La viscosidad, densidad aparente y características reológicas condicionan principalmente el modo de alimentación al horno, puesto que lo que se pretende en la combustión es que sea lo más perfecta posible mediante el contacto óptimo entre la materia combustible y el oxígeno. Así, si la materia es seca y sin un tratamiento previo de molienda se puede utilizar un horno de parrilla, si es seca pero con un pretratamiento de molienda y tamizado se puede utilizar un horno de lecho fluidizado y para fangos o materiales pastosos, ya sean secos o no, un horno rotatorio.

Algunas de las propiedades físicas más importantes que condicionan al residuo son:

- **Densidad aparente:** Se refiere al peso por unidad de volumen. Los combustibles con una alta densidad aparente tienen mayor energía por unidad de volumen, lo que equivale a diseño de equipos más pequeños, alimentación discontinua, almacenes y transporte menores, consiguiendo una disminución de los costes de operación.
- **Contenido de humedad:** Se refiere a la cantidad de agua que presenta la biomasa. Hay que tener presente que hará falta una determinada cantidad de energía, que se extraerá del PCI del combustible, para evaporar esta agua. Sin embargo una vez los gases abandonan la caldera, si la temperatura es superior a 100 °C, el agua, en forma de vapor, se emite a la atmósfera y el calor empleado en vaporizar la humedad, se pierde. De ahí la importancia de que la biomasa este razonablemente seca.

Por lo general, la instalación será factible si el contenido de humedad no es superior al 30%. De lo contrario deberá ser tratado para un secado parcial con lo cual habría que hacer un análisis sobre su viabilidad económica.

En resumen, es muy importante tener en cuenta el contenido de humedad o cantidad de agua del residuo puesto que tiene una gran influencia sobre el balance calorífico del proceso. Este punto se analizará más detenidamente en el apartado siguiente.

8.1.2. Propiedades químicas de la biomasa

Conociendo los elementos que componen el residuo es posible calcular el poder calorífico y por tanto realizar un primer balance de viabilidad económico y técnico del proyecto. Dependiendo de la composición química se podrán evaluar los gases de chimenea que se producirán, lo cual es imprescindible para tomar las medidas medioambientales pertinentes.

De un primer análisis de la biomasa en general y los residuos agrarios y forestales en particular frente a los combustibles fósiles, se desprende que presentan un alto

contenido de carbono y oxígeno y niveles muy bajos de azufre, siendo por tanto menos contaminantes. La Tabla 10.72 muestra la composición de algunos residuos agrícolas y forestales.

Tabla 10.72. Análisis elemental de los distintos residuos agrícolas y forestales.

Elemento (%) en peso	Orujillo de oliva	Restos vegetales de invernadero	Poda de olivar
Carbono	50,00	42,3	49,50
Oxígeno	34,50	48,5	44,20
Hidrógeno	6,40	5,6	5,90
Nitrógeno	1,20	1,83	0,39
Azufre	0,11	0,27	0,05
Cloro	0,10	0,2	0,04

Una vez que se ha estudiado la composición físico-química del residuo se procede al cálculo de su poder calorífico que es una propiedad característica de cada combustible. Se puede utilizar la potencia calorífica superior o inferior, las cuales se definen como el calor desprendido en la combustión completa con oxígeno, estando reactivos y productos a 25 °C y 1 bar. Se diferencian una y otra, porque en la potencia calorífica inferior el agua se encuentra en estado de vapor a 25 °C, y en la superior el vapor está condensado. Por lo tanto, para pasar de una a otra se utiliza la siguiente ecuación:

$$PCS = PCI + m_{H_2O} \cdot h_{vH_2O}$$

En el estudio de factibilidad de la planta no se utiliza la potencia calorífica en base seca, que es como se define el poder calorífico inferior, sino que a efectos prácticos se usa el concepto de potencia calorífica útil que es el calor que se puede generar una vez que se ha evaporado el contenido, de agua del combustible. La Tabla 10.73 muestra el PCI útil de diversos combustibles en función de su humedad.

La potencia calorífica se mide en kcal/kg, kWh/kg o kJ/kg. Para su conversión, entre ellas, son conocidas las relaciones: 1 kcal = 4,184 kJ y 1kWh= 860 kcal.

Tabla 10.73. Poderes caloríficos útiles de diversos residuos orgánicos según humedad (x).

PRODUCTO	PCI a humedad x (kJ/kg)					
	x	PCI	x	PCI	x	PCI
Leñas y ramas	0	19.353	20	15.006	40	10.659
Serrines y virutas	0	19.069	15	15.842	35	11.537
Orujillo de oliva	0	18.839	15	15.800	35	11.746
Cáscara de almendra	0	18.559	10	16.469	15	15.424

Cortezas (Coníferas)	0	19.437	20	15.257	40	11.077
Cortezas (Fronosas)	0	18.225	20	14.087	40	9.948
Poda de frutales	0	17.890	20	13.836	40	9.781
Paja de cereales	0	17.138	10	15.173	20	13.209
Vid (Sarmientos)	0	17.765	20	13.710	40	9.656
Vid (Ramilla de uva)	0	17.263	25	12.331	50	7.399
Vid (Orujo de uva)	0	18.894	25	13.543	50	8.193

La Figura 10.68 hace referencia al porcentaje de humedad de los eucaliptos y cómo ello afecta a su poder calorífico útil.



Figura 10.68. PCI frente a % humedad para eucaliptos.

8.2. CÁLCULO DE LA POTENCIA CALORÍFICA INFERIOR

A partir de la composición elemental de un residuo a incinerar se pueden utilizar tres ecuaciones para calcular el PCI:

- **Fórmula de Dulong modificada.** Es útil y muy usada para combustibles sólidos con alto contenido en nitrógeno y permite calcular el poder calorífico inferior, a partir de los porcentajes de cada elemento en base seca:

$$PCI \text{ (kcal/kg}_{\text{base seca}}) = 7.831 \cdot C_{\text{org}} + 35.932 \cdot (H - O/8) + 2.212 \cdot S - 3.545 \cdot C_{\text{inorg}} + 578 \cdot N$$

Donde C_{org} es la cantidad porcentual de carbono orgánico en peso por kilogramo de combustible. H es el correspondiente al hidrógeno, como el S para el azufre y N para el nitrógeno o para el C_{inorg} para el carbono inorgánico. El $O/8$ representa la cantidad porcentual de hidrógeno que se encuentra combinado con el oxígeno del mismo combustible y que constituye el agua de combinación. De esta forma $(H-O/8)$ es la cantidad neta de hidrógeno disponible para que el combustible se oxide, con el oxígeno del aire y en la combustión, dando lugar al agua de formación de la combustión.

- **Fórmula de Chang**

$$PCI = 8.561,1 \cdot C + 179,7 \cdot H - 63,8 \cdot S - 111,1 \cdot O - 91,1 \cdot Cl - 66,9 \cdot N \text{ (kcal/kg)}$$

- **Fórmula de Boie.** Desarrollada para residuos con un alto contenido en celulosa.

$$PCI = 83,2 \cdot C + 274,3 \cdot H - 25,8 \cdot O + 15 \cdot N + 9,4 \cdot Cl + 65 \cdot P \text{ (kcal/kg)}$$

Llegado al punto del análisis de la potencia calorífica se decide si el residuo es conveniente para incinerar o no. Un residuo óptimo, desde el punto de vista económico, es aquel que presenta alta cantidad de materia orgánica y baja en agua e inertes.

Otra manera de calcular, a partir del análisis elemental, el PCS es usando los calores de formación. Según:

$$PCS = 7.835 \cdot \%C + 33.912 \cdot (\%H - (\%O/7,9)) + 2.214 \cdot \%N \text{ (kcal/kg)}$$

A partir del PCS se calcula el PCI de acuerdo con:

$$PCI = PCS - 9 \cdot \%H \cdot 600$$

Por lo tanto, se puede observar que el cálculo de PCI del residuo constituye un factor determinante para determinar si el proceso de incineración a realizar es viable.

8.3. DIAGRAMA DE COMBUSTIÓN

La construcción del diagrama de combustión es aconsejable para el diseño y posterior funcionamiento de una instalación de combustión del que se conoce el análisis elemental del combustible utilizado, o de la mezcla de combustibles o residuos que actúan como tales. Se trata de una metodología que permite conocer todas las posibles combustiones del residuo a tratar. Su razón de ser es que permite averiguar de forma rápida y bastante precisa como se puede mejorar la combustión a partir de los datos que suministra un analizador de gases de combustión, básicamente el contenido de O₂ y CO₂.

En una combustión entran en reacción los distintos elementos de la biomasa, que actúa como combustible, y por tanto fundamentalmente los elementos C, H, O, N, S y, por otra parte, el aire que básicamente aporta O₂ y N₂. En principio es imposible determinar por adelantado mediante cálculo las reacciones que tendrán lugar, ni siquiera la proporción de aire que se combinará con el combustible para formar CO₂ o CO. Pero una vez se determina experimentalmente con un analizador de gases la proporción de dos de ellos en la mezcla total, habitualmente el tanto por ciento de O₂ y el de CO₂, la combustión queda unívocamente determinada, pudiendo evaluarse con el diagrama el contenido de CO y el exceso de aire con que se ha realizado la combustión. En realidad el diagrama relaciona estas cuatro variables, y si se determinan dos cualesquiera de ellas, permite evaluar las otras dos restantes.

Las características principales del diagrama de combustión de Ostwald de un combustible vienen dadas en la Figura 10.69.

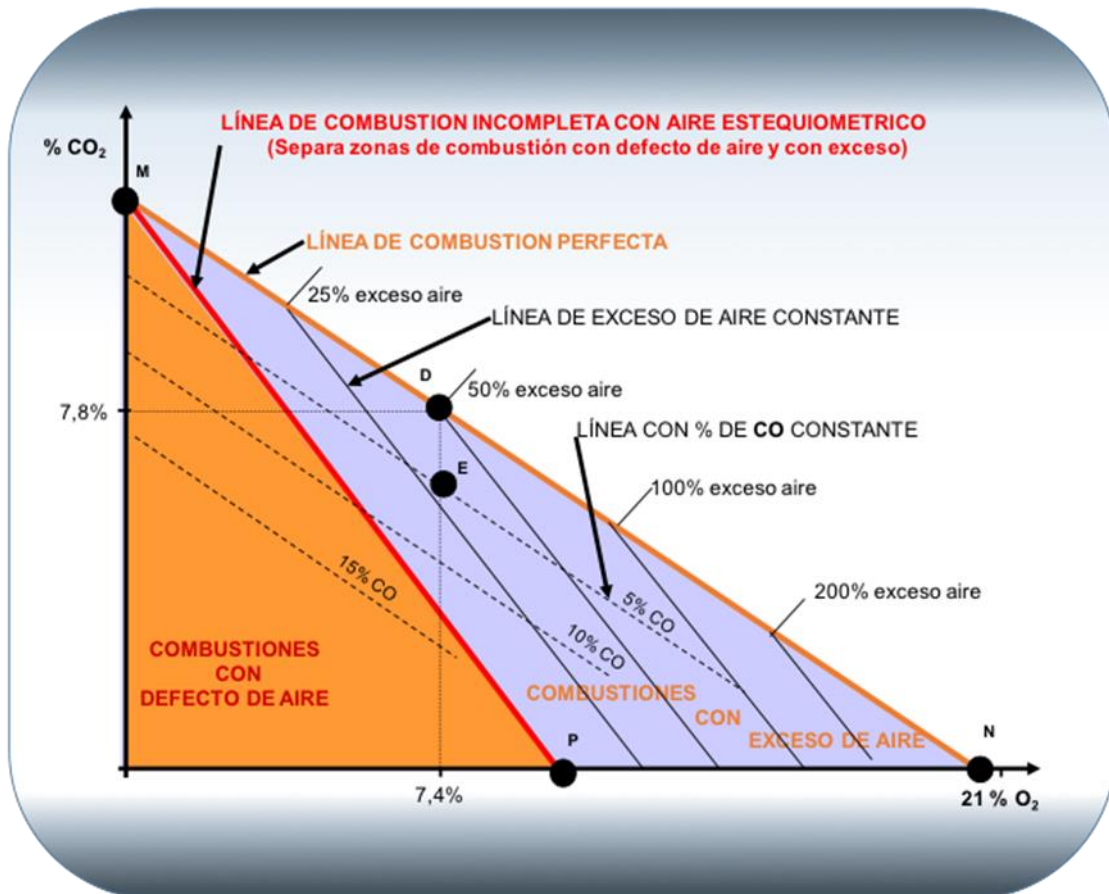


Figura 10.69. Diagrama de combustión de Ostwald.

El eje de ordenadas indica la relación o cociente, en tanto por cien, del volumen de CO_2 presente en los gases de combustión respecto el volumen total de los gases de combustión secos.

El eje de abscisas indica la relación o cociente, también en tanto por cien, entre el volumen de O_2 presente en los gases de combustión respecto el volumen total de gases de combustión secos.

El diagrama está caracterizado por tres puntos **M**, **N** y **P**, que corresponden a las coordenadas de tres posibles combustiones muy particulares y concretas.

Para una determinada biomasa, con su análisis elemental químico, se puede evaluar el aire estequiométrico para realizar su combustión completa. En estas condiciones si todo el carbono se combina con todo el oxígeno que aporta la propia biomasa y el aire estequiométrico tendrá lugar una reacción en que el porcentaje de CO_2 en los gases de combustión será el máximo posible, y por otra parte no habrá oxígeno libre en los gases. Esta combustión se representa en el diagrama por el punto **M**. Evidentemente, para esta biomasa, la cantidad de CO_2 obtenido es el máximo posible, independientemente de si en otras combustiones se aporta más o menos aire, y con mayor razón si se forma algo de CO . En consecuencia las coordenadas de **M** en el diagrama son específicas de la composición química de la biomasa.

