



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER
**ANÁLISIS DE LA CURVA DE OFERTA DE
BIOMASA EN ESPAÑA PARA DIFERENTES
SECTORES INDUSTRIALES**

Autor: Jaime Alonso-Cortés Vivancos

Director: José Pablo Chaves Ávila

Co-Director: Timo Gerres

Co-Director: Carlos Martín Sastre

Madrid

Junio de 2019

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. **Jaime Alonso-Cortés Vivancos**

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra:

Análisis de la curva de oferta de biomasa en España para diferentes sectores industriales, 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 19 de junio de 2019

ACEPTA

Fdo.....

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Vicente ACE', is written over a horizontal line.

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

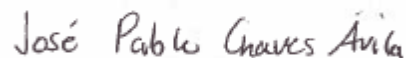
Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título **Análisis de la curva de oferta de biomasa en España para diferentes sectores industriales** en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico **2018-19** es de mi autoría, original e 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.: **Jaime Alonso-Cortés Vivancos** Fecha: **19/ 06/ 2019**



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: **José Pablo Chaves Ávila** Fecha: **19/ 06/ 2019**

EL CO-DIRECTOR DEL PROYECTO



EL CO-DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: **Timo Gerres** Fecha: **19/ 06/ 2019**



Fdo.: **Carlos Martín Sastre** Fecha: **19/ 06/ 2019**



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ANÁLISIS DE LA CURVA DE OFERTA DE
BIOMASA EN ESPAÑA PARA DIFERENTES
SECTORES INDUSTRIALES**

Autor: Jaime Alonso-Cortés Vivancos

Director: José Pablo Chaves Ávila

Co-Director: Timo Gerres

Co-Director: Carlos Martín Sastre

Madrid

Junio de 2019

ANÁLISIS DE LA CURVA DE OFERTA DE BIOMASA EN ESPAÑA PARA DIFERENTES SECTORES INDUSTRIALES

Autor: Alonso-Cortés Vivancos, Jaime

Director: Chaves Ávila, José Pablo

Co-director: Gerres, Timo

Co-director: Martín Sastre, Carlos

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción

En un contexto en el que la preocupación por la sostenibilidad del planeta y la descarbonización son cuestiones de vital importancia, son imprescindibles fuentes de energía alternativas a los tradicionales combustibles fósiles, cuya persistencia en el tiempo cada vez está más en duda.

Entre las distintas fuentes de energía alternativas, la biomasa destaca por su enorme potencial y los múltiples beneficios asociados a su explotación. Se conoce como biomasa toda materia orgánica que puede ser aprovechada con fines energéticos. Dado que la definición de biomasa es muy amplia, se establecen cuatro categorías de biomasa diferentes: biomasa agrícola y forestal, residuos sólidos, biogás y biocombustibles. El alcance del proyecto se centra en el potencial de la biomasa agrícola y forestal.

El primer rasgo característico de la biomasa es la versatilidad de sus aplicaciones energéticas, ya que puede ser aprovechada tanto para generación térmica, generación eléctrica o transporte en el caso de los biocombustibles.

Otra característica fundamental de la biomasa es su carácter renovable, ya que presenta un comportamiento bajo en emisiones de carbono. Las emisiones de CO₂ generadas durante la combustión de la biomasa equivalen al CO₂ fijado durante el ciclo de vida por la biomasa. Sin embargo, durante los procesos de explotación, transformación y transporte de la biomasa se generan emisiones que hacen el ciclo completo no sea nulo.

Además, la explotación de la biomasa tiene otros beneficios asociados como son el desarrollo económico y social del medio rural, la prevención del riesgo de incendios y la eliminación de residuos.

Actualmente, la biomasa se utiliza principalmente en el sector residencial como combustible para sistemas de calefacción. Su presencia en el sector industrial, en industrias como la del papel y la celulosa o la madera también es relevante. En el mix de generación eléctrica, sin embargo, su contribución se limita al 1,5% de la generación total en España en 2016. Estos son los principales usos de la biomasa a día de hoy.

El objetivo de este proyecto es analizar el potencial de la biomasa en el consumo energético en España en el horizonte de 2030. En primer lugar, se estudia la

disponibilidad de la biomasa agrícola y forestal y sus costes de obtención. Es lo que se denomina en el proyecto oferta de biomasa. Por otro lado, se estudia la demanda potencial de biomasa en algunos sectores que presentan un gran potencial. Se trata de la industria del papel y la celulosa, donde se utiliza biomasa procedente de los residuos del proceso industrial, la industria del cemento, pionera en el uso de combustibles alternativos en la industria, y el sector de la generación eléctrica, que presenta un enorme potencial, especialmente por la posibilidad de transformación de las centrales térmicas de carbón en biomasa.

El análisis conjunto de la oferta y la demanda revelará el potencial real de la biomasa en España en 2030, que es el objetivo inicial del proyecto.

Metodología

La metodología seguida a lo largo del proyecto tiene como horizonte final la construcción de una curva de oferta y demanda de biomasa en España en 2030, que permita analizar el potencial de dicho combustible.

La metodología seguida consta de los siguientes pasos:

- En primer lugar, se estudia la situación actual de la biomasa en España: consumo de energía primaria y final y cómo se distribuye este consumo en los distintos sectores de la economía. Se realiza un análisis independiente de la biomasa para usos eléctricos
- A continuación, se explora el potencial de la biomasa en España desde el punto de vista de la oferta. El punto de partida es el Plan de Energías Renovables 2011-2020 (IDAE, 2009). El análisis de la oferta se centra en la biomasa forestal y agrícola. El resultado final de este análisis es una curva de oferta en la que se muestra la disponibilidad de la biomasa en ktep y el coste de obtención en €/tep.
- Una vez construida la curva de oferta, el siguiente paso es la construcción de la curva de demanda para los sectores elegidos. El primer paso en este objetivo es un análisis sectorial de la industria del papel y la celulosa, la industria del cemento y el sector eléctrico, con especial foco en la biomasa. En base a este análisis, se establece un objetivo de penetración de la biomasa en el consumo de energía final de cada uno de los sectores.
- El siguiente paso en la construcción de la curva de demanda es la estimación de la demanda de energía primaria procedente de la biomasa para cada sector en 2030.
- El último paso en la construcción de la curva de demanda es el cálculo de precios, es decir, la disponibilidad a pagar por la biomasa de cada uno de los sectores. En el caso de la industria, se calcula como el coste de oportunidad de sustituir el combustible convencional más las emisiones de CO₂ asociadas. En el sector eléctrico se calcula como el break-even point de la venta de electricidad en 2030.

- Finalmente, se comparan la curva de oferta y demanda de la biomasa y se determina la demanda que potencialmente puede ser cubierta.

