



ECONOMÍA Y SOSTENIBILIDAD DE LA RECUPERACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS BIOMÁSICOS EN ESPAÑA

Autor: Lucas Giménez Gutiérrez de Cabiedes

Director: Julio Montes Ponce de León

Madrid
Julio 2018



AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. LUCAS GIMÉNEZ GUTIÉRREZ DE CABIEDES DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: ECONOMÍA Y SOSTENIBILIDAD DE LA RECUPERACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS BIOMÁSICOS EN ESPAÑA, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

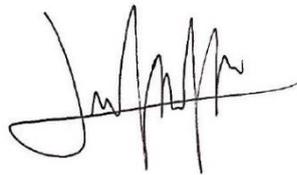
- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a

ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.

- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 29 de junio de 2018

ACEPTA

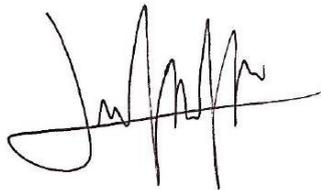


Fdo: Lucas Giménez Gutiérrez de Cabiedes



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**ECONOMÍA Y SOSTENIBILIDAD DE LA RECUPERACIÓN ENERGÉTICA DE
LOS RESIDUOS BIOMÁSICOS EN ESPAÑA**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2017-2018 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Lucas Giménez Gutiérrez de Cabiedes

Fecha: 12 / 07 / 2018

Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Julio Montes Ponce de León

Fecha: 12 / 07 / 2018





ECONOMÍA Y SOSTENIBILIDAD DE LA RECUPERACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS BIOMÁSICOS EN ESPAÑA

Autor: Giménez Gutiérrez de Cabiedes, Lucas.

Director: Montes Ponce de León, Julio.

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

El objeto de este proyecto es el de analizar el poder energético de los residuos biomásicos y en especial los Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Actualmente no están teniendo una importancia notoria en los mixes energéticos en España (ni prácticamente en ningún otro sistema eléctrico) y se está desaprovechando un gran potencial que sería de gran ayuda por varios motivos.

En primer lugar, sería una buena fuente de energía en España que colaboraría a satisfacer la demanda existente, creciente con el tiempo. Es una fuente sencilla, ya estudiada y con recursos inagotables, además de limpia con el medio ambiente. Además, en el caso de la gasificación por plasma, pese a ser renovable, tiene un carácter de gestionabilidad que es lo que suele fallar a la hora de valorar el resto de energías limpias y lo que la hace aún más interesante. El potencial almacenamiento de H₂ producido tras la gasificación por plasma será el principal punto de estudio.

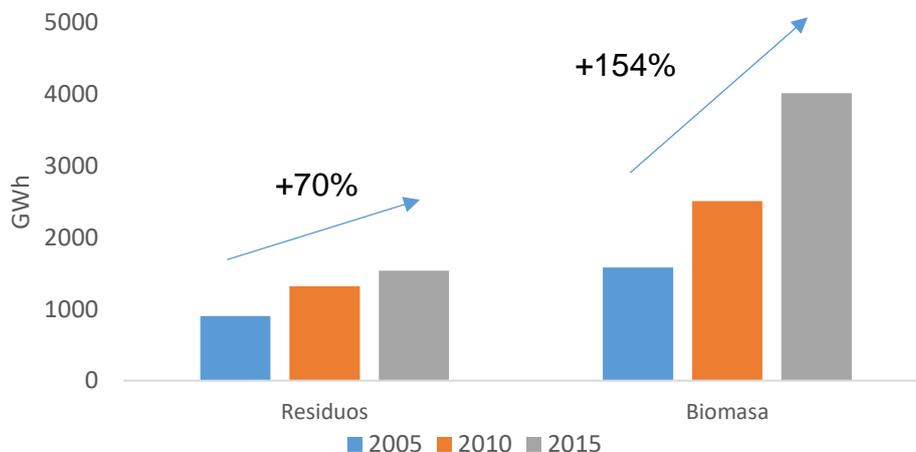
En segundo lugar, fuera del plano meramente energético, sería importante desarrollarla por los siguientes motivos. Primero, de desarrollarse seriamente, la utilización de los residuos forestales evitaría los incendios que ocurren en España cada verano o al menos se verían reducidos considerablemente. Una recogida efectiva de residuos forestales (que ahora no se lleva a cabo) para su tratamiento energético evitaría gran parte de los mismos. Segundo, los vertederos están alcanzando cotas de llenado que requieren una eficiente gestión de los residuos generados. La solución de instalar más vertederos no es factible pues el Parlamento Europeo acordó en 2012 que para el año 2020 se eliminaría la construcción de estos vertederos mientras que en el año 2030 solamente podrán existir un 10% de los que hay en la actualidad. Es importante recordar que en España se incinera sólo el 9% de los residuos mientras que más del 50% se almacena.

En cuanto al primer punto, relacionado con el Sistema Eléctrico español, destaca la casi nula presencia de biomasa y residuos en el mix energético español. La siguiente tabla muestra los valores de potencia instalada y generada en el año 2016.

Tecnología	Potencia instalada en 2016 (GW)	Generación en 2016 (GWh)
Hidráulica	19,3	39.053
Eólica	21,8	48.927
Solar fotovoltaica	4,4	7.979
Solar térmica	2,2	5.102
Residuos	0,7	3.324
Biomasa	0,8	4.014
Biogás	0,2	982
TOTAL	51,0	109.471

A continuación, se muestra una figura en la que se ve cómo, pese a estar en valores que representan un porcentaje ridículo respecto del total, los residuos y la biomasa han aumentado su presencia en la última década, aumentando un 70% y un 154% respectivamente.

Generación de electricidad mediante residuos y biomasa en el periodo 2005-2010-2015



Los Residuos Sólidos Urbanos se tratan en la actualidad de la siguiente forma en España. De las 23.575.435 toneladas generadas anualmente, un 74% van a vertederos controlados mientras que un 9,5% van a incineradoras. El resto, el 16,5% son reciclados y catalogados como productos recuperados. A continuación, se van a explicar los dos métodos mayoritarios de gestión de residuos.

Los vertederos controlados constituyen el método más utilizado de gestión de residuos en España. El primer vertedero controlado en España se construyó en 1978 en Valdemingómez. Tienen como principal objetivo la eliminación de Residuos Sólidos Urbanos sin afectar al medioambiente. Como subproducto se puede obtener metano en el proceso.

Pese a ser un proceso que ha funcionado durante décadas con eficiencia y garantías, tiene una serie de inconvenientes que invitan a buscar nuevas formas de tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos.

En primer lugar, son una fuente de contaminación ya que los lixiviados acaban llegando al exterior y dañan el ecosistema a través de fuentes de agua cercanas. Se emplea parte del presupuesto del vertedero para evitar que ocurra, pero surgen filtraciones en el terreno y demás procesos que hacen que sea inevitable su control. En segundo lugar, a nivel legislativo, el Parlamento Europeo dictaminó en 2012 como parte de la Economía Circular que para 2020 se prohibirá la construcción de nuevos vertederos controlados y que en 2030 solamente podrá haber el 10% de los vertederos que hay en la actualidad. Por último, la principal ventaja que aporta el vertedero controlado, que es la obtención de metano como subproducto para utilizarlo en la generación de energía, no se está llevando a cabo en España en su totalidad. Solamente 22 vertederos lo efectúan mientras que el resto se deshace del metano.

En cuanto a la incineración, se considera la técnica de gestión de residuos más extendida, estudiada y utilizada alrededor del mundo, pese a que en España es minoritaria. Cuenta con multitud de utilidades y es capaz de tratar residuos de diferente índole (residuos como RSU o industriales, que presenten más o menos amenaza al medio, lodos y demás materia).

Pese a ser una técnica afianzada en España, se intenta buscar un nuevo método de gestión de Residuos Sólidos Urbanos pues tiene dos grandes inconvenientes.

El primero es la posibilidad de producción de dioxinas y furanos, peligrosas para el medio ambiente y la sociedad colindante. En el caso de que la combustión sea incompleta estas

partículas se generan. Para evitarlas es preciso aumentar la temperatura de combustión, lo que incrementa el coste. El segundo es que en España las incineradoras simplemente se utilizan para la generación de electricidad, mientras que el potencial de calefacción no se aprovecha. Esto sí se realiza en otros países europeos, donde los inviernos son muy largos y es una buena fuente de calefacción.

Así, entendiendo los inconvenientes que presentan las dos formas de tratamiento de residuos que se emplean en España en la actualidad, es preciso hallar una tecnología que aporte soluciones a ambas y que, además, ayude a mantener el correcto equilibrio del Sistema Eléctrico español.

Este proyecto propone el estudio de la gasificación por plasma, un proceso térmico que utiliza plasma para transformar residuos de diverso origen en gas de síntesis (denominado “syngas”), energía e impurezas. Se utiliza eficientemente en Japón, India o Estados Unidos.

Las principales ventajas que ofrece este proceso son, en primer lugar, la posibilidad de eliminar los residuos sin contaminar el medio ambiente ni producir toxinas que sean perjudiciales para la salud. En segundo lugar, el gas de síntesis obtenido como producto del proceso contiene una alta proporción de hidrógeno que se puede almacenar. Esto hace que se pueda utilizar directamente para alimentar plantas de ciclo combinado o para ser utilizado posteriormente en forma de pilas de combustible.

Esta obtención de hidrógeno con posibilidad de almacenamiento abre la puerta a la posibilidad de creación de microrredes en las que la gestión de residuos apoye a otras fuentes de energía renovable no gestionable. Cuando estas no puedan generar por factores ambientales, este hidrógeno se puede emplear para aportar energía al sistema.

Este proyecto incluye además un estudio financiero que evalúa la posibilidad de instalación de una planta de gasificación por plasma en España. Se incluye a continuación la cuenta de resultados de la planta.

Concepto	Año 0	Año X
Gasto Inicial	58.253.000	
Ingresos		21.200.000
Costes		(4.010.000)
EBITDA		17.190.000
Amortización y Depreciación		(5.825.300)
EBIT		11.364.700
Impuestos		(3.409.410)
Cash Flow		7.955.290

Obteniendo el VAN con una tasa de descuento del 4%, se obtiene un valor superior a 0 por lo que el proyecto es positivo en términos financieros. Se calcula también un periodo de retorno de 8,84 años, un plazo razonable y similar al de otras plantas equivalentes.

Así, este proyecto propone la instalación de centrales de gasificación por plasma en España, ya que solventarían dos problemas a la vez. En primer lugar, el de hallar nuevas formas de gestión de residuos que sean atractivas. En segundo lugar, lograr un eficiente almacenaje de energía que con la instalación de microrredes pueda beneficiar al sistema eléctrico español, que con el centralismo actual no está consiguiendo emplear eficientemente las energías renovables.





ECONOMY AND SUSTAINABILITY OF THE ENERGETIC RECOVERY OF BIOMASS WASTE IN SPAIN

ABSTRACT

The main goal with this project is to analyze the energetic power of biomass waste and, specially, Solid Urban Waste. Currently, these do not have a relevant importance in the Spanish energetic mix (or in any other system around the world) and the great potential these wastes have is being misused, which is not correct as they would be of great help for several reasons.

Firstly, this would be a great energy source in Spain that would collaborate to satisfy the existing demand, which grows with time. It is a simple source, already developed which has infinite resources, as well as being respectful with the environment. Furthermore, in the case of plasma gasification, despite being renewable, it has a component of manageability, which is not normal and therefore makes the project even more appealing. The potential hydrogen storage produced by plasma gasification will be the main study point.

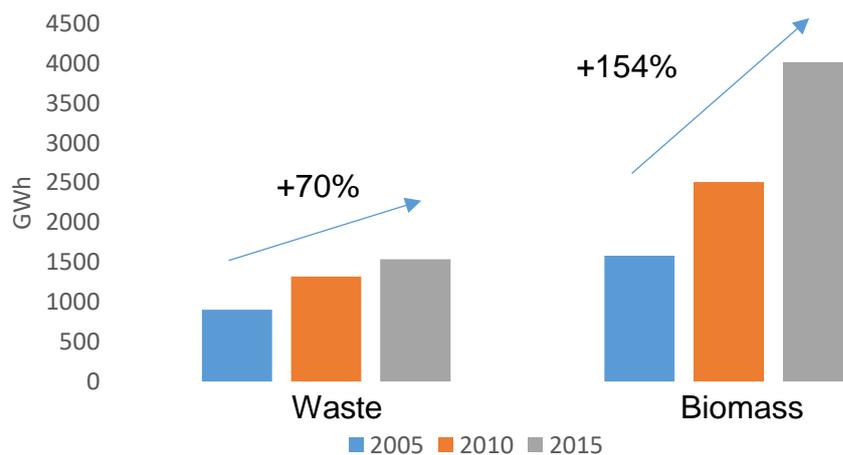
Secondly, apart from technical electrical views, it would be important to increase waste management for these reasons. If seriously developed, the use of forest waste would prevent fires that Spain suffers each year, or at least, these would significantly decrease. An effective collection (that is not currently done) for a future energetic treatment would prevent these problems. In addition, dumping sites are starting to fill up and the solution of installing new ones is not feasible. The European Parliament agreed on 2012 that by 2020 no more dumping sites would be built up and by 2030 only 10% of the actual dumping sites should remain used. It is important to remember that in Spain only 9% of the waste is incinerated while more than 50% is stored at dumping sites.

Regarding the first point, related to the Spanish Electric System, it is shocking that biomass and waste treatment represent a nearly absent presence in the energetic mix. The following table shows the values of installed power and energy generation in 2016.

Technology	Installed power in 2016 (GW)	Generation in 2016 (GWh)
Hydraulic	19,3	39.053
Eolic	21,8	48.927
Solar - photovoltaic	4,4	7.979
Solar - thermic	2,2	5.102
Waste	0,7	3.324
Biomass	0,8	4.014
Biogas	0,2	982
TOTAL	51,0	109.471

The following figure shows the evolution of biomass and waste management in the last decade. Although being values which represent nothing compared to the total, there has been an important increase in the last years, by 70% in waste management and by 154% in biomass.

Energy generation by waste and biomass



Solid Urban Waste in Spain are currently treated in the following ways. 23.575.435 tons are generated each year. From that total, 74% go to controlled dumping sites, while 9,5%

are incinerated. The remaining 16,5% are recycled and cataloged as recuperated products. The two major treatment methods will be explained below.

Controlled dumping sites are the most commonly used waste treatment method used in Spain. The first controlled dumping site in Spain was built in 1978 in Valdemingomez. The main objective is to remain Solid Urban Waste without affecting the environment. As a sub product, methane can be obtained.

Despite being a process with great success in the past decades, with effectiveness and guarantees, there are a series of disadvantages that invite to search for different waste treatment methods.

Firstly, these are a contamination source as leachates end up reaching the exterior and damage the ecosystem by entering water sources. An important part of the dumping site's budget is used to prevent this from happening but filtrations occur and the complete control results impossible. Secondly, the European Parliament stated as part of its Circular Economy that by 2020 no more controlled dumping sites are allowed to be built and by 2030 only 10% of the existing controlled dumping sites can remain in use. Finally, the main advantage of controlled dumping sites, the possibility of obtaining methane and its use to generate electricity, is not being carried out in Spain as it should be. Only 22 dumping sites do it while the rest just discard it.

On the other hand, incineration represents the most popular waste treatment technique around the world, although its use in Spain is still reduced. It has multiple utilities and it can manage waste coming from different origins (Solid Urban Waste, industrial waste with higher or lower danger indices, with mud, etc.).

Although being a used and established technology in Spain, it also has great disadvantages that make the search of new ways inevitable.

Dioxins are produced as a product of the process and these are dangerous both for the environment but also for human health. In the event of incomplete combustion of waste, these particles are created. To prevent its appearance, combustion temperature is to be raised, which increases costs. Moreover, Spain uses its incinerators just for producing energy, while the heating potential is not used. This is different in other European countries where winters are long and cold and it is a great source of heat.

Having analyzed both methods and understanding the disadvantages that Spanish waste treatment methods have, it is vital to look for a technology that solves these problems and helps the energetic system at the same time.

This project suggests the study of plasma gasification, a thermic process that uses plasma to transform waste from diverse origin into synthetic gas (called “syngas”), energy and spots. It is currently used in Japan. India and the United States with great results.

The main advantages of this technology are, in the first place, the possibility of eliminating waste without contaminating the surrounding ecosystem and without producing dioxins that damage health. On the second place, the syngas obtained as a product contains a high proportion of hydrogen that can be stored. This means that it can be directly used to fuel combined cycles or it can be used later in the form of fuel batteries.

The potential storage of the produced hydrogen opens the door to a future in intelligent networks for the Spanish electrical system. The waste treatment methods can collaborate with other non-manageable renewable sources. When these do not work due to a lack of meteorological conditions, the hydrogen may be used to generate energy.

This project also includes a financial study that evaluates the possibility of installing a plasma gasification plant in Spain. The following table includes the Financial Statement

Concept	Year 0	Year X
Initial expense	58.253.000	
Revenues		21.200.000
Costs		(4.010.000)
EBITDA		17.190.000
Amortization and Depreciation		(5.825.300)
EBIT		11.364.700
Taxes		(3.409.410)
Cash Flow		7.955.290



Obtaining the VAN with a 4% discount rate, the result is over 0 which means that the project is positive in financial terms. The payback period is also calculated, being 8,84 years, a reasonable period for a plant with these characteristics.

In conclusion, the project suggests the construction of plasma gasification plants in Spain, as several problems would be solved. Firstly, the most important which is the urge of finding waste treatment methods in the short term. Secondly, achieving an efficient storage of energy that could benefit the electrical system if intelligent networks are also set up.





ECONOMÍA Y SOSTENIBILIDAD DE LA RECUPERACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS BIOMÁSICOS EN ESPAÑA

Autor: Lucas Giménez Gutiérrez de Cabiedes

Director: Julio Montes Ponce de León

Madrid
Junio 2018





A todos los que me han apoyado,
Porque sin ellos no hubiera sido posible



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA ELÉCTRICO ESPAÑOL.....	5
3. LA BIOMASA.....	15
4. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	21
5. VERTEDEROS CONTROLADOS.....	27
6. INCINERACIÓN.....	39
7. GASIFICACIÓN POR PLASMA	51
8. COMPARATIVA DE PROCESOS.....	71
9. ESTUDIO ECONÓMICO	75
10. CONCLUSIÓN	91
ANEXOS	93
REFERENCIAS.....	97



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comparativa de potencia instalada en España	5
Figura 2. Comparativa anual de generación en España	7
Figura 3. Evolución de generación eléctrica por residuos y biomasa en España de 2005 a 2015	12
Figura 4. Diagrama Sankey España 2015.....	13
Figura 5. Evolución porcentual de las emisiones de CO ₂ desde 1990	17
Figura 6. Evolución absoluta de las emisiones de CO ₂ desde 1990	17
Figura 7. Generación con biomasa en los países europeos.....	19
Figura 8. Residuos generados per cápita en Europa en kg/día.....	22
Figura 9. Evolución de los RSU y su gestión en el periodo 2004-2014 en España	23
Figura 10. Esquema de la gestión de RSU en España	24
Figura 11. Esquema de un vertedero controlado	27
Figura 12. Esquema del funcionamiento de la ósmosis inversa.....	28
Figura 13. Esquema de la gestión de gases en un vertedero	29
Figura 14. Comparativa europea de la evolución de los RSU almacenados en vertederos en el s.XXI	31
Figura 15. Distancia de vertederos controlados a aguas superficiales.....	33
Figura 16. Situación de vertederos controlados respecto a aguas subterráneas en España	34
Figura 17. Producción anual de metano en un vertedero controlado	35
Figura 18. Horno rotativo utilizado en una incineradora de Shanghái.....	40
Figura 19. Esquema de horno de lecho fluido	41
Figura 20. Utilización de la energía producida en la incineración en Europa ...	44
Figura 21. Incineradoras en España	47
Figura 22. Incineradora de Gerona	48
Figura 23. Incineradora de Cerceda.....	49
Figura 24. Esquema simplificado de gasificación por plasma	51

Figura 25. Cámara de gasificación por plasma	52
Figura 26. Principal utilización del gas de síntesis	54
Figura 27. Esquema de una pila de combustible.....	60
Figura 28. Planta de gasificación por plasma en Pune (India)	63
Figura 29. USS Gerald R. Ford Supercarrier.....	65
Figura 30. Planta de gasificación por plasma en desuso en Ottawa	67
Figura 31. Plantas de gasificación por plasma en el mundo	68
Figura 32. Localización planteada para la planta de gasificación por plasma en España	69
Figura 33. Evolución del VAN del proyecto	88
Figura 34. Evolución precio (€/MWh) mercado spot.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Mix de potencia instalada renovable en 2016	6
Tabla 2. Mix de potencia instalada no renovable en 2016	7
Tabla 3. Mix de potencia generada renovable en 2016.....	8
Tabla 4. Mix de potencia generada no renovable en 2016.....	9
Tabla 5. Horas de funcionamiento medio de fuentes renovables en 2016.....	10
Tabla 6. Comparativa europea de penetración biomásica en 2016	18
Tabla 7. Composición media en España de los Residuos Sólidos Urbanos	21
Tabla 8. Composición media del gas vertedero	30
Tabla 9. Vertederos controlados en España que utilizan el metano obtenido..	36
Tabla 10. Incineradoras en España.....	46
Tabla 11. Composición media del gas de síntesis	53
Tabla 12. Emisiones de una planta de gasificación por plasma comparadas con el estándar válido	55
Tabla 13. Entradas y salidas de la planta de gasificación por plasma	61
Tabla 14. Comparativa de las distintas técnicas de gestión de residuos	73
Tabla 15. Gastos construcción planta gasificación por plasma.....	77
Tabla 16. Gastos tecnología planta gasificación por plasma	78
Tabla 17. Resumen gasto planta gasificación por plasma	79
Tabla 18. Costes anuales materiales planta gasificación por plasma	81
Tabla 19. Consumo anual electricidad planta gasificación por plasma	82
Tabla 20. Coste anual personal planta gasificación por plasma.....	83
Tabla 21. Resumen costes anuales planta gasificación por plasma	84
Tabla 22. Cuenta de resultados de la planta de gasificación por plasma.....	86
Tabla 23. Precio peninsular por periodo en €/kWh.....	93



1. INTRODUCCIÓN

El objeto de este proyecto es el de analizar la situación actual de la gestión de residuos biomásicos y en especial los Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Actualmente se desarrollan tres técnicas en España, la metanización industrial (con poca presencia en España), el almacenamiento en vertederos y la incineración, que cuentan con problemáticas que requieren soluciones en el corto plazo. Los residuos en el país no se están tratando correctamente [MONT03].