Otra combustión extrema es la que simboliza el punto **N** en la que $x = 21\%$ de O_2 , e $y = 0\%$ de CO_2 . Este punto tiene la composición del aire. Pero, a la vez, este diagrama representa el resultado de una teórica combustión con una enorme cantidad de aire, con dilución de aire infinita. En esta combustión los gases tienen la misma

composición del aire, ya que los resultados de la combustión están tan diluidos en el aire, que no influyen en la composición final.

Uniendo el punto **M** con el **N** se obtiene la “línea de combustión perfecta” o completa. Cualquiera de los puntos de esta recta representan combustiones en las que todo el C de la biomasa reacciona con el oxígeno de la propia biomasa y del aire, este con más o menos exceso, formando únicamente CO₂, (pero no CO), y existiendo un % de O₂ libre, consecuencia del exceso de aire utilizado para llevar a cabo la combustión. Los puntos de la recta **MN** próximos a **M** corresponden a combustiones en las que hay poco O₂ libre en los gases de combustión, ya que en estas combustiones se ha utilizado un exceso de aire bajo. En cambio los puntos próximos a **N** corresponden a combustiones con elevados valores de exceso de aire.

Otro punto singular a determinar en el diagrama es el punto **P**. Este representa otra combustión extrema: aire estequiométrico, es decir el oxígeno justo para realizar la reacción (no hay exceso de aire), pero en este caso todo el carbono se oxida a CO, (y por tanto no se forma CO₂, su % es cero). En consecuencia del oxígeno del aire estequiométrico queda una parte sin reaccionar, O₂ libre, que aparecerá en los gases de combustión. Por lo comentado, esta cantidad de O₂ libre en los gases es función del análisis químico elemental de la biomasa.

La línea **MP** representa las distintas combustiones incompletas con aire estequiométrico. Esta línea divide el diagrama en dos grandes áreas: las combustiones con exceso de aire (llamadas incineración si el combustible es sólido o líquido) es decir todas aquellas combustiones que se realizan con exceso de aire, y al otro lado de la línea, las gasificaciones, o aquellas combustiones que se realizan con defecto de aire.

En las combustiones que tienen lugar en los hornos industriales son normales situaciones como la del punto **D**. Este punto está situado en la línea de combustión completa, en este caso se han indicado las coordenadas **x**= 7,4% de O₂ e **y**=7,8% de CO₂, y como indica el diagrama, la combustión se ha realizado con un 50% de exceso de aire. Sin embargo con frecuencia cuando se altera la relación combustible/comburente, normalmente para corregir la temperatura de los gases, la posición correspondiente al punto **D** en lugar de desplazarse a lo largo de esta recta se sitúa, de manera indeseada o desconocida, en un escenario más hacia el interior del diagrama, como el **E**. En este caso, se generan inquemados que son difíciles de corregir, aunque exista exceso de aire, puesto que con la temperatura generada por la reacción se puede favorecer la formación de CO.

Existe otra familia de líneas en el diagrama de combustión, que en la Figura 10.69 están representadas por líneas de puntos paralelas a la línea **MN**. Estas constituyen las líneas de igual contenido de CO. La **MN** tiene un contenido cero de CO, y cuanto más lejos de esta línea, en otras líneas paralelas, más aumenta el contenido de este tóxico gas.

Este diagrama tiene los ejes coordenados adimensionales, y siempre se refiere al volumen total de gases de combustión secos (vgcombt). Por esta razón se divide el volumen de CO formado en la combustión por el vgcombt, a este nuevo parámetro, también en tanto por cien, se denomina **t**.

$$t = 100 \text{ volumen CO} / \text{vgcombt}$$

En el diagrama de combustión también están indicadas las líneas de equiexceso de aire, estas son paralelas a la línea de las combustiones de aire estequiométrico **MP**. A medida que nos alejamos de esta, hacia valores más elevados de tanto por ciento de O₂, aumenta el exceso de aire utilizado en la combustión, con valores sucesivos 10%,

20%, 50%, 100%, o más elevados, aunque su separación no es proporcional al exceso de aire. Lógicamente cuanto mayor es el exceso de aire mayor es el contenido de O₂ libre en los gases, cantidad que es consecuencia del oxígeno que ha reaccionado con el C, completamente para dar CO₂ y, parcialmente, dando CO₂ y CO, debido a las características de cada combustión particular.

Otra forma de ver el diagrama de combustión consiste en imaginar una escala de temperaturas en el eje de ordenadas. El punto de máxima temperatura sería el correspondiente a la máxima cantidad de CO₂ (que coincide con la combustión estequiométrica), mientras que el origen de coordenadas correspondería a la temperatura ambiente. Se observa que en la medida que se aumenta la cantidad de exceso de aire el porcentaje de CO₂ en los humos es menor y la temperatura, lógicamente, también disminuye.

En la construcción de este diagrama se han realizado dos simplificaciones. Una, supone la no existencia de H₂ y de hidrocarburos en los gases de combustión, es decir, se considera la reacción completa por parte de este elemento, lo cual no siempre es cierto. En efecto, la normativa exige un tiempo mínimo para que se realice la combustión completa de todos los hidrocarburos, y por ello en muchas instalaciones existen las cámaras de oxidación y postcombustión a fin de que estos hidrocarburos queden totalmente craqueados y finalmente el hidrógeno solo salga en los gases en forma de vapor de agua.

La segunda simplificación en este diagrama es englobar a todos los efectos el C y el S, y con ello asimilar el SO₂ al CO₂. Aunque es una simplificación conceptual importante, en la realidad práctica es totalmente admisible, ya que el contenido de S en la mayoría de combustibles convencionales y en la biomasa en particular, la cuantía de este elemento es muy baja.

8.3.1. Determinación de las líneas del diagrama de combustión

La nomenclatura usada es todo este apartado es:

- e = exceso de aire
- v_{aire} = volumen de aire teórico
- v_{gcombsecos} = volumen de gases de combustión secos, con aire estequiométrico.
- v_{gcombt} = volumen gases totales de combustión
- v_{CO₂} = volumen de CO₂
- A = porcentaje de CO₂ máximo en volumen (cociente del volumen de CO₂, es decir v_{CO₂}, y el volumen gases totales de combustión, v_{gcombsecos}, correspondientes a aire estequiométrico)
- v_{CO} = volumen de CO

Si la composición química elemental de la biomasa es conocida se pueden calcular:

$$v_{gcombsecos} = 22,4 \cdot \left(\frac{100}{21} \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32} \right) + \frac{79}{21} \cdot \frac{(8H-O)}{32} + \frac{N}{28} \right) \text{ (litros)} \quad (1)$$

$$v_{aire} = \left(\frac{100}{21} \cdot 22,4 \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{(8H-O)}{32} \right) \right) \text{ (litros)} \quad (2)$$

$$A = C_{CO_2 \text{ max}} = 100 \cdot \frac{22,4 \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32} \right)}{v_{gcombsecos}} \text{ (\%)} \quad (3)$$

Estos tres valores corresponden a una situación de combustión estequiométrica. Además, $C_{CO_2 \max}$ es la concentración en volumen del CO_2 respecto al volumen de los gases estequiométricos secos, y por tanto es, de acuerdo con la nomenclatura anterior, el punto **M** con abscisa y_M en el diagrama de combustión.

En el caso de una combustión con exceso de aire e dada, las ecuaciones de los respectivos volúmenes de los gases totales de combustión V_{gcomb} , del O_2 , CO_2 y CO , quedan ligados por las siguientes tres expresiones.

$$V_{gcomb} = V_{gcombsecos} + \frac{e}{100} v_{aire} t + \frac{vCO}{2} \frac{m^3}{kg} \quad (4)$$

$$v_{O_2} = \frac{21}{100} \frac{e}{100} v_{aire} t + \frac{vCO}{2} \frac{m^3}{kg}$$

(5)

$$v_{CO_2} = \frac{A v_{gcombsecos}}{100} - vCO \frac{m^3}{kg} \quad (6)$$

Si las dos últimas expresiones se dividen por el volumen total de gases, v_{gcomb} , y se multiplican por cien, se obtendrá, respectivamente, el % de volumen de O_2 en los gases de combustión, es decir la ordenada y del diagrama de combustión, y el % del volumen de CO_2 , es decir la abscisa x .

$$x = \%O_2 = 100 \frac{v_{O_2}}{v_{gcomb}} = 100 \frac{\frac{21}{100} \frac{e}{100} v_{aire} t + \frac{vCO}{2}}{v_{gcomb} + \frac{e}{100} v_{aire} t + \frac{vCO}{2}} \quad (7)$$

$$y = \%CO_2 = 100 \frac{v_{CO_2}}{v_{gcomb}} = 100 \frac{\frac{A}{100} v_{gcombsecos} - vCO}{v_{gcomb} + \frac{e}{100} v_{aire} t + \frac{vCO}{2}} \quad (8)$$

Si también se divide vCO por el volumen total de gases, v_{gcomb} , y se multiplica por cien, se obtendrá la variable t , de acuerdo con la definición que se dio de esta variable en un párrafo precedente

$$t = \%CO = 100 \frac{vCO}{v_{gcomb}} = 100 \frac{vCO}{v_{gcomb} + \frac{e}{100} v_{aire} t + \frac{vCO}{2}} \quad (9)$$

En estas expresiones (7), (8) y (9) hay cuatro variables: **x**, **y**, **e**, y **t**. Sin embargo únicamente hay dos que son verdaderamente libres, tal como indica el diagrama. Es decir cualquier punto del diagrama queda determinado por dos de estas variables. Las más habituales son la abscisa **x** y la ordenada **y**, y con ello quedan unívocamente determinados el exceso de aire **e** utilizado en la combustión y la cuantía de inquemados CO, mediante la variable **t**. Viceversa con la ordenada **y** y el exceso **e** se puede determinar **x** y **t**, etc.

Es por esta razón combinando aquellas tres últimas expresiones (7), (8) y (9), eliminando **e** y se puede obtener, por ejemplo, la expresión en la que **y** queda en función de dos variables **t** y **x**

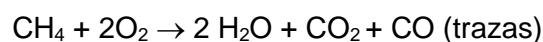
$$y = A - \left(1 - \frac{79A}{21 \cdot 200}\right) \cdot t - \frac{A}{21} \cdot x \quad (10)$$

8.3.1.1. Consideraciones sobre la línea de combustión perfecta y zona de inquemados

El cálculo de la recta **MN** es de suma importancia puesto que determina las coordenadas de las combustiones perfectas, mientras que el resto corresponde a la zona en que aparecen inquemados en los gases de combustión. En efecto, se debe considerar que, cuanto mayor sea la cantidad de CO generado, los gases de combustión serán más contaminantes. El CO es de los pocos contaminantes que no es posible depurar.

En los procesos industriales es difícil conseguir una combustión completa, o sin la presencia de inquemados. Durante el proceso de combustión se presentan oscilaciones de la temperatura que es preciso corregir de manera constante. Esta corrección suele llevarse a cabo por medio de la regulación de la cantidad de aire. Cuando la masa de comburente varía la hidrodinámica de la mezcla (Aire/gas) se altera y las probabilidades de que aparezcan inquemados, aunque sea de forma instantánea, es muy grande. De hecho esta contingencia ya la prevén los diagramas de combustión, donde la posibilidad de tener inquemados es muy elevada.

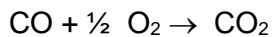
A pesar que las cámaras de la mayoría de hornos presentan un tiempo de residencia alto, más que suficiente para la destrucción térmica de todos los compuestos orgánicos (toda clase de hidrocarburos), la presencia del CO es un caso bien particular. Así el primer inquemado, y más común, que aparece en la combustión es el monóxido de carbono. Se trata de un gas venenoso, cuya ecuación de formación, a partir del metano es la siguiente:



Esta indica, suponiendo que la mezcla de combustible-comburente en el quemador sea correcta, que:

- Cuanto más carbono esté presente en el combustible, mayor potencial de formación de CO.
- La producción de CO disminuye con el incremento del exceso de aire.
- La producción de CO aumenta con el incremento de la temperatura.

Este último parámetro es el más importante y el que explica por qué aparece CO en los gases de combustión en los hornos que trabajan a alta temperatura. La presencia de CO en el interior de la cámara de combustión suele ser importante, no obstante en la chimenea, con independencia del exceso de aire usado, suele aparecer poco CO, la explicación estriba en la ecuación que define la oxidación del CO a dióxido de carbono:



La reacción se desplaza hacia la derecha a medida que disminuye la temperatura. Ahora bien, cuanto peor se realice la mezcla gas y aire en el quemador (o en la parrilla), tanto más CO se generará, con independencia de la cantidad de oxígeno presente, y por tanto se emitirá CO a la atmósfera. Vale la pena hacer un par de reflexiones sobre la eliminación del CO. Es frecuente pensar que el aumento súbito del comburente, gran exceso de aire, arregla la situación. La experiencia demuestra que ello no es así (a veces se incrementa el CO), lo único que hace el gran exceso de aire es aumentar el consumo de combustible. Si la adición de aire se lleva a cabo después del horno: dilución (práctica prohibida o inútil para muchas aplicaciones) el efecto es el enfriamiento de la corriente y, por tanto la inversión de la tendencia de la reacción. La temperatura de transición se halla alrededor de los 500 °C.