Resultados

En primer lugar, se muestran los resultados correspondientes a la oferta de biomasa. El análisis realizado parte de las proyecciones publicadas en el PER 2011-2020 (IDAE, 2009). Los resultados muestran que el coste medio de obtención de la biomasa oscila entre los 100 euros por tep de los restos agrícolas y los 356,3 euros por tep de las masas leñosas susceptibles de implantación en terreno forestal. Los costes mostrados tienen en cuenta un valor de humedad del 45% y una distancia media de transporte de 60 kms, por lo que están sometidos a una cierta variabilidad en función de estos parámetros.

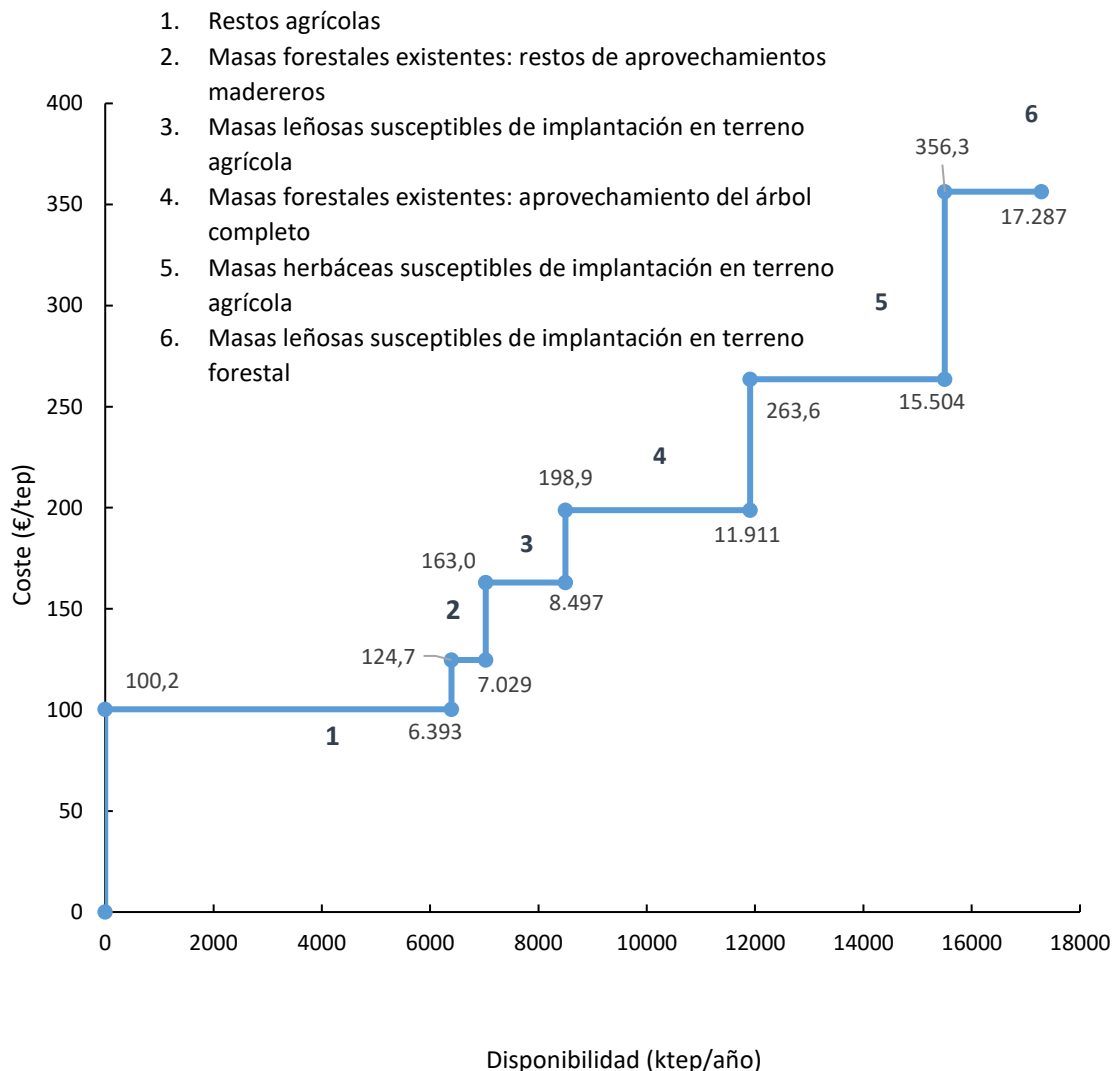


Figura 1: Curva de oferta de la biomasa potencial en España

Por otro lado, se muestra la curva de demanda potencial de los sectores estudiados en 2030. La industria del papel presenta la mayor disponibilidad a pagar por la biomasa, ya que representa el coste de oportunidad del combustible mayoritario en la industria más las emisiones asociadas, que en este caso es el gas natural. Además, en el caso de la industria del papel, el precio de demanda disminuye por el efecto de la amortización de las inversiones necesarias para transformar la industria.

A continuación aparece la industria del cemento, con un precio de demanda menor asociado al coste de oportunidad del coque de petróleo, cuyo precio es más bajo ya que se trata de un residuo del petróleo.

En un nivel de precios claramente inferior aparece el sector eléctrico, en cuatro tramos distintos. El primer tramo se corresponde a la generación de las centrales de biomasa convencionales, que totalizan 877 MW, en las horas con precio eléctrico más alto (punta). El segundo tramo se corresponde a la generación en horas punta del parque térmico de carbón, de 10.030 MW, que potencialmente puede ser transformado en biomasa en 2030.

