



BIBLIOTECA
COMILLAS
Ingeniería

12

BIOMASA Y SUS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS APLICADAS

B. YOLANDA MORATILLA
MARÍA URIS
(coordinadoras)

**BIOMASA Y SUS TECNOLOGÍAS
ENERGÉTICAS APLICADAS**
SEMINARIO PERMANENTE EN TECNOLOGÍAS
ENERGÉTICAS

BIBLIOTECA
COMILLAS
Ingeniería

12

PUBLICACIONES
DE LA UNIVERSIDAD
PONTIFICIA COMILLAS

PEDIDOS:
Servicio de Publicaciones
c/ Universidad Comillas, 3
Tel.: 91 734 39 50 - Fax: 91 734 45 70
c.e.: edit@pub.upcomillas.es

AUTORES:

Fernando Mateo – Francisco González
José Ignacio Linares – Alfonso Maillo
Guillermo Moreno – Victor de Ávila
Miguel Cabrera – Miguel Ángel Relaño

BIOMASA Y SUS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS APLICADAS

SEMINARIO PERMANENTE EN TECNOLOGÍAS
ENERGÉTICAS

COORDINADORAS:

BEATRIZ YOLANDA MORATILLA SORIA
MARÍA URIS MAS



Patrocina la Cátedra



2012

Servicio de Biblioteca. Universidad Pontificia Comillas de Madrid

BIOMASA y sus tecnologías energéticas aplicadas / Seminario Permanente en Tecnologías Energéticas ; autores Fernando Mateo, Francisco González, José Ignacio Linares, Alfonso Maillo, Guillermo Moreno, Victor de Ávila, Miguel Cabrera, Miguel Ángel Relafío ; coordinadoras Beatriz Yolanda Moratilla Soria, María Uris Mas. -- Madrid : Universidad Pontificia Comillas : Instituto de Ingeniería de España, 2012.

125 p. : il. y gráficos

Se recogen las actividades del Seminario Permanente sobre biomasa que se llevaron a cabo en el curso 2011-12

Patrocina la Cátedra Iberdrola

Bibliografía

1. Recursos energéticos 2. Energía de la biomasa I. Linares Hurtado, José Ignacio II. Moratilla Soria, Beatriz Yolanda III. Uris Mas, María

Esta editorial es miembro de la Unión de Editoriales Universitarias Españolas UNE, lo que garantiza la difusión y comercialización de sus publicaciones a nivel nacional e internacional.



© 2012 UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
C/. Universidad Comillas, 3
28049 Madrid

© 2012 INSTITUTO DE INGENIERÍA DE ESPAÑA

ISBN : 978-84-8468-464-0

Depósito Legal: M-39968-2012

Diseño de cubierta: BELÉN RECIO GODOY

Fotocomposición: Rico Adrados, S.L.
Abad Maluenda, 13-15 bajo • 09005 Burgos

Impreso por
Rico Adrados, S.L.

Impreso en España - Printed in Spain

Reservados todos los derechos. El contenido de esta obra está protegido por las leyes, que establecen penas de prisión y multas, además de las correspondientes indemnizaciones por daños y perjuicios, para quienes reprodujeran total o parcialmente el texto de este libro por cualquier procedimiento electrónico o mecánico, incluso fotocopia, grabación magnética, óptica o informática, o cualquier sistema de almacenamiento de información o sistema de recuperación, sin permiso escrito de los propietarios del copyright.

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	9
PRÓLOGO	11
RESUMEN EJECUTIVO	13
CAPÍTULO I. Co-combustión	15
<i>Fernando Mateo</i>	
CAPÍTULO II. Gasificación	25
<i>Francisco González</i>	
CAPÍTULO III. Cogeneración con biomasa mediante ciclos Rankine orgánicos	33
<i>José Ignacio Linares</i>	
CAPÍTULO IV. La combustión de los residuos sólidos urbanos	55
<i>Alfonso Maillo</i>	
CAPÍTULO V. Tratamiento de residuos mediante sistema convertidor de plasma	75
<i>Guillermo Moreno</i>	
CAPÍTULO VI. Valorización energética de biomasa y residuos mediante oxidación catalítica en plantas de mediana escala	85
<i>Víctor de Ávila</i>	

BIOMASA Y SUS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS APLICADAS

CAPÍTULO VII. La Biomasa agroforestal en España. Disponibilidad de recursos y potencial de desarrollo	95
<i>Miguel Cabrera</i>	
CAPÍTULO VIII. Nuevos Usos Térmicos de la Biomasa	115
<i>Miguel Ángel Relañó</i>	
BIBLIOGRAFÍA	125

PRESENTACIÓN

El Comité de Energía y Recursos Naturales del Instituto de la Ingeniería de España y la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas de la Universidad Pontificia Comillas decidieron en 2006 aunar sus esfuerzos y establecer el “Seminario Permanente en Nuevas Tecnologías Energéticas”. Se trata de un foro de reflexión y debate sobre soluciones energéticas aplicables, de actualidad, que se desarrolla mediante varias conferencias y mesas redondas a lo largo de un curso académico.

El Seminario cubre un tema de interés y actualidad en el ámbito de las Tecnologías Energéticas y para ello invita a profesionales y académicos de reconocido prestigio a que impartan conferencias sobre las diferentes aproximaciones al tema central escogido, pasando seguidamente a establecer un debate con los asistentes. Entre los objetivos que los organizadores nos hemos marcado en este Seminario se encuentra que el enfoque de los temas abordados sea eminentemente práctico, es decir, se centre en las tecnologías técnica y económicamente viables, comparando desde estos puntos de vista las diferentes alternativas y seleccionando las más interesantes para su aplicación tanto en el contexto internacional como en España. Este planteamiento no es incompatible con el rigor científico, sino que trata de combinarlo con el enfoque aplicado que busca el sector empresarial, con el objetivo de lograr un máximo calado y dar sugerencias a los responsables de gestionar la energía en España.

Se han abierto dos vías para alcanzar la repercusión deseada en estas sesiones de reflexión. Por una parte se ha dispuesto una página web pública accesible tanto desde el Comité como desde la Cátedra en la que se recogen las presentaciones de los diferentes ponentes. De este modo en un plazo casi inmediato es posible analizar la información dada en cada sesión. Por otra parte se elabora una publicación que recoge toda la actividad del curso y que se realiza a partir de una transcripción de las conferencias, que una vez mon-

tada con las figuras más relevantes de las presentaciones es revisada por los ponentes. Esta publicación se elabora tanto en versión papel como digital.

Este volumen es la sexta publicación del Seminario Permanente y recoge las actividades que tomando como centro la biomasa se llevaron a cabo en el curso 2011-12. Se realizaron tres sesiones en las que ocho ponentes analizaron la generación eléctrica con biomasa, la recuperación energética de los residuos sólidos urbanos y los usos térmicos de la biomasa y disponibilidad de recursos.

Tanto desde el Comité de Energía y Recursos Naturales como desde la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas esperamos que esta información resulte útil a la sociedad y contribuya a dar elementos y criterios de juicio a los responsables del ámbito energético, tanto de la Administración como del sector empresarial.

YOLANDA MORATILLA SORIA

Presidente del Comité de Energía y Recursos Naturales

Instituto de la Ingeniería de España

PRÓLOGO

La biomasa y los residuos son en estos momentos una de las energías renovables que mas interés suscitan, nacional e internacionalmente. El amplio abanico de recursos y aplicaciones que constituyen el área de la biomasa y residuos son la base de este interés, ya que sus posibilidades de aportación tecnológica al nuevo escenario energético que se está conformando actualmente son enormes. En este sentido, cabe destacar el acierto de los temas que se tratan en esta publicación y que son una buena muestra de las tecnologías ya disponibles para proyectos de interés con proyección de futuro.

En este momento de cambios, en el que se están sentando las bases para cumplir con los importantes retos energéticos, medioambientales y sociales que nuestra sociedad tiene planteada, el apostar por la biomasa y los residuos es sin duda una opción segura, ya que además de ser una fuente renovable de energía, con todas las ventajas que ello implica, tiene como valores añadidos destacables el colaborar en el mantenimiento de nuestras masas forestales, disminuir el riesgo de incendios y generar empleo sostenible. A todas estas ventajas hay que añadir el alto potencial de biomasa disponible en España, listo para ser aprovechado, como demuestra la herramienta informática de evaluación de recursos que también forma parte del contenido de esta publicación y que está teniendo una gran acogida desde que esta disponible para su uso.

Finalmente destacar mi satisfacción por la importancia que en mi opinión tiene el acercar la universidad y por tanto nuestros futuros profesionales, a la realidad de las tecnologías y los mercados, por lo que la labor editorial de la que esta publicación es un ejemplo merece el reconocimiento actual y el apoyo suficiente para que siga siendo un referente en el futuro.

FIDEL PÉREZ MONTES
Director General IDAE

RESUMEN EJECUTIVO

La demanda de recursos y el consumo creciente de energía de manera intensiva per cápita ha motivado el desarrollo de políticas en el área de generación de formas eficientes de energía. Ante la situación actual de dependencia energética en Europa que supera el 50%, la Unión Europea ha impuesto la estrategia 20-20-20, consistente en reducir las emisiones de CO₂ un 20% mientras se incrementa la eficiencia otro 20% y se consigue que el 20% del consumo energético quede cubierto por energías renovables. Una de las alternativas para alcanzar el 20% del consumo energético por energías renovables es el aprovechamiento de las fuentes de calor de baja temperatura entre las que se encuentra la producción de calor y electricidad a partir de biomasa y residuos sólidos urbanos (RSU).

Los capítulos I, II y III abordan las distintas tecnologías para la producción de calor y electricidad a partir de biomasa. Las tecnologías disponibles actualmente para el uso de la biomasa como combustible son la co-combustión, la gasificación y los ciclos orgánicos de Rankine (ORC). La co-combustión de biomasa con carbón reduce las emisiones de SO₂, consigue un balance neto casi nulo de CO₂ y presenta ventajas como aumentar la independencia energética aunque por el momento tecnológicamente solo permite porcentajes bajos de sustitución y los tratamientos de la biomasa son más costosos que los del carbón. En la gasificación se produce un gas de síntesis susceptible de ser utilizado en calderas y con un poder calorífico inferior aproximado a la sexta parte del poder calorífico inferior del gas natural, pero la inversión necesaria sigue siendo demasiado elevada. En cuanto a los ORC, es una tecnología que ha alcanzado la madurez tecnológica, presenta unos costes de mantenimiento bajos, tiene un alto grado de automatización, equipos más compactos comparado con el agua, las presiones de trabajo no superan los 40 bar y por las características de los fluidos es posible trabajar siempre por encima de la presión atmosférica.

En los capítulos IV, V y VI se trata la gestión de los RSU en España, en especial la fase última que comprende el tratamiento y su valorización energética. Hasta hace unos años, el método de tratamiento elegido como alternativa al vertido controlado de los RSU era el de la incineración sin aprovechamiento térmico, pero ésta, además de producir un gran rechazo social, ha quedado obsoleto con la aparición de innovadoras tecnologías mucho más seguras y respetuosas con el medio ambiente. Las tecnologías disponibles de valorización de los RSU son la combustión, el sistema convertidor de plasma y la oxidación catalítica.

En el capítulo VII se presenta los resultados obtenidos en la elaboración del programa desarrollado para el PER 2011-2020 del IDAE y que muestran el potencial disponible de biomasa en España de acuerdo con sus distintos orígenes y a las posibilidades de introducción en el mercado energético en función de los costes estimados para su producción y disposición en el mercado.

Por último, en el capítulo VIII, se analizan las aplicaciones térmicas con producción de calor y agua caliente sanitaria como también la generación eléctrica, dentro del sector de la biomasa de origen agroforestal.

CAPÍTULO I

CO-COMBUSTIÓN

Fernando Mateo
IBERDROLA

1. INTRODUCCIÓN

La co-combustión consiste en quemar cierta cantidad de biomasa en centrales cuyo combustible principal es el carbón. La motivación es fundamentalmente medioambiental, ya que la biomasa es considerada neutra en emisiones de CO₂.

En España la tecnología está probada, y en ciertos países, fundamentalmente del norte de Europa, existen instalaciones que la usan habitualmente.

La principal ventaja de la co-combustión frente a centrales dedicadas de biomasa es que la mayor parte de las inversiones ya están hechas: ya existen los elementos principales como son la caldera o la turbina de vapor.

No obstante, también existen desafíos, de abastecimiento y tecnológicos, que serán analizados a lo largo de este artículo.

Para finalizar se describirán las pruebas a escala real llevadas a cabo en la central térmica de Velilla del Río Carrión, propiedad de Iberdrola.

2. EVALUACIÓN DE UN PROYECTO DE CO-COMBUSTIÓN CON BIOMASA

Los principales aspectos a considerar a la hora de decidir consumir biomasa en centrales de carbón son los siguientes (Figura 1):

1. *El abastecimiento de biomasa*: debe existir garantía de suministro y a un precio que sea competitivo frente al carbón y sus costes asociados (coste del CO₂), teniendo en cuenta el coste de mantenimiento in-

cremental que supone la utilización de biomasa. La disponibilidad de biomasa es probablemente el aspecto más importante a considerar.

2. *La capacidad de la instalación existente para el manejo y combustión de biomasa y en su caso las modificaciones necesarias en la misma.* El porcentaje de biomasa a quemar es el factor determinante, ya que a mayores cantidades de sustitución de carbón por biomasa mayores inversiones suelen ser necesarias: sistemas de molienda, sistemas de combustión, modificaciones en la caldera, etc. Normalmente, para porcentajes de biomasa entre el 5% y el 10%, el sistema crítico es el de molienda. En efecto, la mayoría de las centrales de carbón existentes (en el caso de Iberdrola su totalidad), son de carbón pulverizado. En ellas el carbón, que llega a la central con granulometría gruesa, debe ser pulverizado para poder ser quemado en la caldera. El problema que presenta la biomasa es que contiene fibras en su estructura (no es frágil), y es por tanto muy complicado pulverizarla en molinos adecuados para carbón. Por este motivo debe disponerse de sistemas de molienda diferentes específicos para el tipo de biomasa a utilizar.
3. *Afecciones de la combustión de biomasa a equipos de la central* como son la corrosión de tubos, modificación de perfiles de temperaturas en la caldera, posible contaminación de las cenizas, variación de la eficiencia de la central, etc. Estos problemas suelen ser pequeños o incluso despreciables cuando el porcentaje de biomasa se sitúa por debajo del 5% al 10%, y pueden convertirse en un factor crítico en valores superiores. Depende mucho del tipo de central considerada.

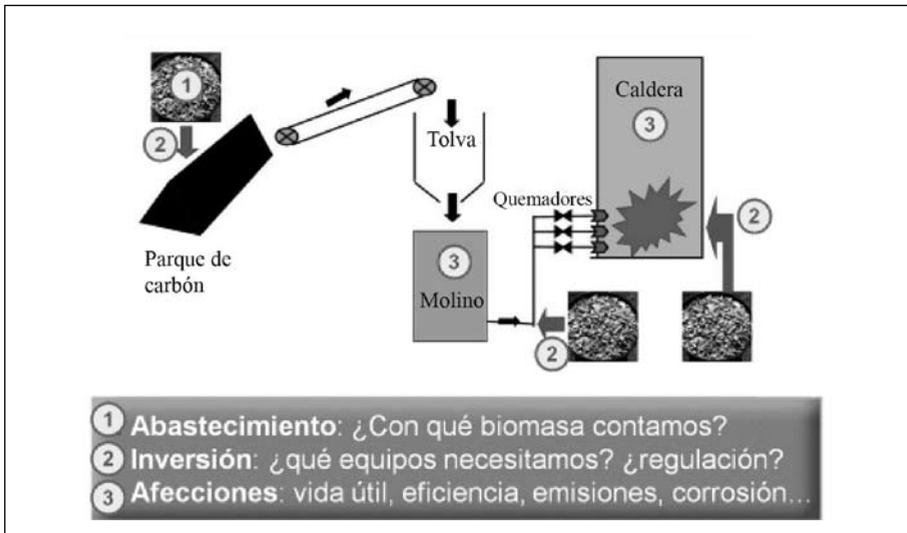


Figura 1: Evaluación proyecto co-combustión. (Fuente: Elaboración propia).

3. ABASTECIMIENTO DE BIOMASA

El abastecimiento de biomasa es un aspecto complejo que determina la viabilidad de un proyecto de co-combustión.

En primer lugar, hay que decidir qué tipo de biomasa se va a consumir. Por biomasa se entiende distintos productos como son los cultivos energéticos, paja de cereal o residuos forestales, por ejemplo. Cada uno de los tipos compete en mercados totalmente diferentes que influyen en la disponibilidad y en el precio. Por ejemplo, en el caso de la paja de cereal se compete con el mercado ganadero. Si el año es poco lluvioso, la demanda para ganadería será superior a la oferta y por ello subirá el precio. Por el contrario, si el año ha sido muy lluvioso, su precio disminuirá significativamente. En el caso de la biomasa de origen forestal, se compete con la industria maderera y dependerá de la situación del mercado de muebles, por ejemplo.

Por todo ello una alternativa muy interesante para la producción eléctrica son los cultivos energéticos.

Otro aspecto a decidir es el formato: pacas de paja, serrín, pellets o astillas de madera. Dependiendo del grado de pretratamiento las instalaciones necesarias en la central serán más o menos costosas, y el precio de suministro también variará significativamente. La elección por tanto dependerá del grado de disponibilidad y del nivel de sustitución deseado.

Los estudios necesarios para evaluar la existencia o no de biomasa en una zona son numerosos y deben considerar numerosos aspectos:

- Pendientes del terreno, que facilitan o dificultan la extracción de la biomasa.
- Redes de comunicación. Hay que tener en cuenta que la biomasa presenta frecuentemente una baja densidad energética (entre el 50 % y el 70% del poder calorífico del carbón) y una menor densidad, entre un 20-25% la densidad del carbón, por lo que para suministrar la misma cantidad de energía se necesita hasta 10 veces el volumen del carbón. Por ello, el transporte de biomasa es más costoso (por unidad de energía transportada) que el transporte del carbón. Es muy importante por tanto tener en cuenta dónde está el origen de la biomasa y dónde está el centro de generación.
- Zonas protegidas medioambientalmente

La mayor parte de los centros de generación con carbón en España están agrupados, lógicamente, cerca de las cuencas mineras. La biomasa local por la que competirían abarcaría zonas solapadas, lo cual supone una dificultad de abastecimiento. Un 5-10% de sustitución del parque de generación de España supondría 2 millones de toneladas al año de biomasa, que es una can-

tividad muy elevada teniendo en cuenta la complejidad y coste del transporte de biomasa.

Económicamente, es frecuente que, considerando el coste de la logística (biomasa “puesta en central”), y las inversiones necesarias para su pretratamiento y manejo, la biomasa sea más cara que el carbón en términos energéticos, aunque como se ha comentado con anterioridad su precio es volátil y dependiente de condicionantes locales, estacionales etc. En la mayor caso de los proyectos, aunque se evitan los costes de emisiones de CO₂, el uso de biomasa en co-combustión incrementaría el coste de generación: es por tanto necesaria una prima para que un proyecto de co-combustión sea rentable.

4. RETOS TECNOLÓGICOS

Técnicamente es necesario evaluar diferentes aspectos antes de acometer un proyecto de co-combustión

- Corrosión en los tubos de caldera debido a mayor contenido de cloro de algunas biomásas
- Posibilidad de aumento de escoria en los tubos de la caldera
- Pérdida de rendimiento: de media se pierde una media de 1% de rendimiento por cada 10% de sustitución
- Posibilidad de contaminación de las cenizas en algún tipo de biomasa.
- Posibilidad de producirse incrementos de inquemados.
- Problemas en molindas y clasificación: los molinos están diseñados para moler carbón, no pueden moler cantidades significativas de biomasa. Si se introduce grandes cantidades, se pueden producir incendios o atascos en los molinos.
- Problemas de almacenamiento de la biomasa: grandes volúmenes necesarios de biomasa para almacenar la misma cantidad de energía que con carbón.

Dependiendo del tipo de central para la que se está evaluando el proyecto, del tipo de carbón que queme normalmente, y del tipo y porcentaje de biomasa que se desea introducir, la magnitud de los aspectos anteriores variará significativamente.

Solucionar estos posibles problemas se traduce en inversiones e incrementar el coste de operación y mantenimiento.

Cada tipo de biomasa puede producir desafíos diferentes. En la Figura 2 se muestran a efectos ilustrativos, cuatro tipos de biomasa y su porcentaje de determinados compuestos con posible afección a una central térmica:

CO-COMBUSTIÓN

- El potasio reduce la temperatura de fusión de las cenizas, por lo que las cenizas se se pegan más fácilmente a los tubos de la caldera y pueden aparecer problemas de corrosión y escoria
- El cloro produce corrosión en caldera. Además el cloro produce cloruros en la etapa de desulfuración (situada después de la caldera). Los cloruros, son de difícil eliminación y por tanto darían problemas en el tratamiento de efluentes si la cantidad de cloro es elevada.
- El calcio produce ensuciamiento de la pared del hogar y por lo tanto una pérdida de rendimiento.

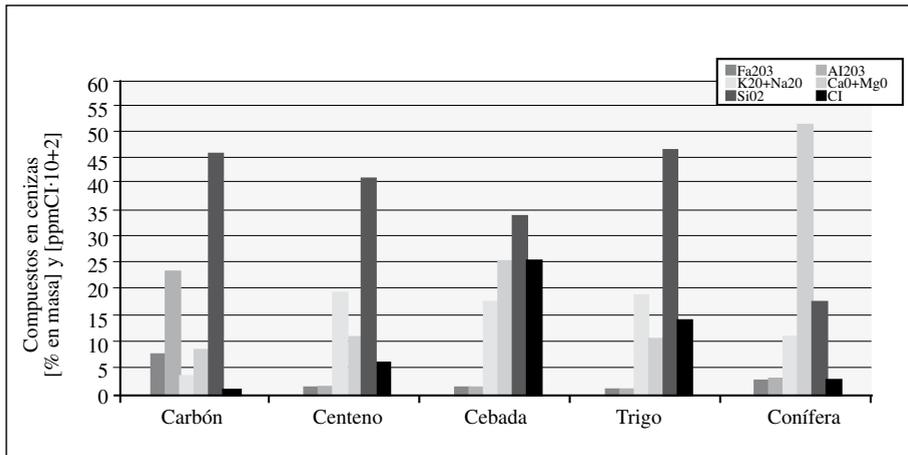


Figura 2: Diferencias químicas entre carbón y biomasa.
(Fuente: Elaboración propia).

Esta figura no representa valores estándar de estas biomasa, sino muestras específicas del estudio.

Otra diferencia importante entre carbón y biomasa se muestra en la Figura 3: la temperatura de volatilización de la biomasa es inferior a la del carbón, y esto hay que tenerlo en cuenta si se van a utilizar los molinos de carbón para molerla. En efecto, en los molinos de carbón, éste es precalentado a una temperatura de 200 a 400 °C. Si se introduce biomasa, hay riesgos de incendios y explosiones, ya que a esas temperaturas la biomasa se volatiliza y arde con facilidad. En cuanto a la combustión, las llamas de los quemadores se pueden pegar más a la caldera y producir sobrecalentamientos en zonas determinadas.

En cuanto a la afección a emisiones, en general el uso de biomasa disminuye las emisiones ácidas. La emisión de partículas no se suele ver afectada, la

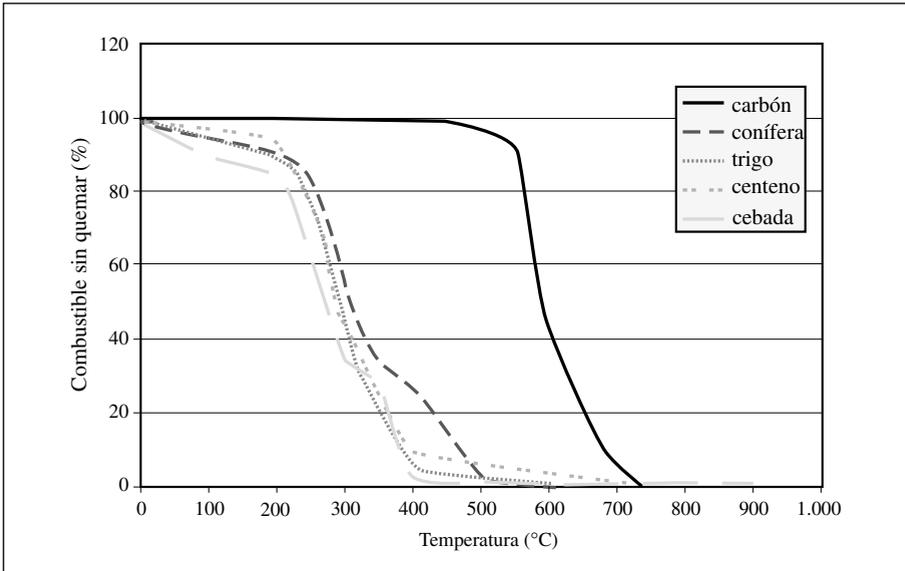


Figura 3. Diferencia de temperatura de combustión entre carbón y biomásas. (Fuente: Elaboración propia).

emisión de SO_2 y NO_x generalmente disminuye ya que la biomasa no contiene azufre y contiene menores cantidades de nitrógeno.

En general, la mayor parte de los problemas y desafíos técnicos comentados son de efecto menor si la sustitución de biomasa es moderada (hasta el 10%). En general, sustituir entre 5 y el 10 % no supone graves problemas, y se puede resolver con inversiones relativamente pequeñas. Sustituciones de mayor porcentaje de carbón pueden dar lugar a complicaciones mayores que deben ser estudiadas para cada caso particular, traduciéndose normalmente en inversiones significativas.

5. CASO EJEMPLO: PRUEBAS REALIZADAS EN LA CAPITAL CENTRAL TÉRMICA DE VELILLA DEL RÍO CARRIÓN

A continuación se describen las pruebas realizadas en la Central Térmica de Velilla del Río Carrión.

Para realizar las pruebas inicialmente se adquirió una pequeña tolva con una cinta transportadora, así como equipos de variación de velocidad para dosificar biomasa a una de las tolvas de la cinta de carbón existente (Figuras 4 y 5).

CO-COMBUSTIÓN

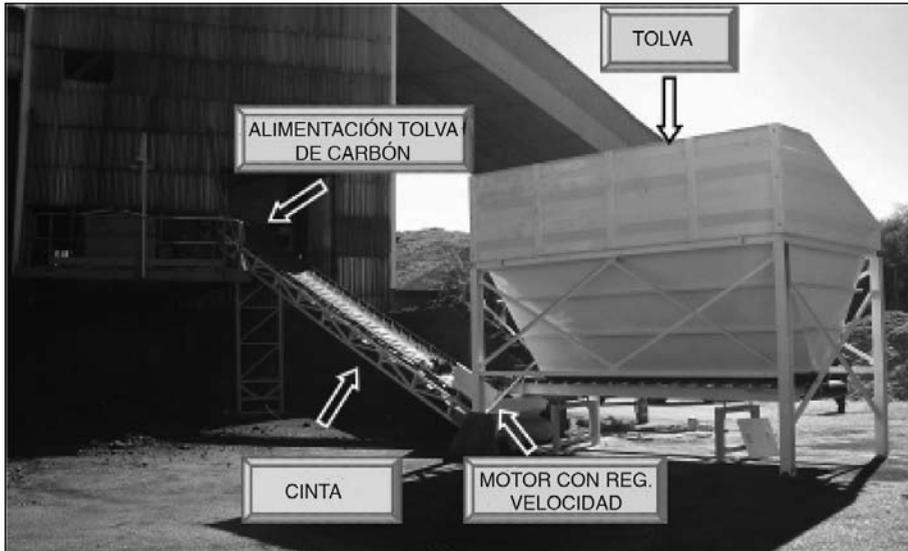


Figura 4: Sistema construido para llevar a cabo las pruebas en CT. Velilla. (Fuente: Elaboración propia).



Figura 5: Variador de velocidad y motor para llevar a cabo las pruebas en CT. Velilla. (Fuente: Elaboración propia).

Las pruebas comenzaron con astillas de chopo, con una granulometría de entre 50 mm y 150 mm, como puede verse en la Figura 6:



Figura 6: Productos granulados y astillados con granulometría entre 50-150 mm. (Fuente: Elaboración propia).

Las pruebas iniciales tenían por objeto determinar la cantidad de biomasa que podía quemarse con la instalación existente. Al quemar pequeñas cantidades de biomasa, (0.5% de sustitución), no apareció ningún problema. Pero conforme se aumentaba la cantidad, empezaban a producirse atascos en los quemadores y en los clasificadores de los molinos. Los atascos en los molinos de carbón pueden apreciarse en la Figura 6.



Figura 7: Atascos producidos en los rifles de los quemadores y en los clasificadores. (Fuente: Elaboración propia).

Los molinos de carbón funcionan machacando el carbón, como ya hemos comentado anteriormente. La biomasa es un material fibroso, no frágil, por lo que al introducirla en los molinos, se produce una especie de fibra (similar al algodón), que en cantidades suficientemente grandes se quedan pegadas al clasificador o a los rifles de los quemadores, llegando a atascarlos. Cuando

esto ocurre se incrementa la presión diferencial del molino y éste tiene que parar para ser limpiado.

Para solucionar el problema de las fibras se pasó a triturar la biomasa en origen, con una trituradora y un trómel con diferentes tamaños de criba. Se trataba en esta fase de discernir, en función del tamaño de la biomasa que se introducía, qué sucedía con la molienda. De esta manera, se empezó a probar con tamaños cada vez más pequeños de biomasa y porcentajes de sustitución mayores (Figura 8).

Una vez agotadas las posibilidades con la trituradora, se decidió utilizar un pequeño molino de martillos que fuera capaz de moler la biomasa a una granulometría aún menor. El molino disponible era de pequeña capacidad, pero moliendo durante mucho tiempo se podía acopiar cantidad suficiente de pequeño tamaño para poder realizar pruebas concluyentes.

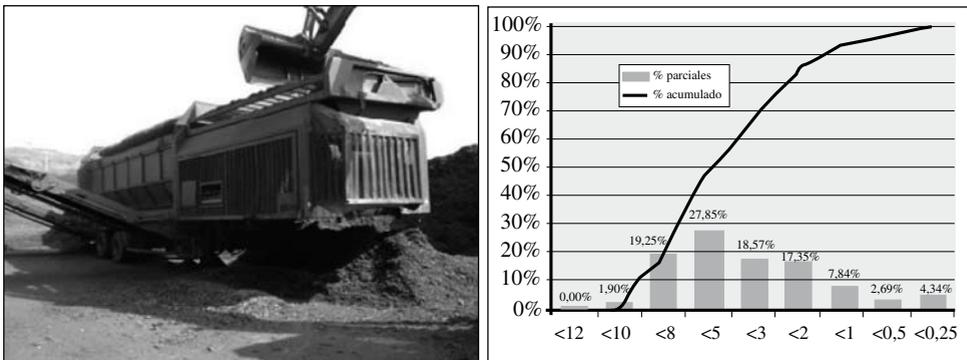


Figura 8: Pruebas con diferentes cribas y granulometrías.
(Fuente: Elaboración propia).

Los resultados obtenidos demostraron que, instalando un sistema de molienda previa para la biomasa (molino de martillos), y un sistema de almacenamiento de biomasa, se puede utilizar los molinos de carbón existentes en la central hasta un 3% de sustitución energética, aproximadamente 10MW eléctricos.