Tan importante y común es la presencia de CO que su valor se usa para definir el concepto de eficacia de la combustión (CE) como el resultado del cociente:

$$\text{CE} = 100 \frac{\text{CO}_2}{\text{CO}_2 + \text{CO}}$$

8.3.1.2. Cálculo de la recta de combustión perfecta

Desde el punto de vista teórico, la combustión perfecta es aquella donde todo el carbono se convierte en CO₂ por lo que el porcentaje de CO es igual a cero o lo que es lo mismo, el parámetro $t=0$, con lo que la ecuación (10) queda reducida a la expresión

$$y = A - \frac{A}{21}x \tag{11}$$

Esta ecuación define la recta **MN**, de combustión perfecta, y de forma muy fácil puede evaluarse los puntos de intersección con las ordenadas (**y_M,0**) y con las abscisas (**0, x_N**):

- Con $x=0$, se obtiene $y=y_M$, punto **M** del diagrama, en este punto los gases no tienen oxígeno en la combustión, así la combustión es perfecta y la mezcla de aire y gas es la estequiométrica.
- Para que $y=0$, la x debe ser $x=21$, lo que significa que el exceso de aire es muy grande.

Con ambos puntos se puede trazar la recta **MN**, que corresponden a todos los puntos en los que la combustión es perfecta.

8.3.1.3. Cálculo de familia de rectas de igual contenido de CO, ($t=cte$).

A partir de la ecuación (10), en el anterior apartado se ha hecho $t=0$, se ha obtenido la recta **MN** de combustión completa. Las sucesivas rectas para distintos valores de t son paralelas a aquella. Por tanto para trazarlas basta con calcular la intersección con el eje de las ordenadas, es decir, dar el valor $x=0$, y luego dando sucesivos valores a t , de 1, 2, 3, en la ecuación (12)

$$x=0 \quad y = A - \left(1 - \frac{79A}{21 \cdot 200}\right) \cdot t \quad (12)$$

con lo que se obtienen las sucesivas ordenadas $y_{t=1}$, $y_{t=2}$ de las que solo queda por trazar las correspondientes paralelas a la recta **MN** para obtener las líneas de trazos en la Figura 10.69.

Si en la ecuación anterior (12) además se hace que $y=0$, se obtiene el valor máximo de t , t_{max} , es decir el valor máximo de porcentaje de CO que se puede obtener para una combustión,

$$Y=A / \left(1 - \frac{79 \cdot A}{21 \cdot 200}\right) \quad (13)$$

8.3.1.4. Cálculo de familia de rectas de equiexceso de aire ($e=cte$)

La ecuación (8) da la combinación de las coordenadas x e y con el exceso de aire e y el volumen de CO, es decir v_{CO} . Si en esta ecuación se considera solo los puntos en que este último valor es igual cero, nos situamos sobre los puntos de la recta **MN**. De esta forma se obtiene que las coordenadas de estos puntos son función de e , esto es

$$\text{Si } v_{CO}=0 \quad y=\%CO_2=100 \frac{v_{CO_2}}{v_{gcomb}t} = 100 \frac{\frac{A}{100} v_{gcomb}secos}{v_{gcomb}t + \frac{e}{100} v_{aire}t} \quad (14)$$

Entonces, si en la ecuación (14) se dan valores a e , como 10%, 20%, ... 200% se obtendrán los valores de y , $y_{10\%}$, $y_{20\%}$ de la recta **MN**. Es decir, trazando rectas paralelas al eje OX con este valor de ordenada se intersecciona en la recta **MN** en los puntos $(x_{10\%}, y_{10\%})$, $(x_{20\%}, y_{20\%})$, que permite la graduación de la recta de combustión perfecta **MN**, y con ello indicar en cada punto el exceso de aire. A partir de estos puntos se trazan las sucesivas rectas paralelas a la recta **MP** que serán las rectas de combustión con equiexceso de aire de combustión.

8.4. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA

La Figura 10.70 muestra el balance de materia para la fase sólida y gaseosa.

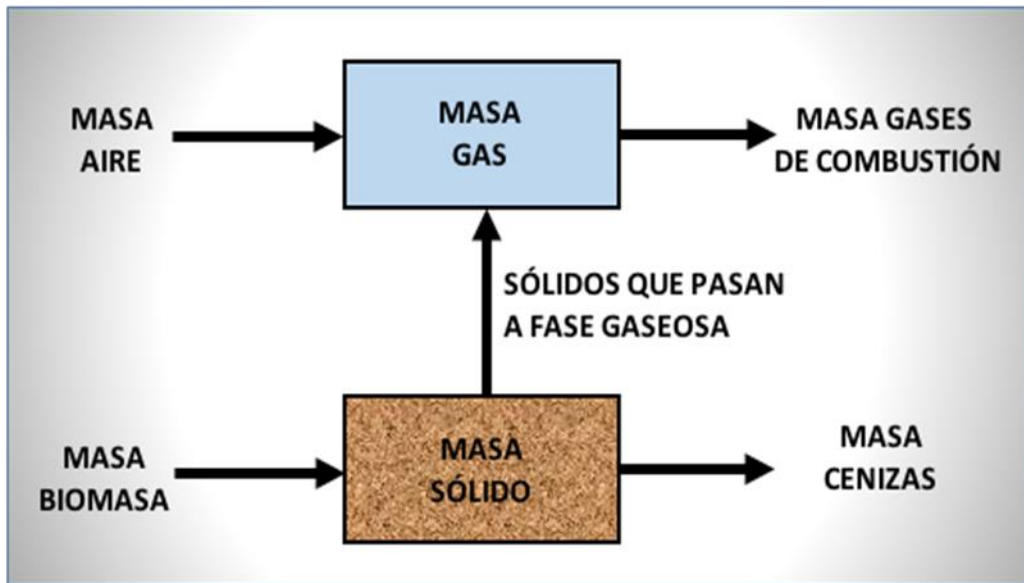


Figura 10.70. Esquema del balance de masa de la combustión de la biomasa.

Balance fase sólida:

Es preciso determinar la masa de cenizas para completar el balance de masas.

Balance fase gaseosa

Masa de aire + masa de sólidos que pasan a fase gaseosa (combustibles) = masa de gases de combustión.

Para el balance de energía hay que tener en cuenta los distintos calores que se producen en el horno:

Calor de combustión

Corresponde al que desarrolla el combustible cuando alcanza la oxidación total.

$$Q_{\text{comb}} = m_{\text{biomasa}} \cdot \text{PCI}$$

La energía generada se transmite a los gases que se emiten a cierta temperatura.

$$Q_{\text{gas comb}} = m_{\text{gas comb}} \cdot C_{p\text{gas comb}} \cdot (T_g - T_a)$$

Calor transmitido por radiación

$$Q_{\text{rad}} = \sigma \cdot A \cdot (T_g^4 - T_p^4)$$

Calor transmitido por convección

$$Q_{\text{conv}} = \alpha \cdot A \cdot (T_g - T_p)$$

El balance de energía es de la forma:

$$Q_{\text{comb}} = Q_{\text{gas comb}} + Q_{\text{rad}} + Q_{\text{conv}}$$

A partir del balance de materia y energía se determina el exceso de oxígeno necesario para la combustión comprobando que la temperatura de llama esté dentro de la normativa vigente.

8.4.1. La temperatura de llama

Naturalmente existe una relación entre el PCI de un combustible y la temperatura teórica de la llama. Sin embargo, a efectos prácticos y de conducción del horno, el combustible es un parámetro fijo mientras que la masa de aire es variable. Por ello, parece más lógico hacer hincapié en esta última relación y su efecto sobre la temperatura real, como muestra la Figura 10.71.

La temperatura de llama se define como la temperatura de los productos de combustión para una reacción adiabática donde los reactivos entran a 25 °C y todo el calor generado en la reacción se invierte en calentar los productos de combustión.

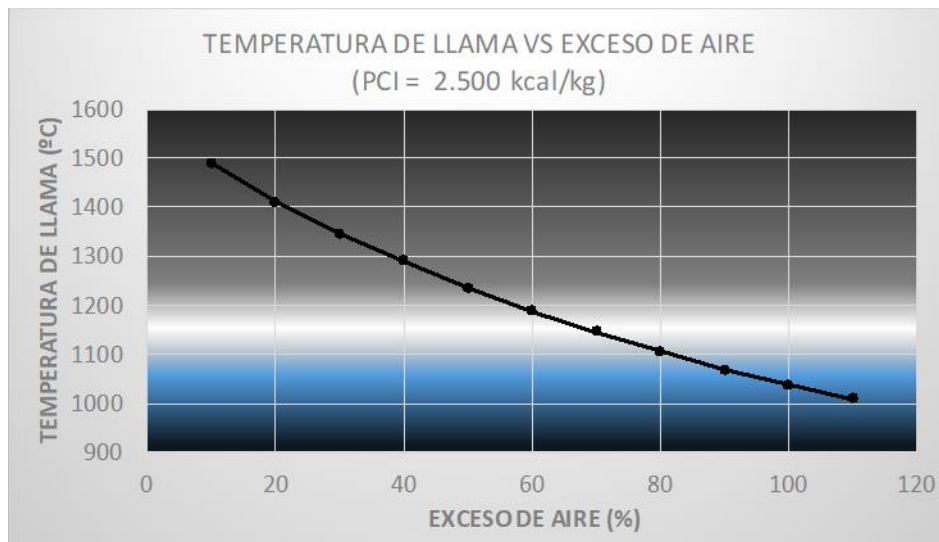


Figura 10.71. Temperatura teórica de llama vs exceso de aire.

Una instalación de conversión energética, sea de combustión, gasificación, etc. se diseña según la masa de combustible que se transforma en gases y éstos, a una determinada temperatura, ocupan un volumen. El proyectista, para calcular el volumen interno del horno, la cámara de postcombustión, o el lavado de gases, ha de conocer, a priori, el caudal teórico de gases, así como sus fluctuaciones, tal y como indica la Figura 10.72. En esta se muestra en ordenadas el caudal de gases de combustión en m³ para la combustión de una determinada cantidad de residuo con un PCI de 2.500 kcal/kg para distintos excesos de aire expresados en %, desde 10 a 110%

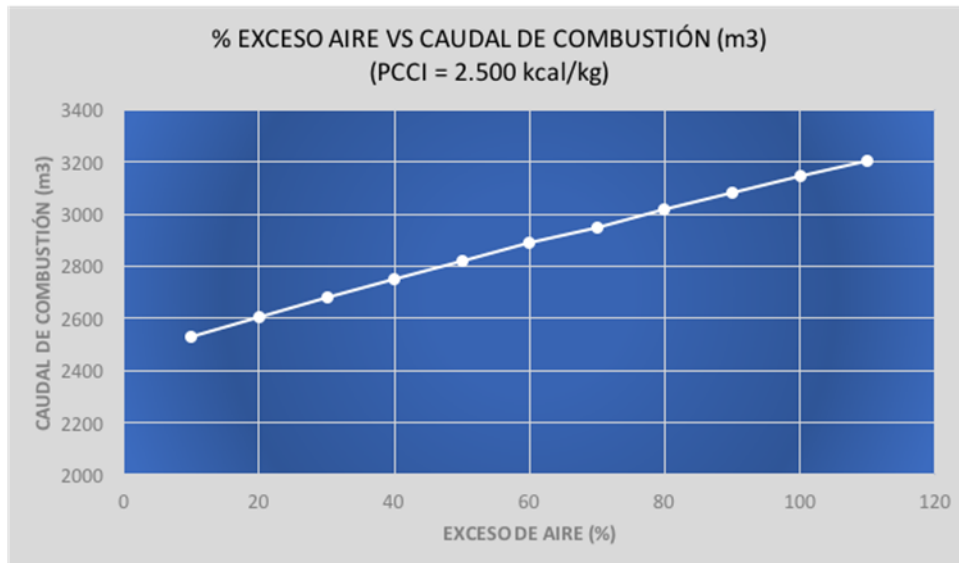


Figura 10.72. Caudal de combustión en ordenadas vs el % de exceso de aire en abscisas.

La buena o mala combustión es debido a las fluctuaciones de la temperatura de llama que debe ser regulada mediante la aportación de más o menos aire, también se debe al tipo de residuo y cantidad que el sistema elegido puede soportar, así como a la calidad del sistema de alimentación.

Para calcular la eficiencia de la combustión se mide en chimenea el porcentaje de CO de los gases. Si este valor es alto, para solucionar este problema se proporciona un exceso de aire en el proceso de combustión, con lo que en principio se disminuye la producción de CO₂ y, habitualmente, en mayor grado de CO, lo cual desde el punto de vista ambiental es favorable, pero también se observa que disminuye la temperatura de llama lo cual implica que la eficiencia del proceso de combustión se reduce.

Hay que ver la instalación en su conjunto como un intercambiador de calor en cadena. El combustible cede su calor a los gases de combustión (si hay inquemados, como el CO, significa que parte del calor se pierde) que, a su vez transmiten el calor a la caldera para la producción del vapor. Habida cuenta que la relación de masa de aire con respecto a la del combustible puede variar en un rango muy amplio, se comprende que si el exceso de aire aumenta, se debe calentar más aire, con lo que la temperatura de los gases de combustión disminuye, y la eficiencia de la caldera será menor puesto que su rendimiento efectivo es una función de esta temperatura.

8.5. PARÁMETROS DEL CÁLCULO DE UN INCINERADOR

Las partes o zonas que configuran un incinerador son:

- 1) Zona de descarga y almacenamiento. Hay que prever un almacenamiento mínimo para prevenir fallos en el suministro y un sistema de almacenamiento que proteja el combustible contra los elementos naturales (lluvia). Además el sistema de almacenamiento debe prever la necesidad de establecer el "menú" en el caso de que haya de tratar con varios combustibles a la vez.
- 2) Zona de alimentación del horno. Constituida, normalmente por una tolva y un mecanismo de alimentación. Para el buen funcionamiento de la instalación es fundamental que la alimentación sea tan regular y constante como sea posible. (Matemáticamente sería lo mismo introducir un lote de 1.000 kg, de golpe en un horno que 250 kg cada 15 minutos o

16,6 kg al minuto. Pero desde el punto de vista técnico y físico esta última alternativa debería ser la única válida).