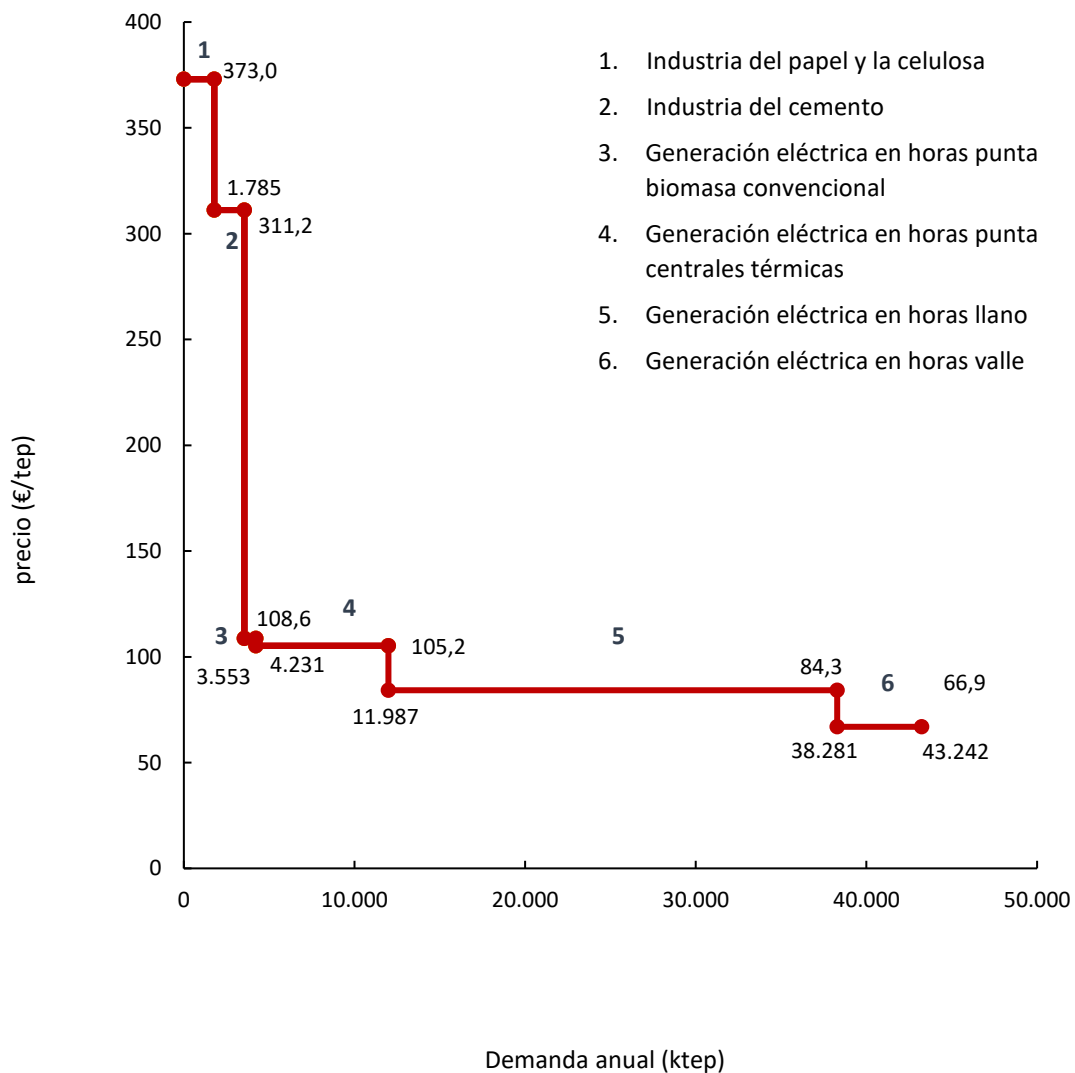


Figura 2: Curva de demanda potencial de biomasa en España en 2030

El precio de demanda es inferior al de las centrales convencionales por el efecto de las inversiones a amortizar. Por último, se muestra la demanda de biomasa en los tramos de generación de llano y valle, con precios notablemente inferiores como consecuencia de ingresos más bajos por venta de electricidad.

Por último, se comparan de forma conjunta las curvas de oferta y demanda para determinar el potencial que realmente tiene sentido desarrollar bajo criterios económicos.

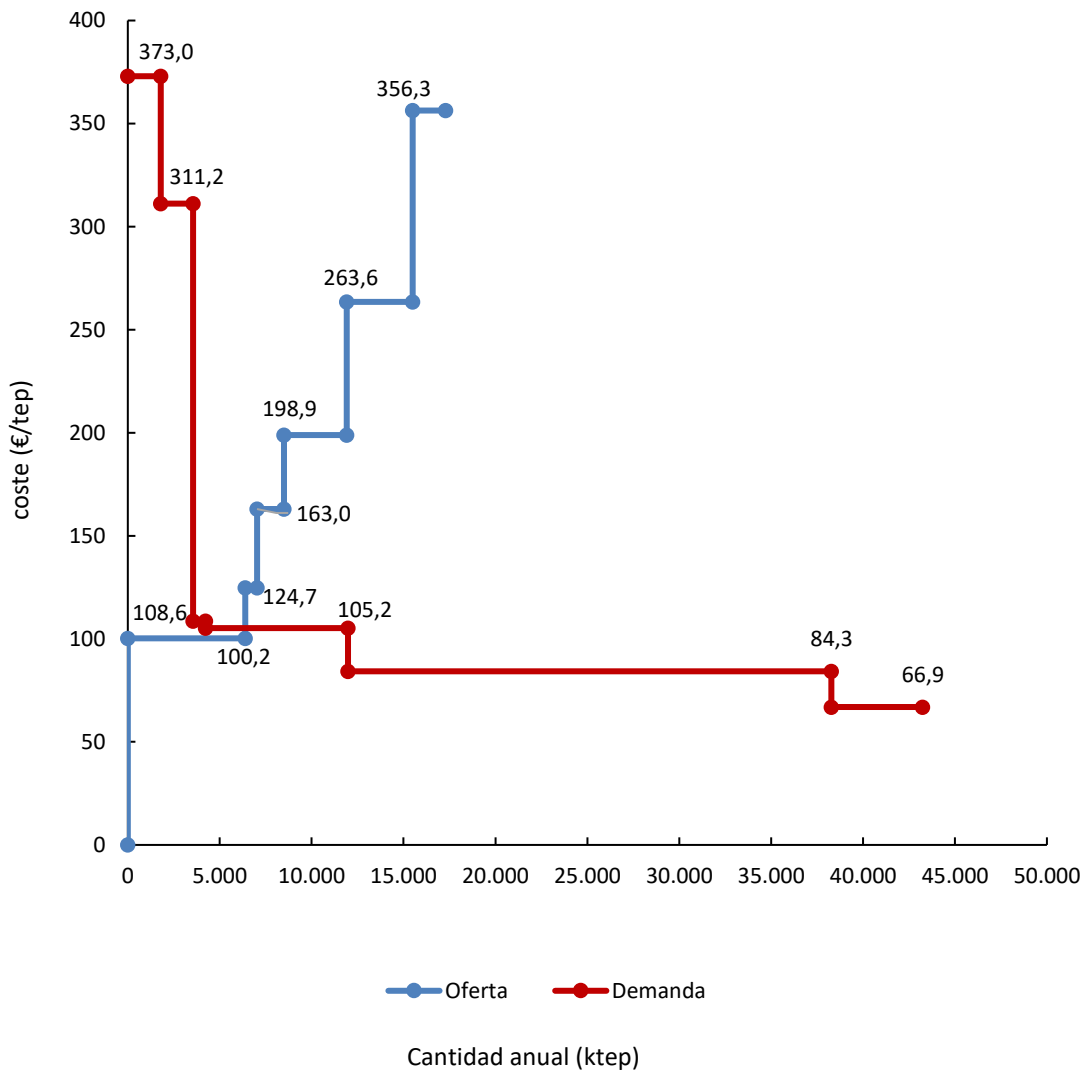


Figura 3: Curvas de oferta y demanda de biomasa potencial en España en 2030

La demanda energética de biomasa de las industrias del cemento y el papel, que en total suman 3.553 ktep, pueden ser cubiertas sin ningún problema por la oferta de biomasa existente.

La demanda de generación eléctrica convencional en horas punta, de 678 ktep, puede ser cubierta únicamente por la oferta de biomasa de restos agrícolas, que presenta un coste de obtención menor a la disponibilidad a pagar del sector.