CAPÍTULO II GASIFICACIÓN

Francisco González
EYRA

0. PRESENTACIÓN DE EYRA

Antes de pasar a hablar de la gasificación en la biomasa, permítanme darles unas pinceladas de quienes somos. EYRA, Energías y Recursos Ambientales, es la parte dedicada a las energías renovables dentro del grupo COBRA.

El grupo ACS se divide en cuatro áreas claramente diferenciadas:

1. Construcción
2. Concesiones
3. Medioambiente y Logística
4. Servicios Industriales y Energía que es donde estamos ubicados. Y a su vez hay una división interna que sería Grupo COBRA y Dragados Industrial.

Por lo tanto, EYRA está ubicada dentro del Grupo Cobra, en el área de Servicios Industriales y Energía de ACS, como puede observarse en la Figura 9. Nosotros desarrollamos, con toda la cadena de negocio, proyectos energéticos desde la promoción y desarrollo, construcción y posterior operación y explotación de los mismos.

Nuestra experiencia real en el ámbito energético es la misma que el resto de empresas del sector, plantas termosolares gestionables, parque eólicos y diversificación en la que se incluye todo, aunque se apuesta fundamentalmente por el ámbito de la biomasa, por ser la tecnología con grado de madurez muy amplio y que todavía no ha alcanzado ninguno de los objetivos marcados en el PER. Ni el el PER 2005-2010 ni el siguiente, hasta el 2020 en el que es

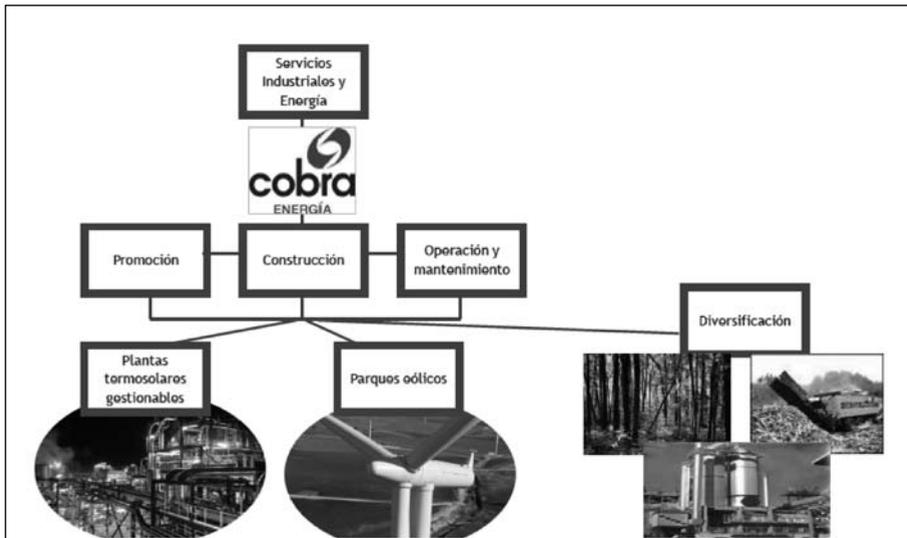


Figura 9. Organigrama Eyra. (Fuente: Elaboración propia).

una realidad. Lamentablemente nos hemos encontrado con una moratoria, que puede cambiar mucho las condiciones actuales pero que esperamos sea también una ventana para ciertas tecnologías, entre ellas la biomasa.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, en fase de promoción, EYRA tiene proyectos en los que se trabaja en biomasa forestal y cultivo energético. Ahora bien, el porcentaje de cada uno daría lugar a un interesante debate.

El proceso de tratamiento de la biomasa comprende el transporte a planta, el astillado, el secado (natural o por tromel de secado) y posteriormente se introduce en el gasificador donde se produce el gas de síntesis (como se indica en la Figura 10).

El gas de síntesis obtenido se quema en motores de combustión interna alternativos de gas natural con posibilidad de ser duales, es decir, poder trabajar en momentos puntuales con gas natural, aunque no es el objetivo, y con estos motores generar energía eléctrica correspondiente para verter a la red. Entendemos que esta energía, para poder entrar en la red debe estar bajo régimen especial, para poder lanzar la tecnología.

En paralelo a la producción eléctrica, tenemos la energía eléctrica procedente de los gases de escape del motor. Bien mediante un ciclo orgánico

GASIFICACIÓN

de Rankine (ORC) con el calor residual de los gases de escape o del agua de refrigeración, bien como calor útil en forma térmica como cogeneración. Más adelante veremos la diferencia retributiva entre la venta de energía en régimen de cogeneración y en modo generación convencional con biomasa. Destacar que no existe diferencia en el valor de la tarifa de referencia si no en la prima equivalente por cogeneración por el rendimiento eléctrico equivalente. Es importante aprovechar los calores de los gases de escape para aumentar ella rentabilidad.

Como ya comentábamos anteriormente, es importante el tema del suministro de la biomasa. ¿Biomasa forestal o cultivo energético? ¿Qué es cultivo energético? El cultivo energético es todo aquel cultivo dirigido y enfocado a fines energético únicamente. Por lo que ciertas masas forestales pueden ser también cultivos energéticos, y en esos casos debe estar certificado y regulado por la Comunidad Autónoma que es el organismo competente en la materia, y debe hacerse siguiendo los planes de ordenación forestal o monte público adecuados.

El Real Decreto 661/2007 (ahora en stand-by por la moratoria) establece que las primas y tarifas correspondientes a las instalaciones de biomasa procedente de cultivo energético es superior a cualquier otro tipo de biomasa forestal.

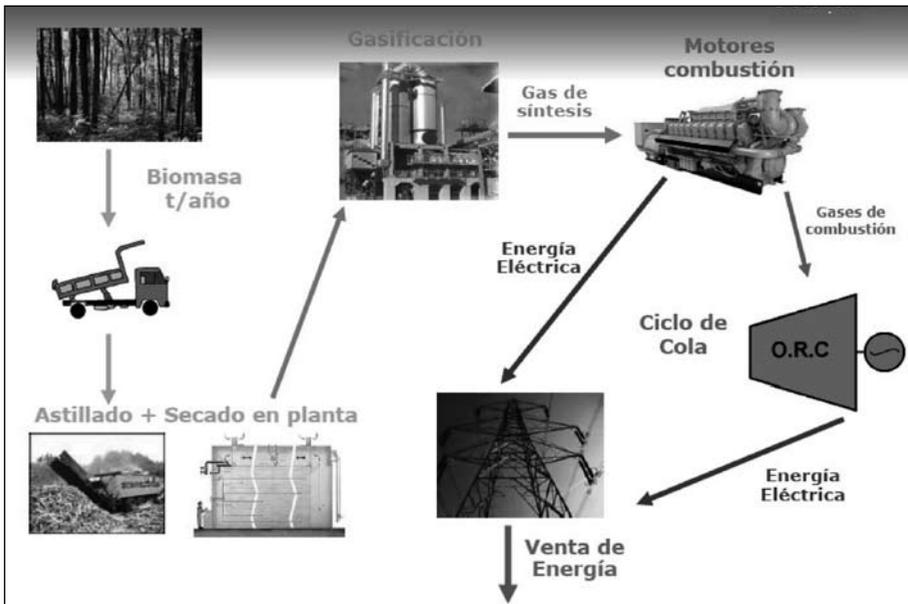


Figura 10. Gasificación biomasa. (Fuente: Elaboración propia).

2. SUMINISTRO DE BIOMASA

En cuanto a garantía de suministro de la biomasa, necesaria para la obtención de los préstamos para financiación de proyectos de biomasa, en primer lugar está la proveniente de cultivos energéticos, aunque existe un porcentaje y un mercado SPOT de residuo forestal o de terceros que no podemos olvidar.

Por nuestra experiencia en el sector, por tanto el suministro debe provenir principalmente de cultivos energéticos, y a su vez ser leñoso como el chopo, el olmo siberiano o la paulonia. Cultivos de crecimiento rápido, de cortas bianuales o trianuales a lo sumo, y con rendimientos bastante elevados, entre 20 ton/hectárea y 45 ton/hectárea por año. Pero por año normalizado, es decir, si es bianual, se corta un año y al siguiente no.

El ratio de biomasa utilizado es de 5.000 ton /MW_{instalado} ·año, teniendo en cuenta que son cultivos de regadío o zonas aproximadas a regadío y por lo tanto contamos con condiciones óptimas de producción.

3. GENERACIÓN ELÉCTRICA

El proceso técnico, presentado en la Figura 11, podemos distinguir:

- Pretratamiento en el que se introduce la biomasa en el gasificador y se obtiene el gas de síntesis.

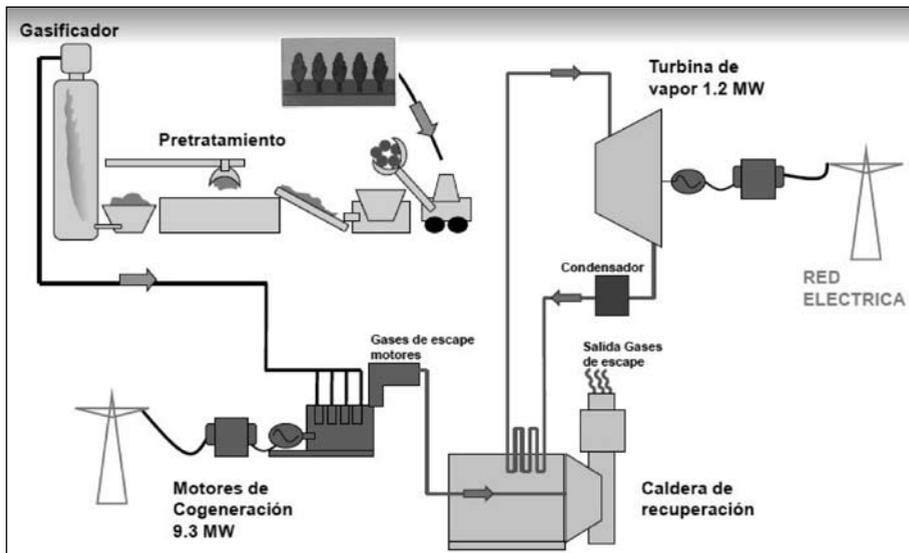


Figura 11. Sistemas Gasificación biomasa para generación eléctrica.
(Fuente: Elaboración propia).

GASIFICACIÓN

- Lavado de los gases de síntesis.
- Quemado del gas de síntesis en el motor de combustión interna.

Aunque puede parecer sencillo el paso del lavado de los gases, es el más complicado de todos. Ya que en este paso, el requerimiento exigido por el fabricante del motor es tal que la calidad de los gases de llegada al motor debe ser una determinada y específica, y es la clave de por qué los procesos de regasificación no se han desarrollado con toda la fuerza que deberían.

Básicamente, el proceso de quemar biomasa en una caldera para obtener calor es un proceso sencillo que lleva años funcionando para obtener calor. Es el filtrado y lavado de los gases para reducir las partículas y alquitranes, lo que supone el *know-how* de los tecnólogos y por lo tanto presenta más dificultades en el desarrollo de las tecnologías. No obstante, ya existen plantas de 2 MW de potencia instalada en funcionamiento, debido sobre todo a la diferencia de remuneración según el Real Decreto 661/2007, aunque debemos trabajar en plantas mayores. EYRA apuesta por plantas de mayor potencia.

La mayoría de los proyectos contemplan el aprovechamiento de los calores para secado de la biomasa en un tromel y mediante intercambiadores agua-aire para aprovechamiento del calor de refrigeración del motor. Mencionar que aunque es factible técnicamente no está considerado como cogeneración si la biomasa que se seca aprovechando los calores es la misma que será usada como combustible para generación eléctrica, ya que sería incoherente.

4. GASIFICACIÓN O COMBUSTIÓN

EYRA apuesta por la gasificación, principalmente por el mayor rendimiento obtenido, en combustión nos encontramos con valores entre 18-25%, mientras que en la gasificación se trabaja con motores alternativos con valores mínimos de 25%. Este aumento de rendimiento se debe a que los motores alternativos presentan rendimientos eléctricos altos, en torno al 40-41% y si añadimos los ciclos de cola ORC llegamos a rendimientos de la planta del 30%.

La gasificación presenta también la ventaja frente a la combustión, de poder utilizar distintos combustibles de manera homogénea, es decir, hacer modificaciones progresivas de combustibles en mucho rango, desde biomasa forestal a residuos. Actualmente existen ya plantas de biomasa de residuos sólidos urbanos, residuos plásticos.

Pero también existen problemas en la gasificación. El principal problema que nos encontramos con la biomasa son los alquitranes. Ahora bien, existe la posibilidad de regasificación de los alquitranes y de esta manera reducir la cantidad final. También supone un problema el agua de lavado de los gases que debe ser tratada para obtener los valores establecidos de emisión y vertido.

5. TARIFAS

Recordar las tarifas publicadas, no vigentes debido a la moratoria actual, pero que esperamos puedan ser retomadas en un futuro. En la Figura 12 podemos ver las tarifas correspondientes a los epígrafes b 6.1 y b 6.2. del Real Decreto 66/1, que corresponden a la generación puramente eléctrica sin recuperación de calor, sin cogeneración. Obviamente la tarifa menor corresponde a los residuos sólidos urbanos, al carecer de coste de producción de la biomasa.

<p>Tarifa s/RD 661/07</p> <ul style="list-style-type: none"> • b.6.1.- biomasa de cultivos energéticos <ul style="list-style-type: none"> • 176,336 €/MWh (P<= 2MW) y 162,689 €/MWh (P>2 MW) • b.6.2.- biomasa de residuos actividades agrícolas y forestales <ul style="list-style-type: none"> • 139,515 €/MWh (P<= 2MW) y 119,350 €/MWh (P>2 MW) • b.6.3.- biomasa de residuos de aprovechamientos forestales <ul style="list-style-type: none"> • 139,515 €/MWh (P<= 2MW) y 131,285 €/MWh (P>2 MW) • c.1- residuos sólidos urbanos. <ul style="list-style-type: none"> • 59,63 €/MWh

Figura 12. Tarifas biomasa. (Fuente: Elaboración propia)

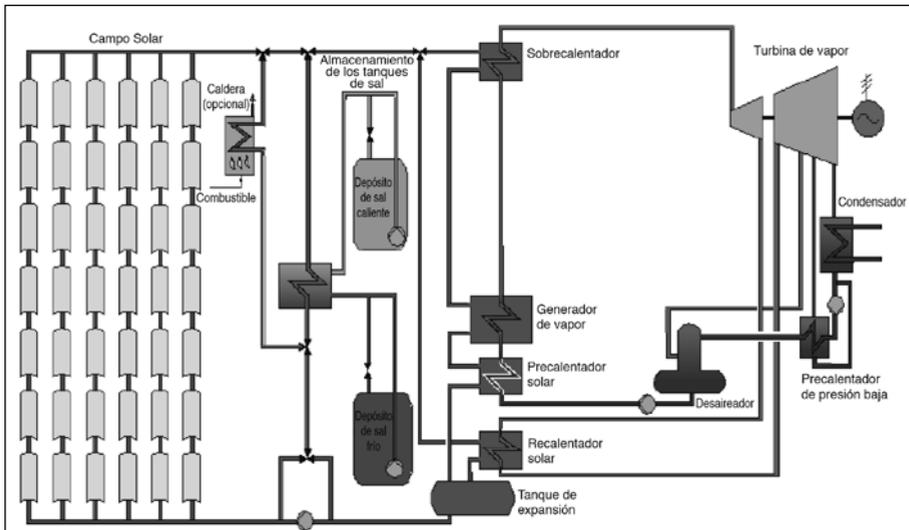


Figura 13. Planta propuesta hibridación planta solar con gasificación. (Fuente: Elaboración propia).

GASIFICACIÓN

Las tarifas para cogeneración son básicamente las mismas, ahora bien, la diferencia radica en la recuperación térmica que da derecho a una prima equivalente. La recuperación de calor, además, supone una reducción, un ahorro directo en el combustible en el proceso industrial del proceso de calefacción o el que tengamos...

Por último, las posibilidades de gasificación. Una de las vías fundamentales es la hibridación de plantas termosolares.

El esquema como podemos ver en la Figura 13 incluye un campo solar cilindro parabólico termosolar, almacenamiento térmico en sales y ciclo de vapor. En estas plantas existen calderas de gas natural para calentar el campo solar y evitar el congelamiento y por lo tanto, la sustitución del gas natural por gas de síntesis es posible. Al disponer de un ciclo de generación y horas sobrantes, como es capacidad de evacuación sobrante en las 8660 horas al año cuando el campo solar utiliza tan solo 3500 horas, es interesante estudiar el caso.

CAPÍTULO III

COGENERACIÓN CON BIOMASA MEDIANTE CICLOS DE RANKINE ORGÁNICOS

José Ignacio Linares Hurtado
Universidad Pontificia Comillas - ICAI

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se va a abordar el aprovechamiento de la biomasa mediante cogeneración en ciclo de cabeza. Para ello, la biomasa se quemará en una caldera de modo que el calor producido se aplique a un ciclo de potencia, el cual lo transformará en electricidad y calor de media temperatura, dando lugar así a la cogeneración. Antes de analizar el proceso de la cogeneración en sí merece la pena dedicar alguna explicación al ciclo de potencia, dado que no siendo complejo tampoco es un ciclo convencional.

El ciclo empleado es el llamado de Rankine orgánico (Organic Rankine Cycle, ORC). Debe su nombre a que sigue los procesos básicos del ciclo de Rankine pero sustituye el agua como fluido de trabajo por un fluido orgánico: hidrocarburo natural (propano, butano, ...), hidrocarburo halogenado (R134a, R245fa, ...), aceite silicónico (compuestos de siloxano) u otros. Las peculiaridades de este fluido de trabajo permiten que los ciclos ORC aprovechen de forma muy eficiente calores de baja y media temperatura, como los que se dan en energía solar, biomasa, geotermia, ..., siendo especialmente adecuados en aplicaciones de cogeneración, ya sea como ciclos de cabeza o como ciclos de cola (Schuster, 2009).

Entre las características de los ciclos ORC figuran:

- Los equipos son más compactos que en el caso del empleo del agua como fluido de trabajo.
- El evaporador (caldera) resulta un simple intercambiador de calor, no siendo precisa la separación típica de economizador, evaporador (con

calderín) y sobrecalentador, debido a que la entalpía de vaporización de los fluidos orgánicos es mucho más baja que en el agua. De este modo, se puede lograr el cambio de fase del fluido como en un equipo de refrigeración convencional (de hecho, los fluidos de trabajo muchas veces son refrigerantes).

- La regeneración no requiere extracciones intermedias de la turbina, lo que facilita su diseño, pudiendo ser de un solo escalonamiento. Esto es así porque los fluidos son secos, es decir, la línea de vapor saturado en el diagrama T-s presenta pendiente positiva, lo que hace que la salida de la turbina siempre sea vapor sobrecalentado, y con una temperatura razonablemente alta. Esta peculiaridad, además, evita la necesidad del sobrecalentamiento a la entrada de la turbina.
- Escogiendo adecuadamente el fluido se puede lograr que la condensación se realice por encima de la presión ambiente, lo que reduce el tamaño del evaporador y además elimina la necesidad del desgasificador.
- La presión crítica de los fluidos orgánicos no suele ser muy elevada (menor de 40 bar normalmente), lo que facilita la construcción de un ciclo supercrítico. Esto se ve favorecido también por la no muy elevada temperatura crítica.

A modo de comparación, la Figura 14 muestra el esquema de un ciclo de Rankine con agua para una aplicación de cogeneración con biomasa. En una caldera se quema la biomasa que eleva la temperatura de un aceite térmico de 250°C a 300°C. Dicho aceite térmico se aplica al evaporador del ciclo de Rankine, que extrae su calor devolviéndolo a 250°C a la caldera de biomasa. El ciclo de Rankine se ha diseñado con una única regeneración, de tipo abierto, y con una temperatura de condensación de 100°C para obtener de ahí calor útil. La Figura 15 muestra el diagrama T-s del ciclo y la Figura 16 el diagrama T-Q del evaporador. Como alternativa, la Figura 17 muestra cómo sería para esta aplicación el ciclo ORC (empleando hexametildisiloxano), la Figura 18 cómo sería el diagrama T-s de dicho ciclo y la Figura 19 el diagrama T-Q del evaporador.

Se aprecia cómo la pendiente positiva de la línea de vapor saturado del diagrama de la Figura 18 permite que la salida de la turbina (punto 2) presente una temperatura aún elevada, lo que permite que la corriente de vapor 2-3 ceda calor al líquido impulsado por la bomba, 5-6, en el regenerador. Esto permite que el aporte de calor al fluido orgánico se realice desde 160°C (comparable a los 170°C logrados en el ciclo de agua, Figura 15). La Figura 18 también permite observar, en unión con la Figura 19, el poco calor transferido en el evaporador en cambio de fase (apenas un 20% del total intercambiado en el evaporador), lo que facilita el diseño del citado evaporador. Esto se pone aún más de manifiesto en la Figura 20, que muestra con la misma escala el

diagrama T-s del agua y del hexametildisiloxano (indicado en la gráfica como “siloxano 1”). Se aprecian las dos características comentadas con anterioridad: menor temperatura crítica en el caso del aceite silocónico y menor entalpía de vaporización.

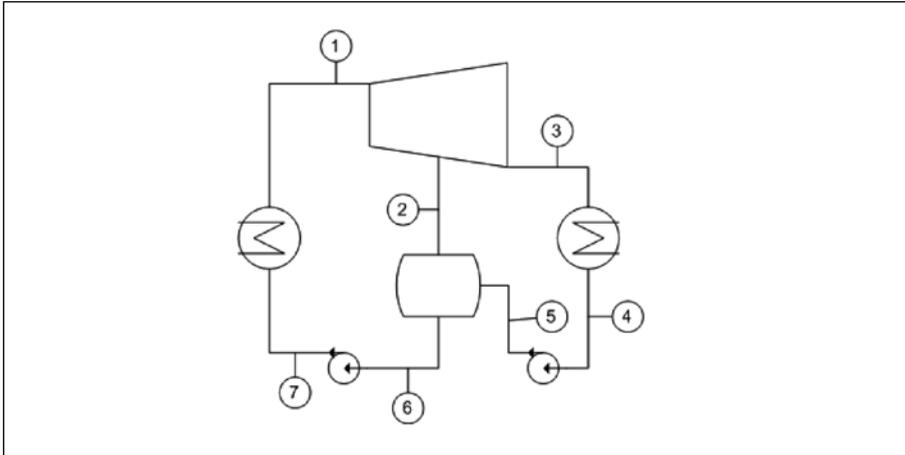


Figura 14. Esquema de un ciclo de Rankine con agua para cogeneración con biomasa. (Fuente: Elaboración propia).

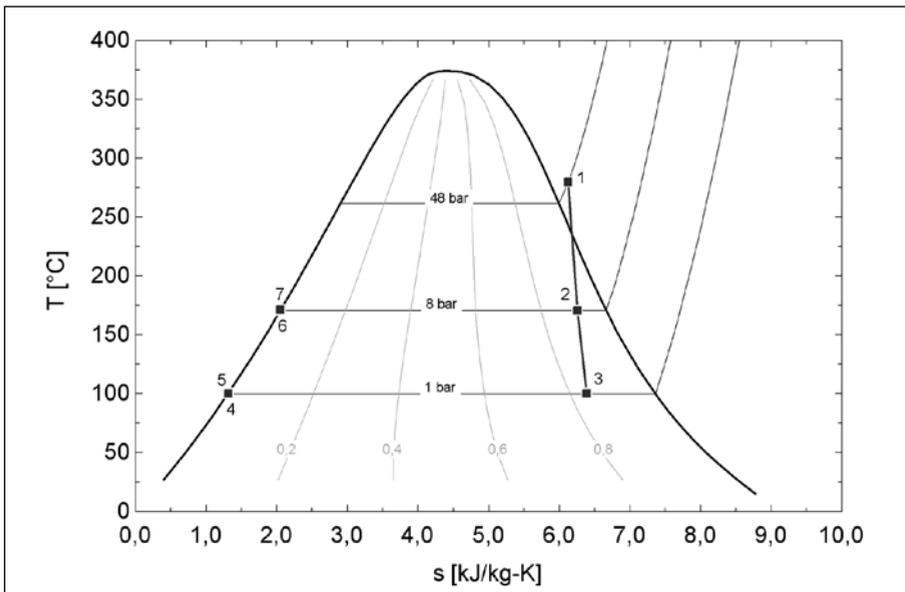


Figura 15. Diagrama T-s del ciclo de la Figura 14. (Fuente: Elaboración propia).

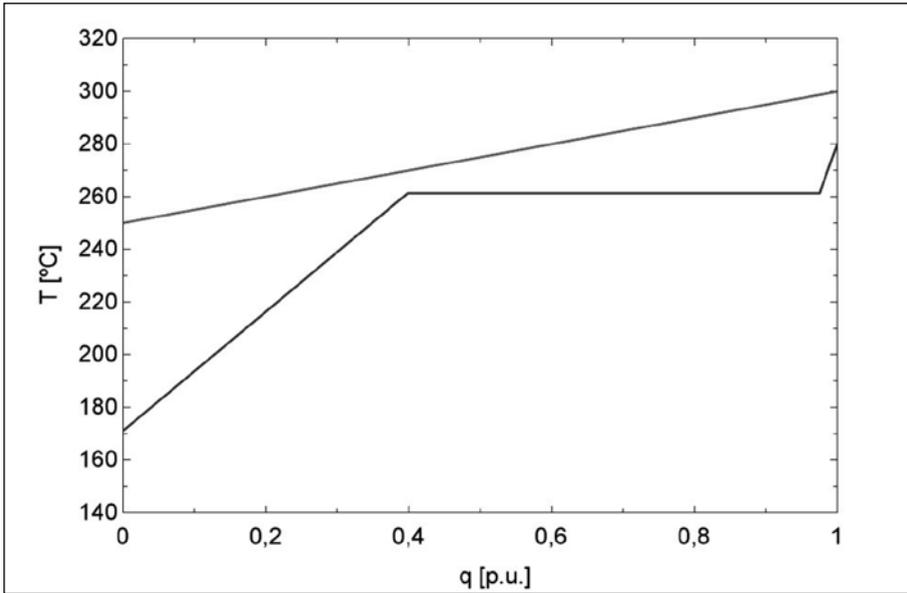


Figura 16. Diagrama T-Q de l evaporador del ciclo de la Figura 14.
(Fuente: Elaboración propia).

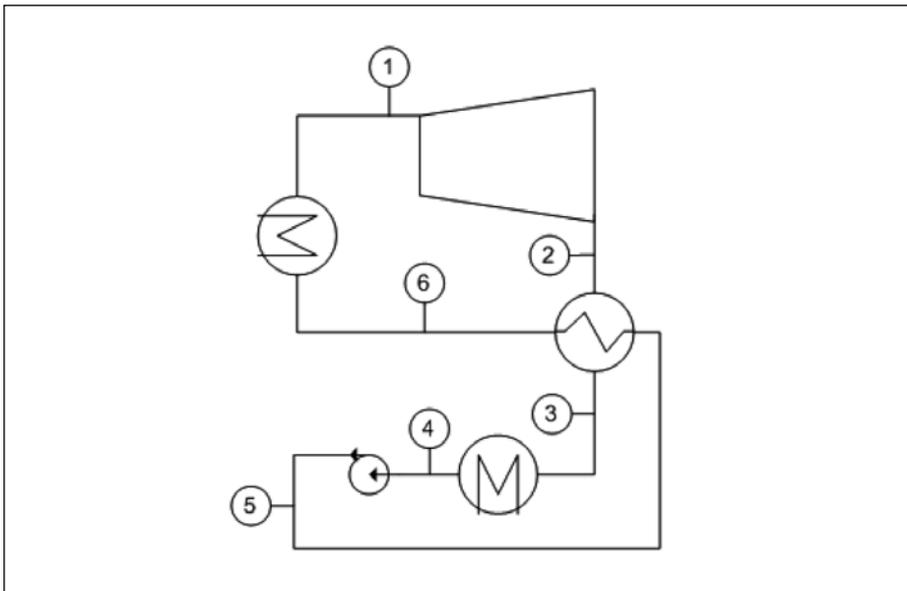


Figura 17. Esquema de un ciclo ORC para cogeneración con biomasa.
(Fuente: Elaboración propia).

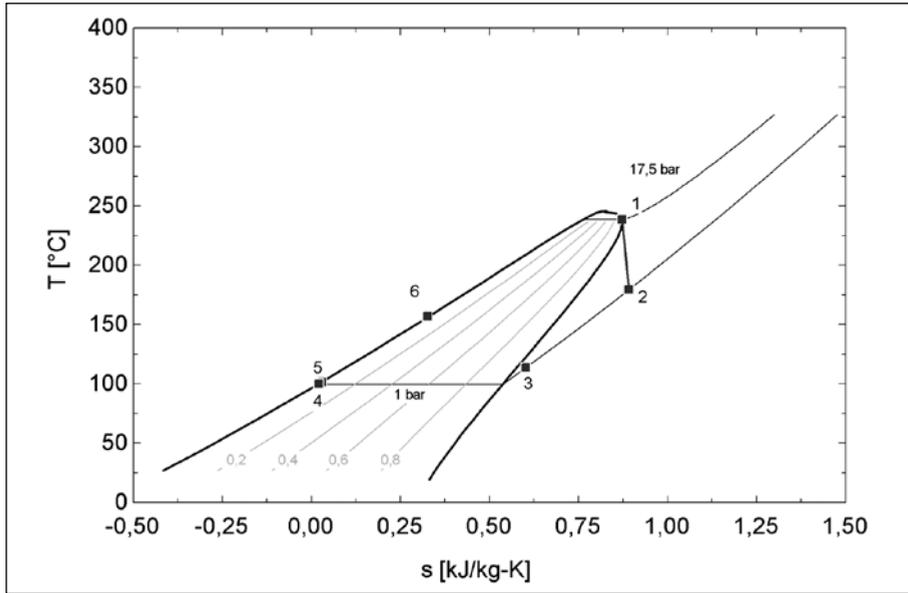


Figura 18. Diagrama T-s del ciclo ORC de la Figura 17.
(Fuente: Elaboración propia).

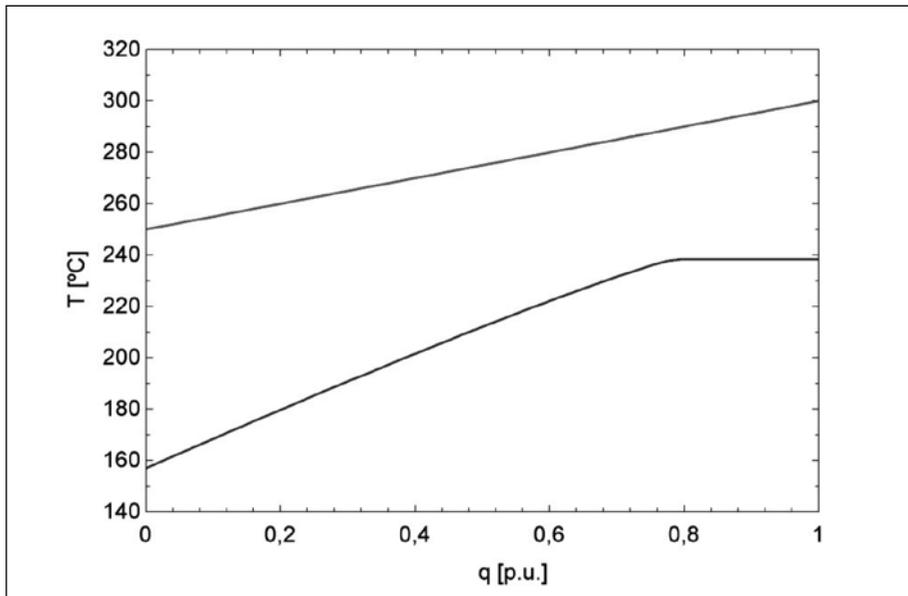


Figura 19. Diagrama T-Q del evaporador del ciclo ORC de la Figura 17.
(Fuente: Elaboración propia).