La solución que se propone es la gasificación por plasma. En España aún no está implantado, pero en países como India, Japón o Estados Unidos ya existen dos grandes empresas que ofrecen esta tecnología. Además de proporcionar una solución real en cuanto al tratamiento de residuos en las incineradoras y vertederos, a nivel energético aporta grandes ventajas. Uno de los productos del proceso de gasificación por plasma es el gas de síntesis, con alto contenido de hidrógeno, que puede ser almacenado para su posterior utilización en ciclos combinados o en pilas de combustibles. A lo largo de este trabajo de fin de máster se analizará la necesidad del desarrollo de plantas de gasificación por plasma, su funcionamiento y utilización reales.

Para comenzar, se hará una valoración de la situación general en el país a nivel energético. Se estudiarán las tecnologías presentes actualmente en generación de energía eléctrica y se analizará cómo ha variado la generación energética. Se hará hincapié en la escasa contribución de la biomasa y en particular, de los Residuos Sólidos Urbanos. Se verá cómo esta generación podría aumentar y sería beneficioso por las siguientes razones.

En primer lugar, sería una buena fuente de energía en España que colaboraría a satisfacer la demanda existente, creciente con el tiempo. Es una fuente sencilla, ya estudiada y con recursos inagotables, además de limpia con el medio ambiente. Pese a ser renovable, tiene un carácter de gestionabilidad que es lo que suele fallar a la hora de valorar el resto de energías limpias y lo que la hace aún más interesante. El potencial almacenamiento de H₂ producido tras la gasificación por plasma es el principal punto de estudio.

En segundo lugar, fuera del plano meramente energético, sería importante desarrollarla por tres motivos. Primero, de desarrollarse seriamente, la utilización de los residuos forestales evitaría los incendios que ocurren en España cada

verano o al menos se verían reducidos considerablemente. Una recogida efectiva de residuos forestales (que ahora no se lleva a cabo) para su tratamiento energético evitaría gran parte de los mismos. Segundo, los vertederos controlados tienen un futuro muy a corto plazo. El Parlamento Europeo acordó en 2012 que para el año 2020 se eliminaría la construcción estos vertederos mientras que en el año 2030 solamente podrán existir un 10% de los que hay en la actualidad. En España se incinera sólo el 9% de los residuos mientras que más del 50% se almacena. Es necesario explorar una alternativa que pueda sustituir a los vertederos controlados. Por último, actualmente se utiliza la denominada “Metanización industrial”. Pese a que es productiva y eficiente, tiene el hándicap de tener un coste muy elevado por lo que se necesita el desarrollo de un nuevo tratamiento.

A continuación, se estudiará en profundidad el desarrollo de la biomasa en España, valorando el potencial energético que puede llegar a tener y los residuos que se utilizan, empleando datos reales históricos de los desechos generados en el país. Se estudiará además el impacto de CO₂ que tendría la aplicación de esta tecnología.

Se estudiarán los procesos de tratamiento de residuos que operan en España en la actualidad, detallándose cada uno de ellos. Estos son: vertederos controlados, incineración. Se explicará su funcionamiento y operación, su utilización en España y cuáles son los problemas que plantean la necesidad de una nueva forma de gestión de residuos.

A continuación, se estudiará la tecnología de gasificación por plasma. Se explicará el proceso de tratamiento de los distintos residuos, las ventajas que ofrece respecto de las técnicas que operan actualmente en España, el potencial aprovechamiento del hidrógeno y la utilización alrededor del mundo, tanto en el presente como en el pasado y las potenciales plantas desarrollándose actualmente.

Para continuar, se efectuará el estudio comparativo entre los distintos métodos analizados (vertederos controlados, incineración y gasificación por plasma) a nivel técnico donde se verán reflejadas las carencias y ventajas de cada una de las opciones disponibles.

En el siguiente capítulo, se calcula la viabilidad financiera de una instalación de estas características en nuestro país. Se comprobarán cuáles son las hipótesis sobre las que se hallan los valores de estudio de la planta de gasificación por plasma. Más adelante, se analizan los gastos iniciales, los costes de implantación de la planta y los ingresos que se obtendrían por la explotación de



la misma. Los costes y los ingresos se plantean a nivel anual. Tras este análisis, se calcula la cuenta de resultados hallando el "Cash Flow".

Para ver si la planta es viable se hallará el Valor Actual Neto (VAN) y el periodo de retorno.

Por último, se concluirá con recomendaciones tras los datos obtenidos en el proyecto y los casos estudiados.



2. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA ELÉCTRICO ESPAÑOL

Para comprender la posible necesidad de nuevas formas de producción energética es preciso estudiar y entender el panorama actual. Se analizará la situación de 2016 (último informe completo anual publicado hasta la fecha por Red Eléctrica Española).

Se examinarán distintas características del sistema: la potencia instalada, la generación de electricidad, las horas de operación por tecnologías y la demanda distribuida por sectores.

En primer lugar, se va a analizar la potencia instalada en España. La potencia instalada se define como la capacidad en condiciones ideales que tiene una central eléctrica de obtener y proporcionar energía. El último dato publicado por Red Eléctrica Española respecto del mix energético instalado es del 31 de diciembre de 2016.

En la siguiente figura se muestra un gráfico de sectores comparando la potencia instalada renovable y no renovable en España. Como se puede observar, es prácticamente igual, diferenciándose por únicamente 900 MW.

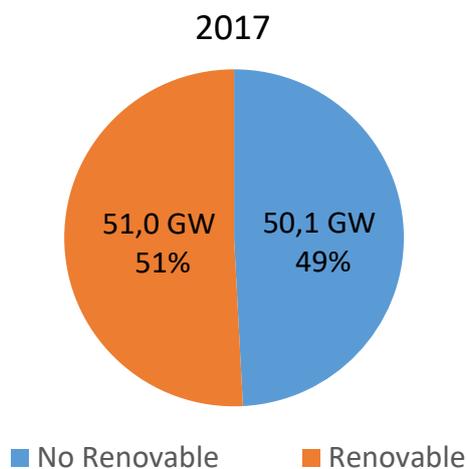


Figura 1. Comparativa de potencia instalada en España

En el sector de no renovable se incluye la energía generada por nuclear, carbón, fuel/gas, ciclos combinados y cogeneración. En cuanto a las renovables, se incluye la energía hidráulica y minihidráulica, eólica, solar fotovoltaica, solar térmica, residuos, biomasa y biogás.

En la siguiente tabla se estudia en concreto el mix de potencia instalada renovable. Destacan con alrededor de 20GW las centrales hidráulicas y eólicas, muy por encima de las solares fotovoltaicas y térmicas y aún más por encima de los residuos, biomasa y biogás, que tienen una presencia muy escasa, prácticamente nula, en el mix energético.

Tecnología	Potencia instalada en 2016 (GW)
Hidráulica	19,3
Eólica	21,8
Solar fotovoltaica	4,4
Solar térmica	2,2
Residuos	0,7
Biomasa	0,8
Biogás	0,2
Otras	0,7
TOTAL	51,0

Tabla 1. Mix de potencia instalada renovable en 2016

En la siguiente tabla se estudia el mix de potencia instalada no renovable.

Tecnología	Potencia instalada en 2016 (GW)
Nuclear	7,4
Carbón	9,5
Ciclo combinado	25,3
Fuel/Gas	2,4
Cogeneración	6,4
TOTAL	50,1

Tabla 2. Mix de potencia instalada no renovable en 2016

A continuación, en la Figura 2, se muestran tres gráficos de sectores que comparan la evolución de la generación de energía no renovable y renovable. Se puede observar cómo ha variado la proporción entre los años 2005 y 2010, un aumento del 100% en las tecnologías renovables, mientras que en el último lustro los porcentajes no han sufrido una variación tan pronunciada.

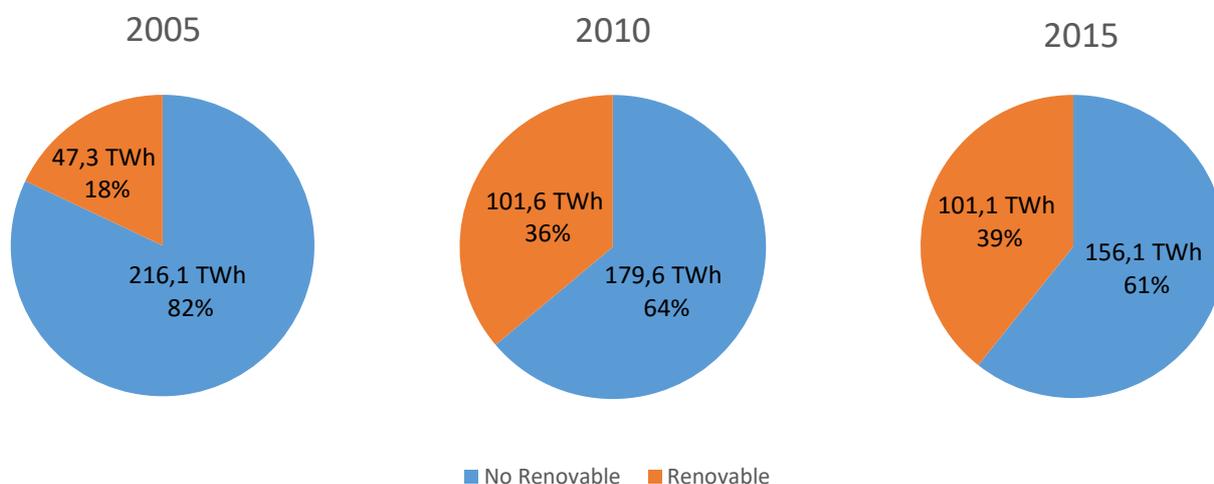


Figura 2. Comparativa anual de generación en España

Resulta interesante volver a estudiar la figura de la página anterior donde se compara la potencia instalada en España de tecnologías renovables y no renovables. Mientras que la potencia instalada era prácticamente igual entre ambas, ahora que se mira la energía generada la proporción es muy diferente, siendo la ratio prácticamente de dos tercios y un tercio. Esto implica que la potencia instalada de tecnología no renovable genera a un alto porcentaje de efectividad. Es decir, a igual potencia instalada, la generación de las tecnologías no renovables es considerablemente mayor.

A continuación, se muestra la generación por fuentes renovables en 2016.

Tecnología	Generación en 2016 (GWh)
Hidráulica	39.053
Eólica	48.927
Solar fotovoltaica	7.979
Solar térmica	5.102
Residuos	3.324
Biomasa	4.014
Biogás	982
TOTAL	109.471

Tabla 3. Mix de potencia generada renovable en 2016

A continuación, se muestra la generación por fuentes no renovables en 2016.

Tecnología	Generación en 2016 (GWh)
Nuclear	55.546
Carbón	37.038
Ciclo combinado	29.787
Fuel/Gas	6.748
Cogeneración	25.878
TOTAL	154.997

Tabla 4. Mix de potencia generada no renovable en 2016

La disparidad que existe entre la potencia instalada y la generada por las fuentes renovables se debe en gran medida a la no gestionabilidad de las mismas.

La generación eólica o solar fotovoltaica está condicionada a las condiciones meteorológicas, si hay escasez de viento o luz solar, estas fuentes no pueden operar. En ese supuesto, centrales de ciclo combinado actúan como fuentes de reserva. Es por eso por lo que cada MW instalado de fuentes renovables no gestionables requiere de MW de reserva de fuentes gestionables que sean capaces de generar inmediatamente, ciclos combinados.

Esto produce un aumento en el coste de la energía para el usuario pues las centrales de ciclos combinados reciben un importe económico para compensar su falta de. Existe un impuesto cargado a los usuarios que se destina a este fin.

Las centrales nucleares y de carbón no actúan de reserva para las fuentes no gestionables pues necesitan un largo tiempo para comenzar a generar mientras que los ciclos combinados generan instantáneamente. Una central nuclear necesita días hasta ser capaz de tener una producción normal. Por tanto, no es

útil a la hora de operar en el caso de que las renovables no gestionables no puedan generar en un momento concreto.

En el mix de generación las fuentes de Régimen Retributivo Especial tienen prioridad a la hora de entregar sus GWh generados. Como resultado de esto, si las renovables operan a máxima potencia la energía generada por otras fuentes como el carbón o nuclear debe reducirse o incluso no utilizarse si ha sido generada.

Para entender aún más la no gestionabilidad de algunas fuentes renovables, en la siguiente tabla se muestran las horas medias de operación al año en el año 2016 (sobre un total de 8760 horas que hay en un año). Esta información se ha obtenido del informe anual de Red Eléctrica de España.

Tecnología	Horas de funcionamiento
Hidráulica	1.923
Eólica	2.073
Solar fotovoltaica	1.705
Solar térmica	2.209
Residuos	4.505

Tabla 5. Horas de funcionamiento medio de fuentes renovables en 2016

En lugar de instalar más energía eólica o fotovoltaica se debería fomentar otro tipo de renovables gestionables como la geotermia. En el año 1985 con el estudio geológico y minero se aprobó la instalación de este tipo de plantas en la Península. Por otro lado, en las Islas Canarias se ha estudiado y detectado la posibilidad de realizar esta técnica pues existen dos emplazamientos térmicos, que abastecería casi por completo a las islas. Sin embargo, no acaba de promoverse en España. En Portugal, en las Islas Azores [FRAN15], se utiliza con gran éxito, estando en la misma zona de falla que las Islas Canarias.

Sería interesante integrar las fuentes de generación no gestionable en microrredes donde existan otros generadores gestionables que compensen sus fluctuaciones sin afectar a la red general. Por ejemplo, se podrían utilizar, como se expondrá más adelante, la biomasa y los residuos, cuya presencia en el mix de generación es casi nula, en sistemas de generación integrados en redes inteligentes. Estudios han afirmado que el tratamiento de residuos provenientes de la agricultura como vinícolas o aceitunera son capaces de proporcionar la energía necesaria para zonas colindantes, con ayuda de energía eólica y fotovoltaica. Lo que carece de sentido es volcar esta producción al sistema central, pues es un porcentaje muy pequeño respecto al total y el transporte de esta energía aumenta el coste y pérdidas. Más adelante en el proyecto se tratarán estos temas con más profundidad.

En cuanto a los cultivos energéticos, éstos no se desarrollan en la Unión Europea, siendo la PAC el organismo que controla esta actividad. Los productores reciben menos de un tercio por cultivos energéticos que por actividades de agricultura por lo que no resulta rentable y no se efectúa. Es en países de gran extensión como Estados Unidos, Argentina o Brasil donde sí se utilizan como fuente de energía [SANT15].

Cabe destacar que, aunque la presencia de energía generada por residuos, biomasa y biogás sigue aumentando, no se ha producido aún un salto cualitativo que permita depender de esta tecnología en España. Siguen siendo las tres tecnologías que menos GWh generan anualmente, siendo los dos tipos de energía solar las más próximas a ellas.

En la siguiente figura se muestra el aumento temporal de generación eléctrica tanto por residuos como por biomasa. Pese a no tener números absolutos comparables a eólica o hidráulica, es cierto que la evolución es significativa, siendo en el caso de los residuos de un 70% en los diez años estudiados y de un 154% en el caso de la biomasa. Ésta última es la tecnología que más variación ha sufrido en el último lustro, creciendo un 60%, más que en el periodo 2005-2010.

Generación de electricidad mediante residuos y biomasa en el periodo 2005-2010-2015

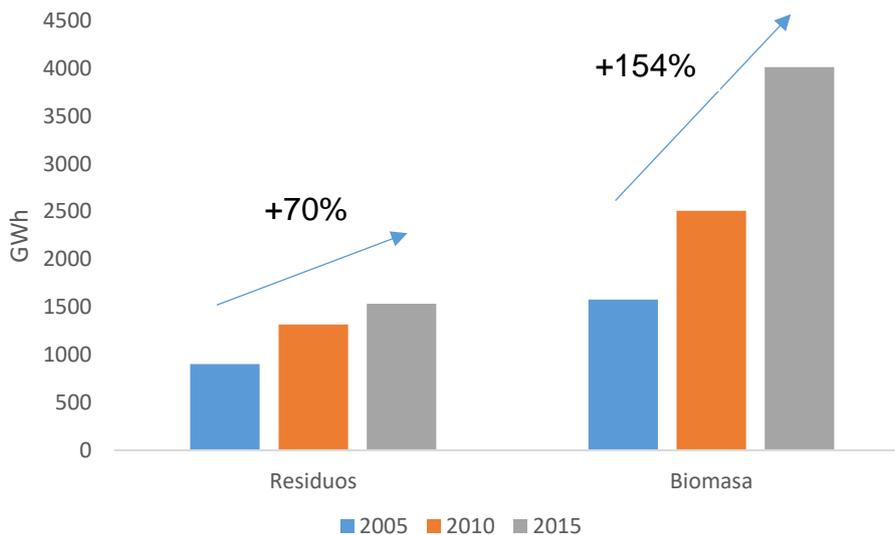


Figura 3. Evolución de generación eléctrica por residuos y biomasa en España de 2005 a 2015

En cuanto a la demanda de energía en España, ésta no ha sufrido mucha variación entre los años estudiados. En la Figura 4, se muestra un diagrama de Sankey del sistema eléctrico español para el año 2015. Consiste en una representación esquemática de la utilización de la energía primaria. En la parte de la izquierda se ven las fuentes de energía, como pueden ser gas natural o petróleo, y en la derecha la demanda, industria o transporte, por ejemplo.

Respecto de la demanda mostrada en el diagrama de Sankey, la mayoría (un 27%) se atribuye a pérdidas del sistema. No es una demanda como tal, pero debe tenerse siempre en cuenta cuando se estudia el destino final de la energía primaria generada. En cuanto a las demandas, el transporte es el sector que más energía requiere, con un 23% del total generado. Después se sitúa el sector terciario con un 19% y la industria con un 15%. Por último, está la exportación de derivados del petróleo (10%) y el autoconsumo (6%). Dentro del sector terciario la mayoritaria, que consume el 54% del subtotal terciario es la demanda residencial, que por tanto equivale a un 10% del total del sistema.

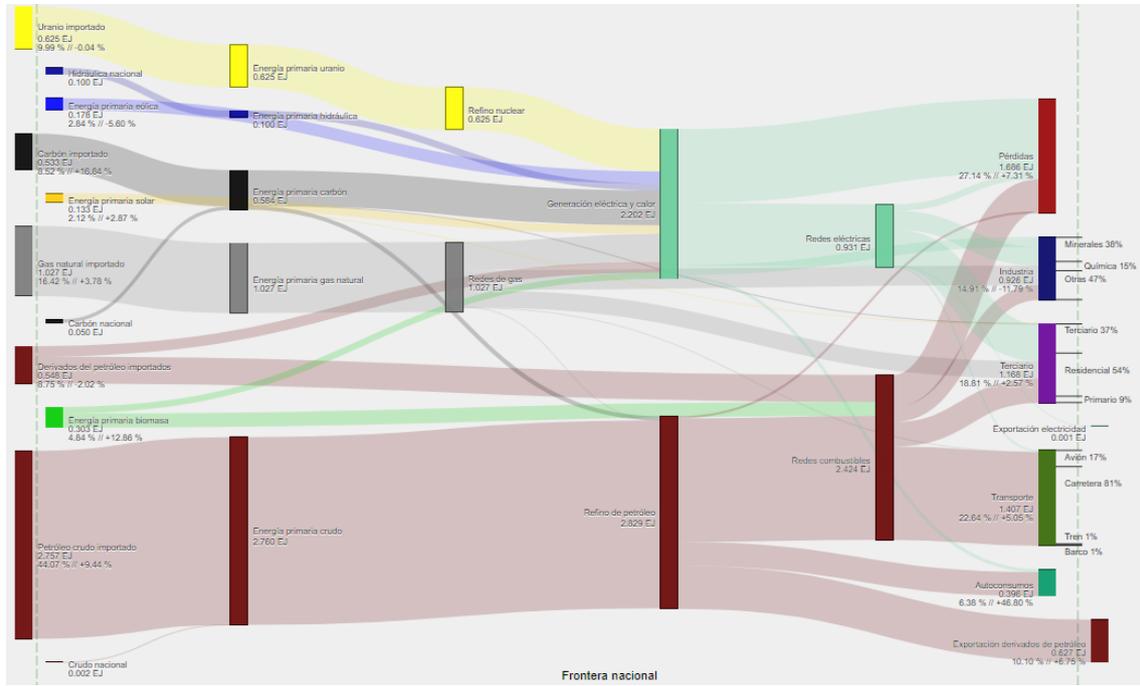


Figura 4. Diagrama Sankey España 2015



3. LA BIOMASA

Como se ha visto en el capítulo anterior, la presencia de biomasa en el mix energético español es nefaria. Solamente representa 3.212 GWh frente a los 262.645 GWh totales, que en valor porcentual representa un 1,22% de la generación anual en España.