Por el contrario, la demanda de biomasa por parte de las centrales térmicas de carbón, con un precio menor por las inversiones necesarias, solo puede ser cubierta parcialmente por la cantidad disponible restante de biomasa de restos agrícolas. La oferta sobrante dependerá de la biomasa que utilicen los sectores industriales. Si las industrias deciden apostar por la biomasa de restos agrícolas, compitiendo con el sector eléctrico, la biomasa restante solamente podrá cubrir un 28% de la demanda. Si por el contrario, las industrias eligen otro tipo de biomasa, se podrá cubrir hasta un 65% de la demanda de biomasa de las centrales térmicas de carbón transformadas a biomasa.

Conclusiones

La principal conclusión extraída de los resultados del proyecto es que la biomasa es una fuente de energía que presenta un alto potencial que todavía no ha sido desarrollado en España. Se trata de un combustible de carácter renovable con múltiples beneficios asociados como su versatilidad y su contribución al desarrollo y la conservación del medio rural.

El potencial de la biomasa es particularmente atractivo para su desarrollo en el sector industrial, concretamente en las industrias del papel y el cemento, donde la biomasa tiene la posibilidad convertirse en el principal combustible. Además de la contribución a la descarbonización en un sector fundamental, su explotación como combustible es claramente rentable bajo criterios puramente económicos.

El potencial que presenta el sector eléctrico es enorme, especialmente por la posibilidad de convertir las centrales térmicas de carbón, con un total de 10.030 MW, en biomasa. Sin embargo, la oferta de biomasa de restos agrícolas no es suficiente para abastecer la demanda de todo el parque térmico de carbón. La demanda máxima que podrían cubrir es del 65% de la demanda, es decir, que solo tiene sentido la transformación de unos 6.500 MW. Esta demanda se cubriría bajo criterios de rentabilidad solo en las horas de mayor precio de venta eléctrica (punta).

Una parte de la oferta de biomasa procedente de restos agrícolas se destinaría a cubrir la demanda total de las plantas de biomasa convencionales, que totalizan 877 MW, durante las horas punta.

Durante el resto de horas, es decir, en los tramos de llano y valle, la biomasa no sería rentable como tecnología de generación. Sin embargo, a través de un sistema de ayudas con el fin de explotar los beneficios de la biomasa, se podría alterar la demanda para que pueda ser competitiva y así aprovechar la oferta sobrante de biomasa para producir electricidad durante más horas.

Referencias

ASPAPEL. 2018. *Memoria de sostenibilidad. La bioindustria circular del papel y su descarbonización.* 2018.

CEMA. 2016. *Reciclado y valorización de residuos en la industria cementera en España.* 2016.

CSI/ECRA. 2017. *Development of State of the Art Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead.* 2017.

IDAE. 2017. *Informe estadístico de energías renovables.* 2017.

IDAE. 2009. *Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020.* 2009.

Rivier, Michel, et al. 2018. *Análisis de escenarios futuros para el sector eléctrico en España para el periodo 2025-2050.* 2018.

ASSESSMENT OF THE BIOMASS SUPPLY CURVE FOR SPAIN AVAILABLE FOR USE IN DIFFERENT INDUSTRIAL SECTORS

Student: Alonso-Cortés Vivancos, Jaime

Supervisor: Chaves Ávila, José Pablo

Co-director: Gerres, Timo

Co-director: Martín Sastre, Carlos

PROJECT SUMMARY

Introduction

In a context in which concern for earth sustainability and decarbonisation are issues of great importance, new sources of alternative energy become essential to replace traditional fossil fuels.

Among the different alternative energy sources, biomass stands out for its enormous potential and the multiple benefits associated to its exploitation. The term biomass applies to all the organic matter that can be used for energy purposes. Given that the definition of biomass is very broad, four different categories of biomass are established: agricultural and forestry biomass, solid waste, biogas and biofuels. This project focuses on the potential of agricultural and forestry biomass.

The most remarkable feature of biomass is the tremendous degree of versatility as far as energy applications is concerned, since it can be used in thermal generation, in power generation and, in the case of biofuels, in transport.

Another important feature of biomass is its renewable nature, since it has a low carbon emission behaviour. The CO₂ emissions generated during the biomass combustion process are equivalent to the CO₂ fixed during the biomass life cycle. However, during the process of exploitation, transformation and transport of biomass, some emissions are produced. As a consequence, the entire/complete biomass cycle of is not null.

In addition, biomass exploitation offers other benefits such as the economic and social development of the rural environment, the prevention of fire risk and the reduction of waste.

Currently, biomass is mainly used in the residential sector as fuel for heating systems. Its presence in the industrial sector, such as paper and pulp or wood industries is also relevant. In the power generation mix, however, its contribution in Spain is limited to 1,5% of the total generation. These are the main current uses of biomass.

The aim of this project is to analyse the biomass potential in energy consumption in Spain by 2030. First, the availability of agricultural and forestry biomass and the associated costs are studied. This is referred to as biomass supply within the project. The potential demand of biomass by sectors that a show great potential is also studied:

paper and pulp industry, where biomass from industrial process waste is used, cement industry, which is pioneer in the use of alternative fuels in industry, and the power generation sector, which presents an enormous potential, especially because of the possibility of transforming coal thermal power plants into biomass plants.

The joint analysis of supply and demand will reveal the real potential of biomass in Spain in 2030, which is the project's main goal.

Methodology

The applied methodology throughout the project seeks to model a biomass supply and demand curve in Spain in 2030, which will be the tool used to quantify biomass potential.

The applied methodology consists of the following steps:

- In the first place, the current situation of biomass in Spain is studied: primary and final energy consumption and how this consumption is split among the different economy sectors. An independent analysis of the biomass for power generation is carried out.
- Next, the potential of biomass in Spain is observed from the point of view of supply. The starting point is the 'Plan de Energías Renovables 2011-2020' (IDAE, 2009). The supply analysis focuses on forest and agricultural biomass. The final result of this analysis is a supply curve showing the availability of biomass in ktoe and the cost of obtaining it in €/toe.
- Once the supply curve is modelled, the next step is to elaborate the demand curve for the chosen sectors. A sectorial analysis of the pulp and paper industry, the cement industry and the power generation sector, with a special focus on biomass is undertaken. Based on this analysis, a target of biomass penetration in the final energy consumption of each of these sectors is set.
- The next stage in the construction of the demand curve is the estimation of the demand for primary energy obtained from biomass for each sector in 2030.
- The last step in the analysis of the demand curve is price estimation, that is, based on each of the sectors' willingness to pay for biomass. In the case of industry, it is calculated as the opportunity cost of replacing the conventional fuel plus the associated CO₂ emissions. In the power generation sector, it is calculated as the break-even point of the power sale in 2030.
- Finally, the supply and demand curves of the biomass are compared to determine the demand that can potentially be covered by the supply.

Results

The results corresponding to the biomass supply are shown in first place. The analysis carried out is based on the projections published in the PER 2011-2020 (IDAE, 2009). The results show that the average cost of obtaining biomass ranges between 100 euros per toe of agricultural remains and 356,3 euros per toe of woody mass to be implanted in forest land. The costs take into account a humidity value of 45% and an average transport distance of 60 km, so they are subject to a certain variability depending on these parameters.