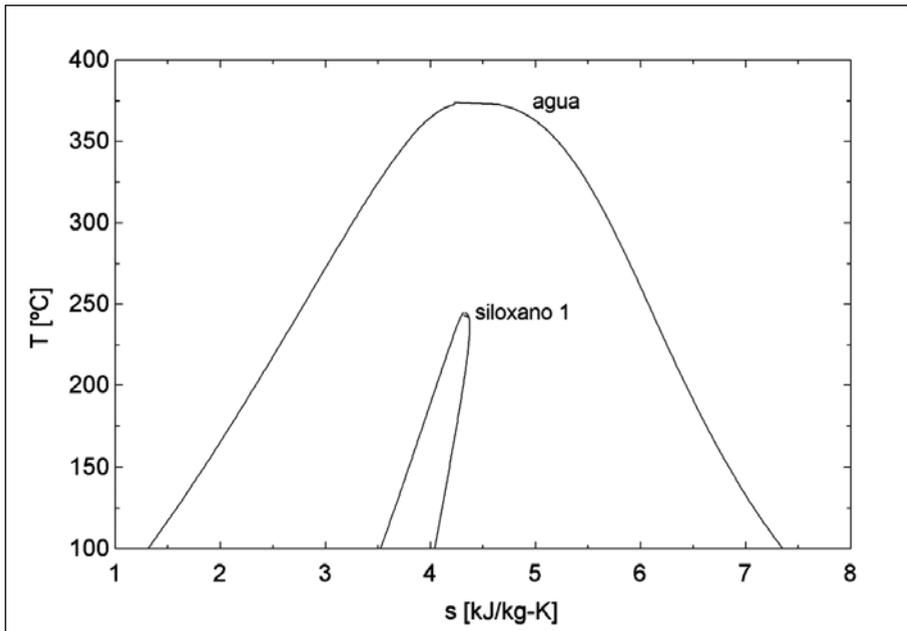


Figura 20. Diagramas T-s del agua y de un aceite silicónico tipo (hexametildisiloxano). (Fuente: Elaboración propia).

2. COGENERACIÓN MEDIANTE CICLOS ORC

En esta sección se van a analizar diferentes alternativas para la aplicación de los ciclos ORC a la cogeneración, ya sea con biomasa o no, con objeto de valorar su versatilidad.

Ciclo combinado con motor de cogeneración

En los motores de cogeneración para aplicaciones industriales un problema frecuente suele ser que los humos de escape presentan un nivel térmico adecuado para satisfacer la demanda térmica del proceso pero no así el agua de refrigeración (85 a 95°C). Una solución a este problema aparece descrita en (Linares, 2010) donde se diseña un ciclo ORC con isobutano para convertir en electricidad el calor extraído del sistema de refrigeración de un motor de cogeneración industrial de 3 MWe, logrando así mejorar las prestaciones del mismo (la producción eléctrica aumenta más de un 3% lo que permite elevar el ahorro de energía primaria de un 6,3% a un 8,6%). La Figura 21 muestra tanto el esquema del ciclo como una implantación real del mismo.

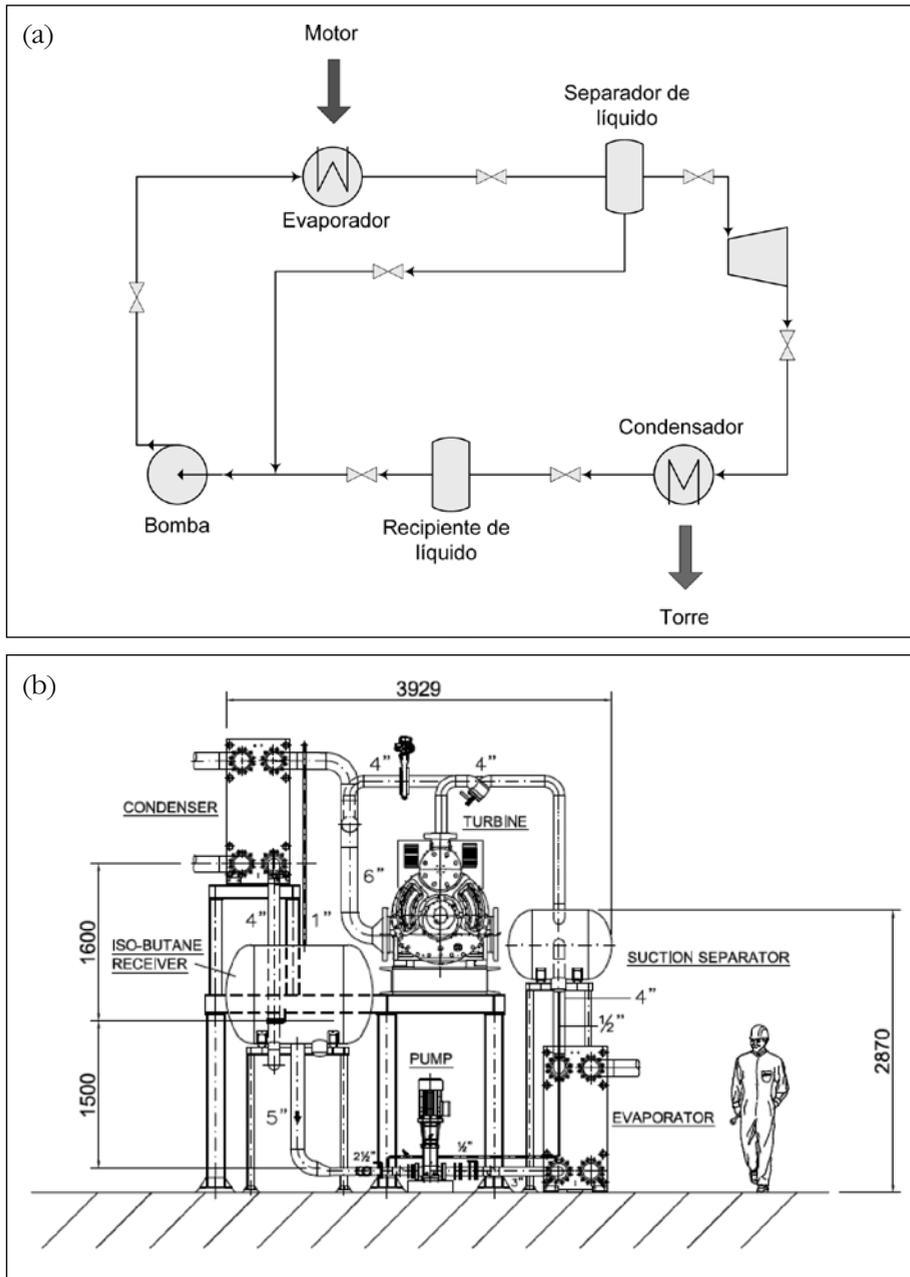


Figura 21. Esquema de un ciclo ORC (a) para la recuperación del calor de refrigeración de un motor de cogeneración industrial e implantación real del mismo (b). (Fuente: Linares, 2010).

Ciclo de cola en cementeras

En la industria cementera existen abundantes excedentes térmicos, incluso después de haber realizado las integraciones térmicas adecuadas, y a su vez existe una importante demanda eléctrica para procesos de secado y molienda. En (Linares, 2011) se describe un ciclo ORC supercrítico con isopentano que convierte los calores residuales en electricidad. Así, empleando el 100% del caudal de gases calientes disponible y con 9°C de temperatura ambiente (condiciones de diseño) se logran producir 4 MWe con una eficiencia eléctrica superior al 26% en una planta con una producción anual de 550.000 toneladas de clinker, lo que permite cubrir en periodos de consumo punta el 80% de la demanda eléctrica y en período de valle el 100% y vender el excedente. La Figura 22 muestra el diagrama T-Q del evaporador, en el que no se aprecia el tramo horizontal del cambio de fase al tratarse de un fluido supercrítico.

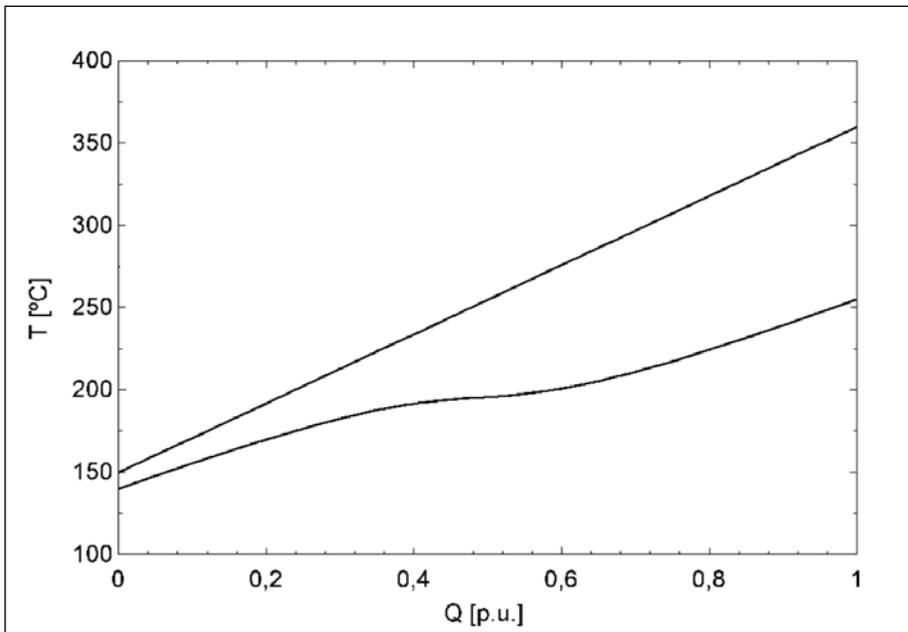


Figura 22. Diagrama T-Q del evaporador de un ciclo ORC supercrítico (Fuente: Linares, 2011).

Ciclo de cabeza con biomasa

En la aplicación objeto de este capítulo, la cogeneración con biomasa a partir de un ciclo ORC, el calor se aplica al ciclo ORC en el evaporador mediante

un circuito de aceite térmico que es calentado en la caldera de biomasa. El ciclo ORC produce la electricidad en la turbina y condensa a una temperatura suficientemente elevada (entre 100 y 110°C) como para que el calor liberado en el condensador pueda ser útil al proceso, normalmente de climatización o de baja temperatura. Cuando existen demandas de calor de mayor temperatura éstas se extraen directamente del circuito del aceite térmico o de la recuperación de los humos de la caldera de biomasa.

Un esquema sencillo de la implantación se recoge en la Figura 23, tomada de (Oberberger, 2002). Se aprecia cómo la caldera de biomasa aporta calor al evaporador del ORC a través del aceite térmico, produciendo el ORC electricidad en la turbina y calor de proceso (para una aplicación de calefacción de distrito) en el condensador. Con objeto de no reducir demasiado el rendimiento eléctrico del ORC la temperatura de condensación no es lo bastante elevada como para producir la temperatura requerida por la demanda térmica por lo que el agua de calefacción toma calor de los gases de escape en el economizador antes de dirigirse al consumo.

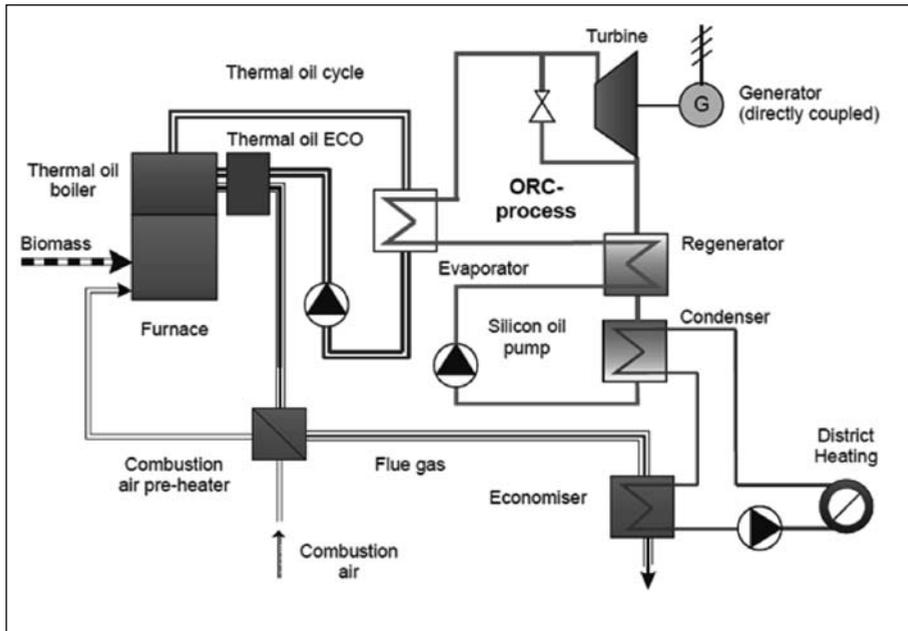


Figura 23. Aplicación de ORC a la cogeneración mediante biomasa.
(Fuente: Oberberger, 2002).

La Figura 24 muestra un esquema más detallado de una planta descrita en (Neuner, 2001) donde el aceite térmico recoge el calor de la caldera de

biomasa, entregándolo directamente al circuito de calor de alta temperatura (120/115°C) y al evaporador del ciclo ORC; el condensador del ORC recibe el agua fría del proceso y alimenta en parte la demanda de calor de media temperatura (80/60°C) y en parte el economizador de humos de escape de la caldera, con lo que produce calor de mayor temperatura para las demandas de 120/115°C, 85/65°C y 90/75°C. Se aprecia, así mismo, la presencia de 2 calderas de fuelóleo como respaldo al sistema de cogeneración, de modo que se maximicen así las horas de uso del mismo al no estar dimensionado para las cargas punta.

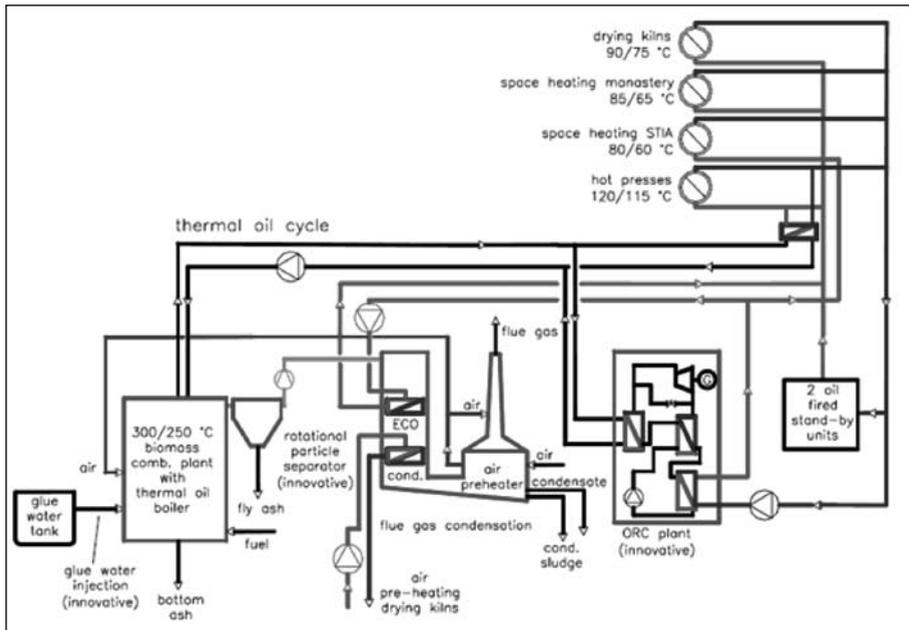


Figura 24. Aplicación de ORC a la cogeneración mediante biomasa.
(Fuente: Neuner, 2001).

El nivel de desarrollo de los ciclos ORC puede considerarse ya comercial para varias aplicaciones dentro de amplios rangos de potencias (Vanslam-brouck, 2011). A modo de ejemplo, la Figura 25 muestra una aplicación de 2 MWe para la planta descrita en (Obernberger, 2000).

El fabricante Turboden¹ ofrece varios modelos para aplicaciones de biomasa, entre 400 kWe y 2000 kWe. Así, el modelo TURBODEN 22 CHP para

¹ www.turboden.eu/it/

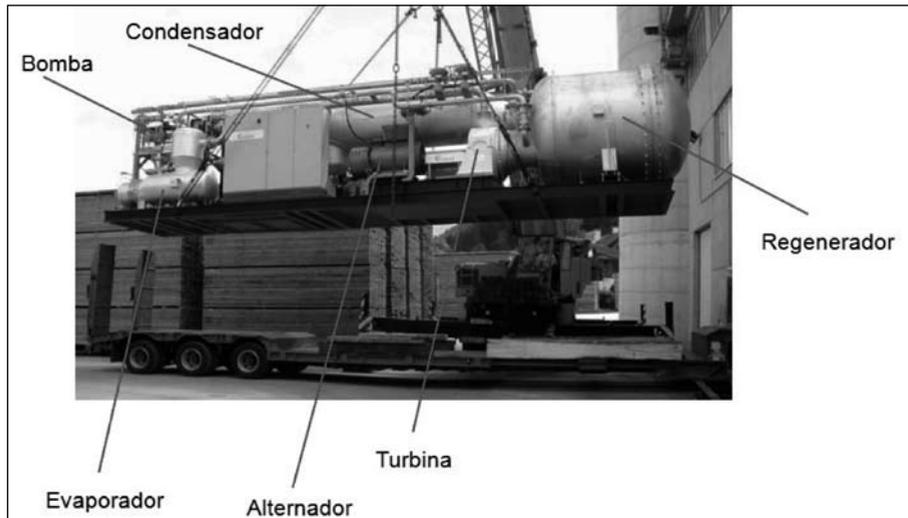


Figura 25. Ciclo ORC de 2 MWe. (Fuente: Adaptado de Obernberger, 2000).

una potencia térmica vertida al aceite térmico ($312/252^{\circ}\text{C}$) desde la biomasa de 12 MW produce 9,6 MWt de agua caliente ($60/90^{\circ}\text{C}$) y 2,2 MWe. Referido a la biomasa consumida, asumiendo una eficiencia de la caldera del 85%, el rendimiento térmico de la planta es del 68% y el eléctrico del 16%. Es decir, el ratio calor/electricidad es muy elevado, adaptándose así perfectamente al sector residencial, por lo que la climatización en redes distritales de pequeñas poblaciones rurales sería el segmento más adecuado para la penetración de esta tecnología, o bien las industrias agrícolas con elevada demanda de calor (por ejemplo en invernaderos).

Investigación y desarrollo

En un trabajo de investigación desarrollado por los autores se está analizando la viabilidad de diferentes fluidos orgánicos, así como de configuraciones subcríticas y supercríticas. El objetivo del trabajo es la producción de agua caliente a $65/95^{\circ}\text{C}$, condensando por encima de la presión ambiente y con un tamaño relativo en los intercambiadores menor o igual a 10 NUT. Los resultados hallados en este estudio pueden resumirse en las Figuras 26 (para los ciclos subcríticos) y 27 (para los supercríticos). En cada Figura se dan dos curvas para cada fluido, siendo la de menor rendimiento la correspondiente al ciclo sin regenerar y la de mayor para el regenerado. Se desprende del estudio que la ganancia por emplear regeneración siempre es más elevada en los ci-

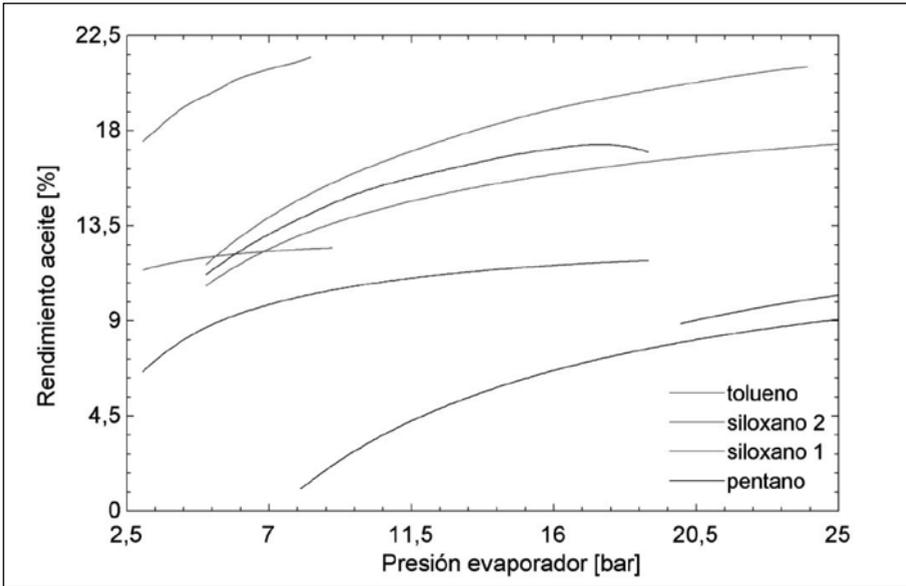


Figura 26. Comparativa de fluidos en ciclos ORC subcríticos.
(Fuente: Elaboración propia).

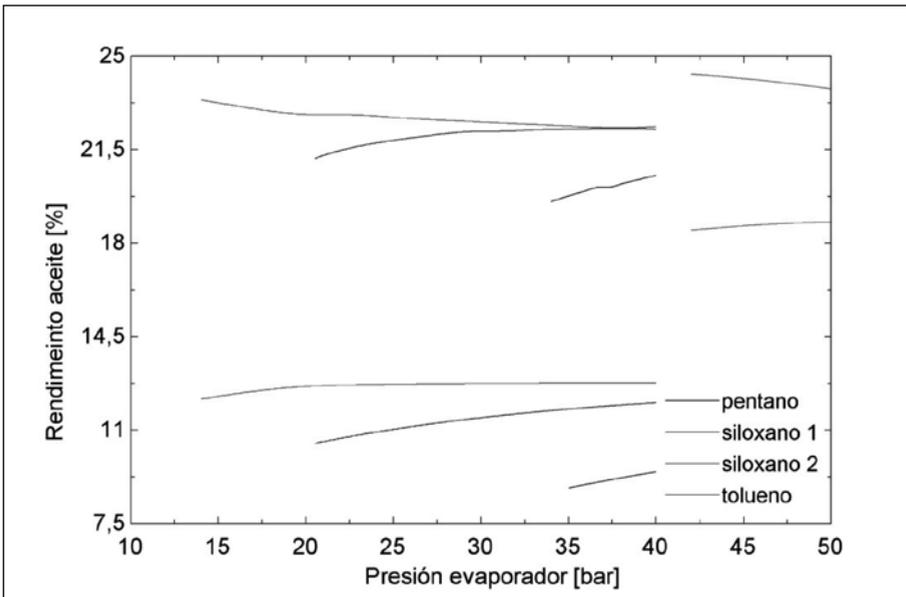


Figura 27. Comparativa de fluidos en ciclos ORC supercríticos.
(Fuente: Elaboración propia).

culos supercríticos, que a su vez son los que presentan un mayor rendimiento, siendo además bastante insensible a la presión del evaporador. En cuanto a los fluidos, el mejor es el tolueno, pero dados sus problemas de toxicidad se prefiere escoger el siloxano 1 (hexametildisiloxano), pues aunque el siloxano 2 (octametilclotetrasiloxano) presenta una eficiencia algo mayor no se logra con él condensar por encima de 1 bar absoluto.

Una vez seleccionado el siloxano 1 como fluido más adecuado se ha optimizado su diseño para un ciclo subcrítico y otro supercrítico, ambos regenerados. La Tabla 1 recoge una comparativa de las principales prestaciones, observándose la mejora significativa por el incremento de presión del evaporador. En todo caso, se observa que las prestaciones del ciclo subcrítico son comparables a las de los ciclos comerciales.

La Tabla 1 permite valorar las prestaciones de esta tecnología. Así, por una parte se observa que el ahorro de energía primaria (calculado según la legislación europea²) supera claramente el 30%, lo que es un valor muy elevado teniendo en cuenta que la cogeneración se considera de alta eficiencia cuando dicho ahorro supera el 10%. Por otra parte, se observa que el ratio de calor a electricidad oscila entre 4,8 para el ciclo subcrítico hasta el 3,5 para el supercrítico, siendo en ambos casos valores muy elevados. Esto indica que las aplicaciones más adecuadas para esta tecnología se sitúan en la climatización de distrito o bien en industrias agrícolas que demanden elevadas cantidades de calor, como los invernaderos.

Tabla 1.
Prestaciones nominales para un ciclo regenerado con siloxano 1
(hexametildisiloxano).

	Subcrítico	Supercrítico
Presión evaporador [bar]	17,5	38
Temperatura salida evaporador [°C]	238	328
Presión condensador [bar]	1,02	1,02
Temperatura salida condensador [°C]	100	100
Rendimiento eléctrico sobre aceite [%]	17,2	22,1
Rendimiento eléctrico sobre biomasa [%]	14,6	18,8
Rendimiento térmico sobre biomasa [%]	70,4	66,2
Ahorro de energía primaria [%]	31,7	36,7

² Directiva 2004/8/CE, de 11 de febrero.

3. EJEMPLO REAL: PLANTA DE LIENZ (AUSTRIA)

Existen diversas instalaciones que emplean la cogeneración con biomasa mediante ciclo ORC para redes distritales. Muchas de ellas se encuentran ubicadas en Austria y Alemania. Una de ellas, construida en el año 2000 y que aún sigue operativa³, es la de Lienz, en el Tirol austriaco. Dicha planta cuenta con una potencia térmica instalada de 44,5 MWt y una eléctrica de 2,5 MWe, con unas ventas de calor anuales de 74 GWh y de electricidad de 11 GWh. La red distrital tenía una longitud de 50 km en 2005, suministrando 42 MW térmicos a los consumidores (800 puntos de conexión para 3431 habitantes). La biomasa empleada está constituida por madera y residuos forestales, siendo su consumo anual de unos 100000 m³, con una capacidad de almacenamiento de 15000 m³. La superficie ocupada por la planta de potencia es de 1620 m², con un volumen construido de 28500 m³.

La planta se desarrolló en dos fases, con una inversión de 24,77 M€ para la primera y 13,56 M€ para la segunda, en ambos casos incluyendo los equipos térmicos, eléctricos y la red de distrito. La Figura 28 muestra un sinóptico de la planta donde se aprecian dos calderas de fuelóleo para los períodos punta junto con una caldera de biomasa para la producción de agua caliente. Las plantas ORC se alimentan con calderas de biomasa que calientan el circuito de aceite térmico, de forma análoga a como se mostró en la Figura 10. La instalación cuenta también con 350 kWt de colectores solares térmicos.

La Figura 29 muestra el diagrama de Sankey de una de las plantas ORC. Se aprecia un rendimiento eléctrico medido respecto a la biomasa de entre el 14 y el 15% y uno térmico del 75 %, habiendo recuperado calor en el economizador de los gases de escape. Estos valores, excluida la recuperación de los gases de escape, están en sintonía con el diseño del ciclo subcrítico propuesto en el apartado anterior, por lo que puede considerarse que el análisis económico que se efectuará en el apartado siguiente parte de resultados creíbles.

Finalmente, la Figura 30 muestra la curva monótona de la producción térmica y eléctrica de la planta de Lienz. Se observa cómo la planta ORC produce la potencia térmica del valle, mientras que las calderas de fuelóleo satisfacen las puntas y la caldera de biomasa de agua caliente la zona media. De este modo se logra que la planta ORC opere de forma continuada.

4. ANÁLISIS ECONÓMICO

Uno de los principales cuellos de botella en la implantación de todo proyecto de energías renovables se encuentra en la viabilidad económica. Fre-

³ <http://www.stadtwaerme-lienz.at/unternehmen.html>

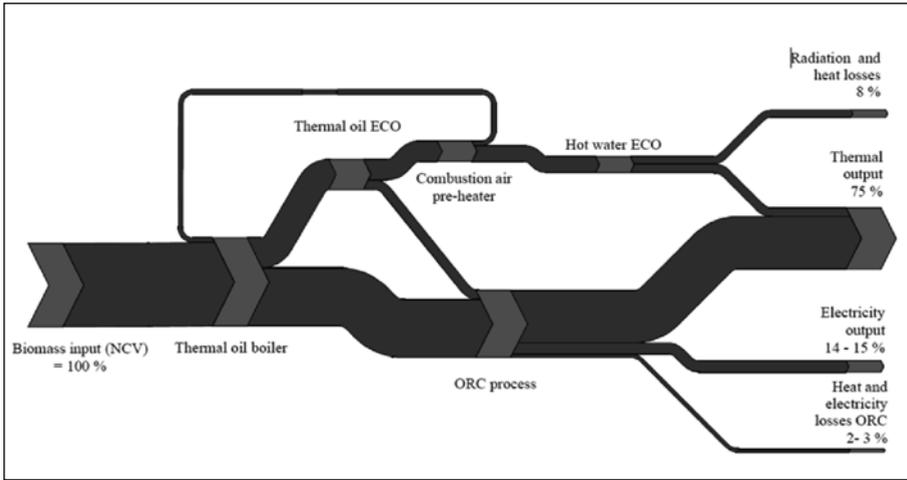


Figura 29. Diagrama de Sankey de una de las plantas ORC de Lienz.
(Fuente: Obernberger, 2002).

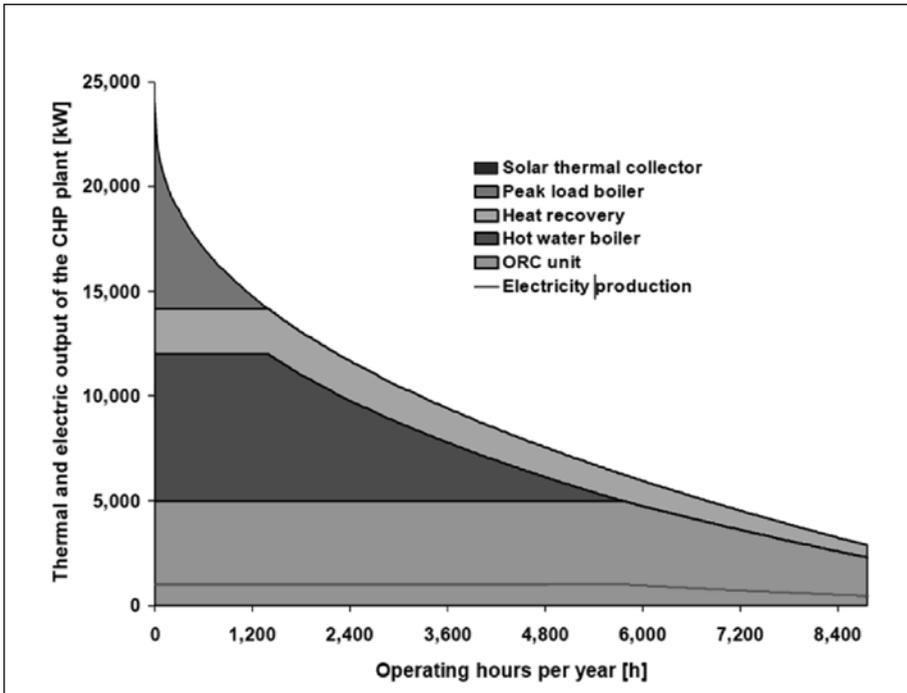


Figura 30. Curva monótona de producción térmica y eléctrica de la planta de Lienz. (Fuente: Obernberger, 2002).

cuentemente proyectos que no serían viables económicamente por sí mismos se apoyan económicamente desde los Gobiernos considerando las ventajas medioambientales que comportan, sin tener en cuenta la penalización que para la competitividad económica producen este tipo de apoyos, sobre todo cuando los incentivos económicos se aplican a gran escala y lo que inicialmente se plantea como un apoyo a la madurez de una tecnología se convierte en un negocio que no tiene en cuenta las economías de escala y que se ve regido exclusivamente por intereses económicos, olvidándose de la mejora tecnológica que debería suponer el apoyo económico recibido.