En primer lugar, es necesario entender qué es la biomasa y de qué elementos se compone. Según el Diccionario de la Real Academia Española, “biomasa” se define como “Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía”. Energéticamente, gracias a la fotosíntesis, las plantas realizan un proceso de transformación de energía solar a química. Un porcentaje de esta energía química se almacena como materia orgánica y permite que tiempo después se pueda recuperar (pese a estar la planta ya muerta). Dicha recuperación se puede hacer a través de una transformación en combustible o realizando una combustión directa sobre la biomasa.

Así, se presenta la biomasa como una alternativa de generación eléctrica renovable más a los combustibles fósiles tradicionales. Puede existir en versión sólida (por ejemplo, madera), líquida (p.e. bioetanol) o gaseosa (p.e. gas metano) [SRIR05].

Entendida como una fuente energética, la biomasa puede agruparse en estas categorías:

- Biomasa natural: aquella que no requiere actuación humana, es decir, que se genera y encuentra directamente en la naturaleza (residuos forestales).
- Biomasa residual: aquella que resulta de la actividad humana por actividades de agricultura, silvicultura o ganadería.
- Biomasa con cultivos energéticos: consiste en el cultivo de productos específicamente para su utilización en producción de energía. En la Unión Europea no se lleva a cabo porque la producción agraria está controlada por la PAC y la remuneración que reciben los agricultores no es rentable frente a la agricultura con fines alimenticios.

- Biomasa de residuos urbanos: industriales, agroalimentarios, maderera o de depuradoras.

A la hora de determinar la validez de esta potencial fuente de energía eléctrica hay que valorar las ventajas que presenta. A continuación, se muestran las más relevantes desde un punto de vista técnico.

Ventajas de la biomasa como fuente de energía:

- La materia prima utilizada en esta tecnología es natural, y su manipulación no tiene unos costes asociados elevados.
- Bajos niveles de dióxido de carbono. Esto se basa en que solamente puede utilizarse una cantidad como máximo a lo aportado por la naturaleza. En el proceso de transformación de la biomasa a gas natural, bioetanol o demás productos sí se utilizarán técnicas industriales que requerirán energía y por tanto habrá emisiones. Sin embargo, siempre será un valor menor al necesario para generar energía con combustibles fósiles tradicionales, donde su manipulación lleva implícita la generación de emisiones desde el momento de su extracción hasta la gestión final del residuo.
- La utilización de biomasa como fuente de generación eléctrica colabora además con la reducción de los residuos. Evita que se acumulen prolongadamente y se produzcan problemas como incendios forestales [CLEA10] por exceso de materia inflamable en los campos a lo largo del país o la incapacidad de almacenar más residuos en vertederos.

La generación de energía con emisión neutra de CO₂ [DIAZ16] es la principal ventaja que aporta la biomasa como fuente de energía. Es preciso estudiar las emisiones de dicho gas en España para entender la necesidad de incrementar la utilización de la biomasa en el mix energético del país.

A continuación, se añaden dos figuras. En la primera, se muestran una figura donde se observa la evolución porcentual de las emisiones de CO₂ en España desde el año 1990 hasta el 2016, con base en 1990. En la segunda se muestra el valor total de dichas emisiones, expresado en millones de toneladas.

Evolución porcentual de las emisiones de CO₂

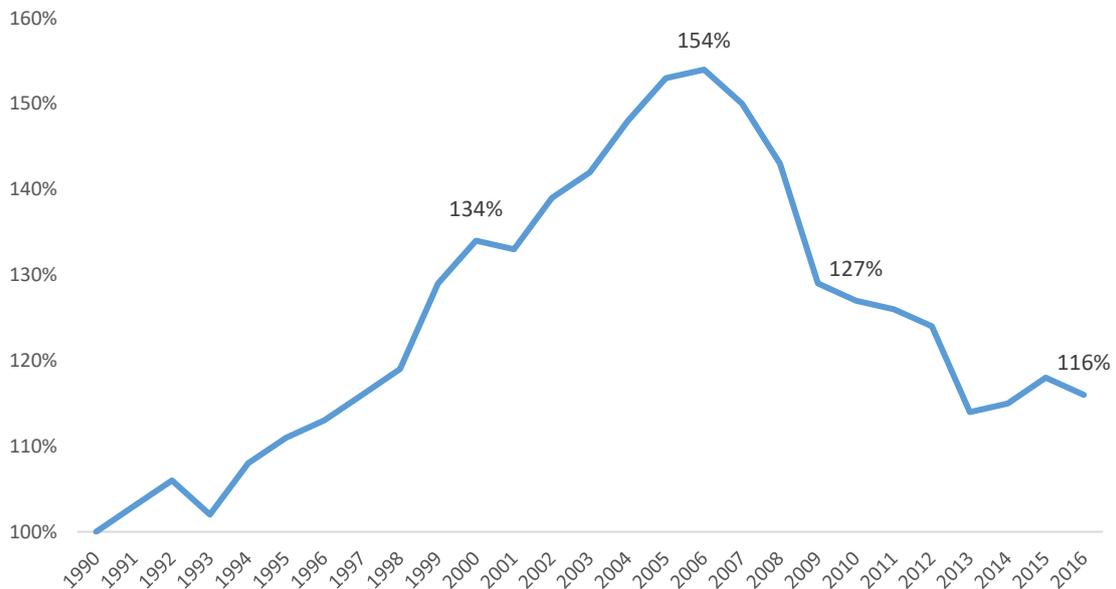


Figura 5. Evolución porcentual de las emisiones de CO₂ desde 1990

Evolución absoluta de las emisiones de CO₂

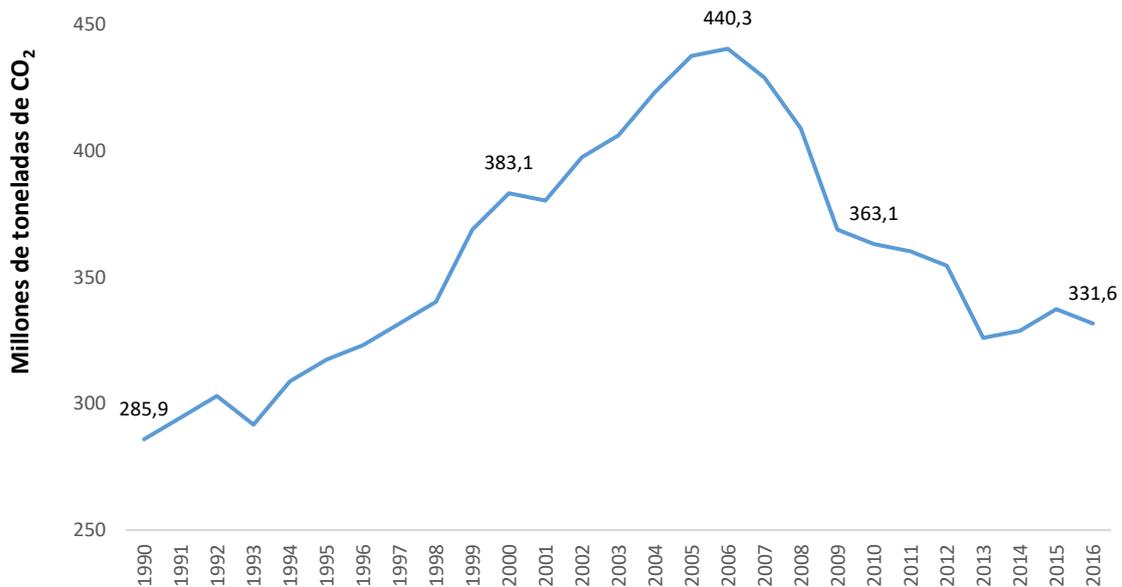


Figura 6. Evolución absoluta de las emisiones de CO₂ desde 1990

A la hora de evaluar el potencial actual de la biomasa en España resulta útil comparar la generación por dicha fuente de energía con el resto de los países europeos. La siguiente tabla muestra la generación por país, siempre que ésta sea superior a 1TWh. También se muestra el consumo de electricidad y el porcentaje que representa la generación con biomasa. Este dato es más representativo ya que se aprecia la importancia y el protagonismo que cada nación otorga a esta fuente de energía. Los datos se han obtenido de Eurostat.

País	Generación con biomasa en 2016 (TWh)	Consumo (TWh)	Generación por biomasa (%)
Reino Unido	19,60	378,7	5,18
Alemania	4,78	545,5	0,88
España	3,21	262,6	1,22
Italia	2,23	307,1	0,73
Bélgica	2,16	82,9	2,61
Polonia	2,05	120,4	1,70
Holanda	1,17	108,0	1,08
Finlandia	1,00	88,3	1,14
Resto de Europa	3,50	-	-
TOTAL	40,03		

Tabla 6. Comparativa europea de penetración biomásica en 2016

Como se puede ver en la Tabla 6, España se sitúa en tercer lugar en Europa en la lista de países con mayor generación eléctrica proveniente de biomasa. Sin embargo, si se compara dicho valor con el total consumido, hallando el porcentaje correspondiente, los resultados no son tan favorables. En esta categoría, España se encuentra en la media de los ocho países que más fomentan la biomasa.

El país con más generación por biomasa respecto del total es Reino Unido, que consume un 50% más que España pero que a su vez genera con biomasa cinco veces más.

Alemania, sin embargo, que genera con biomasa más TWh que España, tiene una penetración menor porque su consumo total es más del doble que el español, por lo que su generación con biomasa es un 0,88% del total.

A continuación, se muestra una figura obtenida también de Eurostat que en la que se visualiza la utilización de biomasa en el continente europeo. Se pueden observar los valores de la tabla 6, así como los de los países con menos de 1TWh de generación biomásica, que se excluyeron de dicha tabla por simplicidad.

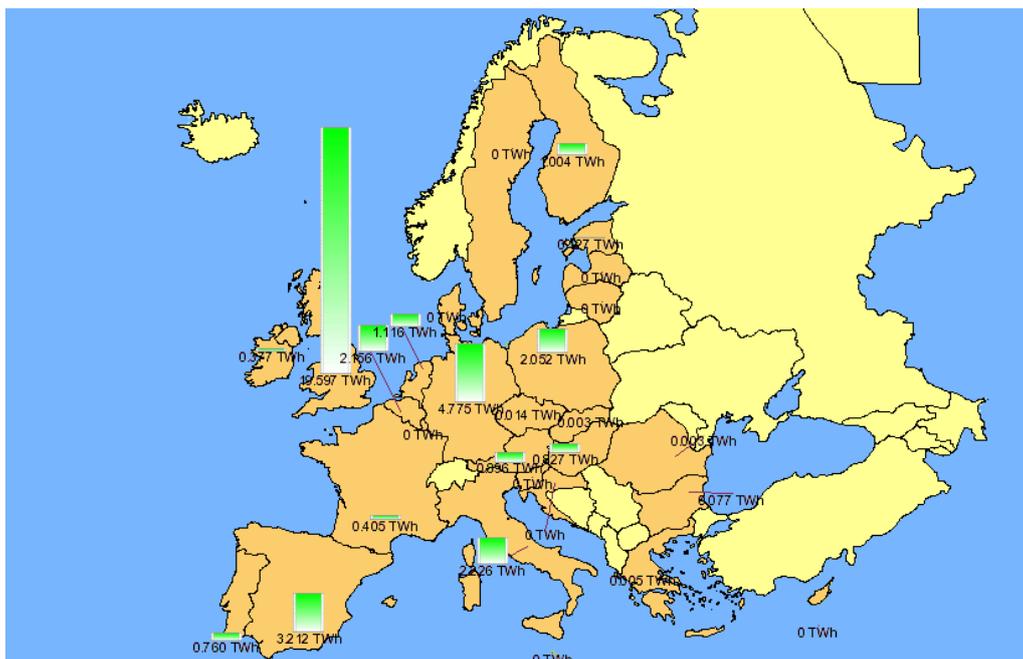


Figura 7. Generación con biomasa en los países europeos



4. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

En este proyecto, el estudio y análisis del tratamiento de residuos se centrará en el caso español. Los residuos se definen en la ley del veintiocho de julio de 2011 como la materia de la cual un sujeto pretende desprenderse o efectivamente se desprende.

En un subapartado, define en concreto los residuos domésticos. Estos se catalogan como los originados en ámbito doméstico y que son causados por labores en dicho lugar. La siguiente tabla muestra la composición media de los Residuos Sólidos Urbanos en España.

Composición	%
Orgánico	49
Papel	12
Plástico	12
Vidrio	8
Textil	4
Metal férrico	3
Metal no férrico	2
Madera	1
Varios	9
TOTAL	100

Tabla 7. Composición media en España de los Residuos Sólidos Urbanos

Cabe destacar de la tabla anterior la enorme importancia que tienen los residuos orgánicos en el mix de RSU. La mitad de la escoria generada es orgánica, la componente más productiva para las actividades de obtención de energía a través de residuos.

La cantidad total generada en kilogramos por persona a nivel diario en España tiene una media de 1,2 kg/persona/día, lo que supone un total nacional de más de 20.000.000 de toneladas de residuos cada año.

La siguiente figura muestra la generación de residuos por los distintos países en Europa además de la media de la Unión Europea. Cabe destacar que España se encuentra por debajo de la media de la Unión Europea, que se encuentra en 1,32 kg/día. Estos datos se han obtenido de la base de datos de Eurostat.

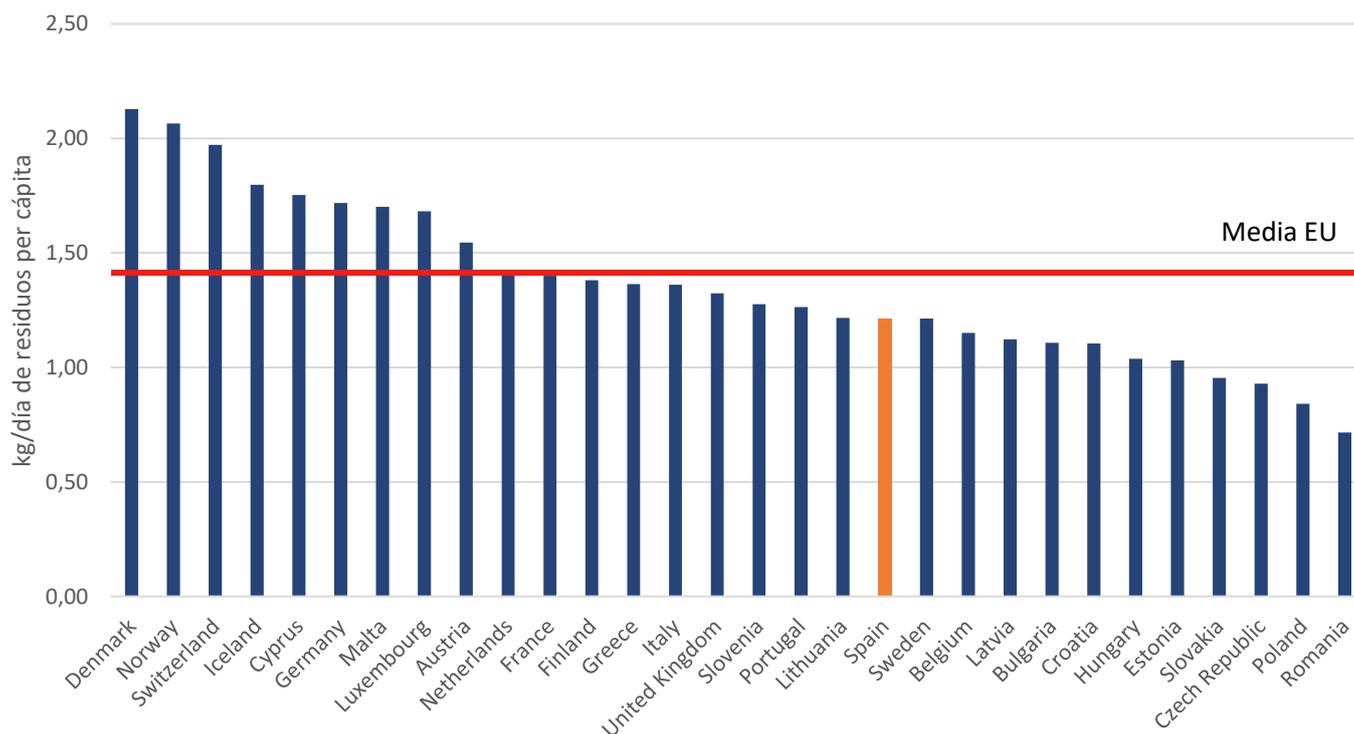


Figura 8. Residuos generados per cápita en Europa en kg/día

La siguiente figura muestra la evolución de la gestión de los RSU en el periodo 2004-2014 en España. En azul oscuro se representa los RSU generados. En azul celeste los que no se tratan y se desechan directamente mientras que en morado se muestran los que se tratan eficientemente.

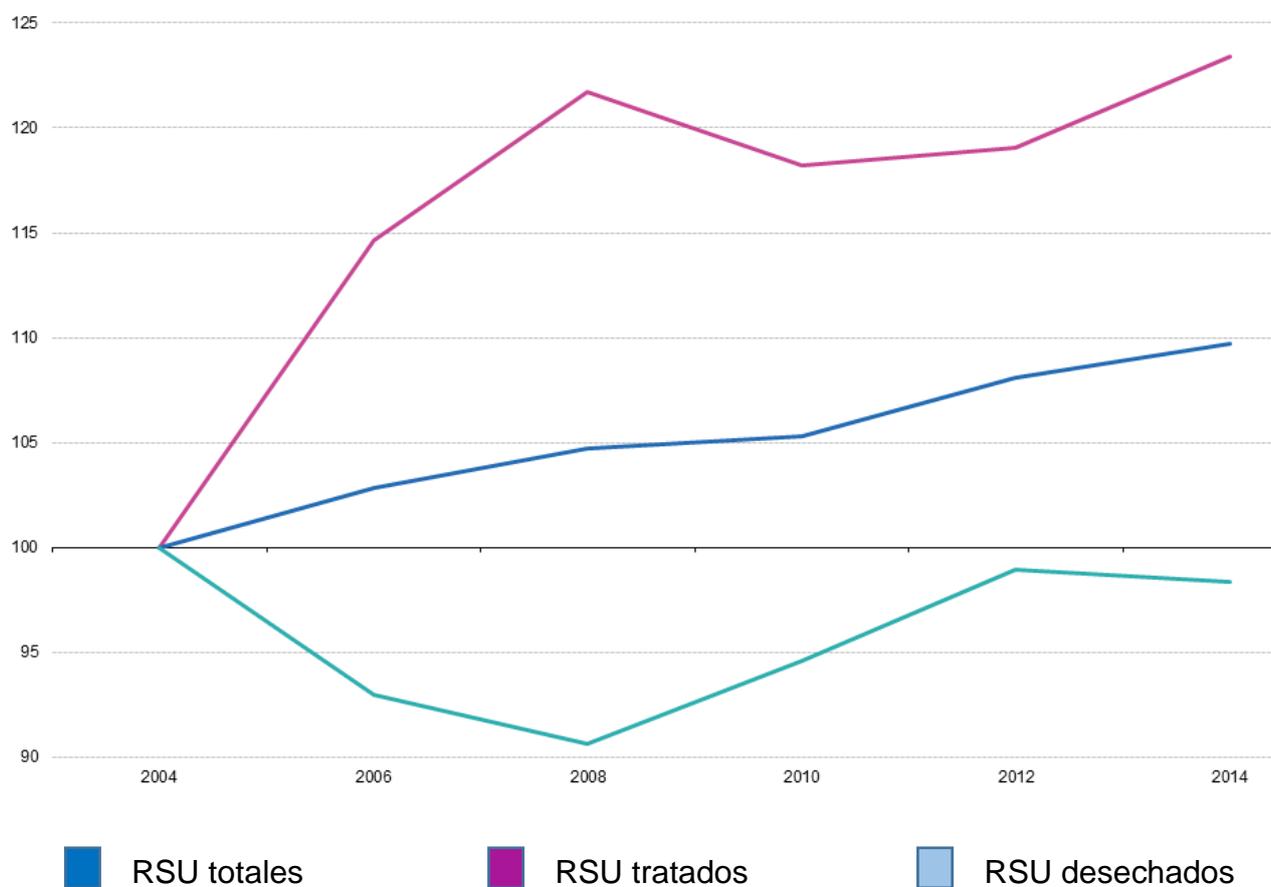


Figura 9. Evolución de los RSU y su gestión en el periodo 2004-2014 en España

Como se aprecia en la Figura 9, los la generación de RSU ha aumentado un 10% en diez años. E el mismo periodo de tiempo los residuos tratados han aumentado un 23% mientras que los desechados han disminuido un 3%.