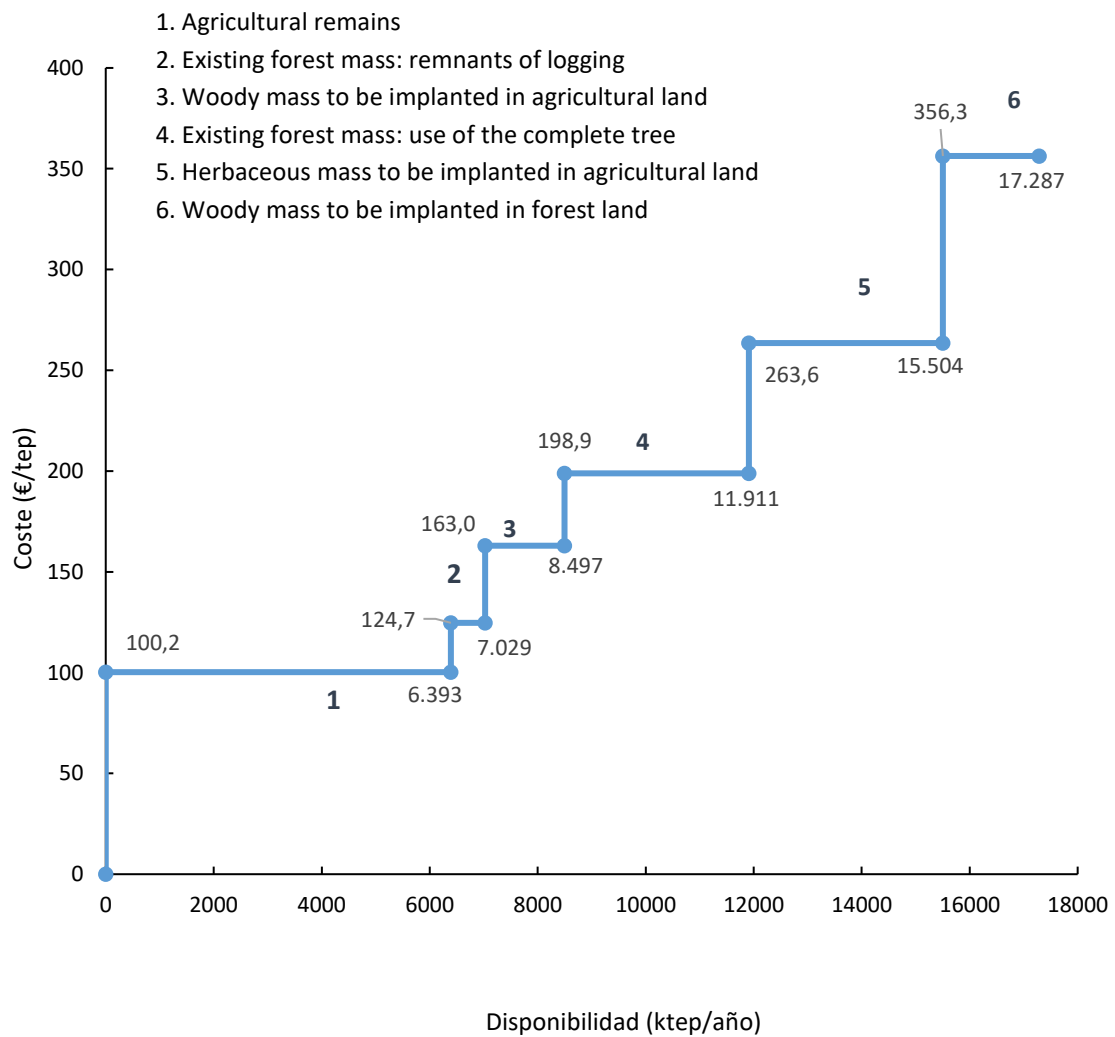


Figure 1: Biomass potential supply curve in Spain

The potential biomass demand curve of the studied sectors in 2030 is shown in Figure 2. The pulp and paper industry offers the highest willingness to pay for biomass, since this represents the opportunity cost of the main current fuel in the industry plus the associated emissions, which in this case is natural gas. In addition, in the case of the paper industry, the demand price decreases due to the effect of the amortization of the investments needed to transform the industry.

The cement industry comes next, with a lower demand price associated to the opportunity cost of petroleum coke, which is slightly cheaper than natural gas because it comes from petroleum waste.

Within a clearly lower price level, the electricity sector appears in four different stretches. The first stretch corresponds to power generation by conventional biomass power plants, (877 MW) in the hours with the highest electric price (peak hours). The second stretch corresponds to power generation by coal thermal parks in peak hour (10.030 MW) which can potentially be transformed into biomass plants in 2030.