El objetivo de esta sección es demostrar que, con un adecuado diseño, la cogeneración a partir de biomasa mediante ORC resulta competitiva sin la necesidad de subsidios ni ayudas estatales, siempre que se respeten unos criterios racionales en el dimensionado de la planta. Para demostrar esto se ha tomado como caso tipo una planta basada en el ciclo subcrítico desarrollado previamente y que no supone un riesgo tecnológico al presentar unas prestaciones comparables a las de los equipos comerciales. Las hipótesis económicas para el caso se han adaptado a partir de las del proyecto de Lienz, tomadas de (Oberberger, 2002).

El balance energético de la planta es de 2 MWe, con una producción de calor útil de 9,628 MWt y un consumo de biomasa de 13,680 MWt. Es decir, un rendimiento eléctrico del 14,6% y uno térmico del 70,4%, ambos medidos respecto a la biomasa aportada.

La inversión (excluida la red de distrito) es de 11.533.323,30 € (5.766,70 €/kWe). Los gastos de mantenimiento se cifran en 250.000 €/año, incrementándose a una tasa nominal de 3,5%; los gastos de administración y seguros se toman de 60.000 €/año, actualizándose con una tasa nominal del 3,5%; la tasa de descuento para evaluar los índices económicos se toma del 10%, siendo la vida económica del proyecto de 10 años.

La clave para alcanzar la rentabilidad económica se encuentra en acercar la planta a la comunidad (haciendo realidad la tan mencionada “generación distribuida”) y además en implicar a la comunidad en el funcionamiento de la planta, de modo que la biomasa pueda ser autoproducida (cultivos energéticos, residuos forestales, ...). De este modo, haciendo que los productores de biomasa sean socios del proyecto y no unos meros suministradores es como se pueden alcanzar unos precios competitivos, tanto en el combustible como en el producto energético. Bajo estas hipótesis se pueden lograr unos precios para el cultivo energético autoproducido de 5,5 €/MWht. La otra alternativa sería comprar la biomasa a granel, con un precio estimado de 20 €/MWh (IDAE, 2012). Como coste para el combustible se toma finalmente un 22% más respecto a los precios anteriores, actualizados anualmente con una tasa nominal del 5%.

En cuanto a los ingresos, se concibe el proyecto para la satisfacción de las demandas térmicas y eléctricas de la comunidad, de modo que los ingresos

procedan de la venta de estos servicios energéticos a precios competitivos con el mercado. Así, se asume que la electricidad se vende a los consumidores a 50 €/MWh e y el calor a 60 €/MWh, actualizándose ambos precios con una tasa nominal anual del 3,5%. El precio de la electricidad así vendida está claramente por debajo de la tarifa doméstica; en cuanto al precio del calor, es necesario compararlo con combustibles transportables, pues se asume que en la comunidad rural no habría servicio canalizado de gas natural. Dichos precios oscilan entre 143,7 €/MWh para el GLP en bombonas de 35 kg y 88,9 €/MWh para el gasóleo de calefacción.

Con estas hipótesis se ha obtenido la tasa interna de rentabilidad (TIR) dada en la Figura 31 en función de las horas al año de funcionamiento de la planta y del coste de la biomasa. Como era de esperar, con menores costes de biomasa se alcanza la viabilidad económica desde menores horas de uso, alcanzándose unas rentabilidades excepcionales si las horas de uso son elevadas.

Con objeto de poner en contexto las razones para alcanzar la viabilidad económica se muestra en la Tabla 2 el análisis de rentabilidad de un caso con coste de biomasa elevado (20 €/MWh) y 7000 horas anuales de funcionamiento. Se observa que el período de retorno es de unos 8 años, es decir, del

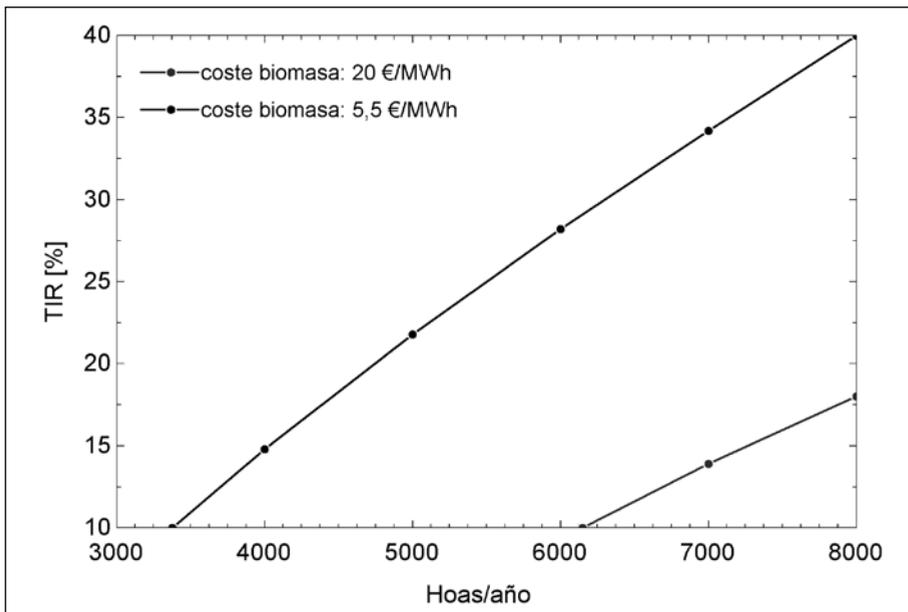


Figura 31. Análisis de rentabilidad para el ejemplo analizado. (Fuente: Elaboración propia).

COGENERACIÓN CON BIOMASA MEDIANTE CICLOS DE RANKINE ORGÁNICOS

80% de la vida útil. En cuanto a la estructura de ingresos, al no estar la venta de electricidad subvencionada la relación de ingresos por energía térmica a eléctrica es de 5,7, lo que pone de manifiesto que este tipo de tecnología ha de estar integrada con los consumidores contando con ellos tanto como suministradores de biomasa como clientes de la producción térmica y eléctrica. En este contexto, el esperado despliegue de esta tecnología en España debería hacerse no en base a la generación eléctrica, sino a la integración en comunidades rurales o ciudades residenciales.

Tabla 2.

Análisis de rentabilidad para el ejemplo analizado (7000 horas anuales de uso y precio de la biomasa a 20 €/MWh).

	Ingresos		Gastos			Flujo Caja	
	3,50%	3,50%	5%	3,50%	3,50%	10%	10%
Año	E [€]	V [€]	F [€]	OM [€]	Admin [€]	FC [€]	FC acum [€]
1	700.000	4.043.722	2.336.525	250.000	60.000	1.906.543	1.906.543
2	749.858	4.331.736	2.576.019	267.806	64.274	1.796.277	3.702.820
3	776.103	4.483.347	2.704.820	277.179	71.261	1.657.542	5.360.362
4	803.266	4.640.264	2.840.061	286.881	81.774	1.526.409	6.886.771
5	831.380	4.802.673	2.982.064	296.922	97.122	1.402.007	8.288.778
6	860.479	4.970.767	3.131.167	307.314	119.387	1.283.262	9.572.040
7	890.595	5.144.744	3.287.726	318.070	151.894	1.168.795	10.740.835
8	921.766	5.324.810	3.452.112	329.202	200.015	1.056.754	11.797.589
9	954.028	5.511.178	3.624.717	340.724	272.600	944.535	12.742.124
10	987.419	5.704.070	3.805.593	352.650	384.530	828.284	13.570.408
						VAN [€]:	2.037.085

Resulta interesante también analizar los costes de generación eléctrica con este sistema, con objeto de comprobar la competitividad frente a otras tecnologías renovables. Para ello, y dado que se producen de forma simultánea electricidad y calor es preciso contabilizar de forma separada tanto las inversiones como los gastos asociados exclusivamente a la generación eléctrica. Así, se excluyen de la inversión y los gastos de operación y combustible la parte requerida por una planta de biomasa que produzca el mismo calor que la planta diseñada (9,628 MWt), en un planteamiento similar al del rendimiento eléctrico equivalente cuando al consumo de energía primaria le sustrae la que se habría consumido para producir el calor útil. El coste se normaliza a 10 años

según el método dado por (Bejan, 1996) con las mismas tasas de descuento y nominales consideradas previamente. Los costes normalizados de electricidad obtenidos, para varios escenarios de coste de biomasa y horas anuales de uso, aparecen en la Tabla 3. Con objeto de poner en contexto dichos costes se puede normalizar el precio medio del mercado eléctrico en 2011 (50 €/MWh)⁴ con la misma metodología y una tasa nominal del 5%, obteniéndose 76 €/MWh. Es decir, que si la biomasa se ha autoproducido con objeto de controlar sus costes y se logra un uso intensivo de la planta, con un adecuado dimensionamiento, el coste de generación eléctrica es comparable al precio de mercado, viéndose especialmente penalizado si se operan pocas horas.

Tabla 3.

Análisis de sensibilidad del coste normalizado de producción eléctrica.

Precio biomasa [€/MWh]	Horas anuales de uso	Coste normalizado de electricidad [€/MWh]
20	8000	106
	6150	128
5,5	8000	80
	3375	176

De la Tabla 3 se desprende también que si se logra un uso intensivo de la planta el coste sólo se ve incrementado un 33% empleando la biomasa suministrada frente a la autoproducida, lo que indica una cierta insensibilidad al coste del combustible. Esto queda claro en la Figura 32 que analiza la composición del coste normalizado de electricidad según el precio de la biomasa en un escenario de horas de uso anuales moderado. Como se ve, incluso en el caso de biomasa de alto coste, la componente mayoritaria del coste de generación es la inversión.

5. CONCLUSIONES

A raíz del análisis llevado a cabo en este capítulo se desprende que la tecnología ORC resulta aplicable a la cogeneración mediante ciclos de cabeza con biomasa, tanto desde un punto de vista técnico como económico. En el lado técnico existen experiencias comerciales y equipos disponibles, habiendo aún un margen de mejora de las prestaciones abierto a la investigación. En el terreno económico se obtienen dos tipos de conclusiones:

⁴ www.omel.es

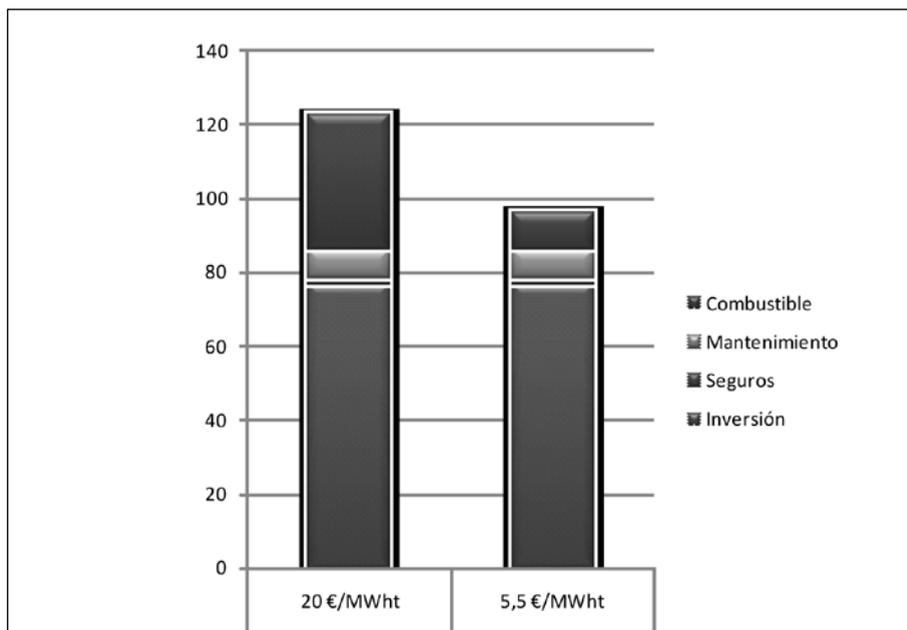


Figura 32. Análisis de la composición del coste normalizado de electricidad según el precio de la biomasa (20 ó 5,5 €/MWh) en un escenario de 6500 horas anuales de funcionamiento de la planta. (Fuente: Elaboración propia).

- Desde el punto de vista de los proyectos de cogeneración resultan importantes (mayoritarios incluso) los ingresos por energía térmica, siendo necesario dimensionar el equipo para aumentar sus horas de funcionamiento (buscando, por tanto, cubrir con él la carga base). El ratio de calor a electricidad resulta muy elevado, lo que hace adecuado el producto para el sector residencial. En cuanto al coste de generación eléctrica producida, éste está cercano al precio de mercado de la electricidad si la biomasa es autoproducida y el uso de la planta es intensivo.
- Desde el punto de vista de los proyectos de biomasa se desprende que es necesario implicar a los productores de la misma en el proyecto, de modo que los costes de la misma estén controlados.

A la vista de los resultados se desprende que la aplicación de esta tecnología de cogeneración ha de ser la climatización por redes de distrito de modo que una comunidad rural o ciudad residencial implante realmente el concepto de generación distribuida (tanto térmica como eléctrica) implicándose en el suministro de la biomasa y beneficiándose de precios de servicios energéticos por debajo de los del mercado. Para la aplicación en España debería valorar-

se la inclusión de máquinas de absorción para facilitar el uso intensivo de la tecnología.

Lo más importante del modelo de gestión analizado es que la viabilidad económica se logra a precios de mercado, sin necesidad de subsidios, salvo alguna ayuda para la inversión en la red de distrito, que podría reducirse si esta tecnología se tuviese en cuenta en la planificación urbana del barrio o población.

CAPÍTULO IV
LA COMBUSTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS
URBANOS

Alfonso Maillo
Urbaser

1. INTRODUCCIÓN

Según la ley 22/2011 del 29 de Julio residuo es cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar, y por tanto es un producto de gran heterogeneidad, que se produce de manera continuada y constante, estas tres características marcan los procesos de tratamiento de los residuos. Hay que tener en cuenta también que al ser un producto desechado tiene valor cero para su productor, pero esto no quiere decir que no tenga valor el residuo. Y por último resaltar que dentro de la heterogeneidad es un recurso parcialmente renovable, con un porcentaje de biodegradabilidad mayor del 65%, con balance neutro en cuanto a gases de efecto invernadero. Hay numerosos residuos sólidos urbanos que se clasifican según su origen:

BIOMASA Y SUS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS APLICADAS



Y entre todos los residuos anteriores, los que se consideran susceptibles de ser tratados son los residuos procedentes de domicilios, comercios de las ciudades que tienen la consideración de residuos asimilables a los domiciliarios o bien residuos no peligrosos de industrias como puede verse en la Tabla 4.

LA COMBUSTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Tabla 4.
Clasificación de los residuos.

Generados en	Domicilios Particulares	Residuos Domiciliarios	RD	RU
	Comercios Oficinas Servicios	Residuos Comerciales e Institucionales Asimilables a Domiciliarios	RICIA	
Todos aquellos que no tengan la calificación de peligrosos y que por su naturaleza o composición puedan asimilarse a los producidos en los anteriores lugares o actividades	Actividades	Residuos Industriales Asimilables a Domiciliarios	RICIA	
	Limpieza	Vías Públicas Zonas Verdes Áreas Recreativas Playas	RICIA	
	Abandono	Animales Domésticos Muertos (RICIA) Muebles (RD) Enseres (RD) Vehículos Abandonos	RD RICIA	
	Construcción y Reparación Domiciliaria	Obras Menores de Construcción Obras Menores de Reparación Domiciliaria	RCD	

Fuente: *Elaboración Propia Plan Integral.*
Ley 10/1998, de 21 de Abril, de Residuos (R24)
Siendo:

RU: Residuos Urbanos

RD: Residuos Domiciliarios

RICIA: Residuos Industriales, Comerciales e Institucionales Asimilables

RCD: Residuos de Construcción y Demolición.

BIOMASA Y SUS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS APLICADAS

Si se lleva a cabo una clasificación de los residuos encontramos tres tipos que pueden verse en la Figura 33:

- Inertes como son los vidrios, metales y procedentes de la construcción y que no presentan poder caloríficos y por tanto no son susceptibles de usar como fuente de energía, y suponen valor cero en cuanto a valoración energética. No obstante son los residuos reciclables *per se* y de forma continua.
- Materia orgánica, son residuos con bajo poder calorífico por su alto grado de humedad (80-90%)
- Material combustible entre los que se encuentran el papel, el cartón o multiacapa. Algunos de los residuos de este tipo tienen consideración de reciclable, pero no en el mismo grado que los inertes. Presentan poder calorífico bastante alto.

TIPO DE MATERIAL	Composición individual	Rango %	
	%	Min.	Máx.
MATERIALES INERTES			
Vidrio	5,8%	3,5%	7,6%
Metales Férricos	2,7%	1,5%	4,0%
Metales No Férricos	1,7%	0,9%	2,2%
Varios	3,3%	0,5%	4,0%
<i>Subtotal</i>	13,2%	6,4%	17,8%
MATERIA ORGÁNICA			
<i>Subtotal</i>	48,9%	42,0%	52,0%
MATERIAL COMBUSTIBLE			
Papel	15,0%	11,0%	20,0%
Cartón	5,6%	3,0%	8,0%
Plásticos	9,8%	8,0%	13,0%
Madera	0,7%	0,5%	0,9%
Textiles	3,8%	3,5%	4,5%
Celulosa	3,0%	1,6%	4,0%
<i>Subtotal</i>	37,9%	27,6%	50,4%
TOTAL	100%		

Figura 33. Composición media de RSU en España (año 2000).

El origen de los residuos es fundamentalmente humano y se encuentra ligado al producto interior bruto (PIB) de los países, por lo que las políticas de

LA COMBUSTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

la Unión Europea están encaminadas a desacoplar estas dos variables. En algunos años, parecía que se había conseguido, ya que las curvas de PIB crecían a distinta velocidad que las de producción de residuos, aunque en tiempos de crisis ha vuelto a acoplarse como podemos ver en la Figura 34, se reduce la riqueza y se reduce los RSU. En España, en los años de superávit se ha alcanzado hasta 27Mton/año de RSU mientras que en estos momentos el volumen se ha reducido a 23Mton/año.

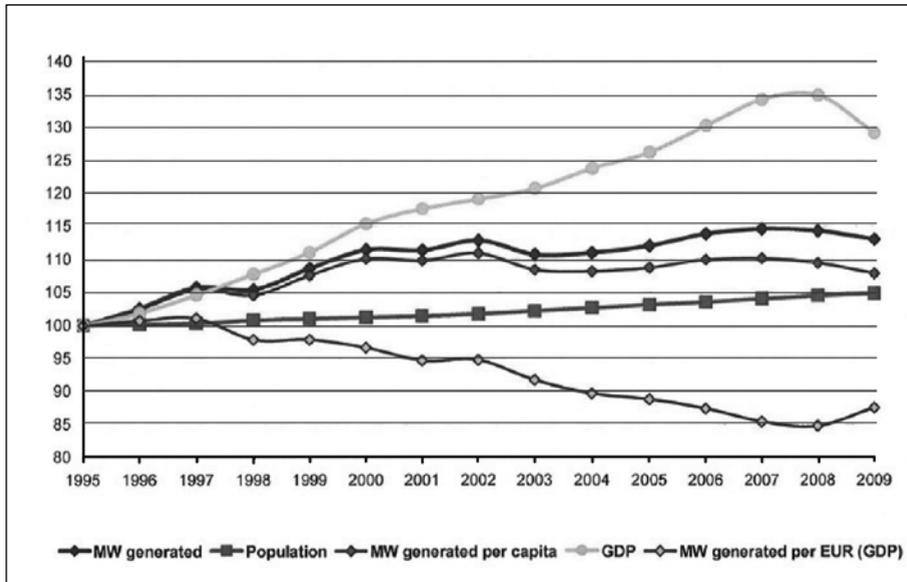


Figura 34. Evolución de los RSU, PIB y población en la UE-27.
(Fuente: Elaboración propia).

Existen cuatro posibilidades de tratamiento de los residuos:

- Vertedero: no hacer uso de los RSU.
- Reciclaje y recuperación de los materiales.
- Compostaje y aprovechamiento de la materia orgánica como fertilizante.
- Incineración o recuperación energética de los materiales no susceptibles de ser reciclados pero pueden ser aprovechados por su poder calorífico.

En la Figura 35 se puede ver la estrategia de los distintos países de la Unión Europea frente a la producción de RSU. El código de colores muestra las estrategias de los países más avanzados frente a los menos en cuanto a tratamiento

BIOMASA Y SUS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS APLICADAS

de RSU. España se encuentra en los puntos medios, ya que hay un 57% de los RSU que van directamente a vertedero, mientras que los países más avanzados como Alemania, Holanda están casi a 0% de RSU a vertedero.

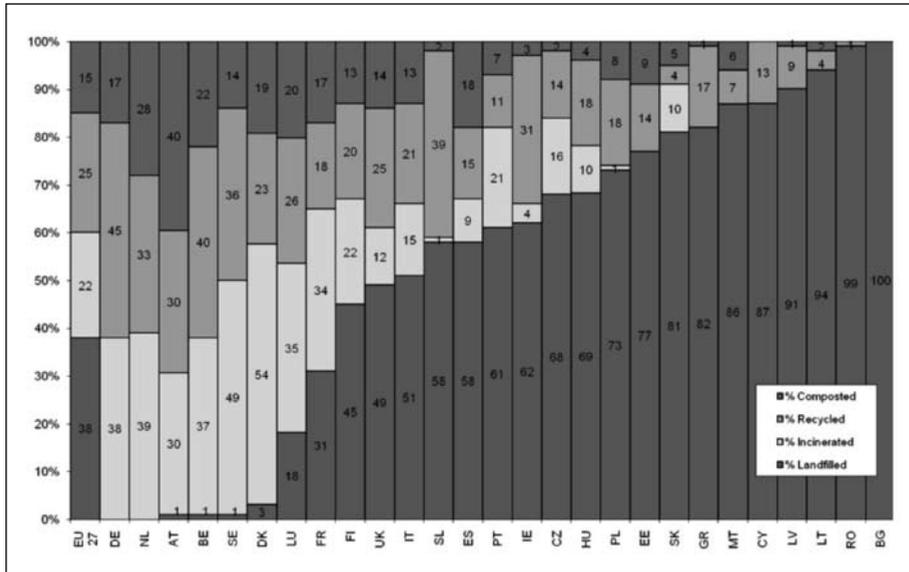


Figura 35. Tratamiento de RSU en la UE-27 (2010).
(Fuente: Elaboración propia).

Si vemos en la Figura 36 el porcentaje de RSU que va a vertedero, hay que tener en cuenta no solo la que va directamente, si no los residuos que son descartados en los tratamientos y acaban igualmente en vertedero.

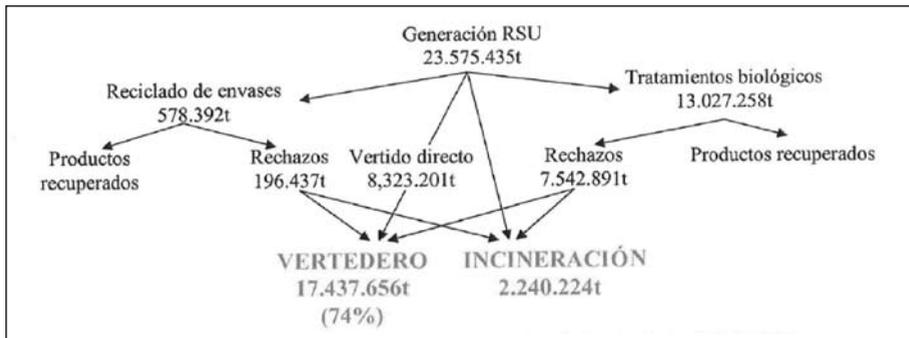


Figura 36. Desfase entre las cantidades de RSU generadas y los inputs a las distintas opciones de gestión. (Fuente: Elaboración propia).

LA COMBUSTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

En España según la Figura 4, de los 23Mton/anual, 13,5 Mton/anales pasa por los tratamientos biológicos y del reciclado de envases, pero los rechazos suponen en casi 8 Mton/anales, por lo que realmente se está reciclando 5Mton/anales y se están realmente enviando a vertedero un 74% de los RSU.

2. TRATAMIENTOS ACTUALES: VERTEDERO

Actualmente como ya se ha comentado hay un vertido de 17,4 Mton/anales de vertido directo más el rechazo de las plantas de tratamiento mecánico biológico.

La fracción orgánica de los RSU, que supone más del 68%, hay que reducirla ya que es la susceptible de digestión anaeróbica y produce gases de efecto invernadero como el metano. Esta producción de metano tiene la ventaja de captación y aprovechamiento energético del biogás generado en el vertedero, pero también supone varios inconvenientes como son la falta de terreno, el impacto ambiental, o el incumplimiento del RD 1451/2001.

El RD 1452/2001, trasposición de la Directiva Europea de Vertedero, obliga a reducir la fracción orgánica biodegradable de los RSU (FORSU) enviadas a vertedero según el calendario siguiente:

- 16-Julio-2006.- 75% de la FORSU generada en 1995 (8,7Mt/año)
- 16-Julio-2009.- 50% de la FORSU generada en 1995 (5,8Mt/año)
- 16-Julio-2016.- 35% de la FORSU generada en 1995 (4Mt/año)

España no cumplió los límites en el 2009 y no hay expectativas de alcanzar los límites impuestos para el 2016, y como puede verse por bastante, casi el 70-80%, recordar que países como Alemania están en el 0%.

Actualmente nos encontramos en un periodo en el que prevalece el síndrome NIMBY (No In My Back Yard) y el síndrome BANANA – (Building Absolutely Nothing Anywhere Near Anybody), y no se ha construido en los últimos años plantas de procesamiento.

3. NORMATIVA EUROPEA RESIDUOS

La legislación europea acerca de los residuos es numerosa, las principales normativas y su transposición a la legislación española es:

- RESIDUOS:
 - Directiva Europea: 91/156/CEE del Consejo de 1991 por la que se modifica la Directiva 75/422/CEE, del Consejo, de 15 de Julio de 1975

Nueva: 2008/98 de 19 de Noviembre del Parlamento Europeo y del Consejo.

- Legislación Española: Ley 10/1998, de 21 de Abril, de Residuos (BOE nº 96 de 22/04/98) Transpuesta por Ley 22/2011 del 30 de Julio.
- ENVASES:
 - Directiva Europea:94/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de Diciembre, relativa a los envases y residuos de envases 2004/12/CE que modificó a la directiva 94/62/CE
 - Legislación Española: Ley 11/1997, de 24 de Abril, de Envases y residuos de Envases (BOE nº 99 de 25/04/97) Real Decreto 252/2006, del 3 de Marzo por el que se revisan los objetivos de reciclado y valorización de la Ley 11/1997 y su Reglamento según Real Decreto 782/1998 de 30 de Abril.
- VERTIDOS:
 - Directiva Europea: 1999/31/CE del Consejo de 26 de Abril de 1999, relativa al vertido de residuos.
 - Legislación Española : Real Decreto 1481/2001, de 27 de Diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero (BOE nº 25 de 29/01/02).
- INCINERACIÓN:
 - Directiva Europea: 000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de Diciembre de 2000, relativa a la incineración de residuos (DOCE nº L332 de 28/12/00).
 - Legislación Española: Transpuesta al Derecho Español por Real Decreto 653/2003, de 30 de Mayo sobre incineración de residuos.
- PREVENCIÓN Y CONTROL INTEGRADO DE LA CONTAMINACIÓN:
 - Directiva Europea: 2008/1/CE de Enero de 2008 relativa a la Prevención y Control integrado de la Contaminación referente a la autorización integrada de las instalaciones potencialmente contaminadas, llamada comúnmente I.P.P.C.
 - Legislación Española: Ley 16/2002 de 1º de Julio de Prevención y Control integrado de la Contaminación relativa a evitar o al menos reducir, las emisiones de actividades contaminantes en la atmósfera, el Agua y el suelo, incluido los residuos en su conjunto. Pendiente de transponer.

- TRAMITACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS:
 - Directiva Europea: Documento de trabajo de la Comisión Europea relativa al Tratamiento Biológico de los Residuos Biodegradables.
- PLAN NACIONAL INTEGRADO DE RESIDUOS:
 - Legislación Europea: Plan nacional 2008-2015 (PNIR) para cumplir la Ley 10/98 de Residuos. (Posible modificación para cumplir la nueva Ley 22/2011) Marca objetivos concretos para: Valorización de la Materia Orgánica, Valorización Energética (9%), Vertedero y Recogidas selectivas.

El Parlamento Europeo en su informe sobre el cumplimiento de la Directiva Marco relativa a residuos 75/442/CEEE, indica en su punto14: “Considera que todos los Estados miembros deben contar con una capacidad de incineración suficiente para los residuos domésticos que permita la Valorización Energética en el caso de los residuos para los que no se dispone de forma de tratamiento alternativa que ocupen un lugar superior en la jerarquía de residuos de la U.E. como la Reutilización y el Reciclado de Materiales. Y la nueva Directiva 2008/98 ya fija la jerarquía e incluye concretamente la Valorización Energética de Residuos como la Incineración.

Los principios de la Unión Europea referente a residuos son:

- Principio de Sostenibilidad.
- Principio de Precaución.
- Principio de que el que contamina paga.
- Principio de Autosuficiencia.
- Principio de Proximidad.

Los dos últimos indican que el tratamiento de los residuos debe ser cercano al origen y acorde a la cantidad generada, siempre teniendo en cuenta la economía de escala, es decir, plantas de mayor capacidad suponen menores costes.

También la Unión Europea indica una jerarquía de acciones en la Directiva 2008/98/CE, por primera vez en una directiva, que son las cuatro “R” (4R) y las tres “P” (3P).

- 4R:
 - 1.º REDUCIR (MINIMIZAR) la cantidad de Residuos generados. La gran ventaja de esta acción es que, al no consumir nuevos materiales, se preservan los recursos naturales existentes, además de no requerir Gestión de Residuos. Por tanto es la acción más barata

y más sostenible, pero es difícil de conseguir a corto plazo, pues requiere un cambio en la mentalidad actual, muy extendida, de “Usar y Tirar”.

- La novedad de esta Directiva, es que incluye, en el concepto de “Reducir”, el hecho de “Reutilizar o Reusar “determinados productos, ya que entiende que si un producto se “reutiliza” se está evitando la producción de uno nuevo y por tanto se ha “minimizado”. Sin embargo entiende que el “reutilizar” un producto no es gratis, pues hay costes económicos y medio-ambientales para que ese producto pueda ser reutilizado sin riesgo, por ejemplo Costes de transporte, De limpieza etc. Por ello han cambiado el segundo puesto de la Jerarquía sustituyendo “Reutilización” por:
- 2.º PREPARACION PARA LA REUTILIZACION: Incluye por tanto el análisis COSTE/BENEFICIO de todas las acciones necesarias para lograr que un determinado producto sea “REUTILIZADO” de nuevo. Esto se consigue con los análisis de Ciclo de Vida de ese producto, de ese producto desde su origen hasta su final como residuo (de la Cuna a la Tumba).
 - El análisis de Ciclo de Vida se ha convertido en especialmente importante ya que, según su resultado, puede llegar a alterar el orden de la Jerarquía Por ejemplo, puede ser más interesante y estar justificado realizar una Valoración Energética que un Reciclaje si se demuestra que lo primero tiene un beneficio TOTAL mayor.
 - 3.º RECICLAR: Significa transformar el material de un producto en su materia prima original mediante alguna operación mecánica (por ejemplo TRITURACION) de tal manera que, posteriormente, se pueda de nuevo utilizar para producir el mismo o diferente producto.