A continuación, se expone una figura en la que se muestra cuáles son los métodos utilizados en España en la actualidad para gestionar los Residuos Sólidos Urbanos, obtenida del IDAE- Plan de Energías Renovables 2011-2020.

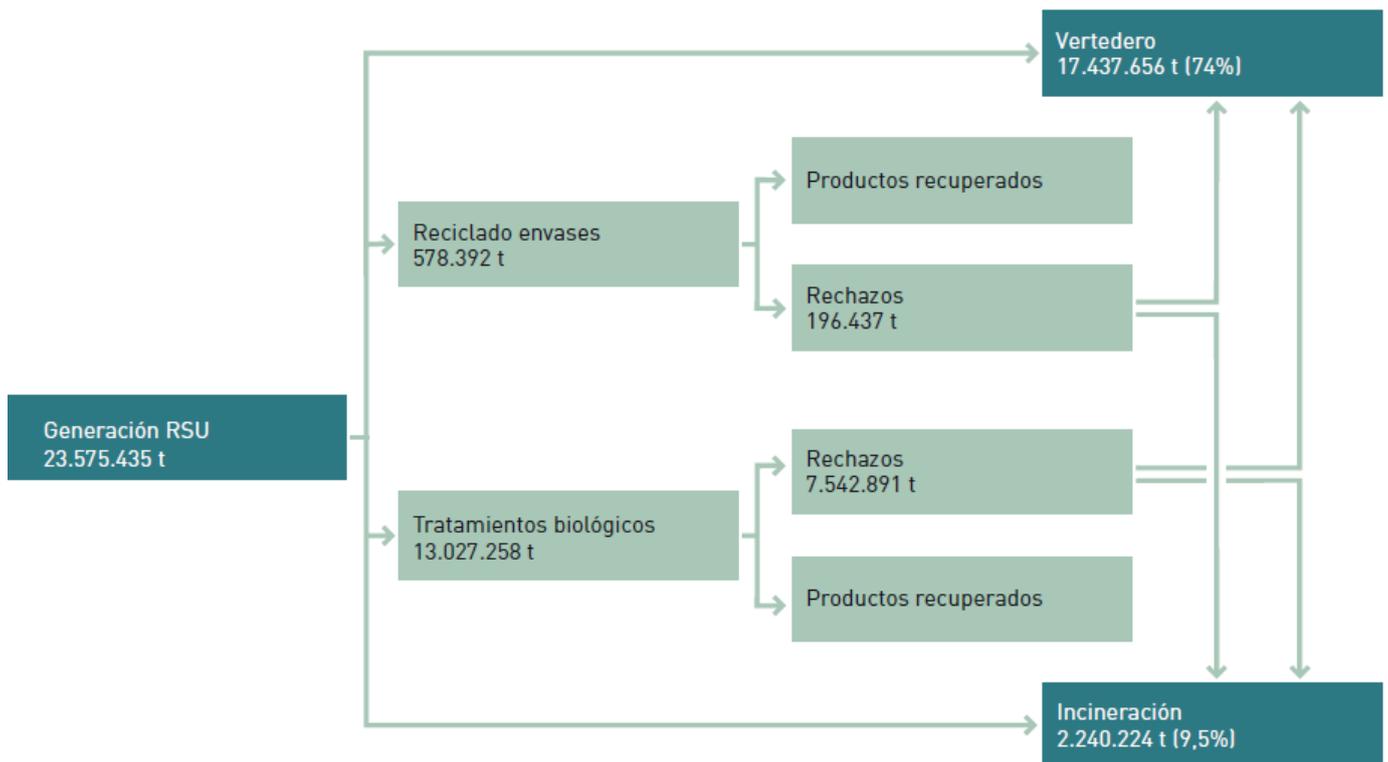


Figura 10. Esquema de la gestión de RSU en España

Como se puede observar, de la totalidad de Residuos Sólidos Urbanos que se generan en España, aproximadamente la mitad reciben algún tratamiento intermedio (bien Reciclado de envases, que constituye un 2,4% del total, bien Tratamientos biológicos, que constituye un 55,2% del total). Por otra parte, el 42,4% de los Residuos Sólidos Urbanos directamente se destina a los tratamientos finales (Vertedero o Incineración).

Después de los tratamientos intermedios, los residuos pueden pasar a ser productos recuperados o ser rechazados. Estos residuos rechazados van también a las fases de Vertedero o Incineración. En España, el porcentaje de productos



recuperados en la actualidad es de un 25% (5.881.955 toneladas de residuos sobre las 23.575.435 toneladas de residuos iniciales).

Como tratamiento final está la opción de vertederos controlados o la de incineración. Los vertederos controlados son el método de gestión de Residuos Sólidos Urbanos más común en España, tratando tres cuartas partes de los residuos generados, mientras que la incineración tiene menos presencia, tratando menos del 10% de los residuos.

En los próximos capítulos se analizarán las distintas formas de gestión de residuos: vertederos controlados, incineración y, por último, gasificación por plasma.



5. VERTEDEROS CONTROLADOS

FUNCIONAMIENTO

Los vertederos controlados constituyen el método más utilizado de gestión de residuos en España. Tienen como principal objetivo la eliminación de Residuos Sólidos Urbanos sin afectar al medioambiente. Como subproducto se puede obtener metano en el proceso [GRAÑ14].

La siguiente figura muestra un esquema de las distintas partes que forman un vertedero controlado.

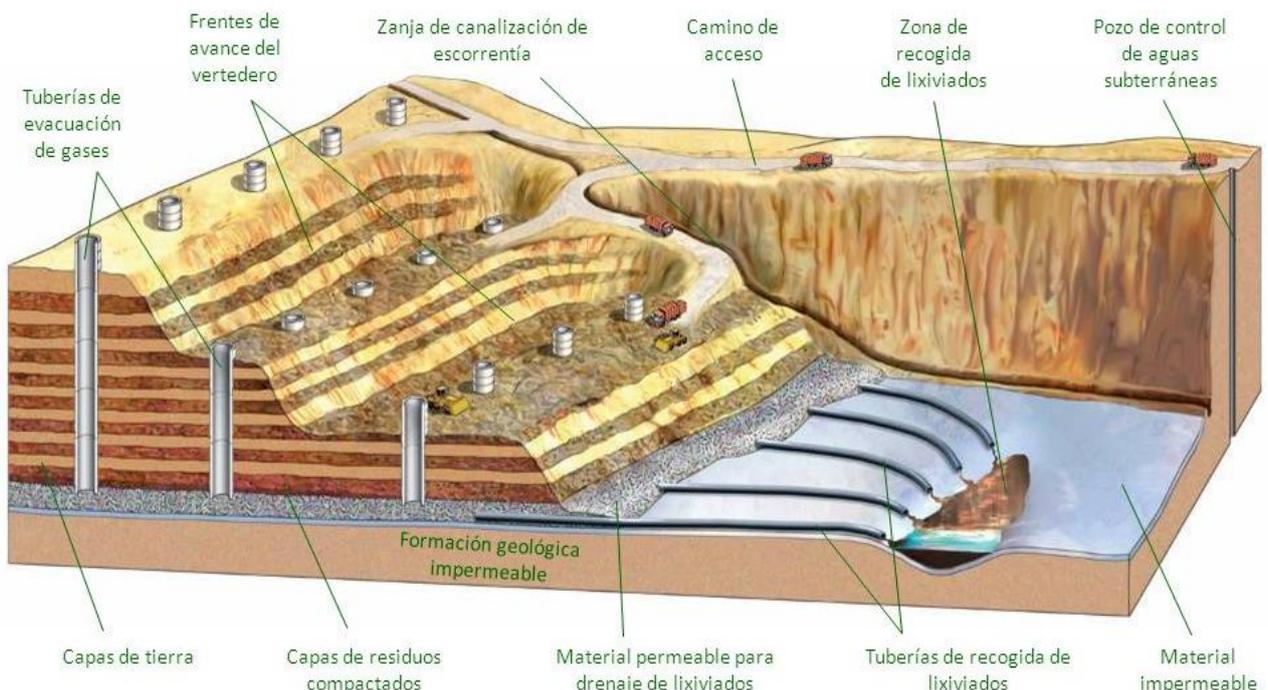


Figura 11. Esquema de un vertedero controlado

Un vertedero controlado es un terreno destinado al almacenamiento seguro de Residuos Sólidos Urbanos para su fermentación anaerobia. Se busca la degradación de los compuestos orgánicos presentes en los Residuos Sólidos Urbanos y la explotación de los gases producidos.

Como se puede observar en la figura anterior, los residuos se compactan y se cubren de tierra y láminas aislantes impermeables para lograr el aislamiento por la parte superior. En la parte inferior, se coloca una lámina de material permeable que permite el drenaje de lixiviados. Estos son recogidos por tuberías que los llevan a una zona de recogida de lixiviados, una balsa de material impermeable para su tratamiento posterior [BARR16]. Por debajo se coloca una lámina de material impermeable, que evita cualquier escape de líquidos del vertedero controlado. Además, para recolectar los gases producidos por la fermentación anaerobia hay tuberías que conectan la parte inferior y superior, por donde se evacúan y almacenan.

En cuanto a los lixiviados, se hace un exhaustivo control ya que son una fuente potencial de contaminación de los vertederos controlados. Se originan mediante el agua que llega al contacto de los residuos [POZO90]. Esto puede ocurrir por la propia humedad de los residuos, por las precipitaciones sobre el vertedero o como aguas subterráneas que se filtran. Los residuos absorben entre un 10% y 30% del agua recibida mientras que el resto cae en forma de lixiviado: agua con productos de descomposición orgánica de los residuos del vertedero.

Una vez recolectados los lixiviados en las balsas impermeables de polietileno, estos se depuran biológicamente empleando una transformación nitrificante-desnitrificante. Tras este proceso, se lleva a cabo una decantación de fangos, donde se filtran para descartar cualquier componente de fangos. a continuación, se realiza un ajuste del pH para llegar a un valor cercano a 6. Para ello se emplea ácido sulfúrico. El último paso es realizar ósmosis inversa en la que se utiliza una membrana para separar una solución contaminada con una de agua pura [BOTA08]. Se aplica una presión más elevada a la propia de la ósmosis para forzar el paso del agua pura a través de la membrana. El proceso se muestra en la siguiente figura.

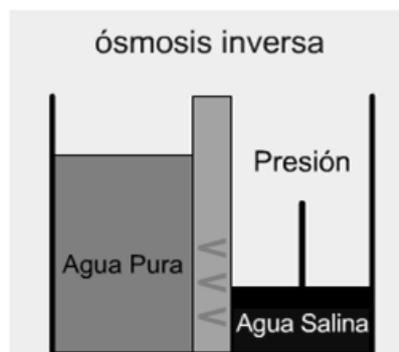


Figura 12. Esquema del funcionamiento de la ósmosis inversa

Por último, cuando el efluente no es nocivo y ha sido correctamente tratado, se vierte en una fuente de agua y comienza de nuevo el proceso.

Por otro lado, los gases de salida se recogen mediante las tuberías de evacuación de gases. De ahí se trasladan a un extractor y un equipamiento para limpiar el gas de componentes no deseados. Por último, se envían a la unidad generadora que empleará el metano para generar energía. Este proceso se muestra en la siguiente figura.

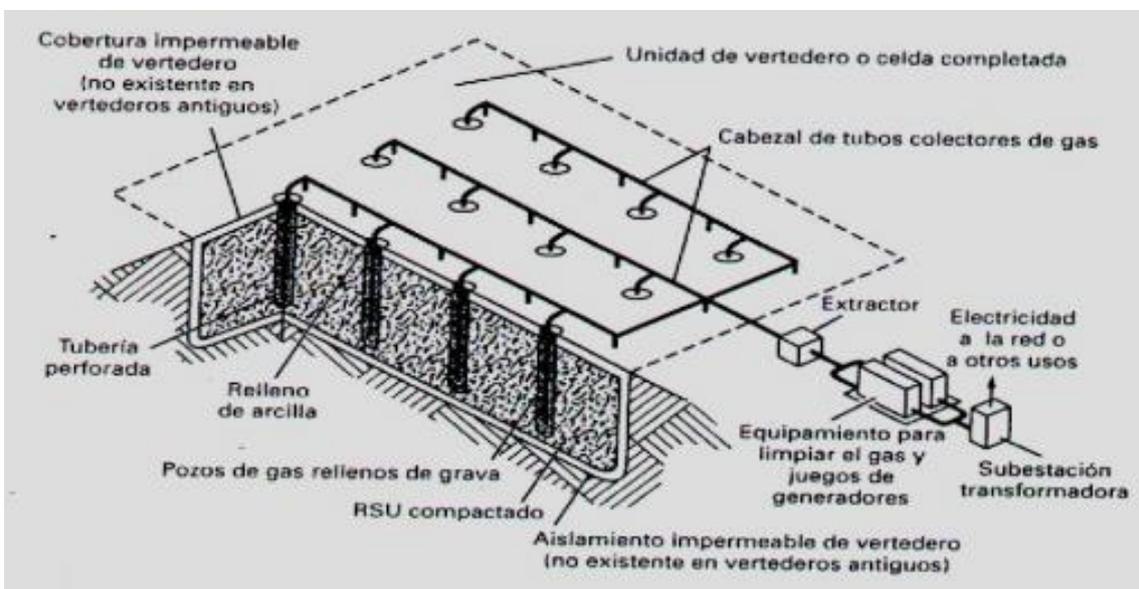


Figura 13. Esquema de la gestión de gases en un vertedero

El gas de salida del vertedero controlado contiene diferentes gases en distintas proporciones. La siguiente tabla muestra los porcentajes medios de los distintos componentes del gas obtenido en el vertedero controlado: metano, dióxido de carbono, nitrógeno, vapor de agua, ácido sulfhídrico y compuestos orgánicos. De esta tabla se destaca la mayoritaria presencia de metano en el gas de salida del vertedero, que es el que cuenta con un mayor poder calorífico inferior (PCI), 8.900 kcal/Nm³.

Gas	Fórmula	% del total
Metano	CH ₄	50-70
Dióxido de carbono	CO ₂	20-50
Nitrógeno	N ₂	4-20
Vapor de agua	H ₂ O	<5
Ácido sulfhídrico	H ₂ S	<5
Compuestos orgánicos	-	<5

Tabla 8. Composición media del gas vertedero

En el equipamiento donde se limpia el gas de materia no deseada se evalúan los componentes del gas. El metano se desea conservar y separar para su utilización en la generación de energía. El dióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua son inertes. No ocasionan daño al medio ambiente, pero disminuyen el poder calorífico general del gas por lo que se extraen y envían al exterior. Por último, el ácido sulfhídrico y compuestos orgánicos como haluros o compuestos de sílice sí son contaminantes y deben ser tratados previamente. En primer lugar, se realiza un proceso de adsorción. Posteriormente, se aplica carbón activo y por último se realiza un proceso de absorción empleando disolventes orgánicos.

En España, además de los vertederos controlados, existe un tratamiento de residuos orgánicos denominado compostaje. Consiste en la degradación aeróbica de la materia orgánica. El proceso tiene una duración de 15 semanas de media, según el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, y requiere de control de la ventilación, humedad y temperatura. Las aplicaciones del compost, como muestra el Instituto Universitario de Tecnología Industrial de Asturias en un estudio de mercado y de posibles usos del compost de 2009, son el aporte de sustratos para agricultura, para la restauración en jardines y parques y el sellado de vertederos, según la calidad del compost.

La relevancia del compost en la generación de energía es nula, este método se ha utilizado durante décadas para gestionar los residuos generados.

En la siguiente figura se aprecia cómo han evolucionado distintos países de la Unión Europea en la gestión de residuos en vertederos en este siglo. Se ha incluido una línea con la media de los países que forman la UE que sirve de indicativo de cómo se está afrontando el reto de gestionar eficientemente los residuos.

Comparativa europea de los kg de RSU almacenados en vertederos por persona en el s.XXI

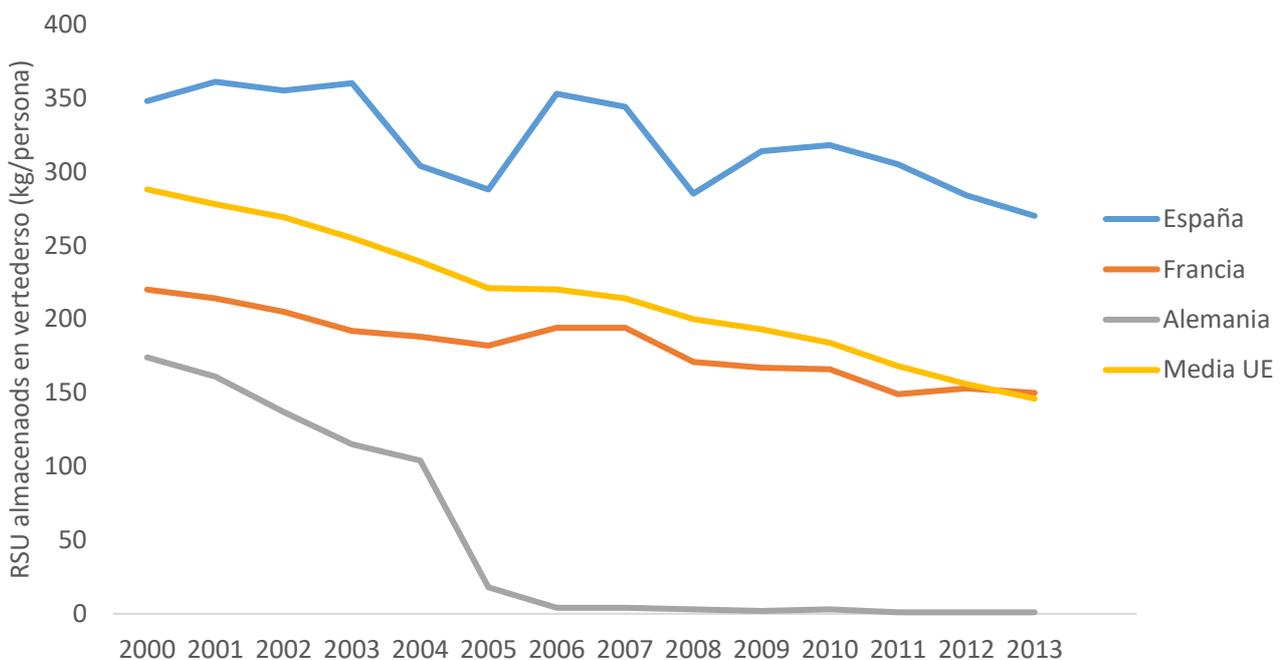


Figura 14. Comparativa europea de la evolución de los RSU almacenados en vertederos en el s.XXI

Estudiando la Figura 14, se ve cómo España almacena más Residuos Sólidos Urbanos que sus vecinos europeos. Mientras que Alemania aplicó en 2004 una política de anulación de almacenamiento de RSU en vertederos [CAVE17], España ha seguido una tendencia más constante. Si bien es cierto que ha reducido en 50 kg/persona el valor desde el año 2000, resulta una disminución



demasiado escasa si se compara con el resto de países. Si en el comienzo de siglo solamente superaba a la media de la Unión Europea en aproximadamente 50 kg/persona, en 2013 superaba a la media comunitaria en casi 150 kg/persona. Esto indica que las directivas europeas no se han aplicado correctamente en España y por ello se ha llegado a un punto en el que se deben tomar medidas urgentes.

PROBLEMAS

Pese a ser una tecnología madura con experiencia desde 1978 en España, los vertederos controlados presentan una serie de problemas operativos, con los lixiviados y con la optimización del metano producido.

La Unión Europea presentó en 2015 una normativa dentro del marco de la Economía Circular en la que estipula que para 2020 se debe suprimir la construcción de nuevos vertederos y que para 2030 solamente podrán existir un 10% de los vertederos actuales. En la actualidad el 75% de los Residuos Sólidos Urbanos generados en España son trasladados a vertederos.

En cuanto al impacto medioambiental, hay que estudiar la presencia de lixiviado y el tratamiento de los gases generados, los problemas más importantes a los que se enfrenta la gestión de vertederos controlados [ESPI97].