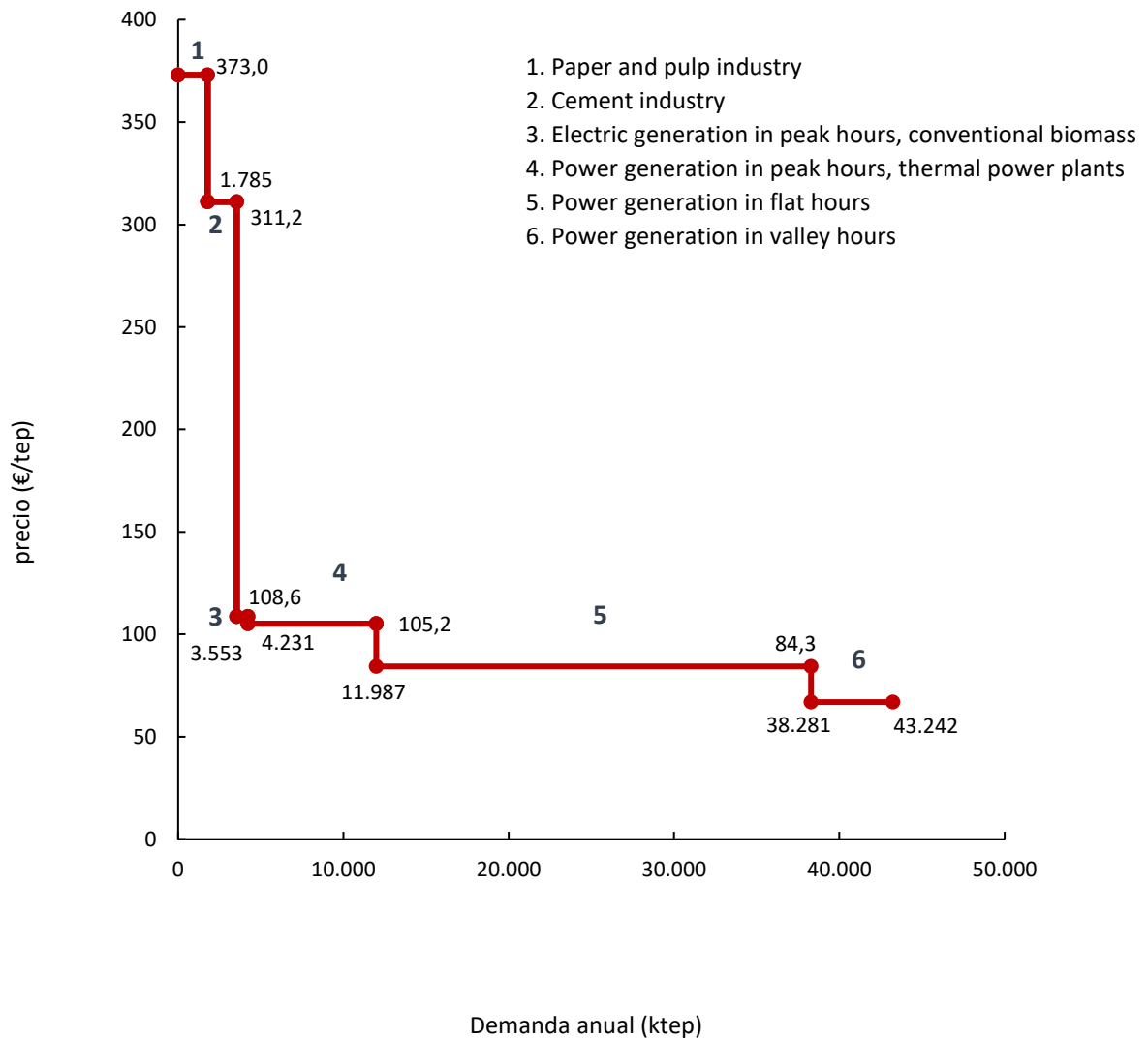


Figure 2: Biomass potential demand curve in Spain in 2030

The demand price is lower than the price of conventional power plants because of the effect of the investments to be amortized. Finally, biomass demand is shown in the plain and valley generation stretches, with significantly lower prices as a result of a reduction in revenues from power sale.

Finally, the supply and demand curves are jointly compared to determine the potential that should be developed according to economic criteria.

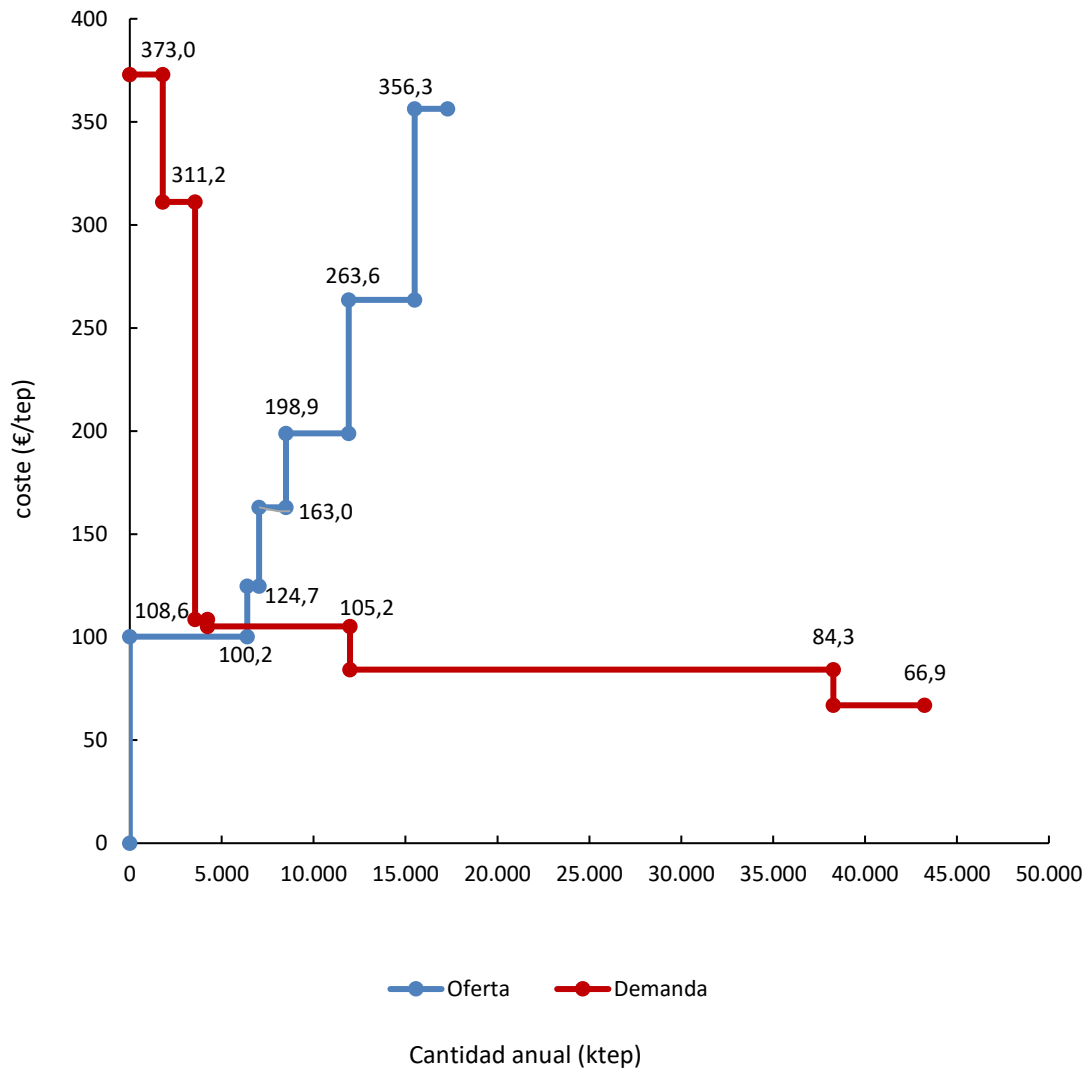


Figure 3: Supply and demand curves of potential biomass in Spain in 2030

The biomass energy demand from the cement and paper industries, which in total add up to 3,553 ktoe, can be fully met by the existing biomass supply.

The demand for conventional biomass power generation in peak hours, of 678 ktoe, can only be covered by the biomass supply of agricultural waste, which has a lower cost than the sector's willingness to pay.

Conversely, the demand for biomass by coal thermal power plants, with a lower willingness to pay because of the amortization of the required investments, can only be partially met by the remaining available amount of biomass of agricultural waste. The remaining supply will depend on the biomass used by the industrial sectors. If the industries decide to bet for agricultural waste biomass, competing with the power generation sector, the remaining biomass will only cover 28% of the demand. If, on the other hand, industries choose another type of biomass, up to 65% of the biomass demand from coal thermal power plants transformed into biomass plants can be covered.

Conclusion

The main conclusion drawn from the project results is that biomass is a source of energy that offers a high potential that has not yet been fully developed in Spain. It is a renewable fuel with multiple associated benefits such as its versatility and its contribution to the development and preservation of the rural environment.