- 3) Horno y su cámara de combustión para garantizar una completa destrucción de los contaminantes. Desde la óptica ambiental el horno es donde se forman las llamas y éstas son sinónimo de generación de contaminantes. Es un “peaje” que se paga para la conversión de sólidos y líquidos a gas.
- 4) Cámara de oxidación, donde se oxidan la mayoría de los inquemados que proceden del horno (en esta zona desaparecen las llamas) y cámara de postcombustión, donde por craqueo térmico se destruyen los hidrocarburos de cadena larga que había en el combustible, o se han generado a raíz de la formación y desarrollo de las llamas.
- 5) Zona de recogida y extracción de escorias y cenizas. Las escorias se reciben en la parrilla del horno, mientras que las cenizas se recogen en la caldera y, sobre todo en el ciclón y/o filtro de mangas.
- 6) Zona de recuperación de energía. Es decir, la caldera, habitualmente de recuperación en instalaciones grandes. En instalaciones de pequeño tamaño se instala un intercambiador de radiación donde los gases de combustión ceden su calor latente al aire, que se emplea como aire de combustión o para otros usos, como secado.
- 7) Zona de limpieza de gases. Puede ser un filtro de mangas.
- 8) Zona de almacenamiento de escorias y cenizas.
- 9) Zona de evacuación de gases depurados. Donde, además suele haber la estación de medida y control de emisión de gases.

En la Figura 10.73 se adjunta un esquema con varios de los elementos citados como horno, cámaras de oxidación y postcombustión, caldera de recuperación, zona de limpieza de gases con un filtro de mangas, además de la recogida de escorias, y cenizas o polvos de los filtros de mangas.

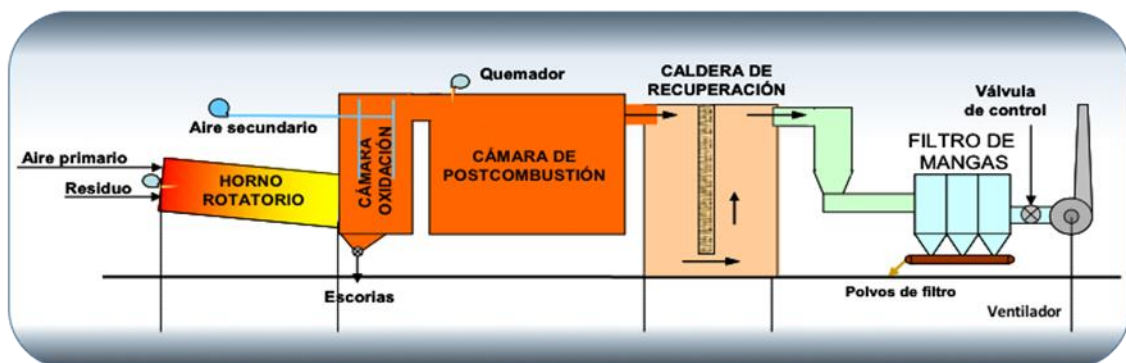


Figura 10.73. Esquema de algunas partes de una instalación de incineración.

El horno no solamente constituye la combustión de la mezcla sino también el avance de la biomasa y su aireación en la combustión para conseguir una buena mezcla comburente y combustible. Para la conversión energética de la biomasa, se pueden distinguir tres tipos de hornos:

- **Horno de parrilla:** La biomasa no necesita ningún tipo de pretratamiento, seguramente por ello es la más usada. La inyección inferior del aire es precisa para refrigerar las parrillas (sin embargo ello retrasa las etapas de combustión). La posible fusión de las escorias

también es un factor limitante. En atmósferas reductoras (frecuentes en la lámina de contacto entre combustible y parrilla) la deformación del metal se produce a menor temperatura. Los inquemados que se filtran por las parrillas pueden generar problemas e incendios.

- **Horno rotatorio:** La biomasa no necesita ningún tipo de tratamiento. El horno rotatorio también es utilizado para fangos de depuradoras. Puede trabajar con un mínimo exceso de aire (lo que permite una elevada temperatura). Las escorias tienen una garantía de estar mejor quemadas.

Admite todo tipo de combustible. No hay partes metálicas en el interior del horno, con lo que la temperatura no es un factor limitante. Permite regular el tiempo de permanencia de sólidos.

- **Horno de lecho fluidizado:** La biomasa necesita un pretratamiento de triturado y tamizado. Garantiza un contacto óptimo entre comburente y combustible. Este sistema permite una mayor transferencia de calor desde las partículas de refractario que constituyen el lecho hacia la carga que se mantiene en constante agitación, gracias al caudal de fluidificación. Posibilidad de usar mezclas heterogéneas de combustibles (fangos). Permite una minimización de las emisiones de SO₂ y HCl por adición de reactivos en el propio lecho. Reducción de las cantidades de NO_x al trabajar a menores niveles térmicos y excesos de aire más reducidos. Aumento del tiempo de residencia.

Para el cálculo del incinerador hay que tener en cuenta el tipo de combustible a utilizar, tamaño de entrada, variabilidad a lo largo de las estaciones del año, volumen del residuo, variación del PCI, humedad de entrada del residuo por si requiere un pretratamiento antes de la entrada del horno, etc.

Estos parámetros determinan el dimensionado de la cámara de combustión, el tipo de tratamiento de limpieza de gases de combustión, posibles centros de almacenaje y, en definitiva, la viabilidad económica de la planta.

8.5.1. Datos básicos para el diseño de un incinerador de biomasa

Antes de poner un ejemplo de cálculo se debe señalar que un horno se diseña para trabajar con una determinada carga térmica (kcal/m³·h). Con este objetivo se deben cumplir dos premisas:

- PCI del residuo alimentado debe ser razonablemente constante.
- Alimentación continua del horno.

La combinación de ambos parámetros (“menú”) permite conjugar estas dos premisas, de tal manera que en función del PCI de los distintos componentes del menú se puede aumentar la carga y viceversa de forma que la potencia con que se alimenta el horno sea constante.

El horno de parrilla para el cual se ha realizado el presente ejemplo de cálculo se emplea normalmente para la incineración de residuos en masa. El principio de funcionamiento se basa en el avance del combustible mediante el arrastre de unos elementos provistos de movimiento relativo entre sí. Estos elementos sostienen además el combustible, insuflándose entre los mismos el aire necesario para el inicio de la combustión. Según van avanzando los residuos, se va completando la combustión de los mismos, de forma que a la salida (escorias) el contenido de inquemados es bajo. A lo largo de la parrilla tienen lugar los siguientes procesos:

- **Secado:** (Temperatura entre 100-250 °C). Se produce el secado de los residuos debido a la acción del aire de combustión (calentado o no en función de humedad de los residuos).
- **Desgasificación:** (Temperatura entre 250-600 °C): Empieza la combustión por radiación del calor procedente del refractario y de la masa de gases en combustión. Además, en la combustión se desprenden diferentes tipos de gases procedentes de la descomposición térmica y carbonización de los residuos.
- **Gasificación y combustión del carbono sólido:** (Temperatura entre 600-800 °C): Combustión generalizada en toda la masa del combustible. Descomposición térmica de los gases producidos y posterior oxidación.
- **Agotamiento de escorias:** (Temperatura entre 800-1.200 °C): Combustión de los productos de carbonización y formación de escorias. Finalmente la escoria agotada se enfría parcialmente con el aire insuflado en la zona final de la parrilla.

El principal inconveniente de esta tecnología radica en que conceptualmente se parte de un diseño cuyo objetivo principal es la eliminación del residuo, más que la recuperación energética con un alto rendimiento. Los inquemados que aparecen en las escorias alcanzan un valor aproximado del 4%. La temperatura en el hogar es elevada, del orden de 1.100 °C, lo que favorece la formación de óxidos de nitrógeno. Por otra parte, la presencia de partes mecánicas móviles encarece los costes de mantenimiento. Como ventajas, cabe citar, además de la fiabilidad y seguridad del sistema cuyo funcionamiento está muy contrastado, que permite una flexibilidad operativa al poder realizar paradas rápidas para mantenimiento debido a que la cantidad de combustible en el horno es pequeña.

Existen varios tipos de hornos de incineración de parrillas:

- Parrillas fijas.
- Parrillas móviles.
- Con diferentes tipos de parrillas y movimiento.

Los tipos de parrilla más utilizados son los siguientes:

- Barras longitudinales.
- Barras transversales.
- Rodillos: Están formadas por una serie de cinco o seis rodillos de ejes horizontales, cuyo plano está inclinado respecto al horizontal entre 20 y 25 grados. El diámetro de los rodillos puede llegar a 1,5 m.
- Parrilla vibrante.

En la actualidad se dispone en el mercado de equipos que combinan una serie de mejoras en el diseño del horno, del sistema de alimentación de combustible y del tipo de parrilla, con lo que se pueden obtener algunas de las ventajas del lecho fluidizado. Una de estas tecnologías es la parrilla vibrante refrigerada por agua que tiene como ventaja la reducción del problema de la escorificación al mantenerse la superficie de la parrilla refrigerada.

8.5.2. Ejemplo dimensionado de un horno de parrilla de forma rápida

En primer lugar, se justifica la utilización de un horno de parrilla frente al de lecho fluidizado en que los residuos no tienen que recibir un tratamiento inicial para su posterior combustión. Desde la óptica de la física esta aseveración es incorrecta. Todo combustible sólido o líquido precisa de un cierto grado de adecuación, principalmente

por lo que hace referencia al tamaño de partícula. Lo que acontece es que un sistema de horno, el de lecho fluidizado, lo exige, mientras que los de parrilla pueden evitarlo, pero se “paga” en mantenimiento e inquemados.

Se consideran como válidos los siguientes parámetros de diseño (estos valores son específicos de cada fabricante):

- Carga térmica de la parrilla: entre 500.000-900.000 kcal/h·m²
- Carga mecánica de la parrilla: 250-450 kg/h·m²
- Carga térmica de la cámara de combustión: 80.000-100.000 kcal/h·m³.

El diseño el horno depende del PCI de la mezcla que vaya a valorizarse, de su capacidad mecánica y de la forma física del combustible. Por la ley vigente es preciso dimensionar la cámara de potcombustión por la necesidad del tiempo de residencia de los gases de combustión con una temperatura determinada, también dictaminada por ley. Teniendo en cuenta que no se debe sobrepasar la carga térmica de la cámara de combustión, porque quedaría disminuida la capacidad mecánica de la instalación.

En el caso del ejemplo propuesto: Alimentación 5 t/h, con un PCI medio para cada combustible de 2.500 kcal/kg y 1.600 kcal/kg.

8.5.2.1. Carga térmica de la parrilla:

Para cada PCI:

$$\frac{5.000 \text{ kg/h} \cdot 1.600 \text{ kcal/kg}}{500.000 \text{ kcal/h m}^2} = 16 \text{ m}^2$$

$$\frac{5.000 \text{ kg/h} \cdot 2.500 \text{ kcal/kg}}{500.000 \text{ kcal/h m}^2} = 13,89 \text{ m}^2$$

Por lo tanto se toma el valor más desfavorable, 16 m², para manejar la carga térmica.

Carga mecánica:

$$\frac{5.000 \text{ kg/h}}{250 \text{ kg/h m}^2} = 20 \text{ m}^2$$

$$\frac{5.000 \text{ kg/h}}{450 \text{ kg/h m}^2} = 11,11 \text{ m}^2$$
$$= 20 \text{ m}^2$$

$$= 11,11 \text{ m}^2$$

De los resultados se colige que el dimensionado de 16 m² es válido.

8.5.2.2. Volumen de la cámara de combustión

Para cada combustible:

$$= 100 \text{ m}^3$$

$$= 125 \text{ m}^3$$

$$\frac{5.000 \text{ kg/h} \cdot 1.600 \text{ kcal/kg}}{80.000 \text{ kcal/h m}^3} = 100 \text{ m}^3$$

$$\frac{5.000 \text{ kg/h} \cdot 2.500 \text{ kcal/kg}}{100.000 \text{ kcal/h m}^3} = 125 \text{ m}^3$$

En este caso es aconsejable elegir el valor de 125 m³, para que no quede limitada la capacidad para PCI más altos.

Cuando se ha determinado el volumen de la cámara de combustión, hay que llevar a cabo unas relaciones previas entre superficie y altura. De hecho, la dimensión de anchura por la altura elegida determina la sección útil de paso de los gases. Si es muy pequeña, la velocidad es elevada y con ella el arrastre de partículas. En principio, la velocidad en las cámaras de hornos de parrillas y rotatorios no debería exceder de 2 m/s. Para una cámara de biomasa, como la propuesta en el ejemplo, la altura de la cámara de combustión suele ser alrededor de 2,5 m, el horno se aproxima a un paralelepípedo, con lo cual, el volumen es de 125 m³ y la altura es de 2,5 m,

Con ello se redimensiona la superficie: $S = 125/2,5 = 50 \text{ m}^2$, a partir de este punto se va probando que superficie es más ventajosa. Por ejemplo: 5 m de ancho por 10 m de largo o 25 m de largo por 2 m de ancho. En este apartado no solo juega el parámetro de la velocidad antes comentado, sino aspectos económicos. Así, si se determina que dentro de ciertas dimensiones la velocidad máxima de los gases es inferior a la recomendada, la relación volumen/área supone una mayor masa de refractarios y aislantes, es decir una inversión más elevada. También es muy importante la optimización de la superficie para establecer un buen contacto combustible y comburente.