Hay que tener cuidado con la calidad del Material reciclado y sus costes, pues muchas veces difiere de la materia virgen de la que partió.
 - 4.º VALORIZACION ENERGETICA: Significa recuperar la energía contenida en los Residuos transformando su energía química en térmica y ésta, a su vez, en Electricidad y/o Calor/Frío.
 - Con esta acción se sustituye la utilización de otros combustibles, sobre todo de origen Fósil, (Petróleo, Carbón. Gas Natural) que tienen mayor poder contaminante. Además se reduce grandemente la utilización del VERTEDERO.

LA COMBUSTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

- Las características específicas de los Residuos (heterogeneidad) impide que la Valorización Energética tenga el mismo rendimiento eléctrico que la combustión de combustibles fósiles o Biomasa pura. También obliga a fuertes inversiones en la Limpieza de Gases y en la eliminación de un pequeño porcentaje de Cenizas Volantes (3-4% de total incinerado). Al tratamiento térmico de residuos se le aplican las normas de emisión más estrictas de gases a la atmosfera de todos los procesos industriales existentes.
- Es una solución inevitable para tratar los restos de los procesos de tratamiento y recuperación de los materiales que forman parte de los residuos, antes que
- Enviarlos a Vertedero.

5.º VERTEDERO (Solo para “el residuo del residuo”). Es inevitable, ya que siempre quedará una fracción inerte o inertizada, que es necesario enterrar. Todo núcleo urbano debe contar siempre con un lugar que sirva como “Vertedero de cola” y que cumpla con las estrictas norma para su diseño, construcción, operación y clausura.

- Es de fácil operación y de bajo coste, pero apenas se obtiene un pequeño beneficio (Biogás). Tiene un alto riesgo potencial de contaminación a la atmósfera y al subsuelo si no se opera bien y representa una pérdida total de recursos recuperables.
- Por ello ocupa el último lugar de la Jerarquía.

- 3P:

1. Público
2. Privado
3. Pueblo

4. PROCESOS TRATAMIENTO RSU

Los procesos actuales de tratamiento de los residuos sólidos urbanos se pueden ver en la Figura 37. Conceptos de tratamiento:

- En primer lugar está la recuperación de los materiales, siempre que el residuo lo permita,
- En segundo lugar los procesos de conversiones biológica o de baja temperatura, ya sea mediante digestión anaerobia o compostaje.
- En tercer lugar la conversión térmica o de alta temperatura, combustión, gasificación, pirolisis o plasma.
- Por último, la conversión química para recuperar los materiales elementales como el carbono, el hidrógeno, etc.

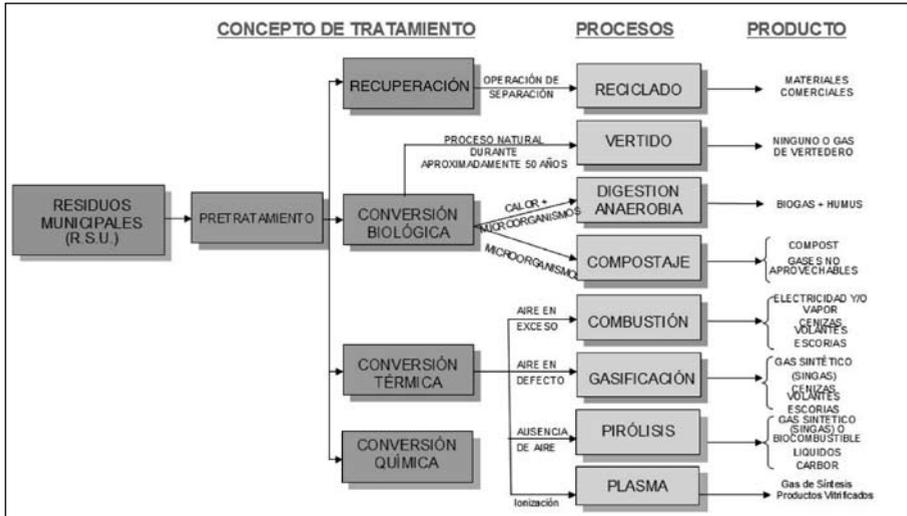


Figura 37. Opciones para valorizar los residuos municipales.
(Fuente: Elaboración propia).

5. COMBUSTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Los aspectos fundamentales en la combustión de los residuos sólidos urbanos son :

1. ELIMINAR la mayor parte de la fracción sólida de los RSU (fracción combustible) de una manera ambientalmente correcta, reduciendo casi por completo las emisiones gaseosas contaminantes y totalmente la posible contaminación de suelos
2. RECUPERAR algunos de los materiales que todavía quedan en el Rechazo Combustible (metales y escorias). Solo queda un pequeño porcentaje de Cenizas Volantes (3 – 4 % del peso inicial)
3. RECUPERAR al máximo posible de la ENERGIA Química de los Residuos transformándola en Energía Térmica y ésta en Eléctrica. La recuperación energética se consigue mediante un ciclo Rankine convencional que utiliza como combustible la fracción rechazo de los RSU. La plantas de combustión están compuestas por una caldera, un turbogruppo, un aerocondensador y las bombas de alimentación.

Las diferentes tecnologías de combustión de RSU pueden verse en la Figura 38. Son tecnologías que consiguen reducir los residuos además de producir energía.

LA COMBUSTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

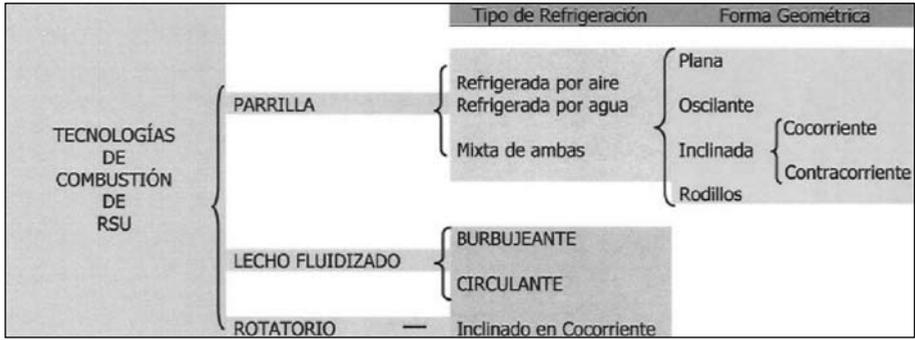


Figura 38. Tecnologías de combustión de RSU.

Las Tecnologías de Incineración, de recuperación energética, han demostrado:

- Que tienen una disponibilidad muy alta mayor del 85% en consonancia con su aplicación a un producto que se renueva todos los días, como son los RSU.
- Que han demostrado una robustez y fiabilidad en cuanto a mantener su proceso de una forma continua y constante en su capacidad de tratamiento
- La Energía que se recupera es: limpia, continua, cercana a los centros de consumo (no se necesitan altos voltajes y hay pocas pérdidas de transformación) y en gran parte (más del 50%) es renovable.

En la Figura 39 se indican las toneladas equivalentes de CO2 producido por tonelada de Residuo Sólido Urbano, tratado según los diferentes sistemas de

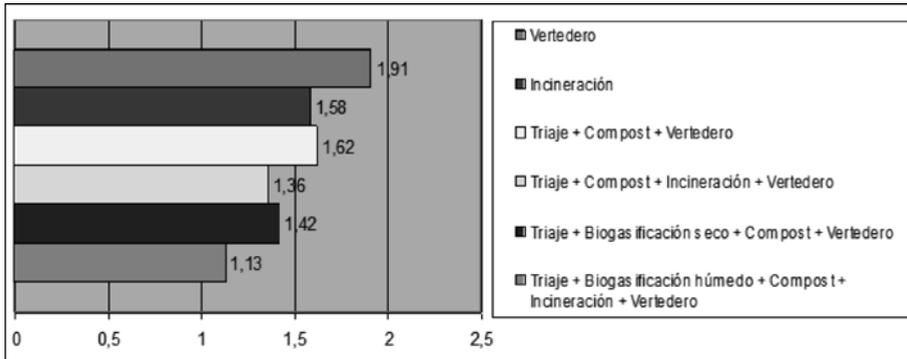


Figura 7. Factores de emisión de gases efecto invernadero según sistemas de tratamiento RSU.

tratamiento usualmente utilizados. Las toneladas equivalentes de CO₂ corresponden a la suma del CO₂ generado mas los efectos similares a los del CO₂, que proceden de otros gases nocivos para el efecto invernadero, como son el metano y componentes orgánicos persistentes.

Se ha propuesto una fórmula para el cálculo de la eficiencia energética de incineración de RSU.

$$T \geq \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0.97 \cdot (E_w + E_f)}$$

Donde:

- T=0.6 para instalaciones existentes con permiso antes del 1 de Enero del 2009.
- T=0.65 para nuevas instalaciones.
- $E_p = 2.6 E_{\text{eléctrica producida}} + 1.1 E_{\text{térmica-expor}}$.
- E_f es la Energía anual entrada con combustibles que produzcan vapor.
- E_w es la Energía total de los RSU (P.C.I.x ton/año).
- E_i es la Energía eléctrica importada de la red para incinerar residuos.
- Se considera un 97% por pérdidas por radiación y cenizas.

Para el cálculo anterior no se tiene en cuenta las condiciones locales, ni el tamaño o capacidad de la planta, ni el poder calorífico inferior del residuo además, deja fuera a casi todas las plantas antiguas. Además, hay que pensar que se consigue un rendimiento térmico superior al 70% que en países nórdicos, por la condiciones ambientales se aprovecha, pero que en países como España más cálidos no. También tener en cuenta que en España no se permite la instalación de estas plantas a menos de 15-20 km del consumo, por lo que no se puede aprovechar para calefacción como sucede en otros países que ya tiene una importante estructura de calefacción de distrito por las pérdidas que conlleva las largas distancias.

Si vemos las ganancias posibles de rendimiento termoeléctrico, éste es menor que en las plantas de carbón o gas natural porque no se puede elevar las temperaturas por el alto contenido en cloro o azufre. Hay algunas acciones que se pueden llevar a cabo para incrementar el rendimiento eléctrico de las plantas de combustión con RSU. Podemos ver algunos números:

LA COMBUSTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Rendimiento para un RSU con poder calorífico inferior (P.C.I.) de 2000 kcal/kg	24 %
a) Incremento por mejor aislamiento de caldera y reducción de pérdida de radiación y convección	0 - 0,5 %
b) Incremento por reducción de exceso de aire(1,7 veces)	0,8 - 1 %
c) Incremento por mejores condiciones de vapor: 450 ° C y 60 bar	1,5 %
d) Reducción de temperatura de salida de gases de caldera a 160 ° C	0,8 - 1 %
e) Reducción de pérdidas por inquemados en escorias a 1,5 %	1,3 %
Rendimiento total:	25,6 %- 29,3 %

Por lo tanto llegaríamos a ganar casi un 5%.

Los beneficios de la incineración en el tratamiento de los RSU pueden verse en la Figura 40. Con la combustión se reduce significativamente el aporte de residuos a los vertederos.

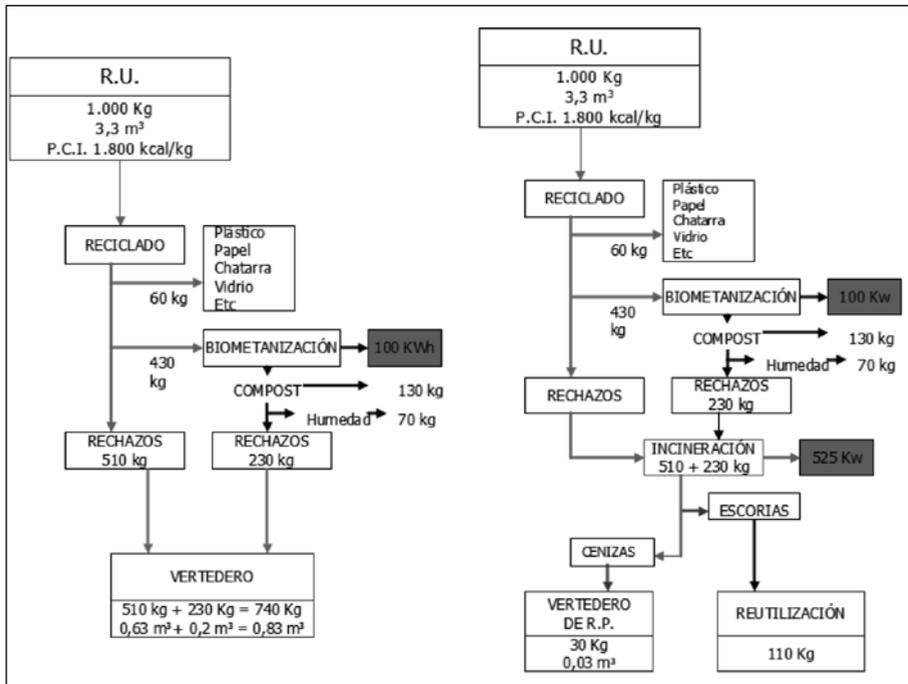


Figura 40. Beneficios incineración.

BIOMASA Y SUS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS APLICADAS

Y por último se puede ver en la Tabla 5 las soluciones adoptadas para cumplir con la normativa medioambiental en cuanto a tema de emisiones de contaminantes o residuos de la combustión.

Tabla 5.
Soluciones técnicas problemas medioambientales combustión RSU

PROBLEMAS	SOLUCIONES
Polvo	Precipitadores electrostáticos Filtros de Mangas
Gases Ácidos (ClH-FH-SO ₂)	Dos etapas de lavado húmedo Absorbedor Semihúmedo Absorbedor Seco
Óxidos de nitrógeno	Sistemas DENO _x Eliminación Selectiva Catalítica (SCR)
Dioxinas y furanos	Adsorción por Carbón Activo Eliminación Catalítica Adsorción en Filtro de Mangas
Residuos sólidos: escorias y cenizas volantes	Lavado de escorias Tratamiento térmico – vitrificación Neutralización química Solidificación - encapsulado
Residuos líquidos	Precipitación multietapa – Fluoculación Precipitación – intercambio iónico Filtro de Carbón Activo Evaporación y Cristalización Producción de sales

El nivel de eliminación de los gases ácidos según las tecnologías está recogidos en la Tabla 6. Resaltar que son los límites de emisión más estrictos entre los procesos de combustión.

Tabla 6.
Nivel reducción gases ácidos

SISTEMA DE CONTROL	REDUCCIÓN DE CONTAMINANTE		
	HCl	HF	SO ₂
Inyección seca + Filtro de mangas (T=160°-180°C)	80%	98%	50%
Inyección seca + Reactor Lecho Fluido / Filtro Electrostático (T=230°C)	90%	99%	60%

LA COMBUSTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

SISTEMA DE CONTROL	REDUCCIÓN DE CONTAMINANTE		
	HCl	HF	SO ₂ .
Semihúmedo + Filtro electrostático	>95%	99%	50-70%
Semihúmedo + Filtro de mangas (T=140°-160°C)			70-90%
Seco/Semihúmedo (T=200°C)			>90%
Sistema Húmedo (T=40°-50°C)			
Sistema Húmedo/Seco (T=40°-50°C)			

Por último recoger la eficiencia de los diferentes procesos de abatimiento de dioxinas y furanos en la Tabla 7.

Tabla 7.
Soluciones técnicas problemas medioambientales combustión RSU

PROCESO	ABSORBENTE O ADSORBENTE	EFICIENCIA
Colector de Polvo	Polvo recogido en un filtro	70%
Lavado (scrubber)	Coke de carbón bituminoso	50%
Spray absorber + precipitador electrostático	Slurry de caliza Coke de carbón bituminoso + slurry de caliza en 500 mg/N ³ m	60% 90%
Proceso Lecho Fluidizado	Zeolita Coke de carbón bituminoso (80 mg/m ³)	95% 99.9%
Proceso Catalítico	NH ₃ o H ₂ O ₂ .	95-99%
Spray absorber + filtro de mangas	Slurry de caliza + coke de carbón bituminoso en 500 mg/N ³ m	98%
Adsorción en inyección de flujo + filtro de mangas	Coke de carbón bituminoso (200 mg/m ³)	99%
Lecho fijo o lecho móvil	Coke de antracita	99.99%

Se ha llevado a cabo un estudio teórico de dispersión atmosférica y se ha evaluado la reducción de dispersiones y la eliminación del efecto negativo de las emisiones mediante las tecnologías correspondientes. En la Figura 41 puede verse a la izquierda las concentraciones de las emisiones según la legislación española de 1975 (límite de emisión 150 mg/m³) y a la derecha las emisiones según la legislación de la Unión Europea de 1989 (límite de emisión 30 mg/m³).

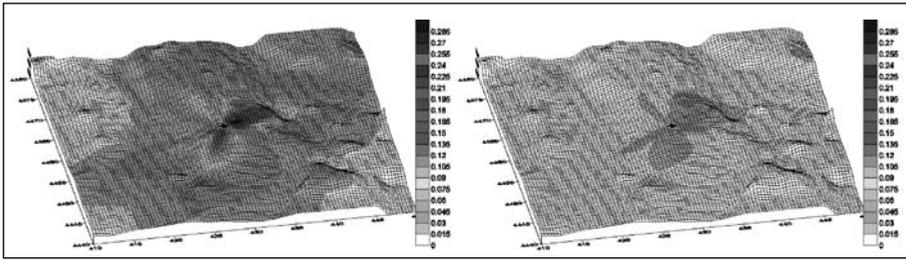


Figura 41. Resultado estudio dispersión.

Por último remarcar el gran potencial de la generación con biomasa, actualmente hay un potencial real de 3.695 ktep equivalentes y el objetivo es alcanzar los 683.000 ktep, como puede verse en la Tabla 8.

Tabla 8.
Plan de Fomento de las energías renovables.

INCREMENTO DE LA ENERGÍA DE LA BIOMASA PARA 2010						
TIPO DE ENERGÍA	1998		2010		Incremento	
	Ktep	%	Ktep	%	Ktep	%
Bioelectricidad	169	4,3	5.269	48,0	5.100	72,0
Biocombustibles (usos térmicos)	3.473	89,3	4.373	39,9	900	12,7
Bioetanol	--		500	1,4	500	7,0
Biogás	--		150	6,2	150	2,1
R.S.U.	247	6,4	683	4,5	438	6,2
TOTAL	3.892	100	10.978	100	7.086	100

Podemos resumir las ventajas e inconvenientes de la valorización térmica de residuos sólidos urbanos:

- Ventajas:
 - Ha probado su sólida experiencia durante mas de 100 años con alta disponibilidad (mayor del 90%).
 - Tratamiento seguro de los RSU con toda su heterogeneidad.
 - Reduce la generación de gases de efecto invernadero.
 - Produce cantidades significativas de Energía tanto térmica como eléctrica (500 Kwh/t), reduciendo por tanto la dependencia de fuentes externas y fósiles.
 - La generación de dioxinas es tan pequeña que apenas pueden detectarse. Actúa como sumidero de dioxinas ya que entran más que salen de la instalación.

LA COMBUSTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

- El mercurio contenido en las emisiones es en tan pequeña cantidad que ya no se considera como tema peligroso.
 - La energía producida es continua, limpia, y renovable en su mayor proporción.
 - Crea un número significativo de empleo sobre todo en calidad (locales).
 - Después del reciclaje y la fermentación es la solución ambientalmente mas segura para la eliminación de los RSU.
 - La valorización térmica con recuperación de energía, reduce drásticamente la necesidad de Vertedero.
 - Los productos finales obtenidos tienen valor económico y comercial (metales y escorias).
 - Existen variedad de procesos de Valorización térmica (incineración, gasificación, Pirolisis, plasma). La gasificación y la Pirolisis se aplican con mayor garantía y seguridad a residuos homogéneos y tienen menor disponibilidad.
 - Aceptada universalmente en Europa y en muchos otros países del mundo.
 - Van disminuyendo las objeciones ambientales hacia ella después de las nuevas tecnologías de Tratamiento de gases. Las reclamaciones de muchos ecologistas son o simplemente incorrectas o desfasadas. Estas protestas desaparecen o se reconvierten en adhesiones una vez que las plantas demuestran que trabajan mejor que lo prometido.
 - Los accesos a la planta son fáciles y cómodos para los camiones.
 - La necesidad de terrenos (superficie) es la más pequeña de todos los sistemas de tratamientos de los RSU.
- Inconvenientes:
 - Inicialmente su inversión es la mayor, aunque su repercusión por tonelada tratada se reduce dada la larga vida de este tipo de instalaciones (~25 años) y la gran cantidad de residuos que se puede tratar por línea (entre 6 y 50 t/h y línea).
 - Aún tiene una percepción negativa tanto pública como política debido a la mala imagen creada en los años 80 antes de la aplicación de la estricta normativa europea, tanto sobre la calidad de la combustión como sobre las emisiones de gases, sólidos y líquidos. Directiva 369/89 y 2000/76 de la U.E. I
 - Tiene rendimientos inferiores a plantas de carbón u otros combustibles por la composición heterogénea de los residuos, lo mismo sucede con la vida útil de la caldera.

CAPÍTULO V

TRATAMIENTO DE RESIDUOS MEDIANTE SISTEMA CONVERTIDOR DE PLASMA

Guillermo Moreno
Materiales Renovados

1. INTRODUCCIÓN

Los residuos presentan una gran problemática ya que hay un notable aumento del número y complejidad de los mismos. Por tanto hay una necesidad de una gestión adecuada de los residuos y el orden de preferencia de la gestión es: reducción, reutilización, reciclaje, valorización energética y vertido.

La gestión de los recursos obliga a garantizar la eliminación de manera segura de los residuos peligrosos, y conlleva un aumento de los requisitos legales para la gestión de residuos debido a los problemas sanitarios y ambientales que generan las instalaciones de tratamiento. Ahora bien, existe un claro rechazo social a las instalaciones de tratamiento de residuos.

El vertido controlado sigue siendo el destino final prioritario de la mayoría de los residuos urbanos, aunque cada día es más complicada la ampliación de los vertederos existentes o la apertura de otros nuevos. Hay que tener en cuenta que debido a las nuevas directivas es necesario valorizar el rechazo, así como reducir al mínimo los traslados de los residuos y su distancia recorrida.

Hasta ahora el método de tratamiento elegido como alternativa era el de la incineración sin aprovechamiento térmico, pero además de producir un gran rechazo social, ha quedado obsoleto con la aparición de innovadoras tecnologías mucho más seguras y respetuosas con el medio ambiente. A todo esto se le suma una tendencia de “descentralización” de las plantas de tratamiento de residuos, acercándolas así al punto de origen de los residuos lo que se traduce en una reducción del tamaño de dichas plantas. De esta manera se reducen los costes de transporte y emisiones de CO₂ derivadas de ello.

Teniendo en cuenta la creciente preocupación por el medio ambiente podemos ver como algunos gobiernos incentivan la valorización de los residuos, por ejemplo en el Reino Unido:

- Cabe destacar el mecanismo de los ROCs (Renovable Obligation Certificates)
- Los ROCs imponen a las compañías eléctricas que operan en el Reino Unido que una proporción creciente de su cartera de energía proceda de energías renovables.
- En cuanto a la aplicación a residuos resulta un Roc sobre tarifa de 40,71€/MWh del 1 Abril 2012 al 31 Marzo 2013.
- La aplicación de los ROCs comenzó en el 2002 en Inglaterra y Gales y en 2005 en Escocia y en Irlanda del Norte. Se ha estudiado que desde la introducción de este mecanismo en el Reino Unido se ha triplicado los niveles de generación de electricidad renovable del 1,8 % al 7% en 2010.
- Adicionalmente se impone una tasa de vertidos:
 - Con un mecanismo de compensación, lo cual sumado a la definición del principio de proximidad por ley (Condados), da lugar a plantas de 80 -150.000 TPD, todo esto hace que los tratamientos elegidos sean los ATT (Advanced Thermal Treatment): Pirólisis, Gasificación y Plasma.
 - En el presupuesto del 2010 se anuncio que la tasa de impuesto de vertedero se incrementaría en 8 € por tonelada cada año hasta al menos el 2014. A partir del 2014 se espera que la tasa este por encima de 80 € por tonelada.

En la Tabla 9 puede verse la comparación entre las distintas tecnologías disponibles para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos. La tecnología de plasma es una solución muy buena pero por ahora poco económica ya que en España la clasificación de los residuos no es adecuada y por tanto el rendimiento del proceso es bajo. Las tasas para calcular el impacto económico representan el coste de preparación y tratamiento y son valores reales de concursos públicos en Alcalá de Henares. Por otro lado el rechazo para la tecnología de Plasma presenta un nivel medio porque es desconocido.

Los residuos sólidos urbanos, son aquellos que se generan en las actividades desarrolladas en los núcleos urbanos o en sus zonas de influencia, como son los domicilios particulares, los comercios, las oficinas y los servicios. También son catalogados como residuos urbanos los que no son identificados como peligrosos y que por su naturaleza o composición puedan asimilarse a los producidos en los anteriores lugares o actividades.

TRATAMIENTO DE RESIDUOS MEDIANTE SISTEMA CONVERTIDOR DE PLASMA

Tabla 9.
Comparativa tecnologías tratamiento RSU. (MA: alto, A: alto, M: medio, B: bajo)

		INCINERACION	VERTIDO	PIROLISIS	GASIFICACION TRADICIONAL	GASIFICACION PLASMA GAS-OFF	GASIFICACION PLASMA DIRECTO
IMPACTO AMBIENTAL	EMISIONES	A	MA	M	A	M	M
	RESIDUOS	MA	MA	M	M	M	B
	AGUAS	A	A	M	M	M	M
	SUELO	B	MA	B	B	B	B
IMPACTO ECONOMICO	TASA RESIDUO [t/t]	120	-	128	134	121	88
	INVERSION [€/año]	550	-	600	687	669	493
IMPACTO ENERGETICO	PRODUCCION	0,54 – 0,76	-	1,04	0,33	1,18	2,01
	CONSUMO	0,11	-	0,6	0,07	0,72	0,90
RECHAZO SOCIAL		MA	MA	M	M	M	M
RIESGO LA TECNOLOGIA		B	B	A	B	M	M

El ciclo de los residuos sólidos urbanos consta de seis fases:

- Recogida selectiva en origen
- Planta de selección (compostaje, reciclaje)
- El rechazo se produce
- El rechazo va a un vertedero
- Cada día es más complicado la ampliación de los vertederos existentes o la apertura de otros nuevos.
- Debido a las nuevas directivas, es necesario valorizar el rechazo

Así como las reglas del tratamiento de residuos, las tres “R”:

- Reducir la generación de residuos
- Reutilizar
- Reciclar, evitando el uso de nuevos recursos naturales; papel, vidrio, metales, plásticos, etc.

BIOMASA Y SUS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS APLICADAS

La Directiva Europea 98/2008 incentiva plantas de tratamiento de RSU del tipo de clasificación, compostaje o biometanización, reciclaje y “Waste to Energy” a partir del combustible derivado de residuos.

El combustible derivado de residuos (CDR) es un combustible sólido, preparado y producido a partir de residuos urbanos y cuyo destino es la valorización energética bajo la legislación ambiental correspondiente. La calidad del CDR final dependerá de la tecnología térmica que lo utilice como combustible en función del nivel de emisiones, la potencia térmica de sustitución necesaria en el proceso o los problemas operacionales. Ahora bien, presenta numerosas ventajas:

1. Reducción de la fracción biodegradable de entrada a vertedero, requiriendo así menos suelo e incrementando su vida útil de tal manera que se optimiza la gestión de los residuos del vertedero. También se considera una alternativa a la deposición final en los vertederos.
2. Reducción del balance de emisiones de gases de efecto invernadero debido a la biomasa contenida en los CDR(CO_2 , CH_4) Menor consumo de combustibles fósiles.
3. Impulso para la sostenibilidad energética y medioambiental
4. Aumento del uso de las energías renovables, debido a su composición en biomasa.

El balance de masa y energía de una tonelada de CDR tratada con plasma en el que el objetivo es la obtención de hidrógeno, puede verse en la Figura 42.

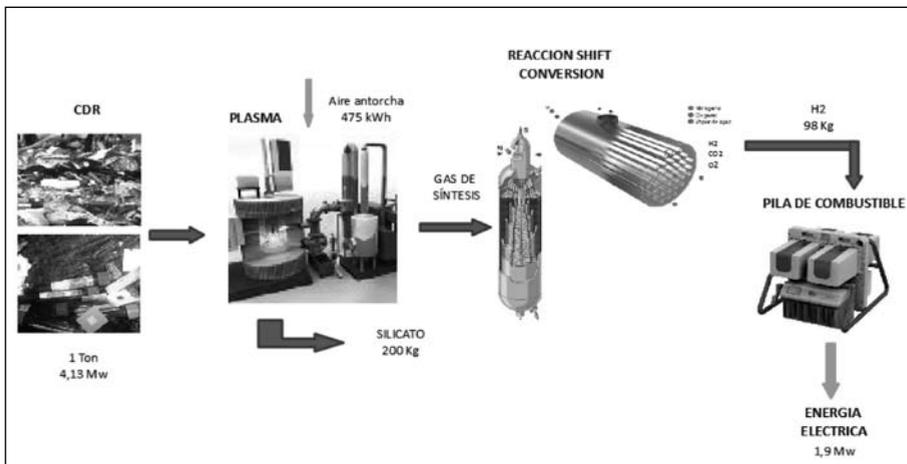


Figura 42. Balance de masa y energía CDR (por tonelada de residuo).
(Fuente: Elaboración propia).

TRATAMIENTO DE RESIDUOS MEDIANTE SISTEMA CONVERTIDOR DE PLASMA

La nueva pila de combustible cuenta con un nuevo sistema en el que se ha eliminado el catalizador de platino y se ha substituido por otro basado en nanotecnología con un sistema de posición en membranas lo que ha permitido la explotación comercial de la producción. La pila alcalina convencional funciona a temperatura ambiente o ligeramente superior, mientras que la nueva pila de combustible funciona con aire, no precisa oxígeno puro y por tanto los materiales con los que se trabaja son estándar, acero, plástico, papel, etc.

Durante el proceso de plasma se obtiene un gas de síntesis, monóxido de carbono e hidrógeno fundamentalmente, ahora bien, la cantidad de hidrógeno de los residuos sólidos urbanos no es alta en peso. EL proceso de “water-shift” permite transformar el monóxido de carbono más agua en hidrógeno y dióxido de carbono, y el hidrógeno aplicarlo a la pila de combustible mejorada. El rendimiento eléctrico actual obtenido de las pilas es del 48%.

2. SISTEMA CONVERTIDOR DE PLASMA

En la actualidad, cada vez se hace más necesario contar con una tecnología que contribuya al desarrollo sostenible para así poder subsanar la creciente problemática de los residuos. El Sistema Convertidor de Plasma se presenta como una solución a dicho problema, ya que es capaz de obtener energía y productos útiles (gas de síntesis y silicato) a partir de recursos renovables como los residuos, respetando el medio ambiente y siendo un impulso para las energías alternativas así como un ejemplo de sostenibilidad ecológica.