Biomass potential is particularly attractive for development in the industrial sector, specifically in the paper and cement industries, where biomass has the possibility of becoming the main fuel. In addition to the contribution to decarbonisation in a fundamental sector, its exploitation as fuel is clearly profitable under purely economic criteria.

The potential of the power generation sector is enormous, especially because of the possibility of transforming coal thermal power plants, with a total of 10,030 MW, into biomass plants. However, the supply of biomass of agricultural waste is not enough to supply the demand of the entire thermal coal park. The maximum demand that could be covered is 65% of the demand, that is, only the transformation of about 6,500 MW makes sense. This demand would be provided under profitability criteria only in the hours with the highest electricity sale price (peak hours).

A portion of the supply of biomass from agricultural waste would be used to cover the total demand of conventional biomass plants, totalling 877 MW, during peak hours.

Durante el resto de horas, es decir, en los tramos de llano y valle, la biomasa no sería rentable como tecnología de generación. Sin embargo, a través de un sistema de ayudas con el fin de explotar los beneficios de la biomasa, se podría corregir el desequilibrio entre oferta y demanda y aprovechar la oferta sobrante de biomasa para producir electricidad durante todo el año.

In the remaining hours, that is, in the plain and valley stretches, biomass would not be profitable as generation technology. However, through a system of funding aimed at exploiting biomass benefits, the difference between supply and demand could be corrected so that the surplus biomass supply could be used to produce a larger amount of power.

References

ASPAPPEL. 2018. *Memoria de sostenibilidad. La bioindustria circular del papel y su descarbonización.* 2018.

CEMA. 2016. *Reciclado y valorización de residuos en la industria cementera en España.* 2016.

CSI/ECRA. 2017. *Development of State of the Art Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead.* 2017.

IDAE. 2017. *Informe estadístico de energías renovables.* 2017.

IDAE. 2009. *Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020.* 2009.

Rivier, Michel, et al. 2018. *Análisis de escenarios futuros para el sector eléctrico en España para el periodo 2025-2050.* 2018.

Índice de contenidos

1. Introducción.....	29
1.1. Estado de la cuestión.....	29
1.2. Objetivos.....	30
1.3. Metodología.....	31
2. La biomasa.....	32
2.1. Definición de biomasa	32
2.2. Tipos de biomasa	32
2.2.1. Biomasa procedente de terreno forestal	33
2.2.1. Biomasa procedente de terreno agrícola	34
2.3. Beneficios de la biomasa	35
2.4. Emisiones.....	36
2.4.1. Partículas en suspensión.....	37
2.4.2. Óxidos de nitrógeno (NO _x)	38
3. La biomasa en España	39
3.1. Estructura energética en España	39
3.2. Energía de la biomasa	43
4. El potencial de la biomasa en España.....	47
4.1. Presentación del potencial de la biomasa en España	47
4.2. Curva de oferta de la biomasa en España	50
5. Análisis de los sectores.....	52
5.1. Industria de la celulosa y el papel	53
5.1.2. Los residuos en la industria del papel y su aprovechamiento	54
5.1.2. Consumo energético en la industria del papel en España	56
5.1.3. Consumo energético a nivel europeo	59
5.1.4. Estimación del potencial de la biomasa en la industria del papel en 2030 ...	62
5.2. Industria del cemento.....	63
5.2.1. Consumo energético de la industria del cemento en España	63
5.2.2. Consumo energético a nivel europeo	68
5.2.3. Estimación del potencial de la biomasa en la industria del cemento en 2030	69
5.3. Generación eléctrica.....	71
5.3.1. La biomasa en el sector eléctrico en España	71
5.3.2. Estimación del potencial de la biomasa en el sector eléctrico en 2030.....	73

6. Curva de demanda de biomasa	77
6.1. Estimación del consumo total de energía final en 2030	77
6.1.1. Industria del papel y la celulosa	78
6.1.2. Industria del cemento	79
6.1.3. Generación eléctrica.....	79
6.2. Cálculo de la energía final procedente de la biomasa.....	80
6.2.1. Industria del papel y la celulosa	80
6.2.2. Industria del cemento	80
6.2.3. Generación eléctrica.....	81
6.3. Conversión de la energía final a energía primaria	82
6.4. Análisis de costes.....	84
6.4.1. Industria del papel y la celulosa	84
6.4.2. Industria del cemento	87
6.4.3. Generación eléctrica.....	87
6.5. Construcción de la curva de demanda	96
7. Análisis de resultados	98
7.1. Oferta	98
7.2. Demanda	99
7.3. Análisis de las curvas de oferta y demanda	100
8. Conclusiones.....	103
9. Bibliografía.....	106
10. Anexos.....	110
10.1. Consumo de energía primaria por combustible	110
10.2. Consumo energía final por combustible	111
10.3. Balance eléctrico nacional	112
10.4. Consumo de energía final por sector	113
10.5. Consumo de combustibles de la industria del cemento	114
10.6. Factores de conversión energía primaria a energía final y emisiones de CO ₂	115
10.7. Previsión de precios de materias primas.....	117
10.8. Resultado del análisis de escenarios futuros del sector eléctrico.....	118

Índice de figuras

Figura 1: Ciclo neutro de la biomasa.....	36
Figura 2: Diagrama de Sankey de la estructura energética de España 2016, (Ministerio de Energía, 2016).....	39
Figura 3: Consumo de energía final por sector, (IDAE, 2017)	40
Figura 4: Consumo energético total en usos diversos, IDAE, 2016.....	41
Figura 5: Consumo energético total en el sector industrial, IDAE, 2016.....	42
Figura 6: Consumo de energía final procedente de biomasa por sector, (IDAE, 2017). ..	44
Figura 7: Consumo de energía final procedente de biomasa en el sector industrial, (IDAE, 2017).....	45
Figura 8: Estructura de generación eléctrica 2016 en GWh, (IDAE, 2017).....	46
Figura 9: Generación eléctrica renovable 2016 en GWh, (IDAE, 2017)	46
Figura 10: Porcentaje de biomasa potencial disponible sobre el total, (IDAE, 2009) ...	48
Figura 11: Coste y disponibilidad de la biomasa potencial en España.....	51
Figura 12: Mapa de fabricantes de papel y celulosa en España, (ASPAPPEL, 2018)	53
Figura 13: Gestión de los residuos papeleros 2017, (ASPAPPEL, 2018).....	56
Figura 14: Porcentaje de consumo de combustible sobre el total, (ASPAPPEL, 2018)...	57
Figura 15: Consumo de combustibles 2017 sector papel (TJ), (ASPAPPEL, 2018).....	58
Figura 16: Consumo energético del sector papel, ASPAPPEL	59
Figura 17: Consumo de combustible en la industria del papel en Europa 2016, (CEPI, 2018).....	60
Figura 18: Consumo de biomasa sobre el consumo energético total de la industria del papel en Europa, (CEPI, 2018).....	60
Figura 19: Consumo de biomasa sobre el total, industria del papel (2005-2007), (Ecofys, 2009).....	61
Figura 20: Consumo de combustibles OFICEMEN 2016 en toneladas, (CEMA, 2016).....	65
Figura 21: Consumo de combustibles alternativos con contenido parcial en biomasa en toneladas, (CEMA, 2016).....	65
Figura 22: Consumo de combustibles alternativos de biomasa (ton.), (CEMA, 2016)..	66
Figura 23: Consumo energético mediante combustibles alternativos, (CEMA, 2016)..	66
Figura 24: Porcentaje de sustitución de los combustibles alternativos respecto al consumo total, (CEMA, 2016)	67
Figura 25: Consumo energético total del sector cemento, (CEMA, 2016)	68