Como se ha analizado previamente, la gestión de los lixiviados consiste en un almacenamiento de los mismos en una balsa impermeable que evita su propagación. Más adelante, un proceso de depuración elimina los componentes nocivos para el medio ambiente. Una vez realizado, se vierten a una fuente de agua. Sin embargo, si la balsa impermeable falla, o el proceso de depurado no se realiza correctamente, los lixiviados llegarían de forma sencilla a fuentes de agua. El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación no incluye en la normativa española, presente en el Real Decreto 1481/2001, ninguna restricción de localización de los vertederos controlados separados cierta distancia de aguas superficiales o subterráneas. En el XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos de 2012, se explicó que solamente el 3% de los vertederos controlados en España se encuentra a menos de 150m de aguas superficiales y que el 34% están situados a menos de 1km. Se muestra la distribución de vertederos respecto de aguas superficiales en la próxima figura.

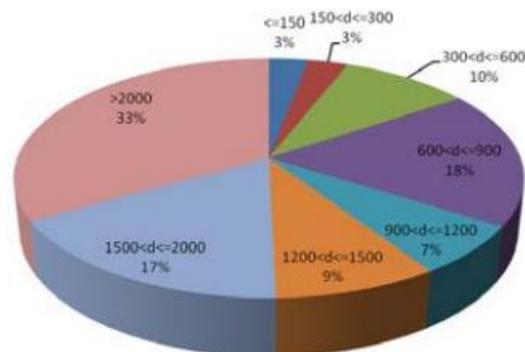


Figura 15. Distancia de vertederos controlados a aguas superficiales

En cuanto a las aguas subterráneas el dato no es tan favorable como el de las aguas superficiales ya que el 69% de los vertederos controlados en España se sitúa sobre aguas subterráneas. Esto implica que, en el caso de un vertido de lixiviados, en dos tercios de los casos, aguas subterráneas en España se verían afectadas.

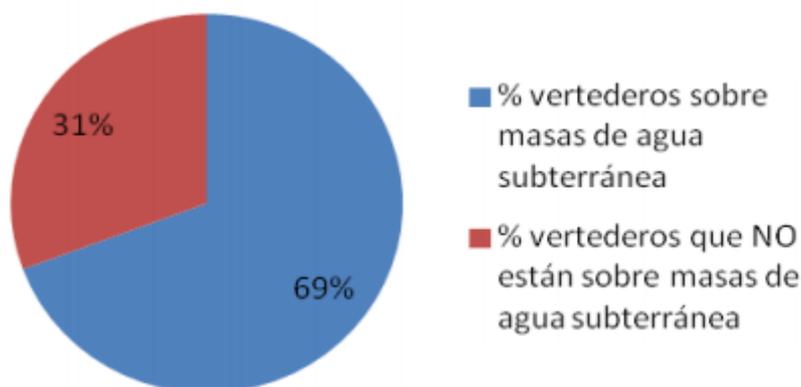


Figura 16. Situación de vertederos controlados respecto a aguas subterráneas en España

En cuanto al tratamiento de los gases de salida del vertedero, en España se realizan dos acciones diferentes. La primera, que solamente se realiza en veintidós vertederos controlados y que se comentará más adelante con detalle, se extrae el metano y se emplea para la generación de energía. La segunda, que se realiza en la mayoría de los vertederos controlados es la quema de los gases de salida [CARR10]. A nivel medioambiental, se generan emisiones de NO_x y SO₂, perjudiciales para el ecosistema alrededor del vertedero pues estas partículas en el aire logran dispersarse hasta una distancia de 50km.

La producción de metano en vertederos controlados no es lineal, lo que marca la vida útil de un vertedero controlado. Ésta es de veinte años. Durante los primeros meses de almacenamiento de residuos, no se produce suficiente metano utilizable pues la materia orgánica no se ha descompuesto en su totalidad. Desde el primer año hasta los veinte años, la producción de metano aumenta a valores elevados, llegando a un máximo de 230 litros. Por último, pasados estos veinte años la producción de metano vuelve a decrecer hasta valores similares a los iniciales. Esto se muestra en la siguiente figura [RENE15].

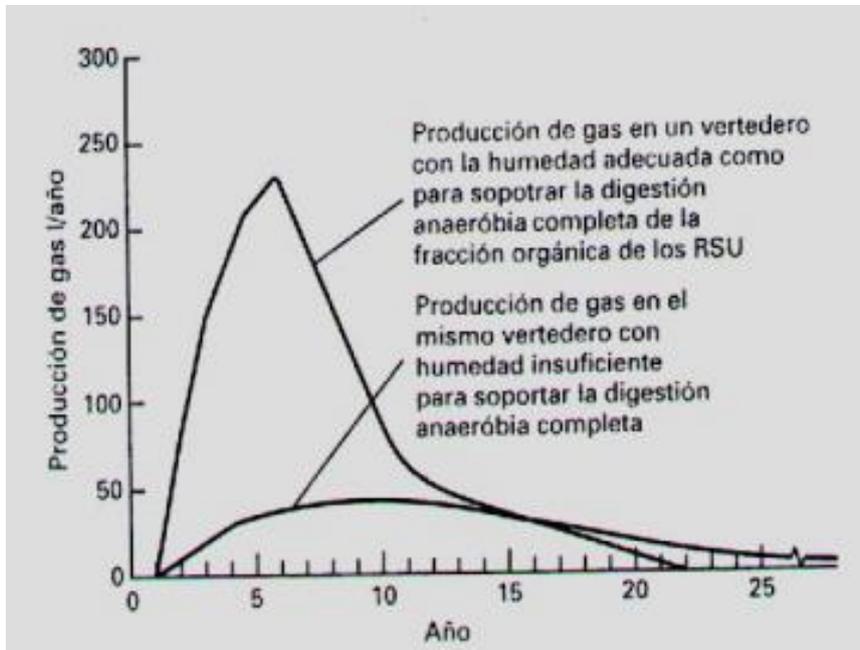


Figura 17. Producción anual de metano en un vertedero controlado

En España solamente veintidós vertederos controlados utilizan el metano obtenido para generar energía. La siguiente tabla detalla estos vertederos.

Vertedero	Provincia	Generación en MWh anual	Año de instalación	Fin de vida útil
Artigas	Bilbao	8.098	1985	2005
Cogersa	Asturias	42.500	1988	2008
San Marcos	Guipúzcoa	5.880	1995	2015
Gongora	Navarra	4.202	1999	2019
Meruelo	Cantabria	17.766	1996	2016
Cañada Hermosa	Murcia	5.369	2000	2020
Alcalá de Guadaira	Sevilla	1.211	2000	2020

Garrat	Barcelona	1.251	2001	2021
V. Municipal	Valladolid	1.250	2001	2021
Sasieta	Guipúzcoa	3.400	2002	2022
Cerceda	Coruña	3.251	2002	2022
Vitoria	Álava	4.621	2002	2022
Valdemingómez	Madrid	126.388	1978	1998
Alcalá de Henares	Madrid	12.200	1986	2006
Nueva Rendija	Madrid	6.300	1994	2014
Pinto	Madrid	92.481	2000	2020
Juan Grande	Gran Canaria	2.000	2000	2020
Pedret	Gerona	1.100	1996	2016
Llagostera	Gerona	1.009	2001	2021
Calahorra	La Rioja	954	1998	2018
Colmenar Viejo	Madrid	32.402	2005	2025
Las Ruices	Málaga	7.776	2005	2025

Tabla 9. Vertederos controlados en España que utilizan el metano obtenido

En la tabla anterior se ha incluido una columna con la fecha del final de la vida útil de cada vertedero. En verde se han coloreado aquellos que no han llegado aún a dicha fecha mientras que los que han cumplido ese plazo se han marcado en rojo.

Como se puede observar, 9 de los 22 vertederos ya han llegado al final de su vida útil, lo que supone un 41%. Del 59% que aún tienen una alta producción de



metano para su posterior uso en la generación de energía, solamente dos llegarán al final su vida útil en más de cinco años.

Por tanto, teniendo en cuenta la prohibición de la Unión Europea en un margen de diez años a nivel legislativo, la presencia de lixiviados en forma de contaminación y el final de la vida útil de vertederos que aprovechan eficientemente el metano, este proyecto propone el fomentar una nueva tecnología para el tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos: la gasificación por plasma.



6. INCINERACIÓN

PROCESO

La incineración se considera la técnica de gestión de residuos más extendida, estudiada y utilizada alrededor del mundo. Es capaz de tratar residuos de diferente procedencia (residuos como RSU o industriales, que presenten más o menos amenaza al medio, lodos y demás materia).

En el mundo hay más de 2.000 plantas de incineración que gestionan más de 500 millones de toneladas anualmente. Asia es el continente en el que más ha proliferado esta tecnología en los últimos años siendo ya la zona con mayor capacidad de incineración del mundo. España cuenta con diez incineradoras en la actualidad en pleno funcionamiento, pero existen comunidades autónomas que por ley prohíben su instalación.

El funcionamiento consiste en que los residuos que se desean incinerar se introducen en la planta y mediante hornos, son calentados y descompuestos a temperaturas elevadas con exceso de O₂. La materia prima del proceso son los residuos. Se intentan compactar en su totalidad para tener elementos de menor volumen y así facilitar el proceso completo. El resultado del proceso tiene una alta eficiencia, simplificando los residuos tanto en tamaño como en masa un 90% [ALLS01]. Como subproductos se obtienen cenizas y gas. Deben ser tratados porque pueden contener un alto contenido de materia tóxica dañina para el ser humano, como las dioxinas y furanos. La forma de prevenir la formación de dioxinas y furanos consiste en aumentar la temperatura de quemado para que la combustión sea completa. Esto ocurre si se realiza a más de 600°C. Si por el contrario se realiza una combustión incompleta, las dioxinas y furanos pueden aparecer y dañar a la población que rodea a las incineradoras, como se detallará más adelante en el apartado de la problemática de la incineración.

La materia prima del proceso, los residuos, son previamente procesados. Se intenta compactar en su totalidad para tener elementos de menor volumen y así facilitar el proceso completo. Se intenta también efectuar una labor de reciclado de última hora por si algún producto se puede aprovechar para un futuro uso. Los productos de metal se distinguen de la materia orgánica pues se incineran a diferente temperatura y comienza el proceso.

Antes de introducir los residuos en el horno se intenta también secarlos al máximo para que casi no haya humedad y el quemado se efectúe de forma más rápida.

En cuanto a los hornos, hay que distinguir distintas tipologías, cada una utilizada para un determinado tipo de residuo. Una incineradora cuenta con varios modelos de horno y así ser versátil y adaptarse a todos los RSU que se reciban. Los diferentes ejemplos de horno se presentan a continuación:

- Horno rotativo: este modelo de horno consiste en un largo cilindro colocado paralelo al suelo estando la entrada del mismo a más cota que la salida. Esto favorece el flujo del residuo y aporta movimiento en el proceso de incineración. Dicho desnivel no llega al 10%. El interior del cilindro es ignífugo para evitar problemas con el recubrimiento. Los hornos rotativos pueden gestionar cualquier tipo de residuo, lo que les convierte en polivalentes. Según el residuo que estén tratando, se puede escoger el tiempo y temperatura que se aplicarán, por lo que resultan muy versátiles. A continuación, se muestra una imagen de un horno rotativo de una incineradora en Shanghái, China.



Figura 18. Horno rotativo utilizado en una incineradora de Shanghái

- Horno de lecho fluido: es el tipo de horno más respetuoso con el medio ambiente ya que no se producen dioxinas y furanos como producto de la combustión [ALFA16]. Opera a altas temperaturas y la combustión es siempre completa por lo que estos productos tóxicos no se generan. Este tipo de horno se coloca perpendicular al suelo y se utiliza

principalmente para incinerar residuos de menor tamaño o fangos. La mayor novedad respecto de los anteriores es que en la parte inferior se coloca un lecho de arena. Al estar colocado verticalmente, funciona a temperatura uniforme, llegando hasta los 1000°C. Además, cuenta con un intercambiador de calor para aprovechar el calor producido. A continuación, se muestra una figura en la que se representa de manera esquemática el horno de lecho fluido con las distintas partes y por dónde se introduce y extrae cada producto.

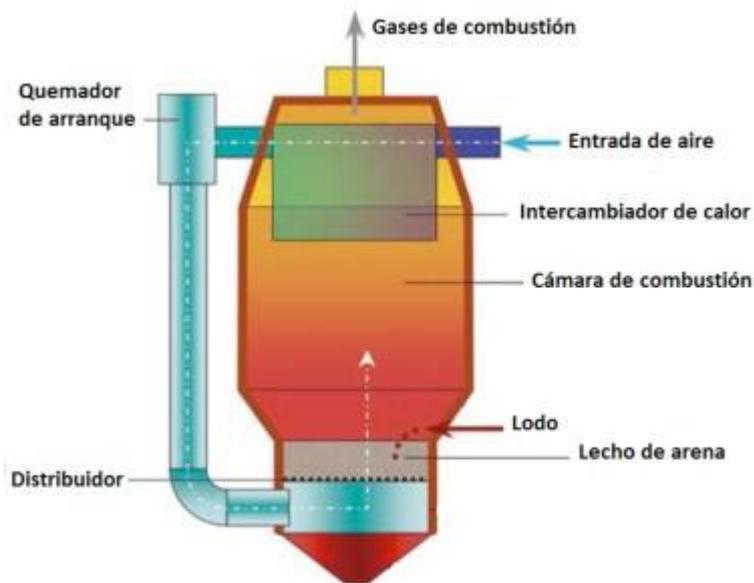


Figura 19. Esquema de horno de lecho fluido

- Inyección: su principal área de funcionamiento es para procesar elementos que se puedan bombear. Esto es mayoritariamente lodo y residuos en fase líquida. De nuevo es una estructura con forma de cilindro donde se introducen los residuos. Hay una entrada para el combustible que favorecerá la incineración y los elementos que aportan la temperatura. Ésta puede ser de hasta 2000 °C y no suele ser necesario aplicarla durante más de cinco segundos. Por tanto, es una combustión extrema de corta duración.

- Horno de parrilla móvil: por último, se va a presentar el modelo de horno más común en las incineradoras europeas, siendo utilizado en un 80% de ellas. De nuevo, al igual que los hornos rotativos, es capaz de procesar toda clase de residuos. El funcionamiento principal es pasar los diferentes residuos por encima de una parrilla. Así, los residuos se van quemando mientras avanzan. Estos hornos pueden llegar a operar a temperaturas cercanas a los 1000 °C.

PROBLEMAS

La incineración es una técnica afianzada en España y Europa, que cuenta con una serie de ventajas y desventajas.

Las principales ventajas son que es una tecnología madura ya estudiada, que es una técnica de tratamiento de residuos segura y que es eficiente a la hora de gestionar los residuos, reduciéndolos a un 10% de su composición original [BARF10].

Sin embargo, la incineración presenta también tres desventajas en España.

En primer lugar, la presencia de dioxinas y furanos como producto de la incineración se da si la combustión no es completa, es decir, que se realiza a una temperatura menor de 600°C y no hay exceso de O₂. El Comité Científico de la Unión Europea ha señalado a la incineración de residuos como la mayor fuente de dioxinas y furanos. Estas partículas tóxicas pueden llegar a las personas mediante dos formas. Por el aire, si hay una exposición humana directa cerca de una incineradora, o mediante la cadena alimentaria, lo más habitual. Así, aumenta el riesgo sobre el ser humano ya que no solamente la exposición directa a la partícula es dañina, también la cadena alimentaria se ve afectada.

De acuerdo con la información compartida por la Comisión para la Cooperación Ambiental, las dioxinas y furanos son persistentes, por lo que perduran tiempo en el medio ambiente, y son acumulables, siendo transportados por la cadena alimentaria de especie en especie durante más de 10 años. Es decir, en una combustión no completa llevada a cabo en una incineradora el día de hoy donde se produzcan dioxinas y furanos, estos productos pueden ser transportados en el aire y afectar cultivos. Su presencia en estos alimentos, y en los seres vivos que se alimenten de ellos, será de diez años [CORT15], afectando a un gran número.

En cuanto a los principales problemas para la salud, las dioxinas y furanos son partículas cancerígenas [DUCH10]. Además, afectan también en gran medida a los procesos de reproducción, tanto en hombres como en mujeres, modificando niveles hormonales y llegando a afectar al feto en su formación neurológica. También afectan a los niveles de hormona tiroidea y agrava los problemas de diabetes y del sistema inmunitario.

El segundo problema que presenta la incineración en España es la no utilización del potencial de calefacción. Las incineradoras españolas únicamente emplean el proceso para la generación de energía, pero se desaprovecha el calor

generado para calefacción. Esto sí se realiza en otros países europeos, donde los inviernos son muy largos y es una buena fuente de calefacción con coste reducido.

En la siguiente figura se observa la disparidad que existe en Europa a la hora de utilizar los recursos obtenidos tras la actividad de incineración. Esta información se ha obtenido de Eurostat.

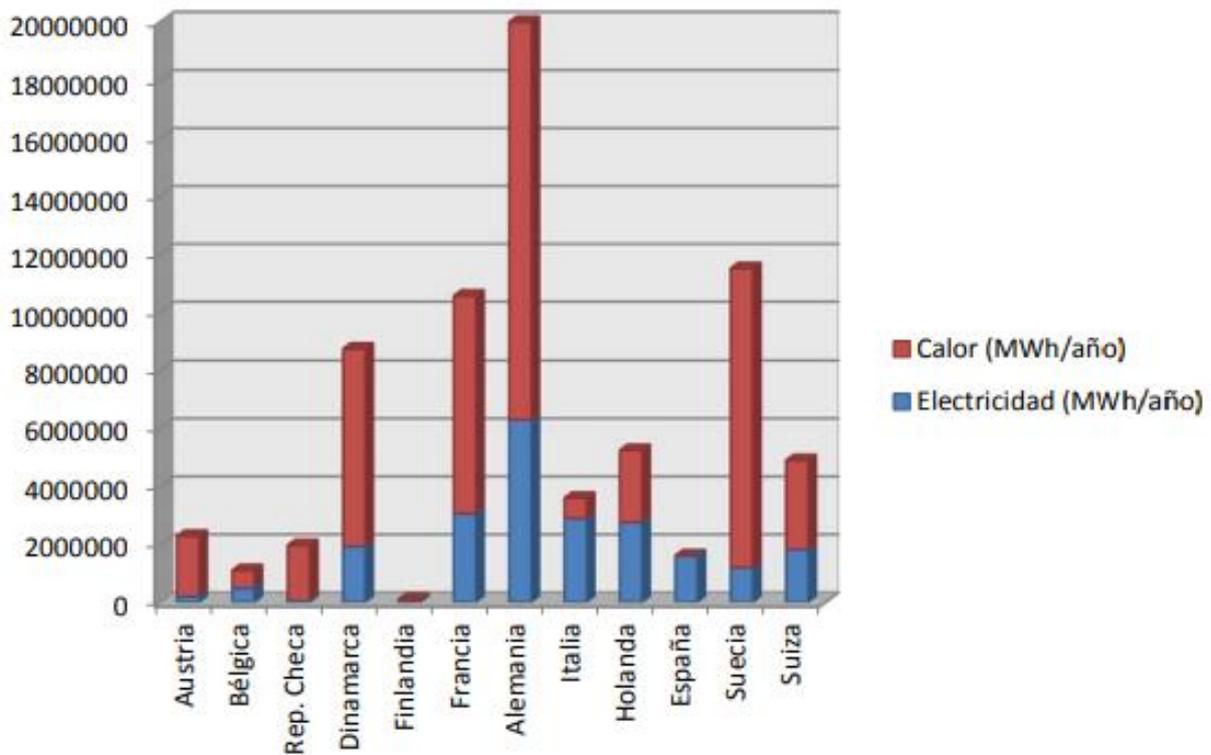


Figura 20. Utilización de la energía producida en la incineración en Europa

España se encuentra entre los países que menos generación tiene en total. Sin embargo, la totalidad de su generación se destina a la producción de electricidad mientras que el calor no se aprovecha. El caso contrario ocurre en países como Austria o República Checa, que tienen una generación similar total en MWh/año pero que destinan todos sus recursos a la obtención de calor y desprecian el potencial eléctrico. Por último, destacar el caso de Dinamarca, Francia, Alemania o Suecia, que generan mucho más en total que España y que según su demanda producen más energía eléctrica o calor.



El tercer problema de la incineración en España es la prohibición de la actividad en ciertas Comunidades Autónomas. Castilla la Mancha, Castilla y León, Aragón, Andalucía y Murcia no pueden incinerar sus residuos, lo que presenta dos opciones. Una es exportarlos a otras Comunidades Autónomas, lo que incrementa el coste de gestión de residuos, y otra es destinarlos a vertederos controlados, que en una década deben reducir su volumen.

UTILIZACIÓN

La incineración es un método de gestión de RSU afianzado y con experiencia de utilización en España, pese a estar prohibida por ley en varias Comunidades Autónomas.

A continuación, se presenta una tabla con las diez incineradoras que operan en la actualidad en España.