La tecnología de ARCO DE PLASMA es una tecnología muy eficiente así como autosuficiente y cuenta con una gran flexibilidad, siendo capaz de producir electricidad, diesel, metanol, hidrógeno. La tecnología de arco de plasma permite trabajar en las siguientes áreas:

- Residuos Sólidos Urbanos (RSU)
- Residuos Industriales: Sector del Papel
- Residuos Industriales: Neumáticos usados
- Residuos Industriales : Sector del Biodiesel
- Residuos Tóxicos y Peligrosos
- Residuos Hospitalarios
- Residuos Farmacéuticos

Las principales características del sistema convertidor de plasma son: Su eficacia a pesar de los cambios en la composición de los residuos, la eliminación de manera segura e irreversible de los residuos peligrosos, la producción de emisiones muy bajas a la atmósfera y un material inerte (silicato), además es un método de recuperación que genera productos de valor como

son la energía y nuevos materiales y cumple con los requisitos ambientales más estrictos.

Existe la percepción en algunos círculos de que la gasificación por plasma es esencialmente la incineración, ya que tanto en la incineración y la gasificación por plasma, los desechos se reducen a volúmenes mucho más pequeños. Pero mientras que la incineración se centra en la reducción de los residuos a cenizas, la gasificación implica la conversión de los residuos en gas de síntesis y un silicato vitrificado inerte con recuperación de energía y metales valiosos. Podemos ver en la Tabla 10 la diferencia entre ambas tecnologías.

Tabla 10.
Incineración vs Sistema Convertidor de Plasma

Gasificación por Plasma	Incineración
Ocurre en la ausencia o casi ausencia de oxígeno, no hay combustión.	El exceso de aire es inducido a garantizar una combustión completa.
Los gases resultantes de la degradación de los compuestos orgánicos se recogen y se utilizan para la producción de diversas formas de energía y/o productos químicos industriales.	Toda la energía potencial se convierte en calor.
Los productos de degradación son en gran parte convertidos a inertes (no peligrosos) silicato vitrificado de un volumen de 6% al 15% del volumen de sólidos original.	Resultados de combustión en cenizas (hasta un 30% del volumen de los sólidos originales) que a menudo deben ser tratados como residuos peligrosos.
Emisiones sustancialmente menores que las resultantes de la incineración.	Emisiones mucho más contaminantes de gases de efecto invernadero y otros que con los sistemas de gasificación térmica.

Investigaciones independientes de la gasificación por arco de plasma en este estudio muestran que el proceso de gasificación por plasma es muy diferente de la incineración, dando como resultado menos emisiones; una proporción menor de residuos sólidos tras su transformación; un residuo, que es inerte y una potencial materia prima para productos con valor añadido; y un gas de síntesis que se puede utilizar para generar calor o energía, o como materia prima para la industria de productos químicos o combustibles líquidos.

TRATAMIENTO DE RESIDUOS MEDIANTE SISTEMA CONVERTIDOR DE PLASMA

La separación en origen antes del arco de plasma es muy deseable desde perspectivas económicas y ambientales y prácticamente cualquier material puede ser descompuesto en un sistema de arco de plasma.

El principal producto sólido de la gasificación por plasma es un silicato (vitricado) inerte que representa de 1/12 a 1/6 el volumen de la corriente de los residuos originales. Actualmente no hay casos documentados de incidentes de salud / seguridad o temas relacionados con las plantas de gasificación por plasma.

La Figura 43 muestra los componentes de un sistema convertidor de Plasma. Básicamente es un crisol con una antorcha y un sello de agua para controlar las sobrepresiones a la salida del gas de síntesis. La entrada del combustible puede ser superior o lateral, y el combustible puede ser introducido como líquido, como sólido, como gas o mezcla de cualquiera de ellos.

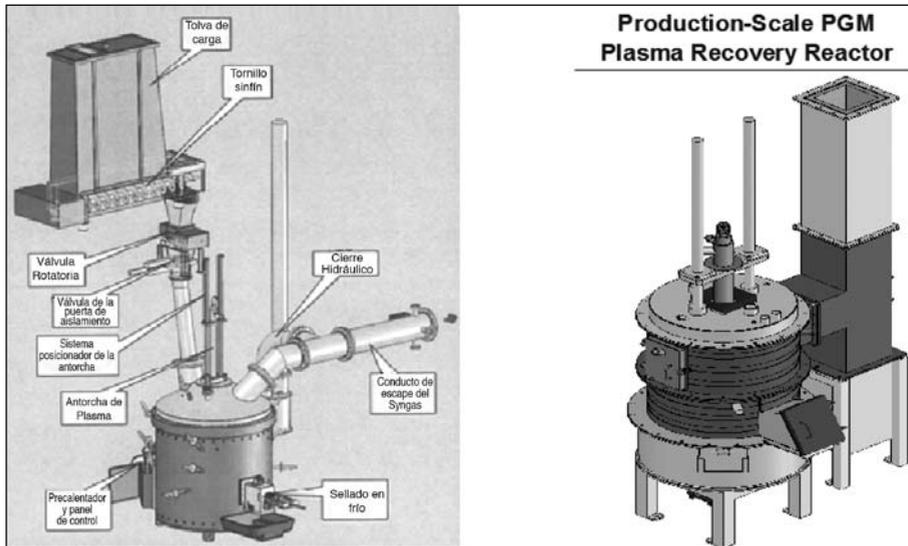


Figura 43. Sistema convertidor de Plasma. (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 44 tenemos fotografías de plantas reales de plasma, con una producción de 1.500 ton/día, pero el tamaño no es proporcional, una planta de 15.000 ton /día no duplicaría el tamaño a la de las fotografías ya que depende de la raíz cúbica del radio del crisol

En el proceso de plasma la intensidad del plasma excita y rompe los enlaces moleculares, produciéndose la “disociación molecular” de esta manera recicla los residuos, convirtiéndolos en materias primas: un gas de síntesis, metales y silicato. El proceso consta de siete etapas:



Figura 44. Plantas reales Plasma. (Fuente: Elaboración propia).

- Alimentación
- Disociación
- Enfriamiento
- Separación de partículas
- Lavado en Quench
- Neutralizado en Scrubber
- Extracción

En el proceso de conversión la antorcha produce un campo eléctrico y térmico, y el arco eléctrico por su alta temperatura y la existencia de electrones libres produce la disociación molecular, y una estratificación por peso de los distintos componentes del residuo. El gas de síntesis no se produce por oxidación de la materia. Los metales pesados y tierras raras van al fondo depositándose y formando una matriz vítrea y el resto, el gas de síntesis (45% H_2 – 55% CO), es extraído por un extractor final. El cloro presente en los residuos se extrae como clorhídrico (HCl), el flúor como ácido fluorhídrico (HF) y el azufre como ácido sulfhídrico (HS). Se consiguen importantes reducciones volumétricas de los residuos, del orden de 300 a 1 y se sobrepasa en varios órdenes de magnitud los requerimientos ambientales y de seguridad actuales.

En cuanto a los temas económicos, la construcción y operación presenta un coste inferior al de otras plantas con tecnologías comparables, además hay una reducción de gastos fijos, una reducción del coste asociado a la responsabilidad por emisiones a la atmósfera, vertidos al agua o producción de residuos peligrosos y supone una nueva fuente de ingresos a partir de residuos que antes representaban un gasto operativo. El proceso produce varias materias primas: gas de síntesis y silicato, que pueden ser comercializados de diversas formas.

Es un sistema seguro y virtualmente cerrado, sin impacto negativo en el ambiente:

TRATAMIENTO DE RESIDUOS MEDIANTE SISTEMA CONVERTIDOR DE PLASMA

1. Diseñado para eliminar posibles emisiones o descargas innecesarias. Sistema configurado en ciclo cerrado.
2. Según volumen y composición del residuo a procesar, la valorización del gas de síntesis puede configurarse para producir: energía eléctrica y productos químicos como metanol, diesel...

Contribuye al desarrollo sostenible ya que se obtiene energía y productos útiles (gas de síntesis y silicato) a partir de recursos renovables como los residuos y presenta un sistema de depuración de gases ejemplar: sin emisiones a la atmósfera.

En la actualidad, cada vez se hace más necesario contar con una tecnología que contribuya al desarrollo sostenible para así poder subsanar la creciente problemática de los residuos. El Sistema Convertidor de Plasma se presenta como una solución a dicho problema, ya que es capaz de obtener energía y productos útiles (gas de síntesis y silicato) a partir de recursos renovables como los residuos, respetando el medio ambiente y siendo un impulso para las energías alternativas así como un ejemplo de sostenibilidad ecológica.

CAPÍTULO VI

VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE BIOMASA Y
RESIDUOS MEDIANTE OXIDACIÓN CATALÍTICA EN
PLANTAS DE MEDIANA ESCALA

Víctor de Ávila
Waste to Energy

1. INTRODUCCIÓN

La empresa WASTE TO ENERGY diseña, desarrolla e instala soluciones energéticas orientadas a recuperar el poder energético latente en la biomasa y residuos para generar energía distribuida limpia y sostenible

El núcleo de la propuesta de valor es el proceso de oxidación catalítica que permite recuperar eficientemente el contenido calórico potencial de biomasa o residuos y las soluciones desarrolladas se conocen como CHP (Combined Heat & Power) para ser aprovechadas en distintas aplicaciones como son el agua caliente sanitaria, calefacción, generación de frío, vapor de proceso, secado de lodos y biomasa, etc.. Mediante plantas modulares de reciclaje energético de pequeña y mediana escala de 2 hasta 8 MWe orientadas a resolver el problema de los residuos para aprovecharlos como combustible.

Los cinco segmentos interesados en la recuperación de los RSU para cogeneración son:

- Ayuntamientos, Comunidades o Autonomías.
- Generadores de residuos industriales como son la industria química, la de alimentación o la papelera. Son grandes generadores de residuos que hasta hace poco se deshacían de ellos ya que el *tipping fee* era muy bajo pero ha ido aumentando, y este aumento del coste ha desarrollado la tecnología y la eficiencia de los procesos para recuperación energética. En los países como Reino Unido o Alemania el precio de la tonelada de

BIOMASA Y SUS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS APLICADAS

RSU está en 150-200 €/ton mientras que en España el precio está en 50-60€/ton.

- Gestores de residuos. Los vertederos poseen una fracción rechazo muy importante y además se están alcanzado los límites del mismo.
- Propietarios de biomasa forestal o cooperativas agrícolas.
- Fondos de inversión interesados en la biomasa.

La conversión de los RSU en ingresos, no solo por evitar los costes de vertedero si no por la energía generada además de reducir la huella de carbono, reducir el transporte de proximidad.

El modelo energético actual está basado en la importación de combustibles fósiles y un bajo grado de autoabastecimiento energético. Si vemos el caso Español en la Figura 45, hay una gran dependencia de energía primaria. En el 2010, España importó el 89% de la energía total que consumió y por experiencia se sabe que la dependencia energética puede afectar gravemente la capacidad de crecimiento de un país.

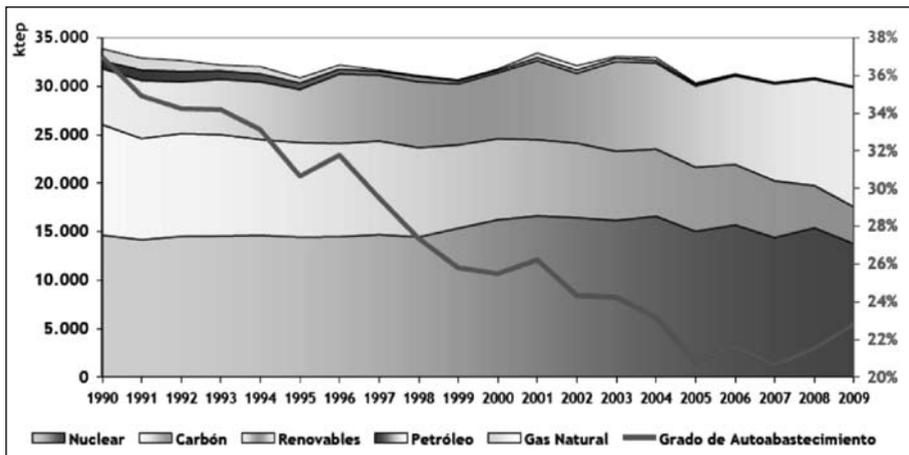


Figura 45. Producción Local de Energía y Grado de autoabastecimiento.
(Fuente: Elaboración propia).

Mientras que por otro lado vemos que tenemos una gran cantidad de residuos sólidos (RSU), 4.000 millones de ton/año y creciendo, se sabe que 1 ton de RSU genera 600 kW_e de potencia, pero tan solo el 2% de esa energía potencial se aprovecha, el resto se entierra en vertederos.

Enterrar la basura sigue siendo el método más extendido y utilizado en el mundo para gestionar los residuos por tanto se está perdiendo la oportunidad

VALORACIÓN ENERGÉTICA DE BIOMASA Y RESIDUOS MEDIANTE OXIDACIÓN CATALÍTICA

de aprovechar el poder calorífico contenido en los residuos para generar energía limpia y renovable. En algunas ciudades se está convirtiendo un asunto crítico resolver el problema de la basura

La evolución de la producción de RSU se puede ver en la Figura 46. Hay 250 Mton/año que supone un potencial energético de 37 Mtep.

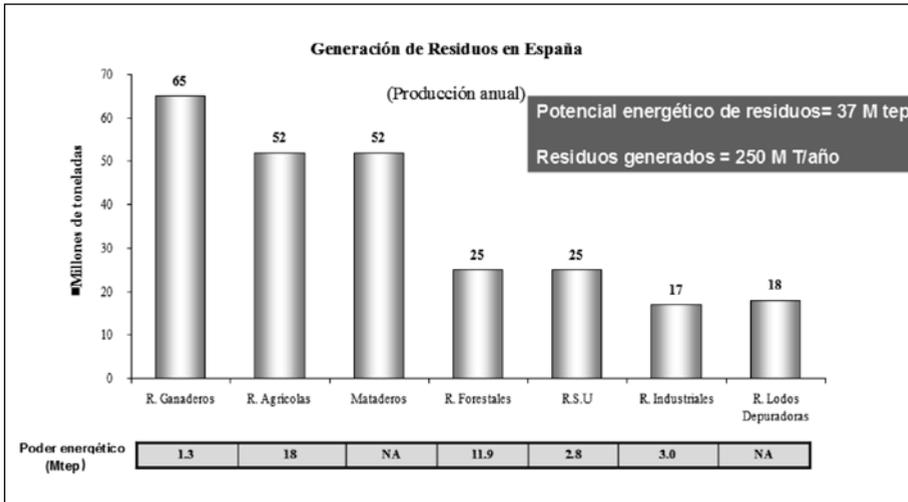


Figura 46. Generación de residuos en España. (Fuente: Elaboración propia).

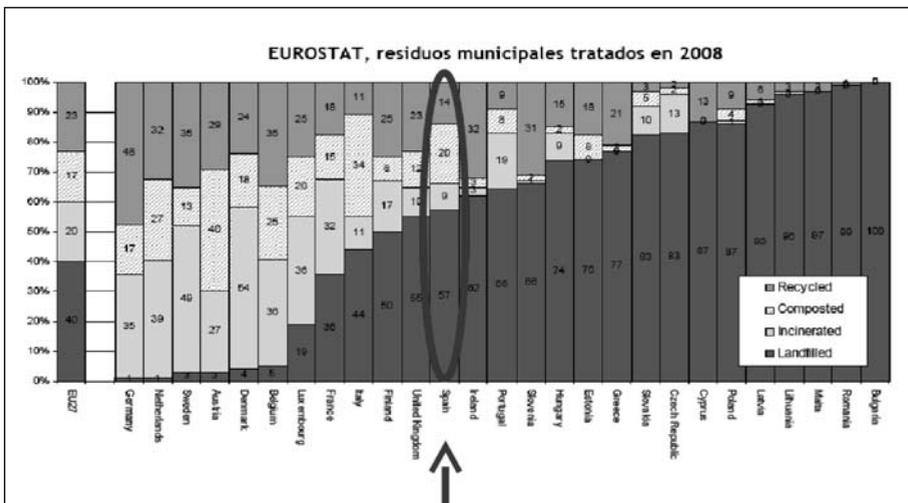


Figura 47. EUROSTAT, Residuos municipales tratados en 2008 en la Unión Europea (Fuente: Elaboración propia).

La gestión de los residuos varía dependiendo del país, incluso en Europa existe un enorme potencial de valorización. En la Figura 47 se puede ver los distintos tratamientos y su peso dentro de cada país de la Unión Europea, podemos ver que países como Alemania u Holanda llevan a vertedero menos del 1% mientras que en España el porcentaje es superior al 50% de los RSU generados.

En España el aprovechamiento energético del RSU es muy bajo, ya que gran parte de los RSU terminan en vertedero. Actualmente existen 188 vertederos, muchos de ellos colmatados y con dificultades de abrir nuevos, 10 incineradoras municipales con una tasa de 2 Millones de t/año de RSU incineradas. Hay que tener en cuenta los largos períodos de implantación, las dificultades de financiación y la oposición de grupos ambientalistas a la implantación de este tipo de proyectos.

2. MODELOS DE SOLUCIÓN ENERGÉTICA ACTUALES

Cada tipo de biomasa y residuo requiere de un tipo de tecnología específico para su valorización energética, lo podemos ver representado en la Figura 48. La oxidación catalítica se encuentra dentro de la tecnología termoquímica y supone una parte de la oxidación. Dentro de la tecnología termoquímica, las plantas de combustión son las más extendidas, las más maduras por lo que son las que predominan en el mercado son modelo de solución descentralizada. Son plantas que no contaminan por su alto nivel de tratamiento de gases, casi la mitad de la inversión. Son plantas en las que el factor de escala es muy importante, necesitan trabajar con 150.000-300.000 ton.

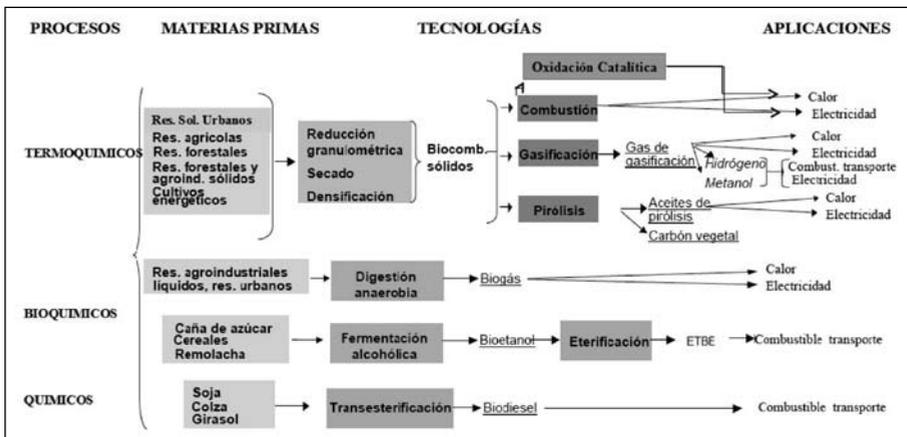


Figura 48. Tecnologías actuales valorización energética.
(Fuente: Elaboración propia).

Dentro de las tecnologías de valorización termoquímicas de combustión, entre las más extendidas predomina el modelo de solución centralizada. Son grandes plantas de mayor complejidad donde la generación energía eléctrica y térmica supera los 15 MWe de potencia con un alto consumo de biomasa o RSU (100.000- 150.000 t/año.

Tienen largos tiempos de implantación entre permisos y construcción y otra desventaja son las elevadas inversiones; más de 50 M€ en plantas biomasa y más de 160 M€ en Plantas de RSU. Podemos ver en la Figura 49 los costes asociados.

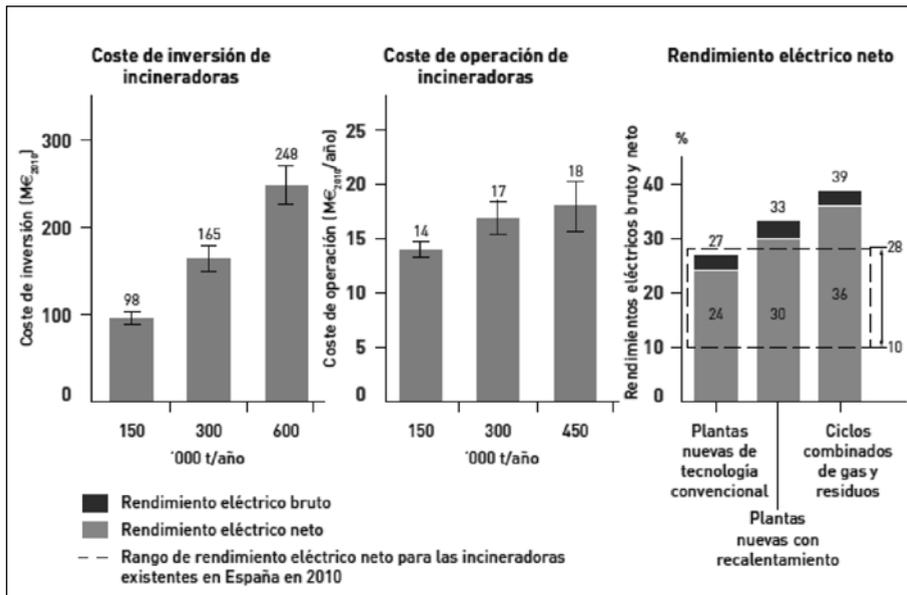


Figura 49. Costes inversión plantas incineradoras. (Fuente: Elaboración propia).

Los estudios de mejores prácticas indican que para asegurar una óptima oxidación se tiene que cumplir una serie de condiciones:

- Una mezcla adecuada del combustible con aire para minimizar la existencia de “bolsas de productos de combustión” ricas en combustible y de larga duración. Se requiere residuos de más de 3.000 kcal.
- El manejo adecuado de las tres T temperatura, tiempo y turbulencia, así como el flujo adecuado de oxígeno mediante un diseño y operación optimizados ayudan a cumplir con las características anteriores:
 - Alcanzar **temperaturas** suficientemente altas, en presencia de oxígeno, para la destrucción total de los enlaces de carbono y evitar la

existencia de zonas de baja temperatura que permitan que el combustible parcialmente utilizado deje la cámara de combustión.

- El **tiempo** de residencia en un horno primario o caldera es de 2 segundos requiriéndose una temperatura igual o superior a 1000 °C para lograr una combustión completa.
- La creación de una alta **turbulencia** dentro de la cámara de combustión ayuda a prevenir la formación de puntos fríos y la formación de carbón que reduce la eficiencia de la combustión. Es imprescindible asegurarse que los niveles de oxígeno al final de la zona de combustión se mantengan por encima de los necesaria para una oxidación completa.

3. SOLUCIÓN DE ENERGÍA DISTRIBUIDA

La generación distribuida (GD) tendrá un papel fundamental en el desarrollo de las energías renovables especialmente en los casos de la biomasa y residuos. La GD abarca un amplio rango de tecnologías incluyendo muchas energías renovables, la cuales permitirán la instalación de pequeñas plantas de energía cerca de los consumidores

El mayor potencial de este tipo de soluciones es la deslocalización del aprovisionamiento energético a través de la red y la producción “in situ” minimiza las pérdidas por transmisión y distribución por tanto de costes, una parte significativa del total del coste de la electricidad (>30%). La GD garantiza la continuidad de la oferta eléctrica en zonas donde la red está sobrecargada o en situaciones de corte regional, permitiendo restaurar el servicio en cortos períodos de tiempo.

La GD como su nombre indica es una solución distribuida, en plantas modulares de valorización de Biomasa/Residuos Industriales de reducida escala lo que supone una menor complejidad. La generación de energía mediante plantas de potencias bajas de 2 a 8 MWe con consumo de combustible derivado de residuo (CDR) que se genera en la zona de influencia a distancias menores de 30 Kms por lo que el residuo no viaja y se reducen los costes logísticos y menor huella de carbono.

Ahora bien, la valorización de los CDR precisa de un pretratamiento como podemos ver en la Figura 50. El CDR debe pasar por un proceso de trituración, de separación de metales, secado y homogeneización para tener un combustible final homogéneo.

El diagrama de la planta de oxidación catalítica está representado en la Figura 51. Es un proceso basado en la oxidación por tanto se trabaja sobre una tecnología madura, comienza con el pretratamiento, posterior almacenamiento y blending en las tolvas, alimentación al oxidador y generación. El

VALORACIÓN ENERGÉTICA DE BIOMASA Y RESIDUOS MEDIANTE OXIDACIÓN CATALÍTICA

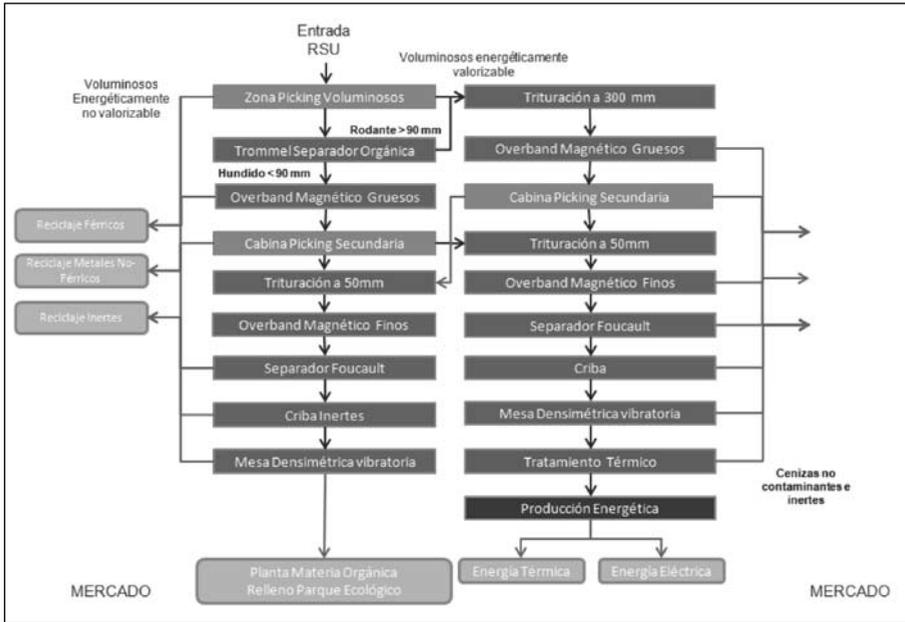


Figura 50. Flujograma de planta de pretratamiento de CDR.
(Fuente: Elaboración propia).

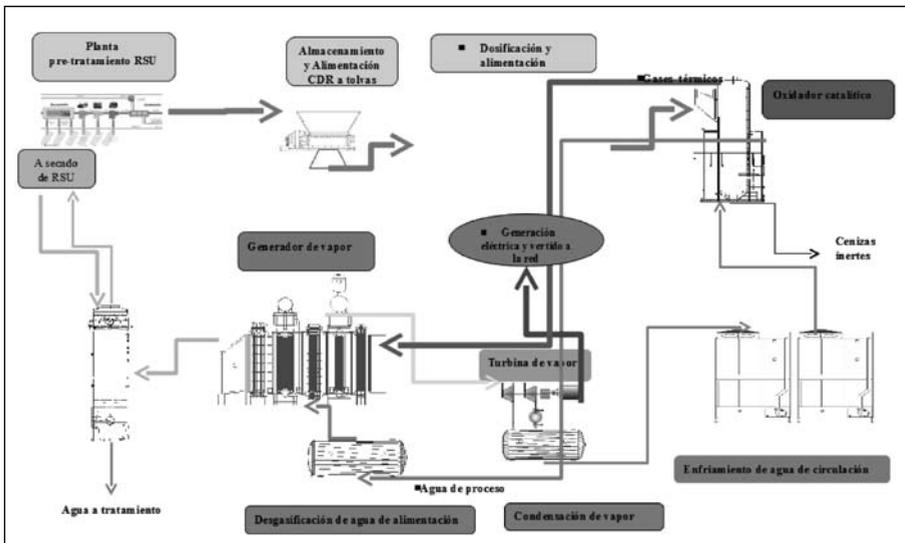


Figura 51. Diagrama planta de valorización energética CDR.
(Fuente: Elaboración propia).

oxidador no utiliza elementos refractarios y por tanto no hay memoria térmica y puede pasar rápidamente por las temperaturas en las que se producen los furanos y las dioxinas y evitarlo. Lo mismo sucede con los subproductos del cloro. La refrigeración se lleva a cabo por agua en un circuito cerrado de agua reciclada, y el agua caliente se puede utilizar como energía térmica para producción de frío con trigeneración, para procesos de secado, de evaporación de alperujo, etc.

La tecnología presentada basada en el principio de oxidación catalítica se basa en tres principios termodinámicos que la hace eficiente y sin emisiones de gases ni contaminación:

- **Catálisis** elevada a través de la disminución del punto de ignición: La Catálisis es necesaria para acelerar y reducir el punto de ignición. En el caso de nuestra tecnología, se reduce la temperatura de ignición en hasta un 20%, lo que mejora el rendimiento del proceso. El material con que está construido el equipo y el uso de catalizadores favorecen la reacción exotérmica.
- Alta **velocidad de oxidación** y proceso isotérmico: La velocidad de oxidación es clave para que, aun usando residuos de igual poder calorífico, se puedan alcanzar temperaturas más rápidamente. El proceso isotérmico garantiza que no se creen puntos fríos es decir zonas con grandes deltas de temperatura lo que evita la generación de inquemados y asegura la ruptura de los enlaces químicos.

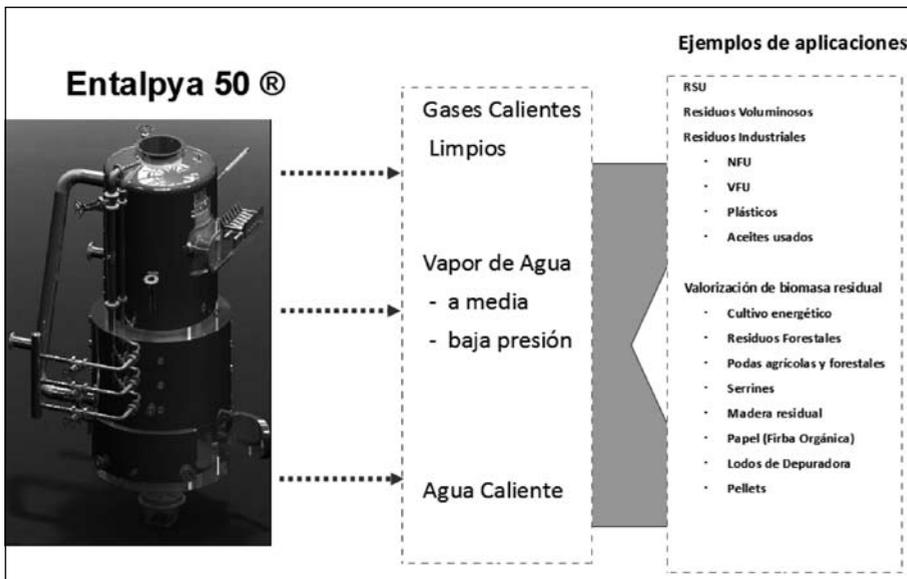


Figura 52. Oxidador catalítico Entalpya. (Fuente: Elaboración propia).

- Largos **tiempos de contacto**: Típicamente, el tiempo de contacto necesario para lograr una oxidación completa es de más de 2 segundos. Con esta tecnología se logran tiempos mínimos de 3.2 segundos por lo que se considera una oxidación perfecta.

Esta tecnología basada en estos tres principios, ha permitido diseñar un equipo más eficiente, con menores costes de operación y sin emitir contaminantes ni humos y su aplicación industrial permite que la instalación sea más pequeña y más eficiente.