Por lo tanto las dimensiones del horno serán 10 x 5 x 2,5 m.

Para el cálculo del horno se deben tener en cuenta además de estos dos valores, los siguientes parámetros:

- **Temperatura, en particular en la cámara de postcombustión:** El factor más importante para la destrucción térmica del residuo. Está sujeto a normativa.
- **Tiempo de residencia:** Se debe distinguir el tiempo de residencia de los sólidos en parrilla (para reducir la cantidad de inquemados, por tanto escorias) y el tiempo de residencia de los gases de combustión en cámara de postcombustión a la temperatura prefijada (muy importante que a la vez se cumpla éste parámetro sujeto a normativa)
- **Turbulencia:** Es el grado de movimiento que tienen los sólidos en el proceso. Se utiliza para reducir los anteriores parámetros y así los costes de operación. Por ejemplo, en el caso de los hornos rotatorios, ello debe interpretarse como el diseño interno de las paredes del horno para optimizar el volteo y avance de la carga.
- **Presión:** Se trabaja con ligera depresión para reducir posibles fugas.

- **Suministro de aire:** Operación para garantizar una combustión completa. Al margen de los comentarios vertidos sobre la cantidad es importante también hablar de la temperatura de entrada del aire primario. Cuanto mayor sea, mejor calidad de mezcla y rendimiento de la combustión (sin embargo ello supone un diseño de los tubos de entrada de mayor tamaño).
- **Materiales de construcción:** Materiales que resistan las altas temperaturas y bajas presiones. En el caso de los hornos de parrillas, éstas deben ser metálicas con lo que se presenta un dilema: la temperatura no puede ser muy alta (el aire primario se encarga de refrigerarlas, en contrapartida, al reducir la temperatura, la radiación térmica también se reduce y en menor grado ya que depende de la cuarta potencia de la temperatura, y el rendimiento de la combustión se viene a bajo).
- **Otros:** De acorde con el resto de las instalaciones para que la operativa sea óptima.

8.6. VIABILIDAD ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE INCINERACIÓN DE BIOMASA

Para llevar a cabo un análisis de la viabilidad económica, se debe de tener en cuenta:

- El tipo de biomasa.
- Cantidad disponible anualmente.
- Coste unitario.
- Coste total anual.
- Humedad del residuo.
- Energía disponible anualmente.

El coste más importante, y lo que más grava a los costes de explotación, es la logística de recogida y transporte del residuo.

Se considera una primera aproximación de lo que puede representar la inversión de una planta incineradora, según la capacidad del tratamiento de la misma. Para ello, se plantea el siguiente ejemplo:

La planta consta de dos líneas, con horno de parrilla, idénticas y régimen previsto de funcionamiento 8.000 h/año, quemando RSU.

El ratio de inversión para una capacidad de 80.000 t/año es de 300 €/t, pero en esta existe una importante disminución del coste de la planta por incremento del factor escala. Por lo tanto, la inversión inicial para las características de la planta, será 24.000.000 €.

Los costes de operación para la planta se estiman 24 €/t. Este coste está compuesto por los siguientes apartados: **Personal** (en sus diferentes categorías),

Mantenimiento, tratamiento de escorias y cenizas, **Aditivos** y otros (suministro de

$$\text{Costes de operación} = 80.000 \frac{t}{\text{año}} \cdot 24 \cdot \frac{\text{€}}{\text{año}} = 1.920.000 \text{ €/año}$$

energía eléctrica, de agua, seguros,

etc.)

Para poder calcular el beneficio, en referencia a la normativa del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital en donde puede encontrarse toda la normativa para calcular la tarifa eléctrica para este tipo de instalaciones y las tarifas vigentes para este tipo de explotaciones, y que ha sufrido importantes cambios en los últimos años

En el caso de conversión energética de biomasa con aprovechamiento energético, en comparación con otras formas de eliminación o valorización, se cuenta con unos ingresos adicionales, primas, de las que se ha hecho referencia, solo superficialmente, en apartados anteriores y que contribuyen de forma muy significativa al equilibrio económico de la actividad.

$$\text{kWh/kg RSU (teóricos)} = \frac{2500 \text{ kcal/kg}}{860 \text{ kcal/kWh}} = 2.91 \frac{\text{kWh}}{\text{kg biomasa}}$$

Para un residuo de 2.500 kcal/kg. se obtiene:

Para calcular la potencia de las turbinas, se estima que su rendimiento ronda en torno al 20% (Para este cálculo se estima un rendimiento del 80% de la caldera). A partir de este valor: kWh/kg de RSU (reales) = 2,91·0,2 = 0,582 kWh/kg biomasa. Potencia cedida a la turbina = 5.000 kg biomasa (dato)·0,582 kWh/kg RSU = 2.910 kWh/unidad, por lo tanto para las dos turbinas será igual a la potencia cedida total 2.910 kWh/unidad·2unidades = 5.820 kWh.

Una vez que se determina la potencia de las turbinas, se puede calcular la energía que se genera de la cual una parte se auto consume y los excedentes, mayoritarios, se exportan a la red pública. Las cifras resultantes son las siguientes:

- Consumo de electricidad = 84,5 kWh/t biomasa
- Venta de electricidad = 507,2 kWh/t biomasa

Luego lo que se obtiene al año será:

- Consumo de electricidad = 84,5 kWh/t biomasa·80.000 t/año = 6.760 MWh/año
- Venta de electricidad = 507.24 kWh/t RSU·80.000 t/año = 40.579 MWh/año

La conexión de energía eléctrica a la red, para la venta de los excedentes, está regulada según la legislación de cada país, y esta además puede variar en el transcurso de los años.

En España durante algunos años, ha sido regulada por el Real Decreto 2818/1998 de 23 de diciembre, publicada en el BOE del 30 de diciembre, donde en el capítulo IV, artículos 26 y 29 de dicho Real Decreto. En este se indicaba como calcular el precio de la energía vendida, además anualmente esta era reactualizada. En 2007 se redactó el nuevo Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, BOE de 26 del mismo mes, por el que se regulaba la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. Este resultado bastante complejo y controvertido. En él se establecía la “metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial” mediante una nueva regulación de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. También, determinaba una prima que complementaba el régimen retributivo de las instalaciones de co-combustión de biomasa y/o biogás en centrales térmicas del régimen ordinario que realicen la venta de la energía en el mercado de producción de energía.

Sin embargo, la metodología es muy compleja, pues las instalaciones las divide en categorías, grupos y subgrupos, en función de las energías primarias utilizadas, de las

tecnologías de producción empleadas y de los rendimientos energéticos obtenidos. Además, la energía eléctrica se puede vender al sistema a través de la red de transporte o distribución, percibiendo por ella una tarifa regulada única para todos los períodos de programación, que, además, según la clasificación estará sometida o no a una discriminación horaria, o vender la electricidad en el mercado de producción de energía eléctrica. En este caso, el precio de venta de la electricidad era el precio que resultaba en el mercado organizado o el precio libremente negociado, aparte de la prima. También el citado R.D. contemplaba un complemento por eficiencia y por energía reactiva. Por tanto, cada instalación podía percibir una cuantía muy diferente por kWh producido. La tarifa regulada indicada en sus dos tablas oscila entre 44,0381 y 3,8294 c€/kWh y las primas entre 11,6608 y 0,6142 c€/kWh, algunas de las cuales solo se percibirán durante los primeros 15 años.

Pero como se ha comentado esta normativa y su metodología de cálculo cambio radicalmente en 2013, con el R.D. 9/2013, la Ley 24/2013, y el R.D. 413/2014, que regulan en la actualidad la actividad de producción de energía eléctrica a partir de energía renovables, cogeneración y residuos, en el que se denomina el nuevo "Regimen Retributivo Específico" (RRE). A igual que en el anterior R.D. 661/2007, resulta o incluso más complejo evaluar la retribución para cada caso concreto ya que depende de muchísimas variables. Un sistema como el que se está comentando entraría dentro de la categoría b y en el grupo 6.

Dada esta complejidad en las próximas líneas se supone, como ejemplo, un precio de venta de 10 c€/kWh. Por otra parte se propone que el coste del propio consumo sea al mismo precio que el de venta, situación que raramente se produce:

- Consumo interno de electricidad = $84,5 \text{ kWh/t biomasa} \cdot 80.000 \text{ t/año} \cdot 0,10 \text{ €/kWh} = 676.000 \text{ €/año}$.
- Venta de electricidad = $507.24 \text{ kWh/t} \cdot 80.000 \text{ t/año} \cdot 0,10 \text{ €/kWh} = 4.057.920 \text{ €/año}$.

Si el consumo interno supone un gasto en la explotación de 1.920.000 €/año, la instalación obtiene un superávit de: $4.057.920 - 1.920.000 = 2.137.920 \text{ €/año}$.

Así pues la supuesta amortización de la planta se puede estimar en:

Amortización = $24.000.000 / 2.137.920 = 11,2$ años, o sea aproximadamente 11 años, lo cual en este tipo de instalaciones es, financieramente, interesante.

Para mejorar las condiciones del aprovechamiento de este tipo de energías se deben tomar una serie de medidas:

- Subvencionar, por parte de los gobiernos las primas a las energías renovables y la producción del kWh, de una forma más adecuada.
- Seguridad en el suministro de la biomasa
- Precio de la biomasa bajo y con variaciones controladas a lo largo del año y en el periodo de tiempo mayor posible.
- Seguridad del precio del kWh en un plazo mínimo de 10 años.
- Tecnología probada y posibilidad de amortización

Para asegurar la seguridad de suministro de biomasa es necesario realizar contratos a largo plazo a los productores y el fomento de cultivos energéticos.

9. SOSTENIBILIDAD ENERGETICA DE LOS BIOCOMBUSTIBLES DE 1ª Y 2ª GENERACIÓN

La radiación solar incidente sobre un campo de caña de azúcar, en el trópico, oscila alrededor de $1.500.000 \text{ kcal/m}^2$ y año (1.750 kWh/m^2 y año). De esta energía la caña fija 13.160 kcal/m^2 de cultivo.

Finalmente tras el proceso industrial, en el etanol producido por cada metro cuadrado de cultivo se recuperan 3.116 kcal es decir el $0,21\%$ de la energía solar incidente.

La cascada de pérdidas de energía resulta evidente con un cuello de botella ineludible que radica en la eficiencia de la fotosíntesis que fija alrededor del 1% de la radiación solar incidente.

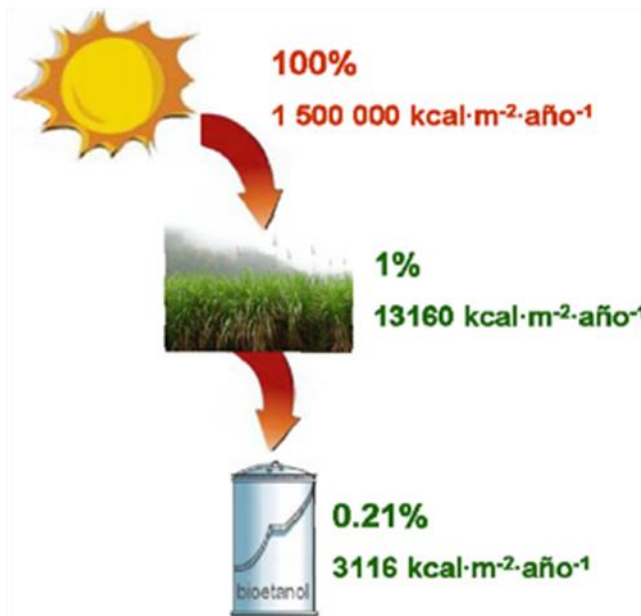


Figura 10.74. Energía solar, rendimiento fotosintético y biocombustible.

El punto de interés de este apartado estriba en calibrar el rendimiento energético que se puede captar, en forma de biocarburante a partir del vegetal. No obstante hay que valorar la energía gastada en el cultivo (preparación del terreno, fertilizantes, riego, fitosanitarios, colecta, etc.) y en la transformación del vegetal en biocarburante.

9.1. INTRODUCCIÓN Y DEFINICIONES

Existe una gran controversia en relación a la sostenibilidad de los diferentes biocarburantes, básicamente líquidos, en especial en relación a:

- La energía que se tiene que suministrar al sistema: cultivo, recolección y producción.
- La energía que contiene el biocombustible generado.
- La energía contenida en el subproducto (Así con el grano del maíz se obtienen los azúcares para el etanol pero con el cañote: el subproducto, se puede generar energía de manera secundaria. A veces es más importante la energía del subproducto que el propio etanol).