Ubicación	Año de apertura	Potencia (MW)	Residuos incinerados en 2017 (ton)
Cantabria	2006	9,9	113.338
Melilla	1996	2,0	46.618
Tarragona	1991	7,4	139.176
Cerceda	2002	50,0	533.742
Barcelona	1975	23,8	321.728
Madrid	1997	29,8	313.065
Mallorca	1997	40,0	319.144
Gerona	1984	2,0	28.390
Mataró	1994	11,3	168.913
Bilbao	2005	99,5	238.084
TOTAL	-	275,7	2.222.198

Tabla 10. Incineradoras en España

Como se puede apreciar en la Tabla 10, las incineradoras españolas han ido construyéndose y entrando en operación desde 1975. El mayor periodo de fomento de esta tecnología llegó a finales del siglo XX, habiéndose puesto en marcha en el siglo XXI solamente un tercio del total en España.

En la siguiente figura se muestra el mapa de España con las incineradoras. Esta información se ha obtenido de la Asociación Empresarial de Valorización R.S.U. (AEVERSU). Cabe destacar que la mayoría se encuentran en la parte norte de España, solamente abasteciendo al sur la incineradora de Melilla y la de Mallorca, pero en ningún caso una incineradora del sur de la Península Ibérica, siendo la más cercana la encontrada en Madrid.



Figura 21. Incineradoras en España

En cuanto a potencia instalada en las incineradoras, éstas tienen en total una potencia de 275,7 MW, siendo las de Melilla y Gerona las que menos potencia tienen, con 2 MW, y la de Bilbao la que más potencia puede aportar, con 99,5 MW.

Es importante analizar también las toneladas de RSU que cada una es capaz de gestionar. En total, en 2017 se incineraron 2.222.198 toneladas, repartidas de manera variada según las distintas plantas. Las que menos capacidad tienen son de nuevo las de Melilla y Gerona mientras que la de Cerceda es capaz de incinerar más de diez veces más que éstas anualmente, superando las 500.000 toneladas de Residuos Sólidos Urbanos.

En las dos figuras que se incluyen a continuación se pueden comparar las dos plantas más grandes y pequeñas en cuanto a potencia y capacidad de tratamiento de residuos. Nótese la diferencia de tamaño.



Figura 22. Incineradora de Gerona



Figura 23. Incineradora de Cerceda

Se ha analizado cómo operan estas plantas y los principales puntos positivos y negativos que ofrecen. En España funcionan correctamente, pero es necesario evolucionar hacia un método de gestión de residuos que no contamine y no pueda generar dioxinas y furanos y que produzca más energía eléctrica y el potencial de calefacción no se desaproveche. Además, la prohibición de instalación de estas plantas en determinadas Comunidades Autónomas hace que estas zonas necesiten soluciones.

La gasificación por plasma, que se trata en el próximo capítulo, parece el método más idóneo ante estas demandas.



7. GASIFICACIÓN POR PLASMA

PROCESO

La gasificación por plasma es un proceso térmico que utiliza plasma para el tratamiento de residuos de diverso origen, transformándolos en gas de síntesis (denominado “syngas”), energía e impurezas. Este gas está formado mayoritariamente por hidrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono.

El plasma es un gas ionizado a alta temperatura [POUR17]. Es el estado de agregación con más entalpía. No se encuentra en la naturaleza, sino que se produce artificialmente a partir de gases inertes. Se consigue aplicando un arco eléctrico a estos gases inertes. La principal característica relevante a la hora de gestionar Residuos Sólidos Urbanos es la alta temperatura que puede alcanzar, 10.000°C, que permite tratar los residuos de forma rápida y completa mientras que en la incineración la máxima temperatura alcanzable es de 2.000°C.

En la siguiente figura se muestra un diagrama simplificado del proceso que se sigue con esta tecnología [YOUN12].

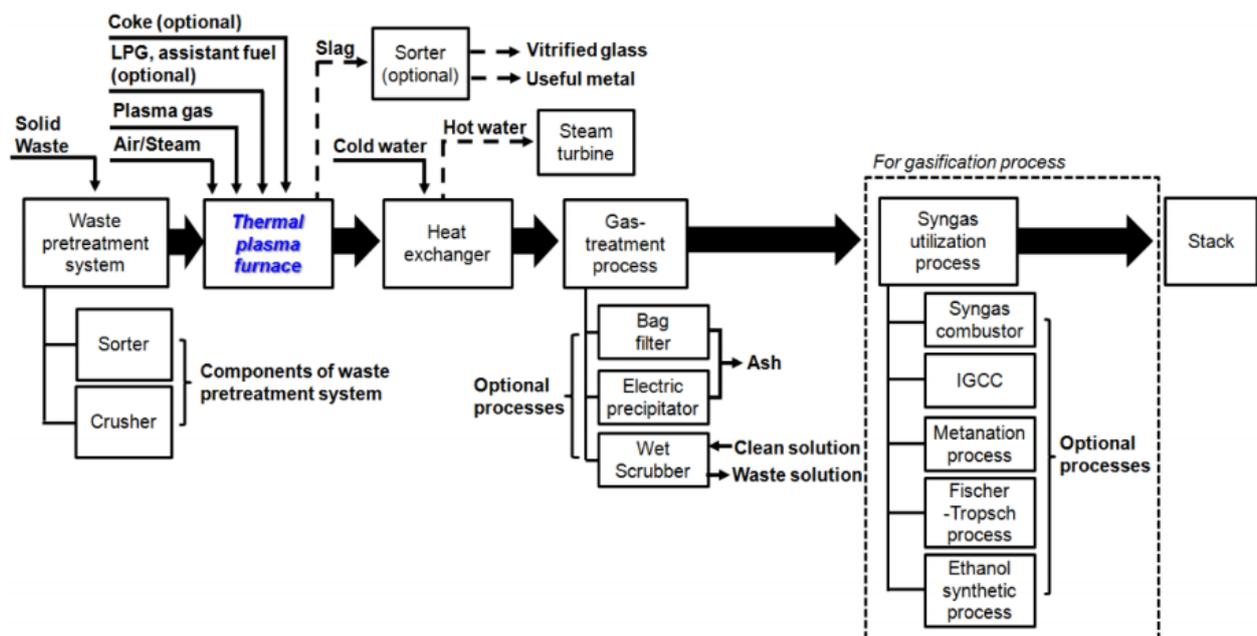


Figura 24. Esquema simplificado de gasificación por plasma

El primer paso del proceso es el pretratamiento de los residuos recibidos. En primer lugar, se separan aquellos componentes que puedan ser reciclados. Posteriormente se compactan los residuos que van a ser tratados con el objetivo de reducir su tamaño antes de entrar en la cámara de gasificación por plasma.

A continuación, se lleva a cabo el proceso de gasificación por plasma. Los residuos pretratados se introducen en la cámara de gasificación, que cuenta con antorchas de plasma. Estas son utilizadas para ionizar el gas y lograr temperaturas entre los 2.000°C y los 10.000°C y así tratar los residuos para su descomposición y producir el gas sintético, generando escoria como subproducto.

La siguiente figura muestra una cámara de gasificación con las entradas y salidas del sistema. Como entradas están los residuos que se desea tratar, el aire u oxígeno que servirá para la combustión y las antorchas de plasma. En cuanto a las salidas, está la escoria y principalmente, el gas de síntesis que se utilizará para diversos usos.



Figura 25. Cámara de gasificación por plasma

La escoria producida se extrae del sistema a continuación. Los metales encontrados en la proporción de escoria se separan para ser reutilizados en industria. El resto de la escoria se utiliza como material de construcción tras sufrir un proceso de compactación, granulado y vitrificación.

El calor producido por el sistema se utiliza mediante el siguiente proceso. Se emplea un intercambiador de calor situado detrás de la cámara de gasificación por plasma para calentar agua que sirva de fuente de energía utilizando una turbina de vapor. El calor que se produce en el sistema es utilizado para calentar agua a temperatura ambiente, que se evaporará y accionará una turbina de vapor, generando energía eléctrica [MAZZ16].

El gas de síntesis, al salir de la cámara de gasificación por plasma, se trata para filtrar impurezas en forma de ceniza. Tras este proceso, ya puede ser utilizado. Las principales aplicaciones incluyen la generación de energía y la obtención de hidrógeno, utilizado en pilas de combustible o como alimentación de ciclos combinados, en plantas denominadas Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) [CORM09].

Otras aplicaciones son la obtención de metano o metanol. El metano se puede emplear en transporte mientras que el metanol se utiliza en la creación de combustibles.

La composición del gas de síntesis se incluye en la siguiente tabla.

Gas	% de volumen
Nitrógeno (N ₂)	42,2%
Monóxido de Carbono (CO)	25,1%
Vapor de agua (H ₂ O)	14,4%
Hidrógeno (H ₂)	14,1%
Dióxido de Carbono (CO ₂)	2,8%
Otros	1,4%

Tabla 11. Composición media del gas de síntesis

La siguiente figura muestra un esquema con las principales utilizaciones del gas de síntesis una vez se obtiene en el proceso de gasificación por plasma.

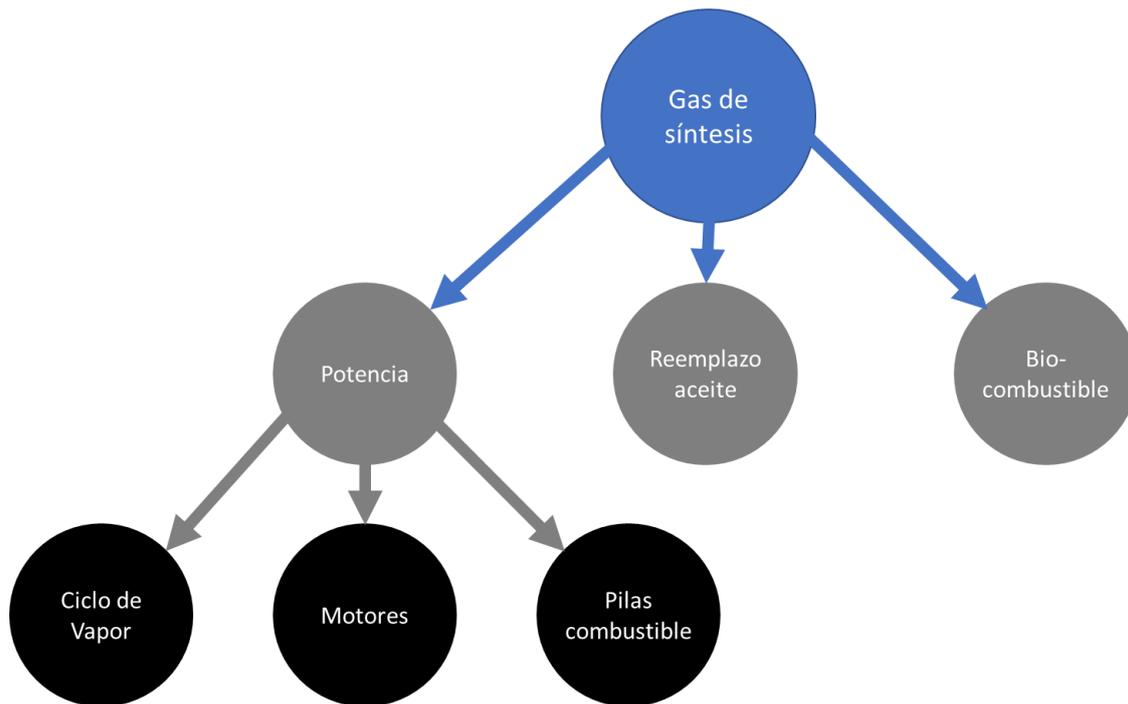


Figura 26. Principal utilización del gas de síntesis

En cuanto a las emisiones producidas en el tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos mediante gasificación por plasma, estas están por debajo de los estándares aprobados para prevenir contaminación. A continuación, se presentan las emisiones producidas en la planta de gasificación por plasma en Ottawa, Canadá [BOWT10]. Se comparan con los valores aceptados de producción en la gestión de residuos por la Unión Europea. Los valores se han obtenido de la directiva 2000/76/EC.

Emisión	Cantidad emisiones	Valores válidos
Materia particulada	12,9	15
Ácido clorhídrico	3,2	15
Óxidos de nitrógeno	160	280
Óxidos de azufre	28	75
Mercurio	0,0001	15
Dioxinas y furanos	0,0087	0,15

Tabla 12. Emisiones de una planta de gasificación por plasma comparadas con el estándar válido

COMPARATIVA

En los capítulos anteriores de este proyecto se han estudiado los distintos problemas que tienen los tratamientos de gestión de residuos que se emplean en España en la actualidad. A continuación, se van a discutir las principales ventajas de la utilización de gasificación por plasma.

Ventajas de la gasificación por plasma:

- La gasificación por plasma elimina los residuos y es un tratamiento eficiente para evitar la acumulación de residuos en vertederos.
- El gas de síntesis como producto aporta diversas aplicaciones una vez obtenido. La más directa e inmediata es la generación eléctrica o térmica.
- Presencia de un 14,1% de hidrógeno en el gas de síntesis que permite su extracción, almacenaje y utilización en distintos sectores, obteniendo un extra de generación y un incremento del potencial económico.
- Con la gasificación por plasma se logra la vitrificación de escoria que en se utiliza como material de construcción. Es una manera de reutilizar los residuos ya tratados y darle una buena utilización a la escoria en lugar de simplemente deshacerse de ella acumulándola en vertederos.
- La gasificación por plasma no genera un alto porcentaje de materia tóxica, como mercurio, óxidos de azufre o en forma de dioxinas y furanos como sí ocurre en la incineración. La alta temperatura de operación evita la aparición de estas partículas. Los valores de producción de partículas contaminantes están por debajo de la normativa europea. Por tanto, el impacto ambiental producido es mínimo.
- La gasificación por plasma es capaz de tratar cualquier tipo de residuos y biomasa. Además, se considera el medio de tratamiento más seguro para todo tipo de residuos médicos. Estos incluyen desde medicinas y productos tóxicos hasta elementos que han sufrido radiación y no se pueden desechar sin un exhaustivo y protocolario plan de reciclado.

- La gasificación por plasma ha sido instalada con éxito en países extranjeros en la última década por lo que ya cuenta con experiencia y madurez que avalan su práctica.
- Como se comprobará en el último capítulo de este proyecto, una planta de gasificación por plasma es financieramente favorable en el largo plazo.

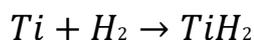
Ante la problemática que presentan los vertederos y las incineradoras en España, la instalación de centrales de gasificación por plasma aporta una serie de ventajas que solucionaría la incógnita de cómo tratar los residuos.

HIDRÓGENO

Una de las principales ventajas que aporta la gasificación por plasma es la capacidad de obtener hidrógeno como producto del proceso en el gas de síntesis. Mientras que la energía no es capaz de ser almacenada, el hidrógeno sí se puede almacenar. Este hidrógeno puede ser empleado en centrales de ciclos combinados cuando sean necesarios o simplemente para fabricar pilas de combustible.

En primer lugar, se van a estudiar las distintas formas de almacenamiento del hidrógeno obtenido.

- Como gas presurizado: es un método simple de almacenamiento de pequeñas cantidades, hasta 3kg, empleado para el abastecimiento de automóviles. Se almacena a presiones entre 200 y 300 bar en envases de acero
- Como líquido: es un método empleado para el almacenamiento de grandes cantidades de hidrógeno, que consiste en su enfriado para ser transformado a fase líquida a -250°C . Se almacena en envases de alrededor de 3 bar por lo que no es necesario contar con presiones altas.
- En hidruros: los metales del periodo 4 de la tabla periódica (Ti, Mn, Fe, Cr, Ni) son altamente reactivos con el hidrógeno. Se produce un hidruro que es sencillamente reversible. El proceso con Titanio sería el siguiente:



La formación y ruptura del hidruro es un proceso exotérmico y endotérmico respectivamente que requiere unos minutos para producirse. El mismo metal puede emplearse hasta cien veces en el proceso de almacenamiento de hidrógeno

Resulta una forma cómoda y segura de almacenamiento de hidrógeno pues permite el traslado del hidrógeno de forma sencilla, con experiencia en su utilización.

Una vez entendidas las opciones de almacenamiento del hidrógeno obtenido en el proceso de gasificación por plasma, se van a estudiar las opciones de aprovechamiento del mismo.

En primer lugar, el hidrógeno sirve de combustible de ciclos combinados. En la actualidad hay una planta en funcionamiento con esta novedosa tecnología, la de Fusina, en Venecia. Operada por Enel, comenzó a operar en 2010 y cuenta con una potencia instalada de 16 MW. Emplea como único combustible el hidrógeno y abastece de energía hasta 20.000 familias, evitando una contaminación anual de 7.000 toneladas de CO₂. Utiliza de máxima 30 toneladas diarias de hidrógeno. Cuenta con un rendimiento del 45%, similar al ciclo combinado tradicional de combustible que tiene un rendimiento de un 50% [PRIE06].

Pese a no ser una tecnología con gran penetración en la actualidad, hay más proyectos para la instalación de plantas semejantes, como la de Magnum, en Holanda. Tiene una capacidad mayor que la anterior, de 1,32 GW y la utilización de hidrógeno como combustible reduciría la emisión de CO₂ en 4 millones de toneladas anuales [WILL17].

En segundo lugar, se va a explicar la presencia de hidrógeno en la utilización de pilas de combustible.

Una pila de combustible proporciona electricidad obtenida tras una reacción química llevada a cabo en su interior. Está formada por un ánodo, un cátodo y electrolito, que los separa. En el ánodo el combustible (hidrógeno) se oxidará, para reducirse posteriormente en el cátodo y generar los productos, en este caso agua. El ánodo y cátodo están conectados mediante un circuito por el que pasan los electrones y donde se conectará el elemento que requiere la energía de la pila.

En la siguiente figura se muestra un esquema del proceso en una pila de combustible utilizando hidrógeno.

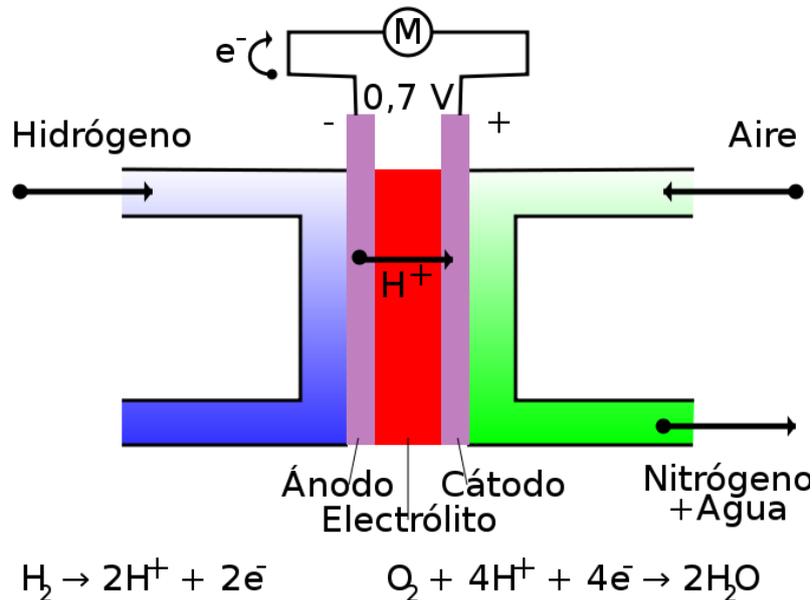


Figura 27. Esquema de una pila de combustible

Una vez entendido el funcionamiento básico de una pila de combustible, se van a comentar los distintos tipos de pila que existen [RUIZ06], variando su eficiencia, temperatura de operación y utilización. Destacar que en todas ellas el hidrógeno es el combustible empleado.

- Pila de membrana de intercambio protónico, PEM: su temperatura de operación es de 50°C a 120°C. La eficiencia media de la pila es del 60%. La utilización principal de este tipo de pila es la automoción.
- Pila alcalina, AFC: su temperatura de operación es de 90°C a 100°C. La eficiencia media de la pila es del 65%. La utilización principal de este tipo de pila es la actividad espacial.
- Pila de ácido fosfórico, PAFC: su temperatura de operación es de 150°C a 200°C. La eficiencia media de la pila es del 40%. La utilización principal de este tipo de pila es la generación distribuida.
- Pila de carbonatos fundidos, MCFC: su temperatura de operación es de 600°C a 700°C. La eficiencia media de la pila es del 50%. La utilización principal de este tipo de pila es la cogeneración.
- Pila de óxidos sólidos, SOFC: su temperatura de operación es de 700°C a 1000°C. La eficiencia media de la pila es del 60%. La

utilización principal de este tipo de pila es, como en el caso anterior la cogeneración. Esto se debe a que son las dos pilas con funcionamiento a temperaturas más elevadas y son válidas para esta actividad.

Una vez entendido qué métodos hay para el almacenamiento directo del hidrógeno y qué tipos de pilas de combustible hay, y para qué temperaturas y funciones se emplean, es preciso estudiar la producción de hidrógeno en una central de gasificación por plasma.

Para dimensionar la instalación de gasificación por plasma, se toma como referencia la que se proyectó para construirse en Alcalá de Henares. Iba a contar con una capacidad de 600 toneladas/día de gestión de residuos, 25.000 kg/h.