En la Figura 52 puede verse el núcleo central de la solución, un oxidador catalítico Entalpya. Se alimenta con líquidos, sólidos o gases y después de un proceso de limpieza salen gases térmicos a altas temperaturas que se llevan a los generadores de vapor a media y baja presión para los procesos industriales y el agua caliente obtenida se utiliza para calefacción.

4. CONCLUSIONES

Se necesita continuar desarrollando el sector de la biomasa y el de los residuos, pero mucho más rápido y es necesario que las Administraciones Central y Autonómicas agilicen los procedimientos y autorizaciones (Permitting) para poder cumplir con los objetivos de la UE (20-20-20)

En España tenemos un importante inventario biomásico y de RSU aun por aprovechar. Además de continuar desarrollando el modelo de grandes plantas, que tienen sus ventajas, es necesario también desarrollar plantas a pequeña escala (2 a 10 MWe) ya que los proyectos con un modelo de energía distribuida facilita la logística y la conexión a la red y su implantación es rápida.

CAPÍTULO VII
LA BIOMASA AGROFORESTAL EN ESPAÑA.
DISPONIBILIDAD DE RECURSOS Y POTENCIAL DE
DESARROLLO

Miguel Cabrera
Aranzada Gestión Forestal

1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo tiene por objetivo presentar los resultados obtenidos en la elaboración del programa desarrollado para el PER 2011-2020 del IDAE y que muestran el potencial disponible de biomasa en España de acuerdo con sus distintos orígenes y a las posibilidades de introducción en el mercado energético en función de los costes estimados para su producción y disposición en el mercado.

La herramienta informática de evaluación del potencial de biomasa ha sido elaborada por la Escuela de Ingeniería de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid (ETSIM), el Instituto Técnico y de Gestión Agrícola de Navarra (ITGA), Argongra, S.L. y Aranzada Gestión Forestal, S.L.P. Los resultados de la herramienta permiten representar los resultados tanto numérica como cartográficamente, ya que ha sido desarrollada sobre una plataforma SIG. Mediante este programa se realizan consultas de los diferentes tipos de biomasa ofreciendo mapas de disponibilidad de los mismos en diferentes ámbitos territoriales, bajo diferentes escenarios de costes de extracción o acopio y de coste medio de la biomasa puesta en puntos concretos a determinar en cada estudio.

Se parte de la definición de la superficie susceptible de aprovechamiento de restos de tratamientos selvícolas forestales, de aprovechamiento de los restos de tratamientos culturales agrícolas y de la superficie potencial de implan-

tación de masas con fin energético tanto leñosas (en terreno forestal o agrícola) como herbáceas (en terreno agrícola). La determinación de superficie se ha realizado a partir de la utilización de la cartografía existente disponible, estableciendo una serie de restricciones de disponibilidad territorial por razones técnicas, tecnológicas, ecológicas, fisiográficas o legales y comparando su viabilidad económica frente a los posibles usos no energéticos forestales o agrícolas.

El resultado del estudio y aplicación de la herramienta informática ha generado como salidas de resultados las disponibilidades anuales de biomasa en entornos territoriales amplios, siempre por encima del ámbito de varios términos municipales (ámbitos comarcales al menos) y los costes de recolección, extracción y adecuación.

El informe y la metodología descrita con todo detalle se encuentran disponibles en la página web del IDAE:

http://ida.electura.es/publicacion/198/plan_energias_renovables_per_2011-2020

2. TIPOS DE BIOMASA

Los tipos de biomasa que se han estudiado se pueden ver en la Figura 53. Por un lado está la biomasa procedente de aprovechamientos forestales o agrícolas existentes y, por otro, la biomasa susceptible de ser implantada en terreno agrícola o forestal; en el caso de terreno forestal, exclusivamente con especies forestales, en el caso de terreno agrícola con cultivos energéticos tanto herbáceos como leñosos. La biomasa procedente de aprovechamientos agrícolas existentes incluye restos como pajas, cañote de maíz, cabezuelas de girasol, y en el caso de aprovechamientos forestales se incluyen los restos de los aprovechamientos tradicionales madereros o bien el aprovechamiento específico de toda la biomasa de un monte (lo que se ha denominado “árbol completo”).

Se han diferenciado tres tipos de resultados para cada posibilidad:

- BIOMASA POTENCIAL TOTAL, es aquella procedente de todas las superficies aprovechables sin ningún tipo de restricción excepto las legales (como los terrenos forestales)
- BIOMASA POTENCIAL ACCESIBLE, aquella procedente de superficies consideradas como aprovechables debido a razones ecológicas (altitud), mecánicas (pendiente), etc., Además, a esta biomasa se le aplica un coeficiente reductor debido a la eficacia en la recogida (variable por el usuario).

LA BIOMASA AGROFORESTAL EN ESPAÑA

- **BIOMASA POTENCIAL DISPONIBLE**, aquella biomasa accesible que no entra en competencia con otros usos como es el maderero, ganadero, agrícola, etc. y en este caso se consideran exclusivamente, los restos que quedan sobre el terreno.

Las restricciones ofrecen cifras de potencial accesible plausibles, se han considerado superficies por debajo de los 1.700m de altura (excepto para *Pinus uncinata* en Lleida, Girona, Navarra y Huesca), y con pendientes inferiores al 30% en el ámbito geográfico mediterráneo, considerándose que es posible trabajar en superficies con pendientes hasta el 60% en la cornisa cantábrica; además se han considerado dos hipótesis adicionales, correspondientes a una eficacia en la recogida de restos del 65% y del 85%, respectivamente.

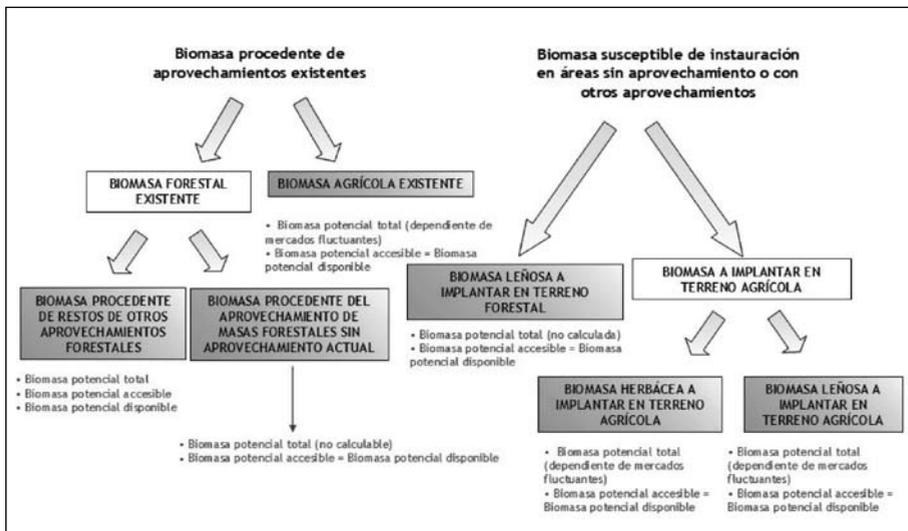


Figura 53. Clasificación Biomasa Agroforestal.
(Fuente: Elaboración propia).

3. RESULTADOS DEL ESTUDIO

En la Tabla 11 se recogen los resultados globales para España obtenidos por tipo de biomasa agroforestal. El coste medio se ha calculado para un transporte a una distancia de 60 km. La biomasa procedente de masas forestal supone el 20% del valor obtenido como biomasa potencial disponible, 91 Mton/año al 35 % humedad, y la biomasa procedente de restos agrícolas representa el 40%.

BIOMASA Y SUS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS APLICADAS

Tabla 11.
Resultados del estudio: Biomasa potencial disponible y coste medio de obtención.

Biomasa potencial disponible (t/año) y Coste medio de obtención				
Procedencia		Biomasa (t/año)	Biomasa (tep/año)	Coste medio (€/t)
Masas forestales existentes	Restos de aprovechamientos madereros	2.984.243	636.273	26,59
	Aprovechamiento del árbol completo	15.731.116	3.414.158	43,16
Restos agrícolas		35.904.646	7.512.158	19,98
Masas herbáceas susceptibles de implantación en terreno agrícola		15.874.572	3.216.819	45,62
Masas leñosas susceptibles de implantación en terreno agrícola		5.728.076	1.271.659	34,73
Masas leñosas susceptibles de implantación en terreno forestal		15.072.320	1.782.467	42,14
TOTAL BIOMASA POTENCIAL EN ESPAÑA		91.294.974	17.833.535	

En la Tabla 12 se presentan los resultados por comunidades autónomas.

Tabla 12.
Resultados del estudio: Biomasa potencial disponible procedente de masas forestales existentes.

Biomasa potencial disponible procedente de masas forestales existentes (t/año)					
Comunidad Autónoma	Restos de aprovechamientos madereros			Aprovechamiento árbol completo	TOTAL biomasa potencial disponible
	total	accesible	disponible	disponible	
Andalucía	909.994	483.100	209.375	1.649.219	1.858.594
Aragón	532.722	215.209	56.161	740.121	796.282
Asturias	1.082.730	498.546	280.944	829.081	1.110.025
Cantabria	617.001	327.070	181.728	505.452	687.180
Castilla - La Mancha	495.893	275.459	74.165	1.313.048	1.387.213

LA BIOMASA AGROFORESTAL EN ESPAÑA

Biomasa potencial disponible procedente de masas forestales existentes (t/año)					
Comunidad Autónoma	Restos de aprovechamientos madereros			Aprovechamiento árbol completo	TOTAL biomasa potencial disponible
	total	accesible	disponible	disponible	
Castilla y León	828.213	409.157	123.428	2.300.723	2.424.151
Cataluña	896.586	458.045	171.078	1.220.223	1.391.301
Extremadura	216.508	127.641	91.283	1.451.860	1.543.143
Galicia	3.490.341	2.231.676	1.307.072	3.427.870	4.734.942
Illes Balears	48.838	26.085	9.126	51.551	60.677
Islas canarias	74.973	7.385	1.182	24.498	25.680
La Rioja	82.946	30.396	7.516	112.853	120.369
Madrid	66.502	28.397	7.205	167.611	174.816
Murcia	77.368	40.869	14.137	63.819	77.955
Navarra	714.606	289.061	41.565	804.471	846.036
País Vasco	1.180.411	691.920	369.469	834.068	1.203.537
Valencia	210.547	112.258	38.809	234.648	273.457
Total	11.526.177	6.252.274	2.984.243	15.731.116	18.715.358

En la Tabla 15 se pueden ver los costes medios de obtención según la procedencia. Las cifras medias brutas están en torno a los 26 €/t para la biomasa procedente de restos, 43 €/t para la biomasa procedente de árbol completo porque hay que incluir las tareas de apeo, desrame y descope, 20 €/t para biomasa procedente de restos agrícolas y 45 €/t para biomasa susceptible de implantar que incluye costes como la fertilización, cosecha, etc.

Tabla 13.
Biomasa potencial disponible según procedencia (t/año)

Comunidad Autónoma	Biomasa potencial disponible según procedencia (t/año)										Total (T/año)
	Masas forestales existentes			Masas leñosas susceptibles de implantación en terreno forestal	Restos Agrícolas	Masas herbáceas susceptibles de implantación en terreno agrícola	Masas leñosas susceptibles de implantación en terreno agrícola	Total			
	Resos de aprovechamientos madereros	Árbol completo	Total masas existentes								
Andalucía	209.375	1.649.219	1.858.594	1.231.669	8.044.868	2.844.014	1.029.572	15.008.716			
Aragón	56.161	740.121	796.282	85.865	3.326.403	1.604.998	678.268	6.491.816			
Asturias	280.944	829.081	1.110.025	1.384.360	559.814	0	0	3.054.199			
Cantabria	181.728	505.452	687.180	472.133	57.160	4.310	1.794	1.222.576			
Castilla La Mancha	74.165	1.313.048	1.387.213	203.519	3.746.320	3.442.578	1.066.648	9.846.279			
Castilla y León	123.428	2.300.723	2.424.151	1.496.793	5.833.426	4.993.483	1.183.685	15.931.537			
Cataluña	171.078	1.220.223	1.391.301	143.838	3.887.684	676.272	469.660	6.568.753			
Extremadura	91.283	1.451.860	1.543.143	1.433.327	2.015.421	869.952	769.899	6.631.743			
Galicia	1.307.072	3.427.870	4.734.942	7.931.615	1.875.525	7.100	56.949	14.606.131			
Illes Balears	9.126	51.551	60.677	8.025	587.526	243.591	40.849	940.669			
Islas Canarias	1.182	24.498	25.680	8.863	219.639	485	394	255.060			
La Rioja	7.516	112.853	120.369	17.315	493.220	140.738	46.254	817.898			
Madrid	7.205	167.611	174.816	81.644	235.261	186.200	74.996	752.917			
Murcia	14.137	63.819	77.955	4.407	1.184.843	124.427	51.295	1.442.927			
Navarra	41.565	804.471	846.036	189.129	881.485	536.020	167.162	2.619.833			
País Vasco	369.469	834.068	1.203.537	275.165	352.665	134.097	24.179	1.989.644			
Comunidad Valenciana	38.809	234.648	273.457	104.654	2.603.385	66.308	66.472	3.114.275			
Total	2.984.243	15.731.116	18.715.358	15.072.320	35.904.646	15.874.572	5.728.076	91.294.974			

Tabla 14.
Biomasa potencial disponible según procedencia (t/año)

Comunidad Autónoma	Biomasa potencial disponible según procedencia (t/año)						Total (T/año)	
	Masas forestales existentes		Masas leñosas susceptibles de implantación en terreno forestal	Restos Agrícolas	Masas herbáceas susceptibles de implantación en terreno agrícola	Masas leñosas susceptibles de implantación en terreno agrícola		
Restos de aprovechamientos madereros	Árbol completo	Total masas existentes						
Andalucía	45.985	347.799	393.784	142.770	1.697.009	580.243	226.196	3.040.003
Aragón	12.784	167.430	180.214	10.409	695.707	321.559	150.604	1.358.493
Asturias	57.596	179.704	237.300	171.164	119.751	0	0	528.215
Cantabria	37.026	104.661	141.687	56.926	11.747	879	400	211.640
Castilla La Mancha	16.765	284.746	301.510	24.636	775.152	700.686	239.226	2.041.211
Castilla y León	27.383	498.963	526.346	182.508	1.192.680	1.007.968	267.037	3.176.539
Cataluña	38.232	279.538	317.771	17.583	820.570	136.001	103.204	1.395.128
Extremadura	20.093	294.269	314.362	172.143	422.365	177.490	168.616	1.254.976
Galicia	271.963	760.068	1.032.031	920.252	389.751	1.448	12.604	2.356.085
Illes Balears	2.048	11.310	13.358	967	124.686	49.698	8.780	197.489
Islas Canarias	296	5.780	6.076	2.019	46.971	99	91	55.256
La Rioja	1.640	24.503	26.143	2.087	103.157	28.323	10.215	169.924
Madrid	1.627	35.798	37.425	9.975	48.660	37.591	16.635	150.287
Murcia	3.176	14.443	17.619	531	252.980	25.386	11.186	307.702
Navarra	9.051	172.223	181.274	22.799	181.310	108.567	36.751	530.701
País Vasco	81.891	180.828	262.719	33.029	73.153	27.352	5.409	401.662
Comunidad Valenciana	8.718	52.097	60.814	12.667	556.509	13.528	14.704	658.223
Total	636.273	3.414.158	4.050.432	1.782.467	7.512.158	3.216.819	1.271.659	17.833.535

BIOMASA Y SUS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS APLICADAS

Tabla 15.
Coste medio de obtención según procedencia de la biomasa (€/t)

Comunidad Autónoma	Biomasa potencial disponible según procedencia (t/año)						
	Masas forestales existentes		Masas leñosas susceptibles de implantación en terreno forestal	Restos Agrícolas	Masas herbáceas susceptibles de implantación en terreno agrícola	Masas leñosas susceptibles de implantación en terreno agrícola	
	Restos de aprovechamientos madereros	Árbol completo					
Andalucía	24,01	43,59	43,22	19,25	51,25	38,17	
Aragón	25,33	42,83	44,38	21,10	49,55	39,74	
Asturias	30,73	43,09	34,66	21,09	0,00	0,00	
Cantabria	27,63	41,60	38,86	16,57	44,17	37,56	
Castilla La Mancha	24,81	44,38	45,53	20,22	52,14	30,94	
Castilla y León	27,11	44,53	42,99	20,46	49,36	30,64	
Cataluña	25,50	40,55	40,35	18,81	45,02	39,24	
Extremadura	21,52	45,31	44,96	19,71	56,51	32,47	
Galicia	30,75	43,99	35,97	16,41	44,84	36,68	
Illes Balears	24,34	37,84	47,27	22,16	55,95	36,66	
Islas Canarias	45,79	50,25	32,51	22,02	26,47	16,70	
La Rioja	27,06	44,11	44,31	18,86	44,83	37,97	
Madrid	25,09	43,85	41,89	20,68	50,10	35,37	
Murcia	24,52	38,48	47,23	24,21	58,28	69,19	
Navarra	26,21	40,85	40,25	18,19	45,47	33,60	
País Vasco	31,01	41,40	38,52	19,73	14,30	36,32	
Comunidad Valenciana	23,74	39,50	44,49	23,75	50,08	40,09	
Coste Medio	26,59	43,16	42,14	19,98	45,62	34,73	

4. CARTOGRAFÍA

En la Figura 54 se muestran los resultados cartográficos, la distribución de superficie según los tipos de biomasa estudiadas. Como puede verse, las zonas representadas en color oscuro son las superficies disponibles para aprovechamiento de árbol completo y coincide con las zonas de quercoideas (rebollares, quejigares, encinares). Como puede verse en la Figura 54, el terreno forestal susceptible de implantación está en el norte, color rojo, y obviamente son terrenos en los que resulta económicamente rentable esta implantación por sus condiciones fisiográficas, climatológicas y de productividad potencial neta.

Se han obtenido distintos mapas de distribución de tipos de biomasa y costes medios. Los valores presentados son por hectárea y año, y hay que tener en cuenta los periodos de rotación entre intervenciones selvícolas que pueden oscilar desde los 5 hasta los 15 años. Los costes dependen enormemente de las infraestructuras existentes, por lo que dependiendo de las pistas disponibles, pendientes del terreno, etc. los costes entre zonas cercanas pueden ser muy dispares.

- Biomasa potencial procedente de restos de aprovechamientos madereros en masas forestales existentes (Figura 55). Una vez más, la cornisa cantábrica y las zonas más productivas son las que presentan un potencial disponible mayor que otras regiones. En la Figura 56 puede verse el coste medio del aprovechamiento de restos de masas forestales según las zonas.
- Biomasa potencial y costes medios procedentes de restos de aprovechamiento de árbol completo en masas forestales existentes (Figura 57).
- Biomasa potencial y costes medios procedentes de masas leñosas susceptibles de implantación (Figura 58).



Figura 54. Distribución de superficie según los tipos de biomosas estudiadas. (Fuente: Programa desarrollado para POR-2011-2020. Figuras 54 a 66).



Figura 55. Biomasa potencial procedente de restos de aprovechamientos madereros en masas forestales existentes

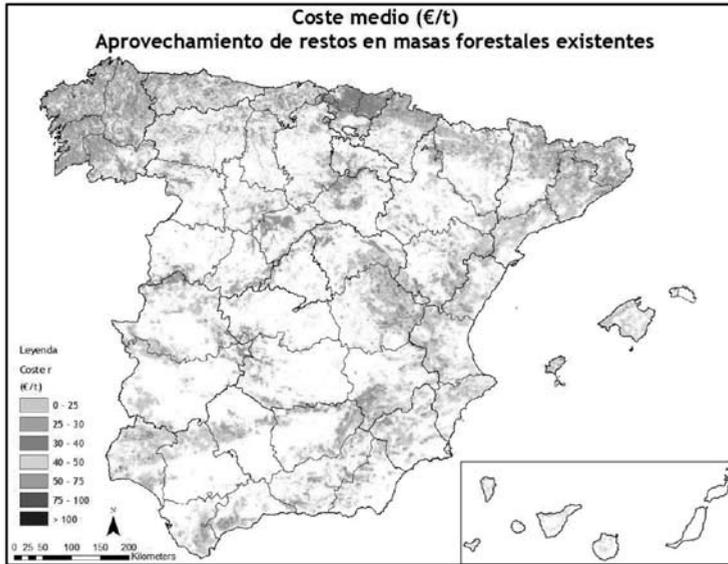


Figura 56. Costes medios procedente de restos de aprovechamientos madereros en masas forestales existentes.

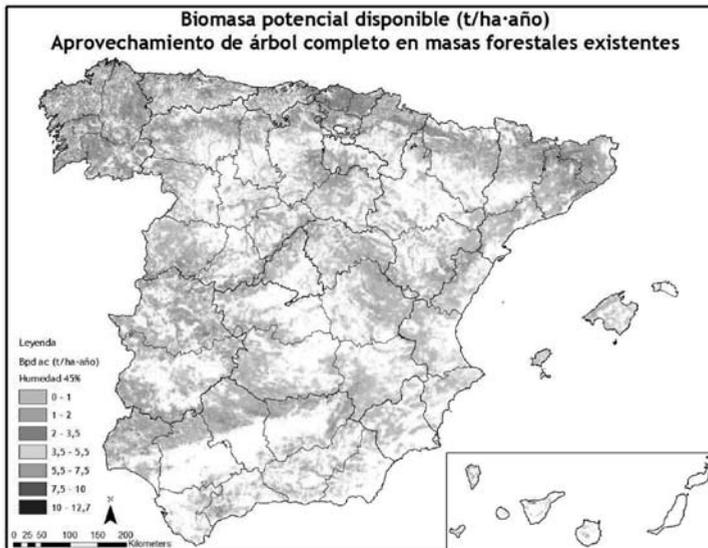


Figura 57. Biomasa potencial procedente de aprovechamientos de árbol completo en masas forestales existentes.

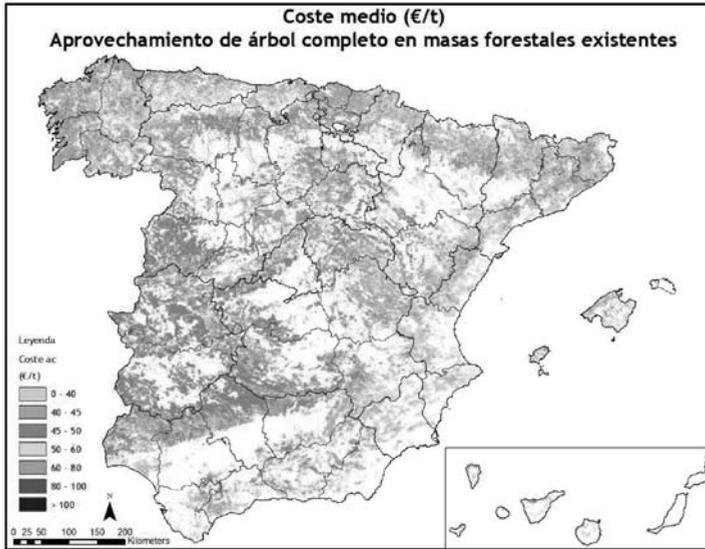


Figura 58. Costes medios de biomasa procedente de aprovechamientos de árbol completo en masas forestales existentes

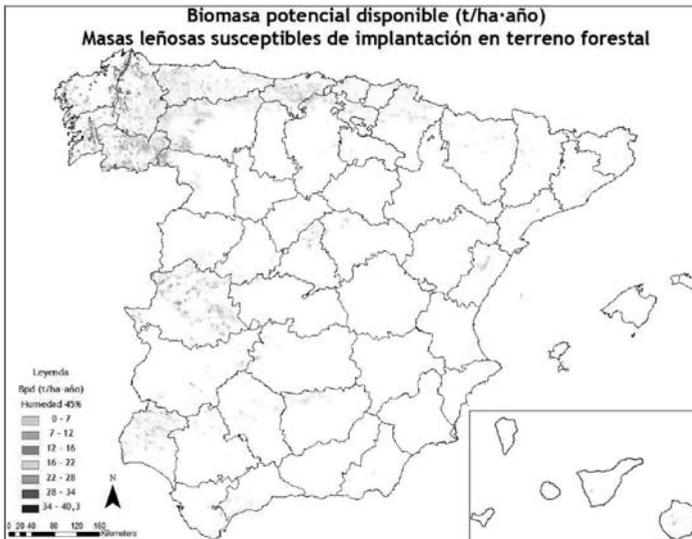


Figura 59. Biomasa potencial procedente de masas leñosas susceptibles de implantación en terreno forestal.

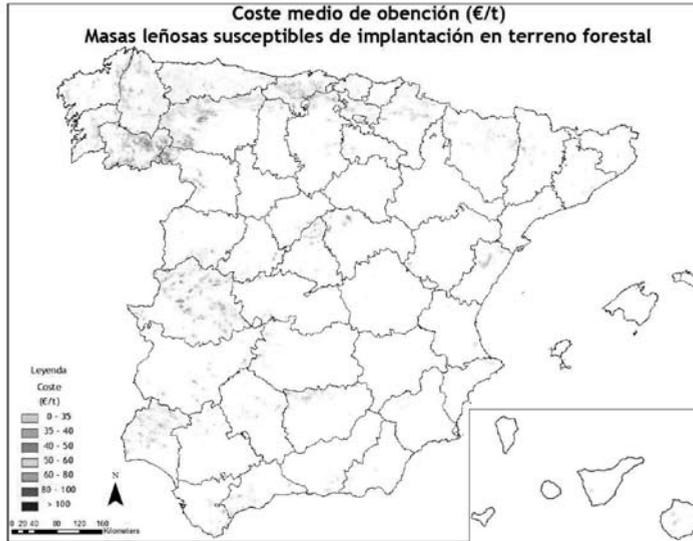


Figura 60. Costes medios para la biomasa potencial procedente de masas leñosas susceptibles de implantación en terreno forestal.

Lo mismo se ha obtenido en cartografía de terreno agrícola.

- Biomasa potencial y costes medios procedentes de restos de cultivos agrícolas tradicionales.
- Biomasa potencial y costes medios procedentes masas herbáceas susceptibles de implantación.
- Biomasa potencial y costes medios procedentes de masas leñosas susceptibles de implantación. En las Figura 61 a 66 se pueden ver los resultados obtenidos para estos tipos de biomasa.

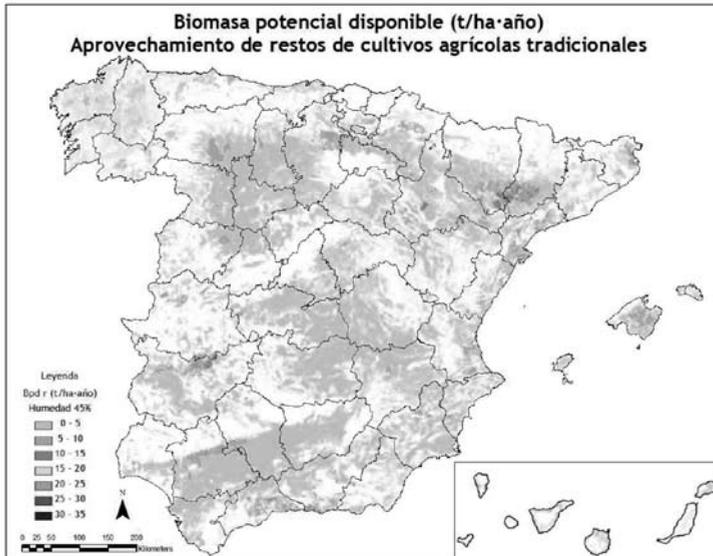


Figura 61. Biomasa potencial procedente de aprovechamiento de restos de cultivos agrícolas tradicionales.

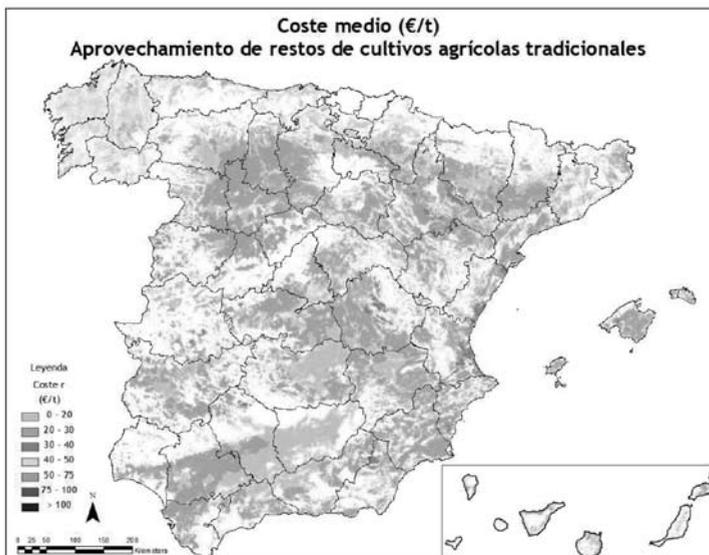


Figura 62. Costes medios de biomasa procedente de aprovechamiento de restos de cultivos agrícolas tradicionales.

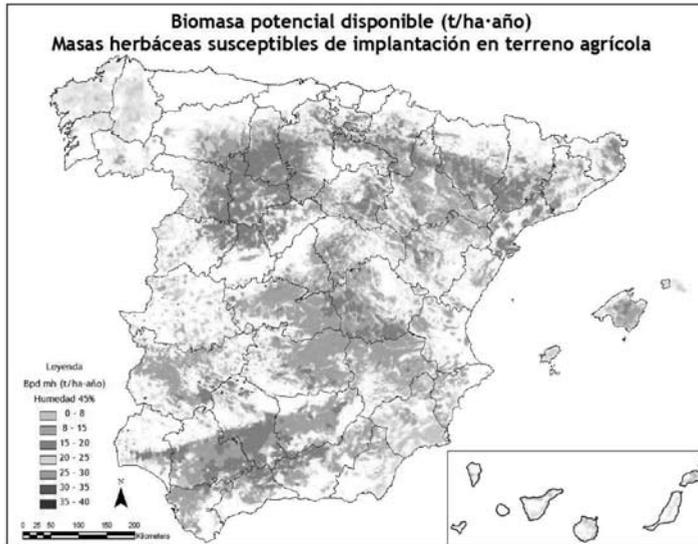


Figura 63. Biomasa potencial procedente de masas herbáceas susceptibles de implantación en terreno agrícola.

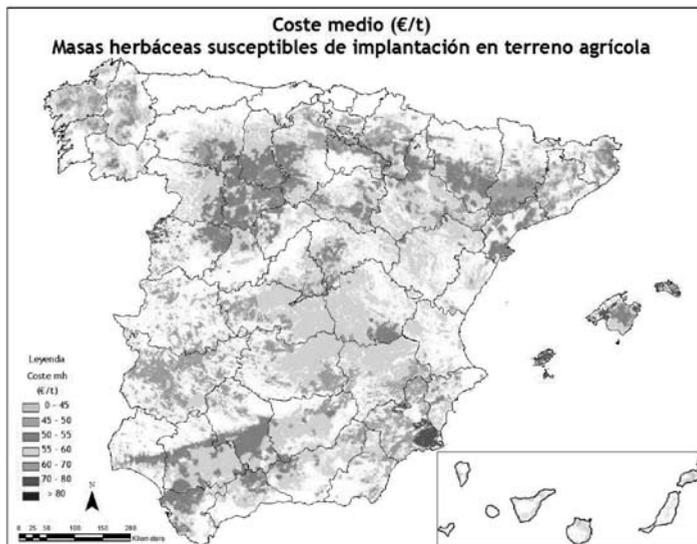


Figura 64. Costes de la biomasa potencial procedente de masas herbáceas susceptibles de implantación en terreno agrícola.