Con el propósito de obtener una visión general de la problemática es preciso centrar las definiciones, teniendo en cuenta el estado de madurez de las tecnologías de producción y utilización, y establecer una categorización entre biocarburantes de primera y segunda generación:

- **Biocarburantes de primera generación.** El biodiésel, los aceites vegetales, 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 buena parte del biogás, pertenecen a esta categoría. La producción y el uso de estos biocarburantes están ya en fase de aplicación avanzada. Los principales márgenes de mejora se deben buscar en la reducción de los costes de producción, la optimización del balance energético, la mejora de los rendimientos energéticos de los motores de combustión y el incremento de los porcentajes de mezcla con los combustibles fósiles.
- **Biocarburantes de segunda generación.** El bioetanol producido a partir de materias primas celulósicas, el bio-hidrógeno, *el syngas*, los bio-aceites, el biometanol, el biobutanol o el diésel sintético obtenido a través de la síntesis de Fischer-Tropsch pertenecen a esta categoría. Su producción tiene escasa implantación a escala industrial y se limita a plantas experimentales. Todos los biocarburantes de segunda generación tienen en común el hecho de estar producidos a partir de materias primas con coste nulo, muy reducido o negativo: biomasa lignocelulósicas residuales. A pesar de estar aún en fase de mejora, las tecnologías de producción de biocarburantes de segunda generación se consideran muy prometedoras por su potencial para reducir los costes de producción. Estos costes representan, en la actualidad, una penalización respecto a las fuentes fósiles corrientes y no permiten desvincular la producción de los biocarburantes de las políticas de ayudas económicas y fiscales actualmente existentes. Además, los biocarburantes de segunda generación permiten incrementar el rango de materias primas ya que el uso de material lignocelulósico y residual no compite con el mercado alimentario.
- **Biocombustibles de tercera generación:** Los biocombustibles 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 de ello 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.
- **Biocombustibles de cuarta generación:** Los biocombustibles de cuarta generación 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. La materia prima no sólo se adapta para mejorar la eficiencia de proceso, sino que se diseña para captar más CO₂, a medida que el cultivo crece. Los métodos de proceso (principalmente termoquímicos) también se combinan con tecnologías de captación y almacenamiento de carbono que encauza el CO₂ generado a las formaciones geológicas (almacenamiento geológico, por ejemplo, en yacimientos petrolíferos agotados) o a través del almacenamiento en minerales (en forma de carbonatos). De esta manera, se cree que los biocombustibles de cuarta generación contribuirán más a reducir las emisiones de GEI (gases de efecto invernadero), porque son más neutros o incluso negativos en carbono si

se comparan con los biocombustibles de las otras generaciones. Los biocombustibles de cuarta generación encarnan el concepto de “bioenergía con almacenamiento de carbono”. Los biocarburantes de interés en esta sección son los representados en la Figura 10.75.

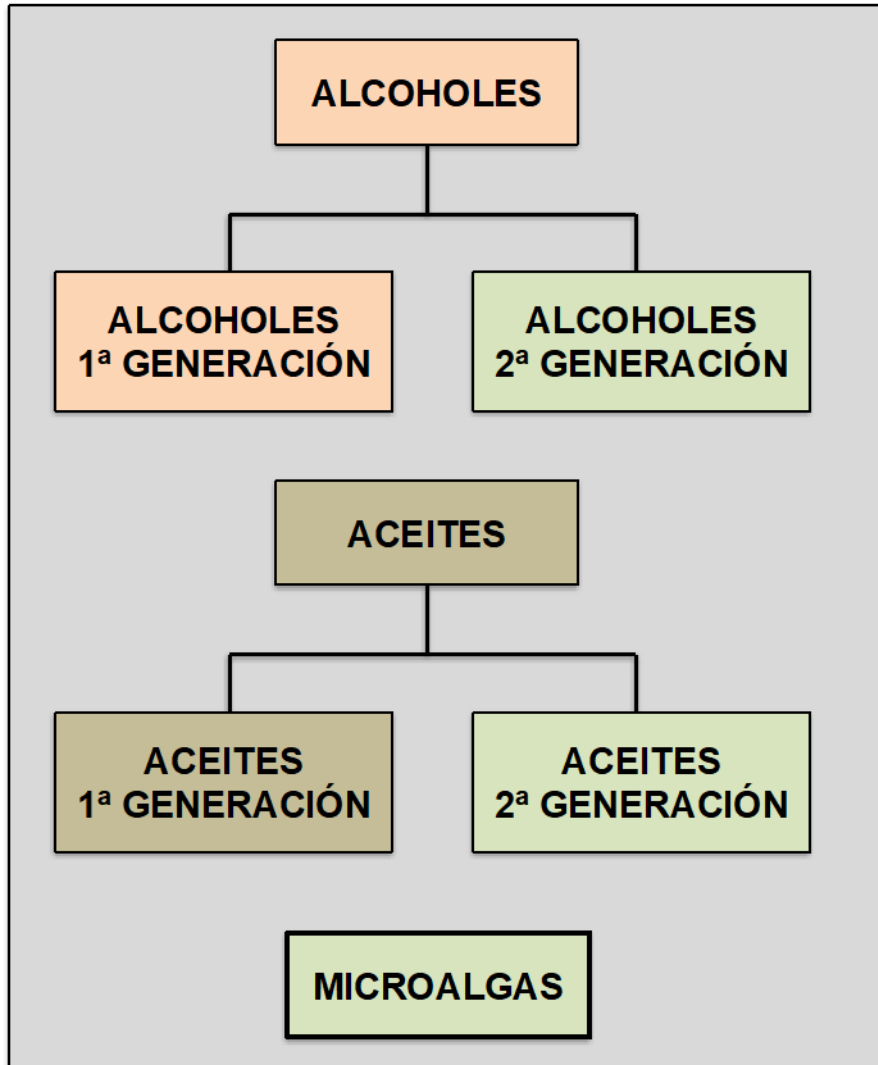


Figura 10.75. Familias de biocarburantes de 1ª y 2ª generación.

Los carburantes de tercera y cuarta generación, no serán objeto del análisis de sostenibilidad.

9.2. BALANCE DE ENERGIA. RENDIMIENTO

Este apartado complementa al extenso y detallado apartado 3, y en particular el subapartado 3.1.3 con una visión de la sostenibilidad de los biocombustibles de primera generación y su entronque con los de segunda generación.

Para mezclar el etanol con gasolina, cuando se utiliza como oxigenante, se requiere etanol de una pureza del 99,5%. El resultado es que cerca del 30 % del costo energético de producir etanol en una planta industrial viene representado por el costo del propio cultivo mientras que la destilación (1.430 kcal/litro de etanol producido) supone casi el 40% del costo del proceso industrial que asciende a 3.800 kcal por litro de etanol que, sumadas a los 1.640 kcal/litro del costo del cultivo arrojan un total de

5.435 kcal/litro de etanol (que es una estimación conservadora del costo energético total de producir etanol a partir del maíz).

La evaluación de estos valores siempre es muy subjetiva ya que muchos factores pueden favorecer o empeorar los valores Así en la Tabla 10.74 se compara maíz y caña de azúcar en cuanto a producción de etanol, con valores algo distintos a los que se comentaron en el apartado 3.1.3 de este mismo capítulo.

Tabla 10.74. Balance de producción de etanol a partir de maíz y caña de azúcar.

Bioetanol	Maíz kcal/l	Caña azúcar kcal/l
Cultivo	1.640	708
Proceso industrial	3.800	3.899
Total	5.440	4.607
PCI etanol	5.222	5.222
Rendimiento	0,96	1,13

Ello es consecuencia de que el balance energético es un elemento crítico y, a veces de crítica, en los biocarburantes. La tabla anterior muestra el balance energético del bioetanol procedente de la caña de azúcar y del maíz. En principio parece mejor la de este último pero hay que tener en cuenta los subproductos (el bagazo en el caso de la caña de azúcar). El bagazo es una biomasa formidable que si se usa como combustible de manera paralela, da un vuelco al balance energético, es decir mejora el rendimiento.

El rendimiento es la relación entre la energía utilizada en el proceso productivo y la energía producida por el biocarburante. En general, cuanto más grande es esta relación mayor es el beneficio energético asociado al biocarburante en cuestión.

La Tabla 10.75. lleva a cabo una comparación de rendimientos entre los principales tipos de etanol y de biodiésel, teniendo en cuenta la energía que puede generar el subproducto.

Tabla 10.75. Rendimientos con o sin subproductos. (Fuente Universidad de Siena y elaboración propia).

RENDIMIENTO	Sin subproductos	Con subproductos
Bioetanol maíz	1,10	2,30
Bioetanol de caña	0,90	5,60
Bioetanol de remolacha	1,10	2,20
Bioetanol de sorgo	1,30	12,40
Bioetanol lignocelulósico	1,80	5,60
Biodiésel de colza	1,70	3,00
Biodiésel de girasol	2,00	3,10

Aceite puro colza	1,80	3,40
Aceite puro girasol	2,80	4,30

Esta tabla complementa, en algunos productos, a la que se presentaba en la Tabla 10.13 de este mismo capítulo. También difiere en algunos de los productos comunes de ambas tablas porque corresponde a otros autores y lo más importante es más reciente, y por ello, en general, presenta mejores rendimientos, en gran parte por las mejoras que se han conseguido en la tecnologías y procesos.

9.2.1 Balance energético y rendimiento de los alcoholes

El bioetanol es el alcohol etílico (o etanol) producido por la fermentación de los azúcares presentes en la biomasa. Se caracteriza por su elevado contenido energético (7,70 kWh/kg o 27 MJ/Kg). Tiene un comportamiento muy similar al de la gasolina, lo que unido a su poder antidetonante hace posible su uso en la alimentación de motores de ciclo Otto.

La evaluación del balance energético de los biocarburantes, entendido como la relación que hay entre contenido energético del combustible (output) y la energía absorbida por el proceso (input), resulta fundamental para entender la sostenibilidad energética del bioetanol.

El balance energético puede variar enormemente dependiendo del modo en que se elabore. Mientras que la energía contenida en el biocarburante se calcula inequívocamente por su poder calorífico inferior, la cuantificación de la energía necesaria para producir el biocarburante puede contemplar variables diferentes, como la síntesis de los productos fitosanitarios o la incidencia de la logística y el transporte. Además, el cálculo puede sufrir variaciones sustanciales dependiendo de la estrategia de valorización de los subproductos. El balance energético del bioetanol depende del tipo de materia prima empleada, ya que cada una de ellas tiene un proceso de producción diferente. Por ejemplo, la fase agronómica de la producción de bioetanol a través de la remolacha absorbe 7,8 MJ/kg (en un rango de entre 3,7 MJ/kg y 11,9 MJ/kg), es decir de 1,02 a 3,30 kWh/kg. El total del proceso se halla en la Tabla 10-76.

Tabla 10.76. Energía precisa para obtener etanol a partir de la remolacha azucarera.

REMOLACHA AZUCARERA		
Energía fase cultivo	kWh/kg (max)	kWh/kg (min)
Cultivo (fertilizantes, pesticidas, etc.)	1,00	3,33
Proceso de extracción	1,42	1,47
Fermentación y destilación	1,67	1,75
Deshidratación	0,92	0,97
Otros	0,25	0,31
TOTAL	5,25	7,83
PCI etanol	7,70	7,70
Rendimiento	1,47	0,98
Rendimiento medio	1,22	

De acuerdo con las fuentes consultadas la demanda de energía para la producción del etanol es variable y da lugar, obviamente, a diferentes rendimientos. Tomando un valor

correspondiente a la media aritmética, el rendimiento “medio” podría establecerse en 1,22, valor que coincide sensiblemente con el aparecido en la tabla anterior.

9.2.2 Biodiésel. Procedencia y rendimientos

Existe una gran variedad de materias primas válidas para la producción de biodiésel, que contienen los triglicéridos necesarios para producir los ésteres. Las principales materias primas empleadas para este fin son:

- Aceites vegetales convencionales: girasol, colza, palma, coco, soja.
- Aceites vegetales alternativos: *cynara curdculus*, *brassica carinata*, *camelina sativa*, *crambe abyssinica*, *jatropha curcas*, ricino, pogianus.
- Aceites de semillas modificadas genéticamente: girasol de alto oleico.
- Grasas animales: sebo de vaca, sebo de búfalo, grasa de pescado, grasa de pollo.
- Aceites usados de fritura.
- Otras fuentes: microalgas, producciones microbianas.

El biodiésel es un carburante compuesto por ésteres metílicos de ácidos grasos de cadena larga obtenidos de aceites vegetales o grasas animales, que se caracteriza por su elevada densidad energética: 10,278 kWh/kg. El éster metílico es el producto de la reacción de un alcohol de cadena corta (por ejemplo, metanol o etanol) con un aceite graso (triglicérido), cuyo resultado es la formación de glicerol (glicerina) y de esteres de ácidos grasos de cadena larga. El biodiésel se puede utilizar en estado puro (B100) o mezclado con gasoil.

La sustitución del gasoil por el biodiésel conlleva importantes beneficios ambientales en términos de contaminantes emitidos a la atmosfera durante la combustión. En particular, en la combustión del biodiésel se emiten menos cantidades de monóxido de carbono, partículas, sulfatos, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos no quemados. El uso del biodiésel permite un ahorro de emisiones de CO₂ del rango de 40/60% respecto al gasoil convencional.

La Tabla 10.77 muestra un ejemplo comparativo de las emisiones de GEI, partiendo del parámetro que el vehículo consume la misma energía por unidad recorrida con independencia de que sea de gasoil (fósil, reducido a la fórmula C₁₂H₂₆) o biodiésel

Tabla 10.77. Comparativa de emisiones en transporte.

CONSUMIENDO GASOIL		
Consumo coche	0,07	l gasoil/km
Distancia recorrida	5.000	Km
Consumo gasoil	350	l gasoil
Densidad gasoil	0,832	kg/l
Consumo gasoil	291	Kg
PCI gasoil	10.998	kcal/kg
Energía consumida	3.202.622	Kcal
Emisión CO ₂	904,4	kg CO ₂
Emisión unitaria	180,9	g CO ₂ /km
CONSUMIENDO BIODIÉSEL		

PCI biodiésel	8.909	kcal/kg
Consumo	359	Kg
Emisión CO ₂ (*)	1.022	kg CO ₂
Emisión unitaria (*)	204	g CO ₂ /km
(*) Se trata de emisión neutra		
Incremento consumo combustible	23%	
Incremento emisión CO ₂	13%	

Para simplificar los cálculos se supone que el biodiésel consta, exclusivamente de ácido linoléico: C₁₉H₃₄O₂ (por lo general este componente es el mayoritario pero, el resto de componentes hacen aumentar el PCI, por lo que la emisión de CO₂ no sería tan grande). En cualquier caso la tabla concluye que:

- Con el uso de biodiésel, el consumo de combustible aumenta (Ello es debido a que el PCI del biocombustible es inferior).
- Con el uso de biodiésel, la emisión de CO₂ también aumenta.