La proporción de materia utilizada en el proceso es la siguiente. Para la descomposición de un 100% de masa de residuos, se requiere un 150% de masa de aire para que se produzca la combustión y un 5% de gas inerte.

Como productos, de nuevo respecto del 100% de residuos gestionados, se obtiene un 240% de gas de síntesis y un 25% de escoria [FERN16].

La siguiente tabla muestra las cantidades utilizadas para la gestión de 25.000 kg/h de residuos.

Materia prima	kg/h	Producto	kg/h
Residuos	25.000	Gas de síntesis	60.000
Aire	37.500	Escoria	6.250
Gas	1.250		

Tabla 13. Entradas y salidas de la planta de gasificación por plasma

Así, se producen 60.000 kilogramos de gas de síntesis cada hora. Como se ha analizado en la tabla de los componentes del gas de síntesis, el 14,1% del total se corresponde a hidrógeno (H₂). Así,

$$60.000 \frac{kg_{gas\ síntesis}}{h} \cdot \frac{14,1}{100} \frac{kg_{H_2}}{kg_{gas\ síntesis}} = 8.460 \frac{kg_{H_2}}{h}$$

En la planta estudiada se producirían 8.460 kilogramos de hidrógeno cada hora, un total de 203 toneladas diarias.

El primer ciclo combinado del mundo alimentado 100% mediante hidrógeno que se he comentado anteriormente, utiliza 30 toneladas diarias de hidrógeno, un 15% de lo generado por la planta de gasificación por plasma que se ha tratado previamente. Esto muestra el potencial que tiene la producción de hidrógeno en las plantas de gasificación por plasma.

Por otro lado, si se desea abastecer el sector de la automoción, los motores actuales tienen una autonomía de 100km por cada kilogramo de hidrógeno consumido. Además, el coste de 1 kg de hidrógeno es de 10,9 € por lo que las 203 toneladas generadas en la central supondrían un ingreso económico de 2,2 millones de euros.

UTILIZACIÓN

En la actualidad hay cinco plantas alrededor del mundo que utilizan esta tecnología como medio de gestión de residuos y de generación de energía a través del gas de síntesis. Otras cuatro están en proceso de construcción y otras diez en fase de aprobación, negociación o financiación.

Estas son las plantas existentes con utilización regular:

- Pune, India. Esta planta gestiona diariamente más de 70 toneladas de materia. Utiliza tecnología Westinghouse y fue aprobada durante el año 2008. El gas generado se destina a la producción de energía, alimentando una turbina a la salida. Esta planta se considera la de mayor tamaño tratando residuos catalogados como de alto riesgo o peligrosos.



Figura 28. Planta de gasificación por plasma en Pune (India)

- Wuhan, China. Esta planta se aprobó al inicio del año 2013. De nuevo con tecnología Westinghouse, trata más de 100 toneladas de residuo de biomasa cada día y lo convierte en gas de síntesis. Éste se emplea posteriormente para producir diésel y otros combustibles para el transporte.
- Mihama-Mitaka, Japón. La primera planta de gasificación por plasma en Japón se desarrolló en Yoshii en el año 1999. Consistía en una prueba piloto que resultó satisfactoria. Gestionaba más de 150 toneladas diarias. Tras las pruebas, fue cerrada en 2004. Mientras tanto, en 2002 se completó otra planta en Utashinai. Trataba también 150 toneladas cada día y hasta 2007 no estuvo en funcionamiento debido a problemas de sobredimensionamiento. Solamente estuvo operativa hasta el año 2013. La única planta que funciona actualmente en Japón se presentó en 2002 en Mihama-Mikata. Gestiona únicamente 25 toneladas diarias y emplea tecnología Westinghouse.
- Tainan City, Taiwan. Tiene menor capacidad que las otras existentes pues solamente trata 5 toneladas de residuos diariamente. Una ventaja que presenta es que estos residuos pueden ser de cualquier origen y categoría. Comenzó a operar en enero del año 2005.
- Portaviones Estadounidense. Esta planta es un caso especial pues opera allá donde se encuentre el portaviones en el que se encuentra (USS Gerald R. Ford Supercarrier). Es un caso único pues se emplea para tratar los 200 kg/h que se generan de combustible para autoabastecer las necesidades energéticas del buque. Comenzó a funcionar en el año 2013 y hasta la fecha no se ha replicado en ningún otro medio de transporte. La siguiente figura muestra uno de los buques USS Gerald R. Ford Supercarrier que tiene disponible esta tecnología en su interior.



Figura 29. USS Gerald R. Ford Supercarrier

Europa no cuenta en la actualidad con ninguna central de gasificación por plasma. Sin embargo, Reino Unido, Francia y Alemania están desarrollando proyectos de implantación de esta tecnología.

Reino Unido es el país con mayor implicación y promoción de esta tecnología en los últimos años. Cuenta con hasta tres plantas en proceso de construcción y validación, lo que le puede colocar en el corto plazo en el líder mundial en este ámbito.

- En 2012 comenzó la construcción de una planta en Peterborough que evitará que los residuos lleguen a vertederos en la zona además de producir energía eléctrica para 60.000 hogares.
- En 2016 comenzó la construcción de una instalación en Swindon que gestionará más de 7.000 toneladas de residuos de combustibles.
- La planta menos desarrollada es la de Hirwaun. Se firmó en 2016 y su construcción sigue pendiente de iniciación. Tendrá capacidad para tratar 250.000 toneladas anualmente.

Francia o Alemania están promocionando también este tipo de tecnología, siendo Europa el continente con mayor proyección en cuanto a gasificación por plasma.

Por último, es preciso mencionar aquellos países que han tenido o han intentado instalar una planta de gasificación por plasma pero que por motivos sociales, burocráticos o financieros no han triunfado:

- Estados Unidos. En Hurlburt Field (Florida) se inauguró una planta en 2011. Tenía una capacidad de 11 toneladas de residuos cada día y el gas sintético generado se utilizaba para alimentar un motor de combustión y producir electricidad. En 2013 salió a subasta y no se llegó a adquirir. Otra planta con nula actividad era la de St. Lucie County (Florida). Se desarrolló el proyecto en 2006 con el objetivo de vaciar el vertedero de la zona en un plazo de 18 años. Empezaría a operar en 2009 pero surgieron varios problemas. El principal fue el descontento social con la seguridad de la instalación. Tras años de negociaciones, la empresa encargada decidió abandonar el proyecto. En Tallahassee (Florida) ocurrió una cosa similar. Se firmó la planta más grande del mundo, capaz de tratar 1.000 toneladas de residuos diariamente. El proyecto estaba diseñado para completarse en 2010 pero en el año 2008 se canceló sin ninguna explicación aparente. Nunca se retomó el proyecto. El último caso ocurrió en Jackson (Georgia). Económicamente iba a ser rentable pues vendería el exceso de gas sintético para producir electricidad y la escoria reutilizable para metal. No llegó a completarse y no se ha retomado aún.
- Canadá. En 2008 un proyecto fue rechazado en Vancouver. No se consiguió aclarar a quién pertenecería la instalación ni quién sería el encargado de gestionarla. En 2009 comenzó la construcción de una planta en Red Deer (Alberta). Su capacidad fue mal calculada y una vez finalizada en 2012, al ver que solamente podría tratar el 10% de los residuos de la zona, se rechazó su aprobación. También en 2009, una instalación en Port Hope (cerca de Toronto) que funcionaba correctamente gestionando 400 toneladas cada día fue parada debido a problemas con las licencias. Se decidió cambiar de tecnología para evitar la gasificación por plasma. Otra planta con dificultades en Canadá fue la que se instaló en Ottawa (Ontario). En 2007 entró en funcionamiento gestionando diariamente más de 80 toneladas de

residuos. En agosto de 2014 dejó de tener apoyo gubernamental y los inversores decidieron paralizar su actividad. En 2015 se paró por completo. Desde abril de 2016 se ha rechazado la operación de otra planta en East Luther (Ontario). Trataría todos los residuos municipales, pero en 2014 comenzó a haber problemas con su tramitación.



Figura 30. Planta de gasificación por plasma en desuso en Ottawa

- Reino Unido. El caso de la planta de Teesside fue sorprendente. En 2013 las obras de construcción de la planta comenzaron. La capacidad sería de casi 100MW. Una vez finalizadas la instalación, la empresa en cargo decidió abandonar el negocio de residuos y energía y se abandonó el proyecto. Se espera que en un futuro alguna empresa adquiera los derechos de la planta y vuelva a funcionar, ya que está en perfecto estado y se podría utilizar con muy poco coste añadido y gran retorno.
- España. En 2008 se proyectó una instalación de gasificación por plasma en Alcalá de Henares, una localidad cercana a Madrid. Consistiría en la gestión anual de más de 200.000 toneladas de residuo y contaba con la aprobación gubernamental. Sin embargo, la presión social con miedo acerca de las técnicas de cremación utilizadas acabó por rechazar el proyecto.

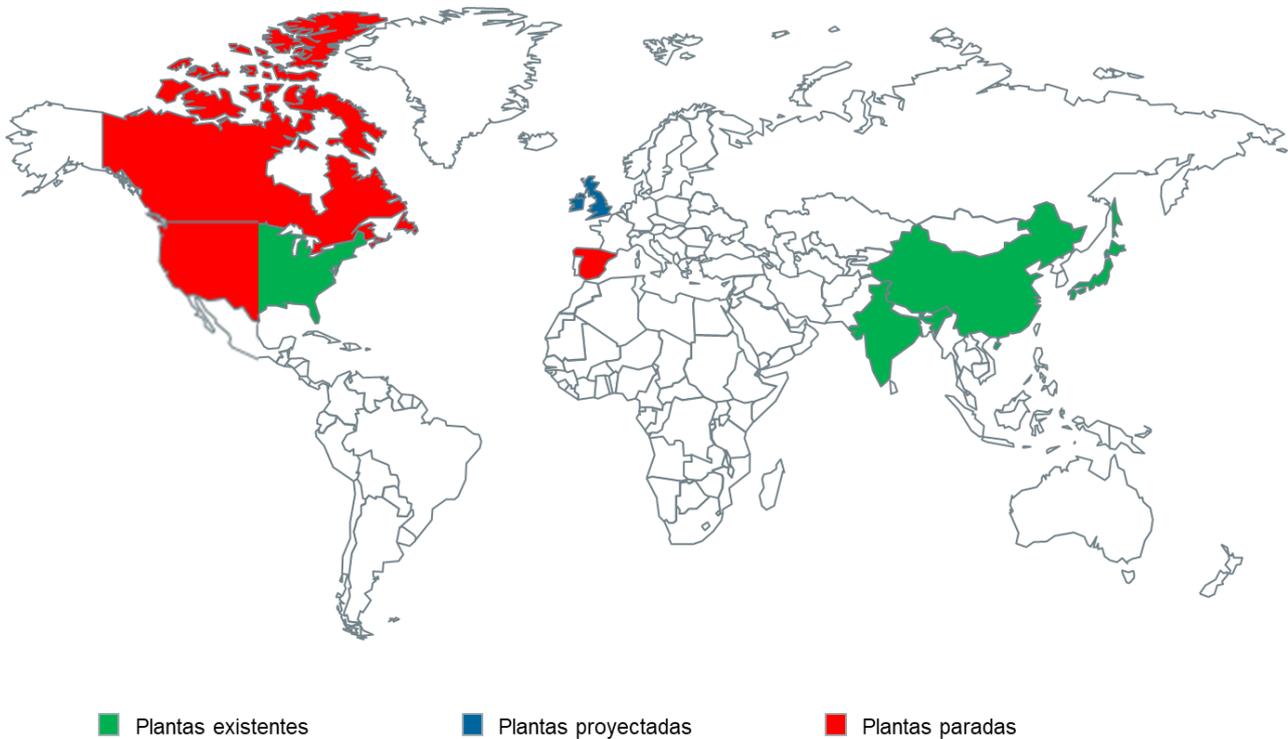


Figura 31. Plantas de gasificación por plasma en el mundo

En la figura anterior se muestra un mapa del mundo con diversos países señalados. En verde se muestran aquellos que tienen plantas de gasificación por plasma en funcionamiento. Nótese que la predominancia en este ámbito la tiene el continente asiático. En azul se representan los países que tienen instalaciones de gasificación por plasma proyectadas o en fase de construcción y aprobación. Reino Unido se encuentra en esta situación, con tres plantas. Por último, en rojo están los países que tuvieron o proyectaron plantas de gasificación por plasma pero que finalmente no fueron exitosas. Canadá y España son dos ejemplos de esta categoría. Estados Unidos es un caso particular. Tiene el color verde pues cuenta con una instalación que incluye esta tecnología, pero también está de color rojo pues ha fracasado en muchos intentos de instalar plantas físicas en su país.

A continuación, va a estudiarse en profundidad el caso español, la planta de Alcalá de Henares. En la siguiente figura se muestra un mapa en el que se puede apreciar dónde iba a colocarse la planta en el plan original.

El 8 de agosto de 2008 se planteó la instalación de una planta de gasificación por plasma al norte de Alcalá de Henares. Estaría lista para comenzar a funcionar en 2011 y trataría anualmente más de 200.000 toneladas de basuras, 600 toneladas diarias, las correspondientes a la ciudad complutense y veinticinco pueblos de los alrededores [IZQU08].

En el momento la tecnología era novedosa y había cierto desconocimiento. Los promotores de la instalación la catalogaron de “innovativa y ecológica” mientras que los detractores la denominaban “arriesgada y cuestionable”. Estos por otra parte alegaban que iba a colocarse en un área de ayuda a diversas razas de aves.

La concesión fue otorgada a la constructora FCC tras un pertinente concurso y consistía en la instalación de la planta y su posterior gestión durante más de veinte años.

Tras meses de discusión y conflictos políticos, se desechó el proyecto. Las razones alegadas fueron que se colocaría a escasos kilómetros de las poblaciones, que en el mundo hubiera solamente tres plantas funcionando en ese momento y no fuera una tecnología madura y con más experiencia.



Figura 32. Localización planteada para la planta de gasificación por plasma en España



8. COMPARATIVA DE PROCESOS

A continuación, se van a exponer de forma comparativa distintos parámetros técnicos que resultan fundamentales cuando se pretende estudiar procesos de tratamiento de residuos. En este caso, vertederos controlados, incineración y gasificación por plasma, los principales agentes de gestión de Residuos Sólidos Urbanos que se utilizan en la actualidad.

Esta comparación se va a efectuar en forma de tabla para que resulte sencilla la comparación visual. Se muestra a continuación en la Tabla 9.

	Vertederos controlados	Incineración	Gasificación por plasma
Requerimiento térmico	No aplica	En el rango de 250°C a 1300°C	Por encima de los 1300°C
Materia prima utilizada	Residuos Sólidos Urbanos mayoritariamente	Residuos Sólidos Urbanos mayoritariamente	Cualquier tipo de residuo o biomasa
% medio de descomposición	No hay descomposición, hay almacenamiento	Alrededor del 90%	100%
Eficacia energética general	No aplica	Gestionando 1 ton de RSU: 550 kWh generados	Gestionando 1 ton de RSU: 2 MWh generados

	Vertederos controlados	Incineración	Gasificación por plasma
Efecto de la humedad	El almacenamiento de los residuos es independiente de la humedad	Diferente nivel de energía demandada según la humedad de los RSU	El tratamiento es independiente de la humedad de los RSU
Productos generados	Lixiviados y gases	Escoria (tanto agresiva como no peligrosa), ceniza y gases	Gas sintético, escoria no agresiva vitrificada, H ₂ O vaporizado
Utilidad de productos extraídos del proceso	Los gases son ricos en metano. Su obtención se utiliza para la generación de energía	Generación de electricidad mediante una turbina	Generación de electricidad mediante una turbina, utilización del gas sintético, almacenamiento y gestión del hidrógeno y líquidos combustibles como C ₂ H ₆ O
Generación de combustible	Metano para generar energía	No se genera ningún combustible en el proceso	Gas sintético que se utiliza con diversos usos a posteriori

	Vertederos controlados	Incineración	Gasificación por plasma
Dioxinas y furanos	No se generan, no hay combustión en el proceso	Se forman y es preciso tratarlos con rapidez	No se generan debido a la alta temperatura de funcionamiento
Emisiones	Lixiviados y gases. Ambos se tratan en procesos de depuración	Los gases generados como productos se expulsan al ambiente tras ser gestionados. Estos son mayoritariamente gases nitrogenados, contienen de azufre y con pequeña proporción de mercurio	Se extrema el cuidado para no expeler gases al exterior
Inversión económica	Baja	Media - alta	Alta

Tabla 14. Comparativa de las distintas técnicas de gestión de residuos



9. ESTUDIO ECONÓMICO

El apartado económico es uno de los limitantes a la hora de potenciar una instalación de gasificación por plasma. Como se ha comentado previamente, es una tecnología innovadora, lo que implica que tiene muy poca experiencia y es costosa de implementar.

En este capítulo se pretende estudiar la viabilidad económica de una planta completa de gasificación por plasma en España. Puesto que en la actualidad no existe ninguna instalación de esta categoría en funcionamiento se deberán asumir ciertos parámetros. Para una correcta estimación de los mismos se comparará la potencial situación española con la de lugares en los que sí se ha conseguido implementar satisfactoriamente una planta de gasificación por plasma. Además, se estudiará el proyecto que no llegó a aprobarse en Alcalá de Henares hace una década para tomar valores semejantes.

Se analizarán los distintos costes asociados a la construcción y puesta en marcha de una planta y se aportarán criterios financieros que ayuden a entender si esta instalación es económicamente favorable y si se recuperaría la presunta inversión.

DATOS GENERALES

La planta estará en funcionamiento 350 días al año, estando parada dos semanas en total debido a mantenimiento, festivos de carácter nacional y situaciones de imprevistos que también deben contemplarse en el análisis. Tomando como referencia la planta que iba a situarse en Alcalá de Henares, tratará alrededor de 600 toneladas diarias de Residuos Sólidos Urbanos para hacer un total de 200.000 toneladas anuales.

GASTO INICIAL

Los gastos iniciales tienen diversos componentes por lo que se estructurará este apartado según las distintas categorías, explicando y dando valor numérico a cada una de ellas.

- SOLAR

La planta proyectada se colocará en Alcalá de Henares para dar servicio a las localidades que se quedaron sin la proyectada en la década anterior. Tiene una extensión de 40.000 m². Después de estudiar el precio del metro cuadrado en la zona, éste tiene un valor de 300 €, al ser una zona rural cerca de una gran población.

Así,

$$300 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} \cdot 40.000 \text{ m}^2 = 12.000.000 \text{ €}$$

Por tanto, se concluye que los gastos debidos al solar y a la localización de la planta ascienden a doce millones de euros.

- CONSTRUCCIÓN

La construcción de la planta implica diversos edificios y dependencias sin las que la planta no funcionaría correctamente. Incluye la zona de gasificación, oficinas, almacenes y servicios auxiliares de agua, electricidad etc.

Se representa en forma de tabla para que sea sencilla la comprensión del concepto con su precio total.

Construcción	€
Zona de gasificación	2.000.000
Oficinas	250.000
Zona de apoyo	30.000
Almacén vitrificación	30.000
Almacén para caliza	30.000
Almacén para coque	30.000
Servicio Auxiliar Electricidad	300.000
Servicio Auxiliar Agua	200.000
TOTAL	2.870.000

Tabla 15. Gastos construcción planta gasificación por plasma

Así, el gasto total en construcción de la planta será de casi tres millones de euros.

- **TECNOLOGÍA**

En cuanto a tecnología, una planta de gasificación por plasma requiere un gasto importante ya que es el concepto más costoso. Son elementos únicos y representan la mayor parte de los gastos de inicio.

De nuevo, se representan en forma de tabla.

Tecnología	€
Antorcha de plasma	22.500.000
Divisor gases	2.200.000
Generador gas sintético	2.100.000
Conveyor	3.000
Tolva	30.000
Turbina (vapor)	5.500.000
Turbina (gas)	11.000.000
TOTAL	43.333.000

Tabla 16. Gastos tecnología planta gasificación por plasma

Así, el gasto total en construcción de la planta supera los cuarenta millones de euros.

- **ELEMENTOS EXTRA**

Una vez construida la planta y adquirida toda la tecnología necesaria para que se pueda realizar satisfactoriamente la gasificación por plasma, es necesario adquirir utensilios, ordenadores y demás elementos que son básicos para la gestión de una planta. Se ha calculado que este concepto suma un total de 50.000 €.

- RESUMEN GASTOS

Gasto	€
Solar	12.000.000
Construcción	2.870.000
Tecnología	43.333.000
Extra	50.000
TOTAL	58.253.000

Tabla 17. Resumen gasto planta gasificación por plasma

Así, el gasto total para la instalación de una planta de gasificación por plasma ronda los sesenta millones de euros.

COSTE

Mientras que el concepto de gasto recién analizado tiene carácter único ya que solamente es necesario incluirlo una vez en la vida útil de la planta, los costes se van a estudiar anualmente.

- MATERIALES

Siendo los Residuos Sólidos Urbanos la principal fuente de materia prima de este proceso, este concepto resulta muy reducido. Sin embargo, hay dos materiales que deben ser considerados y que sí implican coste asociado: caliza y coque.