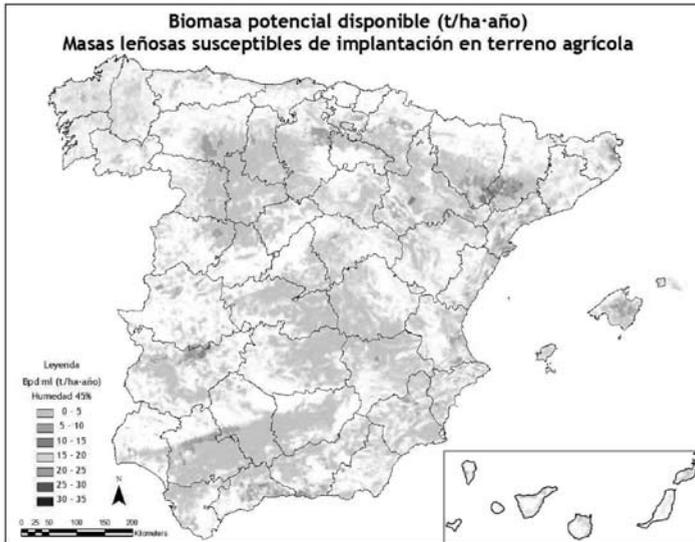


Figura 65. Biomasa potencial procedente de masas leñosas susceptibles de implantación en terreno agrícola.

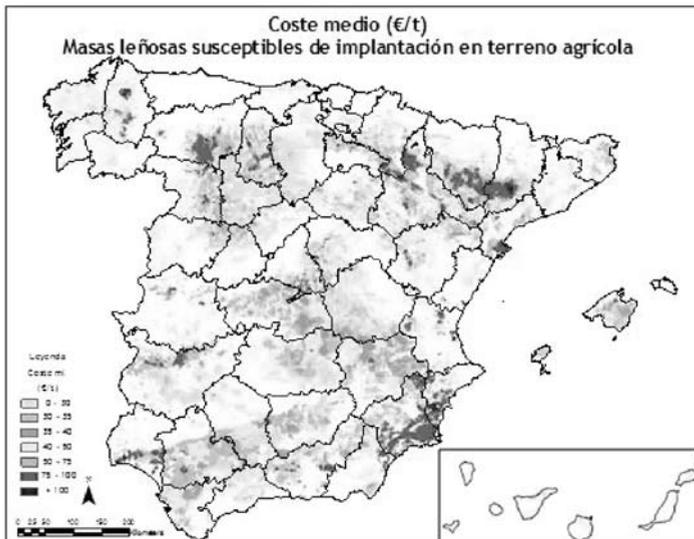


Figura 66. Costes para la biomasa potencial procedente de masas leñosas susceptibles de implantación en terreno agrícola.

5. CONCLUSIONES

Llama la atención que desde el año 1995 se está hablando continuamente de biomasa y de su importancia, pero la situación actual de la misma es que está en stand-by. Un 20% de la energía térmica en España procede de la biomasa, lo que supone un potencial del 80%. Lo mismo sucede con el potencial de desarrollo para producción de energía eléctrica aunque el rendimiento de conversión es bastante menor.

Si analizamos la situación actual de España en cuanto a consumo energético y auto-abastecimiento representado en la Figura 67 se ve que si en el año 1990 había un grado de abastecimiento del 36%, éste ha decaído hasta el 22% en el año 2009. En cuanto al consumo de energía primaria, ha crecido y si se compara con la producción energética propia, este consumo es 10 veces mayor. Por tanto las políticas energéticas deberían estar encaminadas a aumentar el grado de abastecimiento.

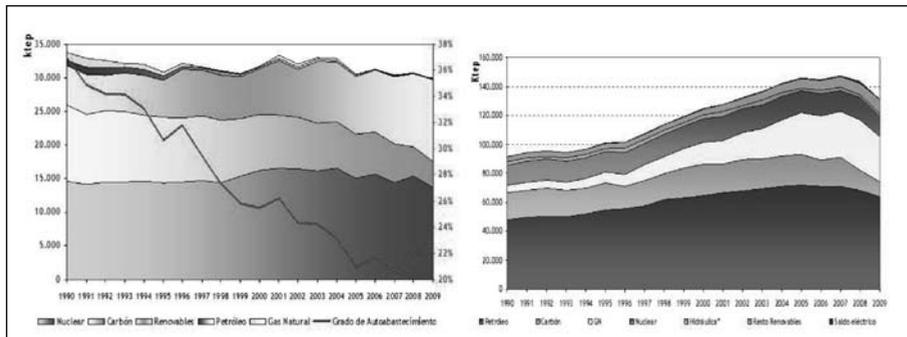


Figura 67. Consumo/abastecimiento en España (2009).
(Fuente: Elaboración propia).

Si se ven también las alarmantes cifras de la situación de la población española según datos del INEM, en el primer trimestre del 2012 el número de parados asciende a 5.639.500: 1 de cada 8 habitantes está en situación de desempleo, 1 de cada 5 personas de la población activa. Esto conduce a la siguiente reflexión: los puestos de trabajo que se podrían generar movilizan-do toda la potencialidad productiva de la biomasa a partir exclusivamente del aprovechamiento de las masas forestales actuales, recogidas en superficie en la Tabla 16, supondría de una manera conservadora, una cantidad de puestos de trabajo equivalente a los siguientes:

BIOMASA Y SUS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS APLICADAS

- Puestos de trabajo **directos en monte:**
 - 13.044.418 ha/20 años (suponiendo este periodo de rotación) = 650.000 ha/año
 - Personal de trabajos de campo: 3 - 6 jornales/ha
 - Jornales totales anuales: 1.950.000 – 3.900.000 (= 650.000 x 3-6)
 - Puestos de trabajo permanentes equivalentes: 11.000 – 23.000 (a 177 días laborales efectivos/año)

- Puestos de trabajo **indirectos por transporte**
 - Jornales totales anuales: 100.000 –140.000
 - Puestos de trabajo permanentes equivalentes: 570 – 800 (a 175 días laborales efectivos/año)

Tabla 16.
Superficie forestal potencial por Comunidades

Comunidad Autónoma	Superficie con posibilidad de aprovechamiento (ha)
Andalucía	1.923.901
Aragón	952.026
Asturias	384.350
Cantabria	159.178
Castilla - La Mancha	2.060.617
Castilla y León	2.177.810
Cataluña	1.040.717
Extremadura	1.562.093
Galicia	1.144.250
Illes Balears	104.607
Islas canarias	14.059
La Rioja	88.456
Madrid	182.922
Murcia	212.240
Navarra	271.593
País Vasco	270.569
Valencia	495.030
Total	13.044.418

Aún considerando que se movilizara menos de la mitad de la superficie considerada, el número de jornales que se generaría oscilaría de un millón a un millón y medio de jornales anuales. Y hay que tener en cuenta que estos puestos de trabajo serían permanentes en el tiempo y constituirían una entra-

da de rentas a las zonas rurales, constituyendo una oportunidad para zonas tradicionalmente desfavorecidas y que contribuirían a la fijación de población en zonas de montaña, lo que contribuiría, además, a la conservación de las mismas.

Para finalizar resumimos que, la biomasa se caracteriza por:

- VENTAJAS
 - Independencia energética de terceros países
 - Económicamente rentable para el consumidor (periodo de amortización de instalaciones bajo)
 - Creación de empleo y desarrollo de sector **primario** e industrial nacional
 - Beneficios medioambientales (reducción de riesgo estructural de incendios forestales; reducción de emisiones de CO₂ fósil)
 - Recurso renovable

- INCONVENIENTES
 - Práctica desaparición del sector forestal por la crisis crónica (agravada por la actual) del mercado de la madera
 - Trabas administrativas: inflación legislativa
 - Poco interés por parte de la administración (R.D.L.1/2012, de 27 de enero, por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos), aunque puede que esta suspensión termine por levantarse en cuanto se analicen todas las ventajas que suponen las energías renovables frente a las fósiles (autoabastecimiento energético, disminución de la factura exterior, evitación de costes por emisiones de CO₂, etc.)

CAPÍTULO VIII

NUEVOS USOS TÉRMICOS DE LA BIOMASA

Miguel Ángel Relaño
INGECOR

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace varios años estamos asistiendo a continuas subidas en el precio de los combustibles fósiles, manifestándose una tendencia claramente alcista, la biomasa cumple con los requisitos de estabilidad y capacidad de abastecimiento suficiente para resultar enormemente competitiva.

Además es renovable, lo que de acuerdo al código técnico de la edificación, la hace doblemente interesante para su utilización con fines domésticos. El mercado de la biomasa y los pellets en Europa se caracteriza por:

- El 54% de la energía primaria renovable procede de la biomasa, el 83% se destina a usos térmicos y el 17% a producción eléctrica
- Países con rápido crecimiento de uso de biomasa como Austria, Suecia, Dinamarca, Alemania. Sólo Suecia ha consumido 1.850.000 t de pellets.
- La producción en 2006 fue de 8,3 Mton de los cuales 6,3 t en Europa y la capacidad es aún mayor
- La demanda de pellets se ha incrementado de media un 25% desde 2008 como puede verse en la Figura 68. Algunos países como Italia, Dinamarca, Suecia deben importar y otros países con consumos menores a 200.000 t: exporta.

El precio de la biomasa y los pellets en Europa, como se puede observar en la Figura 69, ha seguido una evolución al alza estos últimos 7 años, pero estable a pesar de la crisis mundial: el precio no ha bajado y se prevé un incre-

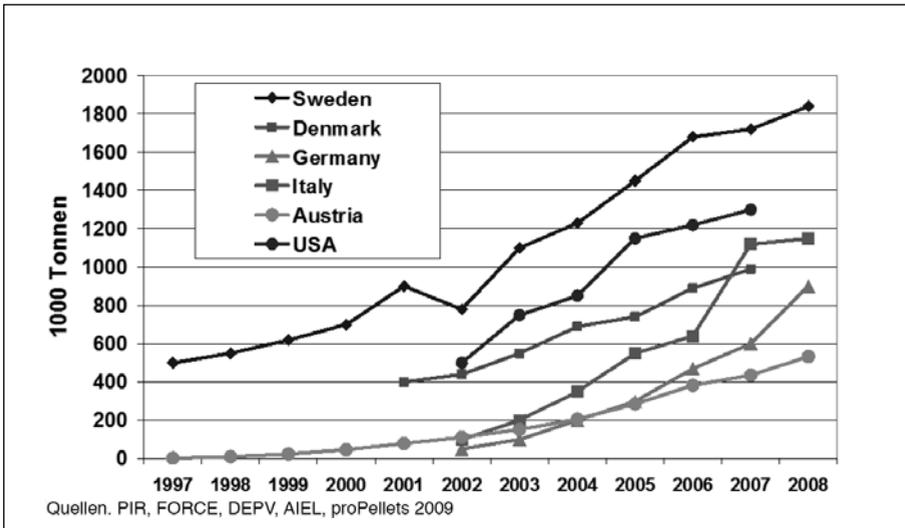
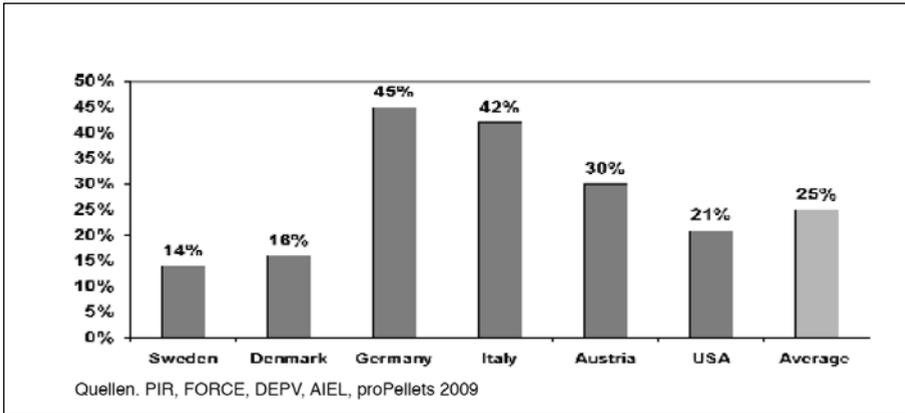


Figura 68. Crecimiento de la demanda de pellets en Europa.
(Fuente: Elaboración propia).

mento anual del 2-3%. La subida del coste de la biomasa es inferior a lo que se prevé crezcan los combustibles fósiles, siempre se encuentra por debajo del gasóleo y más estable. En el año 2006-2007 hubo un pico por el debastecimiento debido a una gran demanda por política energética, pero volvió a su tendencia habitual. El precio de los pellets en consumidor final está en el rango de 150-200€/ton ya sea a granel o en sacos. Para que la vida útil de la caldera sea más o menos larga y el rendimiento alto, el producto deberá ser más o menos homogéneo.

NUEVOS USOS TÉRMICOS DE LA BIOMASA

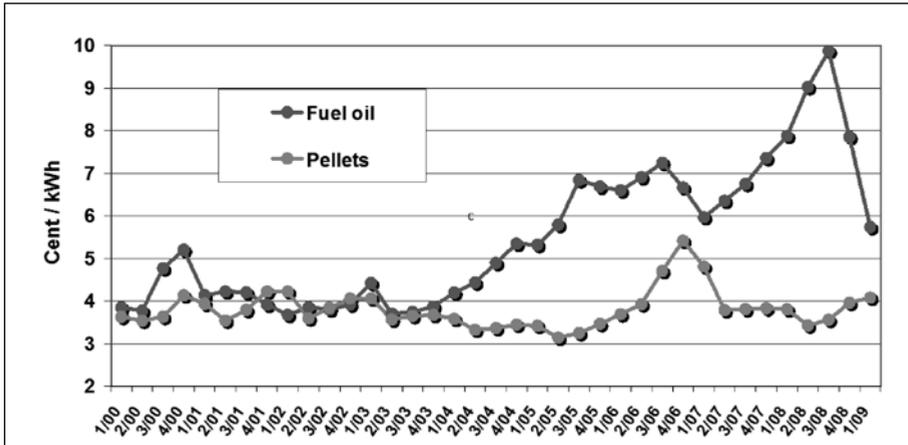


Figura 69. Evolución del precio del gasoil y de los pellets.
(Fuente: Elaboración propia).

El interés de la biomasa reside, particularmente, en que aporta una cantidad de CO₂ a la atmósfera prácticamente igual a la que ha sido absorbida por la planta de la que proviene durante su vida y, por consiguiente, la tecnología que la emplea se considera CO₂ neutro. En la Figura 70 podemos ver los distintos tipos de biomasa según su procedencia; subproductos industriales, subproductos agroalimentarios, residuos sólidos urbanos, subproductos forestales o cultivos energéticos.

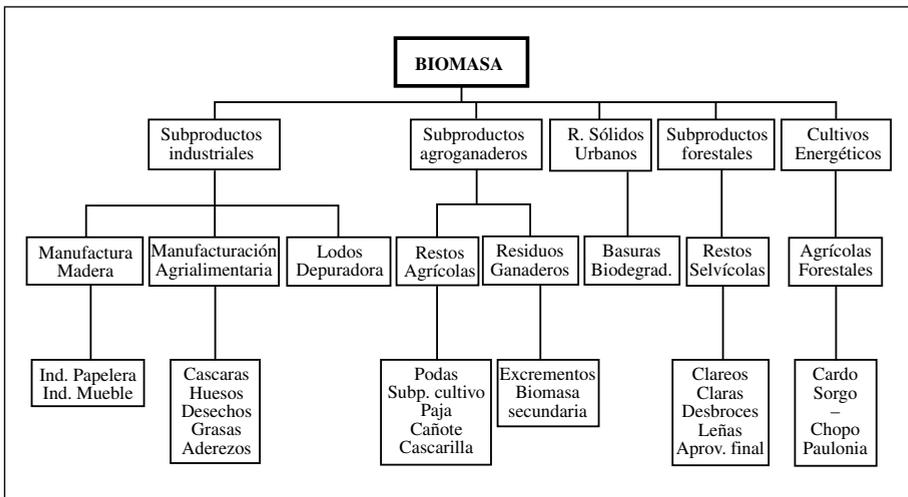


Figura 70. Tipos de biomasa. (Fuente: Elaboración propia).

2. USO TÉRMICO DE LA BIOMASA

Cuando se trata de valorizar un recurso energético y compararlo con respecto a los combustibles convencionales, se emplean como indicadores:

- Poder Calorífico (PC): Calor generado en la combustión del combustible por kg de combustible. La magnitud del poder calorífico puede variar según como se mida. Según la forma de medir se utiliza la expresión poder calorífico superior (abreviadamente, PCS) y poder calorífico inferior (abreviadamente, PCI).
- Kcal/kg: Aplicada a un combustible, indica el número de kilocalorías que se obtendrían en la combustión de 1 kg. de ese combustible.

Por todo esto es complicado el uso de ciertos tipos de biomasa para la fabricación de pellets, y sobre todo tener en cuenta que para conseguir rendimientos y trabajos óptimos de la caldera, y por tanto una amortización de la instalación, deben ser homogéneos. La planta debe contar con un suministro acorde al producto de venta. La fabricación de los pellets debe ser continua, por lo que los tipos de biomasa utilizada debe ser homogénea. Si se utiliza por ejemplo subproductos forestales, árboles completos o poda, como el material no será homogéneo la caldera tendrá una curva irregular. Algunos



Figura 71. Poda Olivar y sarmiento de vid. (Fuente: Elaboración propia).

tipos de poda de biomasa que no servirían para fabricar pellets los vemos en la Figura 71, poda de olivo, sarmiento de vid, tratamientos selvícolas. Pueden aparecer contaminados con tierra, con hojas, no son continuos en el tiempo ni estables en cuanto a precio y la granulometría obtenida en la molienda de astillas varía.

Las claras ventajas del uso de la biomasa son:

- Favorecer el mantenimiento y desarrollo de los sectores agrícola, forestal e industrial, contribuyendo a la creación de puestos de trabajo, hecho especialmente importante en el ámbito rural, ya que promueve la fijación de población.
- Generar beneficios añadidos en el caso de la valorización energética de residuos, tales como la reducción del riesgo de incendios y mantenimiento de masas forestales.
- Construir la alternativa más realista para la sustitución de combustibles de origen fósil en el sector del transporte a corto y medio plazo, mediante el empleo de biocarburantes (especialmente el biodiesel y el bioetanol).
- Garantizar la estabilidad en los precios, debido a que al ser difícil concentrar grandes cantidades de biomasa, en cuanto su valor energético, en pocas manos es más difícil que se generen procesos especulativos en este mercado.

Ahora bien, la biomasa para uso térmico presenta una serie de inconvenientes:

- El potencial calórico de la biomasa es muy dependiente de las variaciones de humedad, clima y densidad de la materia prima.
- Su combustión incompleta produce materia orgánica, monóxido de carbono (CO) y otros gases. A alta temperatura, también se producen óxidos de nitrógeno.
- La producción y el procesamiento de la biomasa pueden requerir importantes insumos, como combustible para vehículos y fertilizantes.
- Los precios de la energía no compensan los beneficios ambientales de la biomasa o de otros recursos energéticos renovables.

Los tipos de aprovechamiento se pueden ver en la Figura 72. Las aplicaciones térmicas con producción de calor y agua caliente sanitaria son las más comunes dentro del sector de la biomasa, si bien como se acaba de estudiar también puede utilizarse para la producción de electricidad. De hecho, la biomasa puede alimentar un sistema de climatización (calor y frío) del mismo modo que si se realizara con gas, gasóleo o electricidad.

BIOMASA Y SUS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS APLICADAS

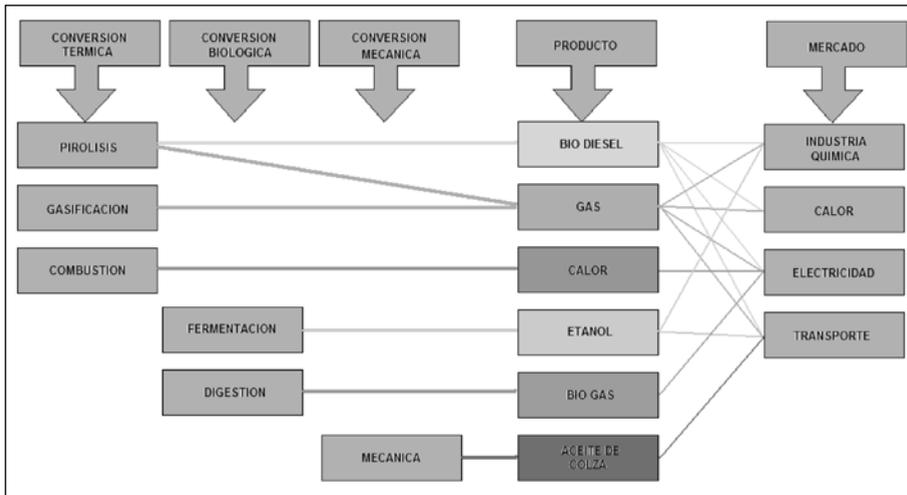


Figura 72. Tipos de aprovechamiento de la biomasa.
(Fuente: Elaboración propia).

La producción térmica puede realizarse mediante:

- Estufas, normalmente de pellets o leña, que calientan una única estancia y normalmente actúan simultáneamente como elementos decorativos.
- Calderas de baja potencia para viviendas unifamiliares o construcciones de tamaño reducido.
- Calderas diseñadas para un bloque o edificio de viviendas, que actúan como calefacción centralizada.
- Centrales térmicas que calientan varios edificios o instalaciones (district heating) o grupo de viviendas.

Y las biomásas comerciales actualmente son:

- Astillas procedentes de trabajos forestales: En este caso estamos ante una biomasa que puede estar entre el 25% y 50% de humedad y va con corteza.
- Astillas procedentes de la primera transformación de la madera: Costeros astillados de troncos previamente descortezados, entre el 25% y 40% de humedad y que puede tener algún resto de corteza.
- Astillas procedentes de la segunda transformación de la madera: Recortes triturados con una humedad inferior al 15%, en este caso el problema puede ser que esta biomasa puede tener algún resto de colas, barnices y pinturas.
- Pellets, producidos de forma industrial: Para la producción de pellets es necesario realizar un secado y molienda previa del material.

NUEVOS USOS TÉRMICOS DE LA BIOMASA

- Residuos agroindustriales, como los huesos de aceituna, cáscaras de frutos secos, almendra, piña, etc.
- Leña, que puede producirla el propio usuario u obtenerse en el mercado.

En la Figura 73 puede verse los componentes de una instalación de producción térmica con biomasa; caldera, circuitos de calefacción, acumulador de energía, producción de agua caliente sanitaria.

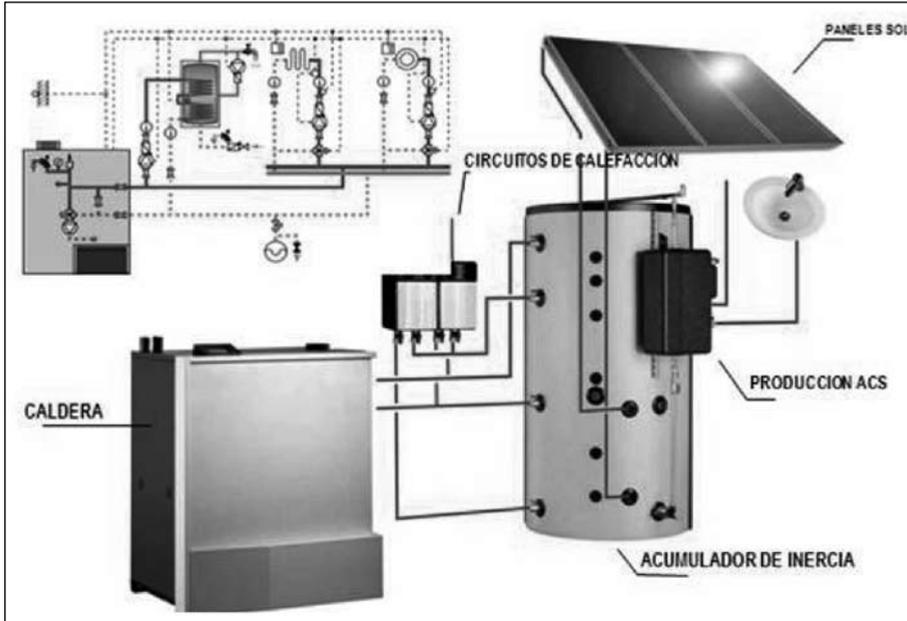


Figura 73. Componentes instalación térmica con biomasa.
(Fuente: Elaboración propia).

Las características de los dos tipos de caldera comerciales:

3. Gama alta

1. Limpieza automática intercambiador calor
 2. Limpieza automática de la parrilla de combustión
 3. Extracción y compactación automática de cenizas
 4. Regulación automática y completa de la combustión con sonda lambda
 5. Ventilador de extracción de humos modulante
 6. Alimentación automática de combustible
- Rendimiento >90%

4. Gama media

1. Limpieza automática intercambiador calor
 2. Limpieza semiautomática de la parrilla de combustión
 3. Recogida de cenizas en una caja inferior
 4. Regulación fija de la combustión
 5. Ventilador de extracción de humos fijo
 6. Alimentación automática de combustible
- Rendimiento 85-90%

3. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para finalizar se ha llevado a cabo el estudio económico de las distintas soluciones para una instalación, en nuestro caso una piscina climatizada de 582kW.

En la Tabla 17 puede verse los resultados obtenidos para distintos tipos de combustibles. En los cálculos de Pellet y Astilla está incluido el 40% de subvención.

Tabla 17.
Rentabilidad Económica Piscina climatizada 582 kW.

DATOS DE PARTIDA DE LA INSTALACIÓN	PELLET	ASTILLA	GASÉLEO	PROPANO
Coste instalación [€]	155.408	155.408	24.030	29.520
Subvención [€]	62.163	62.163	0	0
Capital préstamo (coste -subvención)	93.245	93.245	24.030	29.520
Costes de mantenimiento mensual	12.5	12.5	17	19
Costes alquiler mensual depósito	0	0	16	16
Coste del pellet [€/kg]	0.225	0.16	1.02	1.57
Incremento anual precio pellet [%]	4	4	15	15
Consumo estimado de Pellet [kg]	419.040	447.692	209.520	167.616

NUEVOS USOS TÉRMICOS DE LA BIOMASA

En la Figura 74 se ha representado la rentabilidad de cada uno de los proyectos, con operación a 20 años y podemos ver como se recupera la inversión a los 3 años.

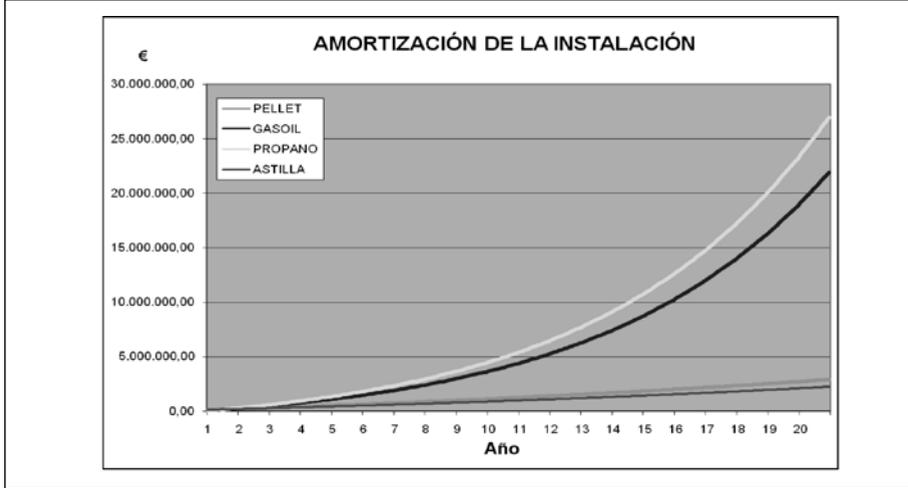


Figura 74. Rentabilidad Proyectos Piscina Climatizada 582 kW.
(Fuente: Elaboración propia).

En cuanto al coste acumulado, considerando un 15% de crecimiento en los combustibles fósiles y un 4% en la biomasa, se puede ver en la Figura 75 como es beneficioso el uso de la biomasa.

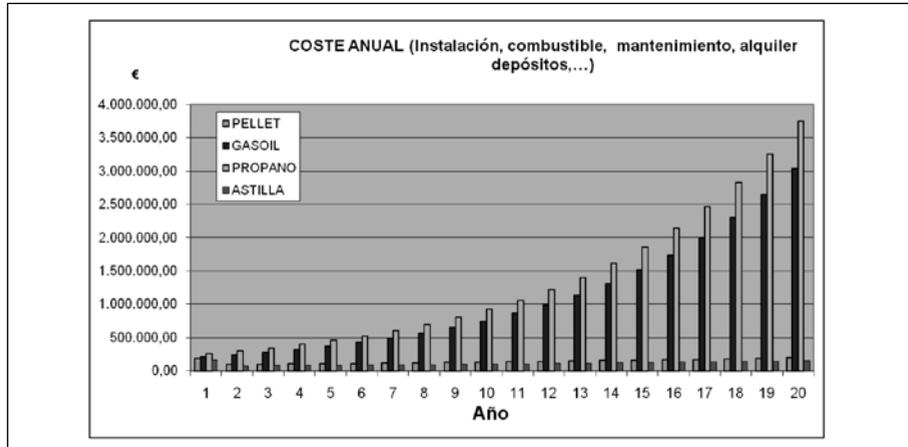


Figura 75. Coste acumulado proyecto Piscina Climatizada 582 kW.
(Fuente: Elaboración propia).

BIBLIOGRAFÍA

- BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M., *Thermal design and optimization*, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- IDAE, *Informe de precios energéticos: carburantes y combustibles*, Secretaría General, Departamento de Planificación y Estudios, Informe nº 51, Año 2012.
- LINARES, J.I.; CEBALLOS, C.; MORATILLA, B.Y.; DIAGO, M., *Mejora del rendimiento eléctrico en motores de cogeneración mediante tecnología ORC*, I Congreso de eficiencia energética eléctrica E3PLUS, 27-28 de octubre 2010, Madrid.
- LINARES, J.I.; MORATILLA, B.Y.; ARANDA, D., *Aplicación de un ciclo de Rankine orgánico como ciclo de cola en una industria cementera*, VII Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica, 15-17 junio 2011, Bilbao.
- NEUNER, H., *Biomass fired CHP plant based on an ORC cycle – Project: ORC-STIA-Admont* (THERMIE-A-PROJECT, contract no.: BM/120/98/AT/IT), 2001.
- OBERNBERGER, I., *Biomass CHP plant based on an ORC process – realised EU-demonstration project in Admont/Austria*, Meeting of IEA Bioenergy, 6-8th December 2000, Broadbeach (Australia).
- OBERNBERGER, I.; THONHOFER, P.; REISENHOFER, E., *Description and evaluation of the new 1,000 kWel Organic Rankine Cycle process integrated in the biomass CHP plant in Lienz*, Austria, Euroheat & Power, 10, 2002.
- SCHUSTER, A.; KARELLAS, S.; KAKARAS, E.; SPLIETHOFF, H., *Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications*, Applied Thermal Engineering 29 (2009) 1809-1817.
- VANSLAMBROUCK, B.; VANKEIRSBILCK, I.; GUSEV, S.; PAEPE, M. DE, *Turn waste heat into electricity by using an Organic Rankine Cycle*, 2nd European Conference on Plygeneration, 30th March-1st April 2011, Tarragona (Spain).