Sin embargo hay que tener en cuenta:

- Las emisiones de CO₂ del biodiésel son neutras.
- No emite SOx.

La sostenibilidad del cambio de uso estriba, precisamente, en determinar la cantidad de CO₂ de origen fósil (fabricación de fertilizantes, fitosanitarios, fabricación del biodiésel en la planta, etc.). De hecho el ahorro de CO₂ puede ser del 50%, o más, si se emplea el subproducto para acometer los gastos energéticos de obtención del biocombustible en la propia planta.

Procedencia del aceite

El biodiésel se puede producir a partir de aceites vegetales obtenidos por cultivos energéticos oleaginosos, grasas animales y vegetales usados de origen alimentario y grasas o aceites vegetales recuperados mediante recogida selectiva.

En las latitudes de la península ibérica los cultivos generalmente empleados para la producción de biodiésel son la colza, el girasol y, en menor medida, la soja. El cultivo de mostaza etíope (*Brassica Carinata*) se encuentra en fase experimental, pero resulta prometedor para las regiones más meridionales de la península por sus reducidas necesidades hídricas y por su adaptabilidad a los terrenos de cultivo. Los aceites vegetales usados en la producción de biodiésel, provienen de la preparación y conservación de alimentos, del sector de la restauración, de las industrias agroalimentarias y del sector doméstico.

Las grasas animales residuales y las grasas recicladas tienen un nivel mucho más alto de ácidos grasos libres. Si las grasas son de buena calidad (15% de ácidos grasos), se suelen utilizar en la producción de comida para animales y mascotas. Sólo si son de mala o muy mala calidad (entre 50 y 100% de ácidos grasos) se utilizan para la producción de biodiésel. Las grasas intermedias (entre 15% y 50 de ácidos grasos) presentan algunas dificultades en su proceso de conversión a biodiésel que se pueden resumir en: presencia de emulsiones difíciles de romper, presencia de arena, alto contenido de agua, color y olor muy persistentes que pueden afectar a la producción final de biodiésel.

El mayor requerimiento energético se da en la producción de fertilizantes y en la conversión industrial del producto, con diferencia respecto a los otros determinantes

del total. En el caso del girasol, el coste energético de la conversión industrial suma el 41% del total (14% para la colza). En el caso de los fertilizantes, estos representan más del 65% del total del coste energético en el caso del biodiésel producido con colza y del 30% en el caso de producirse con girasol.

El biodiésel con un poder calorífico inferior medio de 10,27 kWh/kg (37 MJ/kg) muestra un balance energético positivo de 2,0 si es producido con girasol y de 1,7 si se produce con colza. El balance mejora a 3,1 (en el caso del girasol) y 3,0 (en el caso de la colza) si en el cálculo total de los outputs se incluye el contenido energético del subproducto (*expeller*), de las harinas y de los residuos de los cultivos.

9.3. COMBUSTIBLES DE 2º GENERACION

La diferencia entre los biocombustibles de primera y de segunda generación estriba en el hecho de que los de segunda generación se pueden producir a partir de una amplia gama de materias primas. Estas materias primas están representadas, por lo general, por cultivos no alimenticios y residuales. Se pueden utilizar, por ejemplo, residuos agrícolas, que comprenden todas las partes de los cultivos alimentarios o industriales. Constituyen una serie muy heterogénea de materias primas, cuyo denominador común es la gran dificultad de eliminación. Algunas de las materias primas que se pueden emplear incluyen las siguientes:

- CDR: Combustibles Derivados de Residuo, procedentes del RSU u otros.
- raíces, hojas o frutos no aprovechables.
- tallos, y en general, la parte aérea de la planta que es preciso separar para facilitar la recolección o las labores agrícolas. Una parte considerable de estos residuos herbáceos (por ejemplo, pajas de leguminosas y algunas de cereal o residuos verdes de cultivos como remolacha azucarera o ciertos residuos de huerta) son consumidos por el sector ganadero.
- residuos lignocelulósicos que se suelen quemar en las propias tierras de labor. A esta categoría de residuos corresponden las pajas de los cereales, el grano y el cañote de maíz algunos cultivos industriales como los textiles y oleaginosas (girasol, algodón) y la poda anual de frutales y viñedos (sarmientos).

9.3.1 Biometanol

El biometanol se diferencia del metanol tradicional por la materia prima utilizada para su producción. Mientras que el metanol tradicional es obtenido mediante el proceso de conversión catalítica a partir de un combustible fósil (generalmente gas natural), para el biometanol se usa biomasa lignocelulósica.

La gasificación de la biomasa, con la conversión catalítica de los gases obtenidos (CO y H₂), es el proceso más usado para la producción del biometanol. La reacción para la producción de biometanol se da a altas temperaturas (alrededor de los 400 °C) y presión (40-80 atm). Dadas las propiedades del biocombustible, muy parecidas a las del bioetanol, el biometanol se puede utilizar en los motores de ciclo Otto y Diésel.

El metanol del medio ambiente puede provenir de fuentes naturales y actividades humanas. Según los datos de fugas comunicadas a *United States Toxics Release Inventory* (TRI, Inventario de fugas de sustancias tóxicas de EE.UU.), se libera más metanol en el aire que en ningún otro entorno medioambiental, aunque parte del metanol también se distribuye en el agua.

El metanol atmosférico procede principalmente de fuentes industriales. El metanol se degrada por foto oxidación y sufre degradación aerobia y anaerobia por medio de mecanismos biológicos. Tiene baja toxicidad para la mayoría de los organismos acuáticos y se considera que no se acumula biológicamente de manera significativa en peces.

La emisión de agentes contaminantes de automóviles que funcionen con metanol reduciría un 20 % el CO₂ y 10 % de los diferentes hidrocarburos que actualmente emiten los vehículos que utilizan gasolina. Empleando metanol, los automóviles eliminarían casi por completo las emisiones de partículas en suspensión y compuestos tóxicos tales como: óxido de nitrógeno (NO), ozono (O₃), hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre (SO₂) entre otros.

Tanto en las mezclas con etanol, como en las que se emplean grandes porcentajes de metanol, la generación de ozono es mucho menor.

9.3.2 Biodimetiléter (bio-DME)

El biodimetiléter es el dimetil éter obtenido de la biomasa. En el proceso productivo del bio-DME se usa la gasificación de la biomasa lignocelulósica para producir biometanol que se convierte sucesivamente en bio-DME. En la actualidad, se están optimizando algunas tecnologías que permiten la transformación directa del *syngas* en bio-DME. Tomando en consideración las propiedades fisicoquímicas del bio-DME, éste es indicado para la sustitución del gasoil en los motores de ciclo Diésel.

9.3.3 Biocarburantes sintéticos

Pertencen a esta categoría los hidrocarburos sintéticos o las mezclas de hidrocarburos sintéticos producidos a través de la biomasa. El proceso más conocido para la conversión energética de la biomasa lignocelulosa en biocarburantes líquidos es la síntesis de Fischer-Tropsch, que se usó en gran escala en Alemania durante la segunda guerra mundial (como materia prima se usaba, básicamente, carbón).

El proceso Fischer-Tropsch comprende la gasificación de la biomasa lignocelulósica, la limpieza y acondicionamiento del gas producido y la consiguiente conversión en biocarburantes líquidos. Los productos líquidos se constituyen por hidrocarburos de cadena lineal y no contienen compuestos de azufre, pudiendo ser convertidos en combustibles para el sector transporte.

El diésel Fischer-Tropsch puede producirse directamente, pero se obtienen rendimientos más elevados si se pasa por un producto intermedio que es sucesivamente transformado a través de un proceso de hidrólisis. Este diésel tiene características parecidas al diésel de origen fósil, en cuanto a poder calorífico inferior, densidad y viscosidad y puede sustituir este carburante en los motores de ciclo Diésel.

La alternativa al proceso Fischer-Tropsch es la gasificación y síntesis catalítica del metanol directamente a partir del *syngas*. Este es el proceso desarrollado por la empresa canadiense ENERKEM que ya en 2015 se hallaba en fase de producción industrial. La Tabla 10.78 presenta el rendimiento energético de este metanol a partir de CDR de RSU.

Tabla 10.78. Rendimiento energético del metanol a partir de CDR.

RENDIMIENTOS ENERGÉTICOS			
	kcal/l alcohol	kWh/l alcohol	Rendimiento
Etanol (caña azúcar)	4.807	5,59	
Etanol (maíz)	5.230	6,08	
Etanol (remolacha)	4.755	5,53	
PCI etanol	5.222	6,14	1,02
Metanol de CDR (gasificación)	1.089	1,27	
PCI metanol	3.989	4,64	3,66
Biodiésel (Girasol)	2.615	3,04	
Biodiésel (Colza)	3.076	3,58	
PCI (Biodiésel medio)	7.839	9,12	2,75

Obsérvese que en la literatura se denomina metanol (no biometanol) ya que se ha producido a partir de CDR procedente de los residuos urbanos (RSU). Por tanto este tipo de residuo contiene una cantidad notable de plásticos (combustible fósil) y no sería técnicamente correcto denominarlo biometanol. El destino de los CDR suele ser la incineración en hornos de clínker o el vertedero. Con su transformación a biocombustible, se da al residuo otra oportunidad y, sobretodo, se reducen las emisiones netas de GEI.

Lo más destacable es que el rendimiento energético del metanol de segunda generación es muy superior a cualquier combustible de primera generación.

9.4. CUÁLES SON LOS CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD PARA EVALUAR LOS BIOCOMBUSTIBLES

No existe, por el momento, un protocolo definido y oficial para evaluar la sostenibilidad energética y, en general, ambiental de los biocombustibles. Sin embargo son válidos los siguientes principios:

- Exigencias de reducción mínima de gases de efecto invernadero (GEI)
- Protección de la biodiversidad
- Protección de las reservas de carbono
- Condicionalidad agraria
- Consecuencias sobre la sostenibilidad social
- Sostenibilidad de otros usos energéticos de la biomasa

Estos criterios de sostenibilidad tendrán una repercusión directa sobre el proceso productivo de los biocombustibles desde el cultivo de la biomasa energética hasta su transformación en las plantas de producción y uso final.

9.4.1. Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (gei)

De acuerdo con las directrices que emanan de la UE, los biocombustibles y biolíquidos deberán reducir como mínimo un determinado porcentaje de la emisión de GEI en

comparación con los carburantes fósiles a los que sustituyen según las especificaciones aparecidas en la Tabla 10.79.

Tabla 10.79. Calendario propuesto de reducción de GEI en biocarburantes

CALENDARIO ESTABLECIDO	% MÍNIMO DE REDUCCIÓN DE GEI
26 de diciembre de 2009 (Entrada en vigor) 1 de abril de 2013 para plantas operativas anteriores a 23/01/2008	35%
1 de enero de 2017	50%
1 de enero de 2018 para plantas posteriores a 01/01/2017	60%

Este es el único criterio exigido a los biocarburantes procedentes de aceites usados y grasas animales.

El gráfico de la Figura 10.76 muestra los valores por defecto de reducción de GEI para los biocarburantes usualmente comercializados en la actualidad.

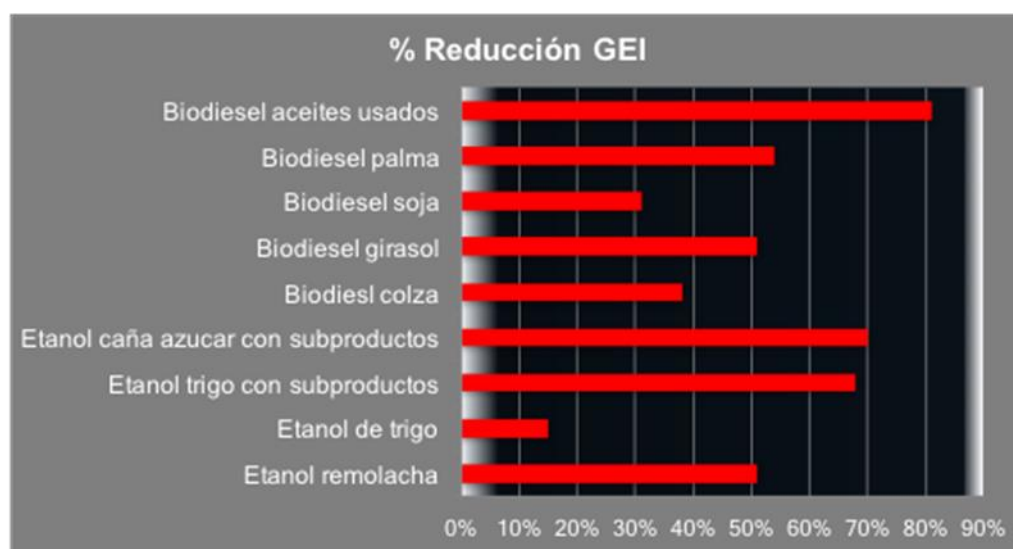


Figura 10.76. Porcentaje de reducción de GEI en biocombustibles.

Como pone en evidencia el gráfico, la tasa de sustitución mejora en la medida en que se aprovechan los subproductos.

9.4.2 Otros criterios de sostenibilidad

Existen un sin fin de criterios de sostenibilidad, sin embargo los más importantes que establece la Comisión son los indicados en los apartados siguientes.