Se sabe que el porcentaje de caliza y coque necesarios para que se lleve a cabo el proceso es de un 8% y un 5% del total de RSU tratados respectivamente (200.000 toneladas anuales).

Así,

$$\text{Caliza: } 8\% \cdot 200.000 \text{ toneladas} = 16.000 \text{ toneladas}$$

$$\text{Coque: } 5\% \cdot 200.000 \text{ toneladas} = 10.000 \text{ toneladas}$$

Se conocen también los costes de una tonelada de caliza y coque:

$$\text{Caliza: } 8,50 \frac{\text{€}}{\text{ton}}$$

$$\text{Coque: } 150 \frac{\text{€}}{\text{ton}}$$

Así, se halla el coste total de materiales en la siguiente tabla:

Materiales	ton	€/ton	€
Caliza	16.000	8,50	136.000
Coque	10.000	150	1.500.000
TOTAL			2.636.000

Tabla 18. Costes anuales materiales planta gasificación por plasma

Así, el coste anual de materiales será de casi tres millones de euros cada año.

- **ELECTRICIDAD**

El consumo eléctrico representa una gran fuente de coste fijo en la planta.

Aunque las horas totales de funcionamiento de la planta son de 8.400 horas anuales, las máquinas no están operando constantemente por lo que se ha aplicado un porcentaje de reposo por lo que las horas reales de operación oscilan entre las 4.000 y las 8.000 horas.

Se muestra en la siguiente tabla el consumo anual en kWh de la planta de gasificación.

Materiales	Potencia (kW)	Utilización (h/año)	Consumo anual (KWh)
Antorcha de plasma	150	7.000	1.050.000
Divisor gases	100	8.000	800.000
Conveyor	10	7.500	75.000
Tolva	10	7.500	75.000
Turbina (vapor)	250	4.000	1.000.000
Turbina (gas)	250	4.000	1.000.000
TOTAL			4.000.000

Tabla 19. Consumo anual electricidad planta gasificación por plasma

Se conoce que el precio medio industrial de energía en la Península es de media 0,0909 €/kWh, como se muestra en el Anexo I.

Por tanto,

$$0,0909 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 4.000.000 \text{ kWh} = 364.000 \text{ €}$$

Así, el coste anual de electricidad en la planta será de aproximadamente trescientos cincuenta mil euros cada año.

- PERSONAL

El coste humano también representa un porcentaje alto en los costes de operación de la planta. Se muestran en la siguiente tabla

Personal	Número	Salario (€/año)	Total anual (€)
Manager	1	45.000	45.000
Encargado	5	30.000	150.000
Oficina	6	20.000	120.000
Operario	20	18.000	360.000
Limpieza	5	15.000	75.000
Seguridad	4	15.000	60.000
TOTAL			810.000

Tabla 20. Coste anual personal planta gasificación por plasma

- COSTES EXTRA

Además de los costes habituales en una planta de electricidad, materiales y personal, hay otros gastos que deben incluirse como mantenimiento (el más costoso), elementos de limpieza, conexión online, material administrativo, etc.

Se ha calculado que estos costes representan un total de 200.000 € anuales.

- RESUMEN COSTES

Coste	€
Materiales	2.636.000
Electricidad	364.000
Personal	810.000
Extra	200.000
TOTAL	4.010.000

Tabla 21. Resumen costes anuales planta gasificación por plasma

Así, el coste anual total para la instalación de una planta de gasificación por plasma ronda los cuatro millones de euros.

INGRESOS

Una vez estudiados los gastos iniciales y los costes anuales de la planta de gasificación por plasma, es momento de analizar los ingresos anuales que se obtendrán de su operación.

El hecho de recibir residuos y tratarlos lleva unos ingresos asociados. Por cada tonelada recibida y tratada en la planta se ingresarán de media 6 €. Como ocurría con el caso de la compra de energía a nivel industrial, cada tipo de residuo tiene un coste distinto. Según su procedencia, tratamiento necesario y peligrosidad se factura más o menos.

Por tanto,

$$6 \frac{\text{€}}{\text{ton RSU}} \cdot 200.000 \text{ ton RSU} = 1.200.000 \text{ €}$$

Así, los ingresos anuales por el tratamiento de residuos serán de un millón doscientos mil euros.

En cuanto a la energía generada que puede venderse, se ha incluido un análisis en el Anexo II en el que se muestra el precio de la energía en el mercado spot en MWh. Se puede tomar como precio medio de referencia para años futuros de 50 €/MWh. La generación anual de esta planta será de aproximadamente 400.000 MWh por lo que se obtendrán de esta práctica:

$$50 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \cdot 400.000 \text{ MWh} = 20.000.000 \text{ €}$$

Por tanto, los ingresos totales anuales aproximados serán de 21.200.000 €. Se puede suponer, al igual que sucedía con los costes, que este valor es asumible constante para los años futuros de estudio.

CUENTA DE RESULTADOS

Para entender el Cash Flow anual es preciso realizar la cuenta de resultados de la planta. Se toma como Amortización y Depreciación un 10% y como Impuestos un 30%.

Así,

Concepto	Año 0	Año X
Gasto Inicial	58.253.000	
Ingresos		21.200.000
Costes		(4.010.000)
EBITDA		17.190.000
Amortización y Depreciación		(5.825.300)
EBIT		11.364.700
Impuestos		(3.409.410)
Cash Flow		7.955.290

Tabla 22. Cuenta de resultados de la planta de gasificación por plasma

VALOR ACTUAL NETO (VAN)

Para ver si el proyecto de instalación de esta planta de gasificación por plasma es rentable y económicamente favorable es preciso hallar el Valor Actual Neto o VAN. Se establece para su cálculo un periodo en el que se desea obtener beneficio de 10 años y una tasa de descuento que será de un 4%, típica para estudios de mercado como el que se está realizando.

Este cálculo indica si el proyecto es positivo económicamente hablando. En ese caso, el VAN será positivo. Para calcularlo se hace:

$$VAN = -(Gasto Inicial) + \sum \frac{Cash\ Flow\ i}{(1 + tasa\ de\ descuento)^i}$$

Siendo i el número de años para los que se desea calcular el VAN.

Por tanto, para el caso de estudio:

$$VAN = -58.253.000 + \frac{7.955.290}{(1+4\%)^1} + \frac{7.955.290}{(1+4\%)^2} + \frac{7.955.290}{(1+4\%)^3} + \frac{7.955.290}{(1+4\%)^4} + \frac{7.955.290}{(1+4\%)^5} + \frac{7.955.290}{(1+4\%)^6} + \frac{7.955.290}{(1+4\%)^7} + \frac{7.955.290}{(1+4\%)^8} + \frac{7.955.290}{(1+4\%)^9} + \frac{7.955.290}{(1+4\%)^{10}} = 6.271.528 \text{ €}$$

Ya que el resultado final del VAN es mayor que 0, se concluye que el proyecto puede llevarse a cabo desde un punto de vista financiero.

En la siguiente figura se puede observar cómo evoluciona el proyecto a lo largo de los años hasta que supera la barrera positiva a partir del noveno año.

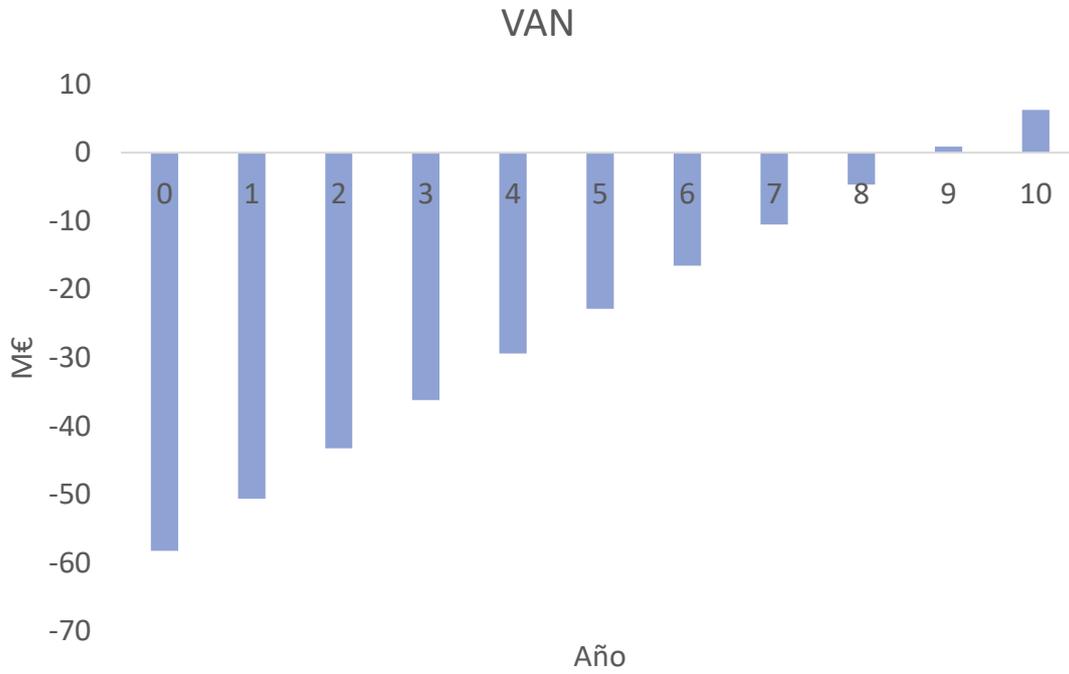


Figura 33. Evolución del VAN del proyecto

PAYBACK PERIOD

El “payback period”, o periodo de retorno, es un concepto que se utiliza en ámbitos económicos para saber exactamente cuándo se va a empezar a rentabilizar un proyecto. Es decir, el momento en el que se termina de pagar el gasto inicial y se comenzará a ganar dinero.

En este caso, observando la Figura 24, se puede deducir que el payback se encontrara en algún momento entre el octavo y noveno año.

Sin embargo, es importante conocerlo con precisión por lo que se aplica la siguiente fórmula para conocerlo:

$$\textit{Payback period} = 8 - \frac{-4.692.062}{5.589.281} = 8,84 \text{ años}$$

8,84 años representa 8 años y 10 meses. Este es el tiempo exacto en el que el proyecto empezaría a tener balance positivo, en el que ya todos los gastos iniciales han sido satisfactoriamente cubiertos.



10. CONCLUSIÓN

España se enfrenta a un reto importante en los próximos años, la eficiente gestión de sus Residuos Sólidos Urbanos. Hasta la actualidad se ha llevado a cabo de forma razonable, mediante vertederos controlados e incineradoras. Han sido efectivas y correctas para la época en las que se instalaron. Sin embargo, una serie de normativas están demandando cambios.

A partir de 2030 los vertederos controlados tendrán que haber disminuido en un 90% y las incineradoras lo harán en un ritmo similar pues los productos que generan son nocivos. Ante este panorama, aparece una alternativa que ha sido exitosa en países que ya la han implementado: la gasificación por plasma.

Además de eliminar eficientemente los RSU, la gasificación por plasma permite almacenar el H₂ obtenido como producto, lo que la convierte en la tecnología idónea para complementar otras fuentes renovables que no son gestionables como la eólica o la fotovoltaica.

En cuanto a su instalación y viabilidad económica, se ha estudiado cómo en un plazo de nueve años la construcción se rentabilizará, un periodo razonable para una instalación de este calibre.

Así, este proyecto propone la instalación de centrales de gasificación por plasma en España, ya que solventarían dos problemas a la vez. En primer lugar, el de hallar nuevas formas de gestión de residuos que sean atractivas. En segundo lugar, lograr un eficiente almacenaje de energía que con la instalación de microrredes pueda beneficiar al sistema eléctrico español, que con el centralismo actual no está consiguiendo emplear eficientemente las energías renovables ya que necesita fuentes gestionables que actúen en caso de que las primeras no operen.



ANEXOS

ANEXO I

El precio de la energía para industrias viene desglosado en periodos a lo largo del día. Hay diferencia entre industrias en la Península, en Baleares y en Canarias. Se estudiarán por tanto las de la Península pues es donde se está estableciendo la planta.

Existe un precio punta (P1), cuatro precios llanos (P2 a P5) y un precio valle (P6). El precio es evidentemente mayor en P1, menor en P6 y de P2 a P5 va reduciéndose regularmente

En la siguiente tabla se muestran los precios en €/kWh para los distintos periodos de estudio.

Periodo	€/kWh
P1	0,1185
P2	0,1036
P3	0,0965
P4	0,0825
P5	0,0789
P6	0,0685

Tabla 23. Precio peninsular por periodo en €/kWh

Ya que la planta está operativa 24h, se puede establecer una media entre estos periodos, obteniendo un coste medio de 0,0909 €/kWh.



Es cierto que estos precios tienen gran variabilidad y que su observación debe realizarse a nivel diario o semanal. Sin embargo, es habitual que las empresas o industrias adquieran energía a un precio determinado a futuros, es decir, que pagarán durante un trimestre, semestre o año el mismo precio, el del día en el que se adquirió.

ANEXO II

Para saber a qué precio se va a vender la energía generada en la planta de gasificación por plasma en el proceso de cogeneración es preciso estudiar la evolución del mercado Spot.

A continuación, se muestra cómo ha evolucionado desde el año 2008 hasta la actualidad, incluyendo previsiones realizadas por el OMIE y OMIP hasta el año 2022.

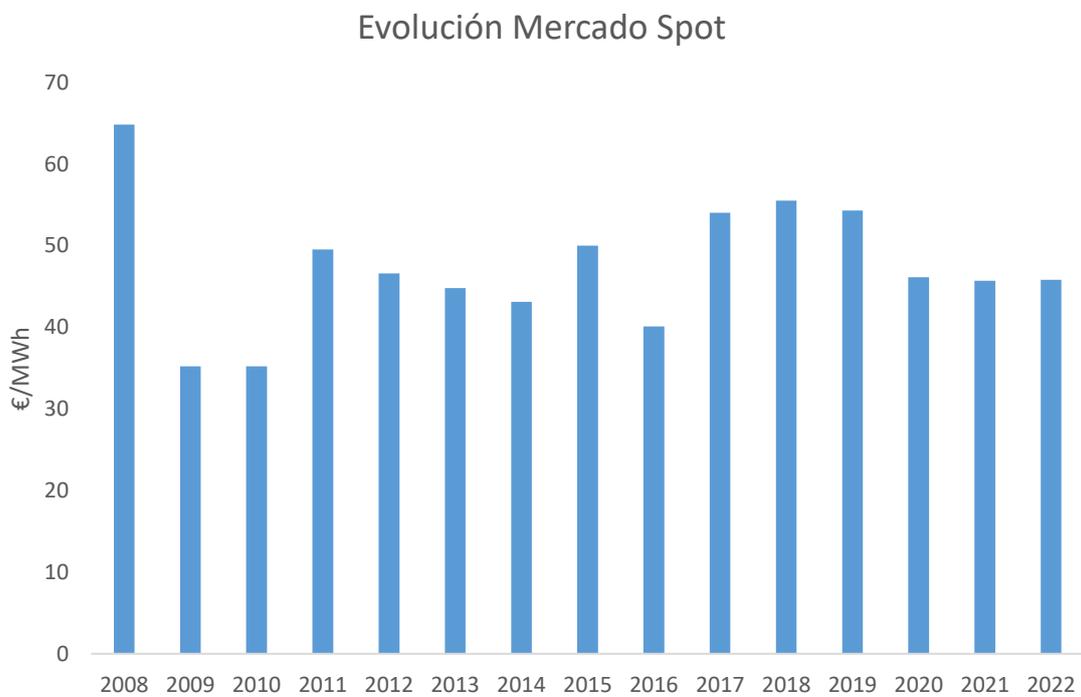


Figura 34. Evolución precio (€/MWh) mercado spot



REFERENCIAS

- [MONT03] Montes, Julio, "Recuperación energética de los residuos urbanos, residuos agrícolas y residuos forestales", 2003
- [FRAN15] Franco, Antonio, "Use of geothermal resources in the Azores islands: a contribution to the energy self-sufficient of a remote and isolated region", 2015
- [SANT15] Santilli, Juan Pablo, "Perspectivas de los cultivos energéticos en Argentina", UNCUYO, 2015
- [SRIR05] Sriram, Nisha, "Renewable Biomass Energy", Illinois Institute of Technology, 2005
- [CLEA10] Cleaves, Bob, "We can prevent forest fires with a biomass strategy", 2010
- [DIAZ16] Díaz, Javier, "El camino de eficiencia energética pasa por la biomasa", 2016
- [GRAÑ14] Graña, Juan José, "La producción de biogás en vertedero. Modelización y determinación analítica de los parámetros operativos de funcionamiento mediante diferentes tipologías de algoritmos", CONORAMA, 2014
- [BARR16] Barriuso, Benedicto, Rodríguez, Luis María, Martínez, Laureano, Berruete, Juan Manuel, "Segunda balsa de recogida de lixiviados en el centro integral de tratamiento de residuos "Planta de Cárcar"", 2016
- [POZO90] Pozo, Marcos, "Selección de emplazamientos para vertederos controlados", E.T.S. de Ingenieros de Montes, 1990
- [BOTA08] Botamino, Iván, "Depósito de residuos en vertedero", Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental, EOI, 2008
- [CAVE17] Cave, Suzie, "Research and Information Service Briefing Paper: Recycling in Germany", 2017

- [ESPI97] Espinace, María, Chamy, Rolando, Szanto, Marcel, “Asentamiento en un vertedero controlado a escala con recirculación de líquidos lixiviados”, Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica, 1997
- [CARR10] Carreras, Nely, “Curso de Introducción a la gestión de vertederos”, 2010
- [RENE15] Reneo, Alberto, “Vertederos y su aprovechamiento energético”, UIMP, 2015
- [ALLS01] Allsopp, Michelle, Costner, Pat, Johnston, Paul, “Incineration and Human Health”, Greenpeace Research Laboratories, 2001
- [ALFA16] Alfaro, Pilar, “Estudio crítico del coste y del precio de la energía eléctrica en España. Aplicación a la economía de las redes inteligentes”, 2016
- [BARF10] Barford, John, Lam, Charles, McKay, Gordon, “Use of Incineration MSW Ash: A Review”, 2010
- [CORT15] Cortés, Pablo, “Efectos de las dioxinas sobre la salud humana”, 2015
- [DUCH10] Ducharme, Caroline, “Technical and economic analysis of Plasma-assisted Waste-to-Energy processes”, Earth Engineering Center, Columbia University, 2010
- [POUR17] Pourali, Masoud, “Application of Plasma Gasification Technology in Waste to Energy Challenges and Opportunities”, IEEE, 2017
- [YOUN12] Youngchul, Byun, Moohyun, Cho, Soon-Mo, Hwang and Jaewoo, Chung, “Thermal Plasma Gasification of Municipal Solid Waste (MSW)”, 2012
- [MAZZ16] Mazzaroni, Luca, Ahmed, Rizwan, Janajreh, Isam, “Plasma gasification of two waste streams: Municipal solid waste and hazardous waste from the oil and gas industry”, The 8th International Conference on Applied Energy, 2016
- [CORM09] Cormos-Cristian, Calin, Cormos, Ana-Maria, Agachi, Serban, “Heat and power integration for hydrogen-fuelled Combined Cycle Gas Turbine”, 2009

- [BOWY10] Bowyer, Jim, Fernholz, Katie, "Plasma Gasification: An Examination of the Health, Safety, and Environmental Records of Established Facilities", 2010
- [PRIE06] Prieto, Ismael, "Generación Termoeléctrica/Ciclos Combinados", E.P.S. de Ingeniería Industrial, 2006
- [WILL17] Williams, Diramaid, "Dutch gas power plant to undergo hydrogen power conversion", 2017
- [RUIZ06] Ruiz, Juan Carlos, Núñez, Pedro, Peña-Martínez, Juan "Pilas de combustible", 2006
- [FERN16] Fernández, Mario, "Análisis tecno-económico de la gasificación de residuos sólidos urbanos mediante plasma térmico", 2016
- [IZQU08] Izquierdo, Amaya, "Alcalá instala una incineradora en una zona con protección ambiental", El País, 2008

Otras referencias:

- AEVERSU
- Alter NRG
- Balances Energía Eléctrica – Red Eléctrica Española
- CNMC
- Endesa
- EurObserv'ER
- Eurostat
- GAIA
- Greenpeace
- Iberdrola
- IDAE- Plan de Energías Renovables 2011-2020
- IDAE- Plan de Energías Renovables 2005-2010
- Indra
- Informe REE 2017

- Informe REE 2016
- Informe REE 2015
- Informe REE 2014
- La Energía en España: Análisis y proyecciones
- OMIE
- OMIP
- Real Academia Española
- Real Decreto 773/2017
- Real Decreto 947/2015
- Real Decreto 413/2014
- Real Decreto 815/2013
- Real Decreto 134/2010
- Real Decreto 1304/2009
- Real Decreto 653/2003
- Real Decreto 1481/2001
- ScienceDirect
- Westinghouse Electric Corporation
- World Bank Open Data
- Worldmeters