Protección de la biodiversidad

Los biocarburantes y biolíquidos no se producirán a partir de materias primas procedentes de tierras de elevado valor en cuanto a biodiversidad, es decir tierras que a partir de enero de 2008 pertenecían a una de las siguientes categorías, con independencia de que sigan encontrándose en la misma situación:

- Bosques primarios y otras superficies boscosas, es decir, bosques y otras superficies boscosas de especies nativas.

- Zonas designadas por ley o por las autoridades competentes pertinentes con fines de protección de la naturaleza, o para la protección de las especies o los ecosistemas raros, amenazados o en peligro, a menos que se demuestre que la producción de tales materias primas no ha interferido con dichos fines de protección de la naturaleza;
- Prados y pastizales con una rica biodiversidad:
 - naturales, es decir, prados y pastizales que seguirían siéndolo a falta de intervención humana.
 - no naturales, es decir, prados y pastizales que dejarían de serlo a falta de intervención humana, que son ricos en especies y no están degradados, salvo que se demuestre que la explotación de las materias primas es necesaria para preservar su condición de prados y pastizales.

Protección reservas de carbono

Si las zonas con grandes reservas de carbono, en el suelo o en la vegetación, se reconvierten para cultivar materias primas para producir biocarburantes y biolíquidos, una parte del carbono almacenado se liberará normalmente a la atmósfera, formando CO₂. Para impedirlo, los biocarburantes no se fabricarán a partir de materias primas procedentes de tierras que en enero de 2008 pertenecían a una de las siguientes categorías pero que ya no se encuentran en dicha situación:

- A) Humedales
- B) Zonas arboladas continuas, es decir tierras con una extensión superior a una hectárea, con árboles de una altura superior a cinco metros y una cubierta de copas superior al:
 - 30 %.
 - 10 % y el 30 %, salvo si se aportan pruebas de que las reservas de carbono de la zona en cuestión antes y después de la conversión son tales que cumplen las condiciones establecidas de mantenimiento de reservas de carbono.
- C) Turberas, a no ser que se aporten pruebas de que el cultivo y la recolección de esta materia prima no implican el drenaje de suelos no drenados con anterioridad.

Condicionalidad agraria

Las materias primas agrarias obtenidas en la comunidad deben de cumplir los mismos requisitos de buenas condiciones agrarias y medioambientales exigidas a los cultivos agrícolas de la política agraria comunitaria (condicionalidad agrícola).

Sostenibilidad social

La Comisión, deberá estudiar el impacto de la demanda de biocarburantes sobre la sostenibilidad social de la Comunidad Europea y en terceros países, y el impacto de la política europea de biocarburantes sobre la disponibilidad de productos alimentarios a precios asequibles, especialmente en los países en vías de desarrollo.

Para ello la Comisión deberá remitir un informe al Consejo y Parlamento Europeos cada dos años y a partir de 2012, que deberá incluir información sobre si los principales países productores de materias primas han ratificado e implementado toda

una serie de tratados internacionales sobre los derechos de los trabajadores. Sobre estas cuestiones, la Comisión deberá proponer acciones correctivas, en caso que sean necesarias

Asimismo, respecto a los terceros países que constituyan una fuente importante de biocarburantes o materia prima la Comisión emitirá un informe cada dos años respecto a los criterios de sostenibilidad adoptados por dichos países para proteger suelo, aire y agua.

Sostenibilidad de la biomasa para usos energéticos

La Comisión propondrá en su caso, sobre los requisitos de un sistema de sostenibilidad para los usos energéticos de la biomasa, distintos de los biocarburantes y biolíquidos.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Danesa del Medioambiente. <http://www.mst.dk/homepage>
- ANDRÉ, F.J., de Castro, L.M., Cerda, E. Las energías renovables en el ámbito internacional. UCM. Cuadernos Económicos de ICE. Nº 83, 2012.
- BOYLE, G. Renewable Energy, Power for a sustainable future. Oxford University Press. London. UK.(2004)
- CAMPS, M. Los Biocombustibles. Mundiprensa. Madrid. España. (2002)
- CARRASCO, J. Aspectos Medioambientales de la producción y uso de la biomasa como recurso energético. Encuentro Medio Ambiental Almeriense, España. (1998)
- CARRILLO L., Energía de Biomasa, ISBN 987-43-8679-7, 2004
- CESEFOR, Aprovechamiento forestal para biomasa en la provincia de Soria, I Jornada sobre Bioenergía, 2004
- Complejo de secado y reducción de lodos oleícolas con cogeneración de alta eficiencia y valorización energética de biomasa en Linares (Jaén). InfoEnviro-InfoPower, Julio/Agosto. 2011.
- DE BRITO, Energy from waste: Case study of Brazil. Science Publishers Inc. UK. (2002).
- DE JUANA, J. et al. Energías renovables para el desarrollo. Internacional Thomson Editores, España. (2003)
- Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente de la U. de Zaragoza 2004. <http://wzar.unizar.es/acad/fac/cps/iq/unizar.html>.
- DONATO. Lidia B., Huerga Ignacio R., Hilbert Jorge A., Balance Energético de la producción de biodiésel a partir de soja en la República Argentina. INTA. Nº Doc IIR-BC-INF-08-08.06/11/2008.
http://www.carbio.com.ar/es/pdf/biblioteca/3_Balanceenergeticodelaproducciondebiodieselapartirdesojaenargentina.pdf
- ELIAS, X, Jurado, L. Empleo de biocarburantes a partir de biomasa. Revista Tecnoambiente. Diciembre 2006.
- ELIAS, X. "Reciclaje de residuos industriales". Ed. Díaz de Santos. Madrid ISBN 84-7978-437-7 (2000).
- ELIAS, X. "Tratamiento y valorización energética de residuos". Ed. Díaz de Santos. Madrid (2005).

ELIAS, X., BORDAS, S. "Energía, agua, medioambiente, territorialidad y sostenibilidad". Ed. Díaz de Santos. Madrid (2011).

Energía de la biomasa. IDAE. Enero 2007.

Energy information administration. International Energy Annual 2002. <http://eia.doe.gov>

European Environment Agency. 2006. How much bioenergy can Europe produce without harming the environment.

FARREL, A, et al. Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals. Science, volume 311. (2006).

FIELD, C.B. Behrenfeld, M.J. Randerson, J.T. Falkowski, P.G. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. Science 281: 237-240. (1998).

GONZÁLEZ GARCÍA-CONDE A. Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno. INTA. 2013

GÓMEZ-ACEBO, T. Mezclas reactivas y combustión, tema 10, Tecnun, 2004

GROVER, V., y Hogland, W. Recovering energy from waste. Science Publishers Inc. USA. (2002)

<http://www.energidalen.se/>

Guía de Mejores Técnicas Disponibles para la Valorización del Alperujo en la Obtención de Energía Calórica para las Operaciones de las Plantas Olivícolas. Consejo Nacional de Producción Limpia de Chile. 2102

IDAE. Manuales de energías renovables. Energía de la Biomasa. 1996.

IDAE. Energía de la biomasa. 2007

Banco Interamericano de Desarrollo y BID, MME, MADR, MAVDT, DNP de Colombia. *Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia*, Capítulo II. Proyecto Estrategias de energía sostenible y biocombustibles para Colombia ATN/JC-10826-CO y ATN/JF-10827-CO. Enero 2012

Institut Català d'Energia. Revista Eficiència Energètica N°163, Junio 2003. Barcelona, España. 2003

JARABE, F. Valorización energética de residuos, (2003)

LLAURÓ FÁBREGAS, X. Estudio de la aplicación de sistemas basados en el conocimiento a la operación de una planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos por valorización energética, 2003.

- LOPEZ, E., Arrien, N., Antoñanzas, J., Egizabal, A., Belsue, M., y Valero, J.M, Producción de hidrógeno a partir de residuos mediante fermentación. Ingeniería Química. Pag 175, Abril 2005.
- MELGAR A, Diez A, Lapuerta M, Hernández JJ, Alkassir A. Potencial energético de residuos procedentes de biomasa lignocelulósica en las regiones agrícolas del centro de España. Energía. Mayo-junio, pag 50. 2003.
- MILNE, T.A., Elan, C.C., Evans, R.J. "Hydrogen from biomass: state of the art and resarch challenges. IEA report. IEA/H2/TR-02/001.2001
- NIESSEN, W,R., Combustion and Incineration Processes. Aplicaciones in Environmental Engineering, Marcel Dekker, Inc,1995.
- NOGUÉS, Fernando et al, "Ciclo energías renovables" Jornadas de Biomasa. Generalidades, Fundación CIRCE 2002
- NORBERTO, C. Metodologías para el Análisis Costo-Beneficio de usos del Suelo y Fijación de Carbono en Sistemas Forestales para el Mecanismo de Desarrollo Limpio. Revista SAGPyA Forestal N°25. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. Argentina. (2002)
- ONSITE SYCOM Energy. Cost Analysis of NO_x Control Alternatives for Stationary Gas Turbines. Environmental Programs. U.S. Department of Energy. (1999).
- POSLUSZNY, J.A. Energía de la Biomasa. Tecnologías para emprendimientos de mediana escala
- SCHINGNITZ, M. Gasification – An Oportunity to Design Environmentally Compatible Process in the Chemical and Pulp & Paper Industry. Chemical Engineering & Technology Journal. Volumen 26. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. Alemania. (2003)
- System for the Analysis of Global Energy Markets (2004). World Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions, 1990–2025. <http://www.infoplease.com>
www.consagro.com/articulos2.htm
www.textoscientificos.com/energía/combustible/estudios-calculos

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren mostrar su agradecimiento a aquellos que colaboraron en la edición de 2009 del libro "RECICLAJE DE RESIDUOS INDUSTRIALES, RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y FANGOS DE DEPURADORA": ISBN: 978-84-7978-835-3. 2nd edición. En dicha edición colaboraron una serie de tecnólogos, profesores y especialistas en diversas materias que, por orden alfabético, se relacionan seguidamente:

- ALTADILL COLOMINAS, RAMÓN. Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Cataluña (España). Director Comercial de Electrorecycling SA.
- ANDRES PAYAN; ANA. Doctora en Ciencias Químicas por la Universidad del País Vasco (España).
- ABRUNO, ANA. Ingeniería Técnica Química por la Universidad Politécnica de Cataluña.
- BRUNO SALGOT, JORDI. Doctor en Ciencias Químicas por el Royal Institute of Technology de Estocolmo (Suecia). Consejero delegado de Amphos XXI Consulting SL.
- CANALES ROJAS, ÁLVARO. Ingeniero Forestal por la Universidad Católica de Chile. Asesor en desarrollo sostenible de la minera Anglo American Chile.
- CORTES LUCAS; AMPARO. Doctora en Farmacia por la Universidad de Barcelona. Profesora titular de Edafología y Química de la Universidad de Barcelona.
- DIEZ BERNABE, GLORIA. Arquitecta por la Universidad Politécnica de Cataluña (España). Área de I+D del Instituto Tecnológico de la Construcción de Cataluña.
- FELIUBADALO MOLINS, JOAN. Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Cataluña (España). Área de Medio Ambiente de la Entidad Metropolitana de Barcelona.
- FLOTATS RIPOLL, XAVIER: Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Cataluña (España). Director de GIRO.
- FULLANA PALMER, PERE. Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Ramón Llull (Barcelona). Director del Centro de Investigación de la Escuela Superior de Comercio Internacional (Barcelona).
- GARCIA MARTINEZ, JORDI. Licenciado en Ciencias Químicas por la Universidad de Barcelona. Departamento de Aguas e Industria de Crison Instruments.
- HERRERO MUNICIO, MARIBEL. Ingeniera Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid. Especialista en hormigones poliméricos.
- JURADO GRACIA, LORENA. Licenciado en Ciencias Ambientales por la Universidad de Girona (España). Técnica de Medio ambiente del Consell de Cambres de Comerç de Cataluña (España).
- LOPEZ MARTINEZ, MARGA: Ingeniera Técnica Agrícola por la Universidad Politécnica de Cataluña (España). Profesora de la Escuela Superior de Agricultura de Barcelona.
- MAGRÍ ALOY, ALBERT. Doctor Ingeniero Agrónomo por la Universidad de Lleida (España). Centro de investigación GIRO.
- MAÑA REIXACH; FRUCTUOS. Doctor Arquitecto por la Universidad Politécnica de Cataluña (España). Ex Director adjunto del Instituto de Investigación del Instituto de Tecnología de Construcción de Cataluña.
- MENENDES ARIAS, JUAN. Ingeniero de Minas por la Universidad de Oviedo. Profesor de la Universidad Politécnica de Cataluña (España).
- MOLINA BELTRAN, JORGE. Ingeniero de Minas por la universidad de Santiago de Chile. Ingeniero de negocios del grupo Kiasa-Urbaser (Chile).

- POMBO DA TORRE, SUSANA. Licenciada en Ciencias Químicas por la Universidad de Santiago de Compostela (España). Técnica de medio ambiente de la consultora Adantia SL.
- PUIG VIDAL, RITA. Doctora Ingeniera Química IQS por la Universidad Ramón Llull (Barcelona). Directora de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Igualada (Universidad Politécnica de Cataluña. España).
- RIGOLA LAPEÑA, MIQUEL. Ingeniero Químico. Profesor titular de Ciencias Ambientales de la Universidad de Girona (España).
- ROCA LAMOLLA, MARTA. Economista por la Universidad de Barcelona. Economista en el servicio de Medio Ambiente de la Diputación de Barcelona.
- SOLIVA TORRENTÓ, MONTSERRAT. Doctora en Ciencias Químicas por la Universidad Autónoma de Barcelona. Profesora de la Escuela Superior de Agricultura de Barcelona. (Universidad Politécnica de Cataluña. España)