Figura 26: Porcentaje de sustitución de combustibles alternativos UE (2017), CEMA.	69
Figura 27: Generación eléctrica renovable en 2016 en GWh, (IDAE, 2017)	71
Figura 28: Evolución de la potencia eléctrica instalada de biomasa en España, (IDAE, 2017).....	72
Figura 29: Potencia instalada de otras renovables por tipo de combustible, (REE, 2017)	72
Figura 30: Curva monótona de precios eléctricos en 2030	88
Figura 31: Demanda potencial de biomasa en 2030.....	97
Figura 32: Oferta y Demanda de energía primaria de biomasa en 2030	100

Índice de tablas

Tabla 1: Biomasa potencial disponible en España, (IDAE, 2009)	47
Tabla 2: Cálculo del poder calorífico de la biomasa potencial disponible	49
Tabla 3: Poder calorífico inferior por combustible, (IDAE, 2019)	49
Tabla 4: Cálculo de los costes de la biomasa por unidad energética.....	50
Tabla 5: Residuos generados por la industria papelera en toneladas, (ASPAPPEL, 2018)	54
Tabla 6: Gestión de los residuos papeleros %, (ASPAPPEL, 2018)	55
Tabla 7: Proyecciones de consumo de materias primas, (Gerres, y otros, 2019).....	78
Tabla 8: Consumo energético del sector papel.....	78
Tabla 9: Consumo energético del sector cemento	79
Tabla 10: Proyecciones de energía final procedente de la biomasa	82
Tabla 11: Factores de conversión energía final - energía primaria uso directo, (IDAE, 2011).....	82
Tabla 12: Factores de conversión energía final - energía primaria electricidad, (IDAE, 2011).....	83
Tabla 13: Cálculo de la demanda energía primaria por sector	83
Tabla 14: Costes O&M biomasa en 2017, (IRENA, 2018).....	90
Tabla 15: Resultados del análisis del potencial de la demanda de biomasa en 2030	96
Tabla 16: Resumen de la oferta potencial de energía primaria de la biomasa en 2030..	98
Tabla 17: Resumen de la demanda potencial de energía primaria de la biomasa en 2030	99
Tabla 18: Consumo de energía primaria, (MINETAD/IDAE, 2017).....	110
Tabla 19: Consumo de energía final, (MINETAD/IDAE, 2017)	111
Tabla 20: Balance eléctrico nacional 2016, (IDAE, 2017).....	112
Tabla 21: Consumo energía final biomasa 2016, (IDAE, 2016)	113
Tabla 22: Resultado del análisis de escenarios futuros del sector eléctrico 2030, (Rivier, y otros, 2018).....	118

1. Introducción

1.1. Estado de la cuestión

En las últimas décadas, se ha producido un crecimiento exponencial del consumo energético como consecuencia de un fuerte desarrollo económico y demográfico a nivel global, especialmente en algunas regiones en vías de desarrollo.

En este contexto, las emisiones de CO₂ y de otros gases contaminantes se han disparado, generando un grave problema de sostenibilidad en el planeta y acelerando el cambio climático. Además, la sobreexplotación de los recursos energéticos, en particular de los combustibles fósiles como el carbón o el petróleo, está dando lugar a problemas de disponibilidad, que en un periodo de tiempo no demasiado extenso pueden terminar en el agotamiento de los mencionados combustibles fósiles.

La preocupación por la sostenibilidad del planeta, acentuada por la disponibilidad limitada de los combustibles fósiles, hace de extrema necesidad la búsqueda de fuentes de energía alternativas.

La biomasa surge como respuesta a las cuestiones recientemente planteadas, ya que se trata de un combustible de origen renovable que presenta un alto potencial como fuente de energía. Una primera aproximación al concepto de biomasa, en el que profundizaremos más adelante, es toda materia orgánica que puede ser aprovechada con fines energéticos.

La biomasa es un combustible que presenta un comportamiento bajo en emisiones de CO₂ en comparación con los combustibles fósiles tradicionales. Esta característica hace de la biomasa un combustible muy atractivo para lograr los objetivos de descarbonización que se persiguen. Aunque, como se verá más adelante, existen otras emisiones asociadas a la explotación de la biomasa como las partículas en suspensión o el NO_x. Además, tiene la ventaja de que presenta una alta disponibilidad y de que se trata de un recurso autóctono. Esta diferencia es esencial, ya que el petróleo y el carbón además de su disponibilidad limitada, son en su mayoría de importación, lo que se traduce en una mayor volatilidad de precios y en la dependencia energética de otros países.

La biomasa es la mayor fuente de energía renovable a nivel global y la que presenta un mayor potencial (IEA, 2018). A diferencia de otras renovables como la eólica o la fotovoltaica, que están principalmente implantadas en el sector eléctrico y son prácticamente inexistentes en otros sectores, la biomasa también se utiliza para generación térmica en distintos sectores como el residencial o el industrial, y en el transporte con los biocombustibles.

Las principales instituciones del sector energético apuntan a un fuerte desarrollo de la biomasa en los próximos años. En 2015, la biomasa era responsable del 9% de la producción de energía primaria a nivel global (IEA, 2016). En 2030, se prevé que alrededor del 20% de la energía primaria a nivel global proceda de la biomasa, lo que es igual a un 60% de la energía de origen renovable (IRENA, 2014). A nivel nacional, el

reciente borrador del Plan nacional integrado de energía y clima 2021-2030 (PNIEC) (MITECO, 2019) concreta una serie de medidas para acelerar el desarrollo de la biomasa. El borrador plantea medidas concretas orientadas a aumentar el peso de la biomasa y otras renovables en el consumo energético del sector industrial (medida 1.4) y al desarrollo de la biomasa en la generación eléctrica renovable (medida 1.8). También se señala la importancia de la biomasa como sumidero de CO₂ (medida 1.17) y su contribución a la reducción de gases de efecto de invernadero (1.14 y 1.15).

Queda claro que la biomasa posee un enorme potencial aún por desarrollar y que está llamada a ser una de las piezas fundamentales en el mix energético del futuro, ya que se trata de una fuente de energía con innumerables beneficios. Renovable, gestionable, con una alta disponibilidad, autóctona, con multitud de aplicaciones (generación eléctrica, térmica, transporte) son algunas de sus principales ventajas. Además, la explotación de la biomasa genera otros beneficios que van más allá del plano puramente energético como son la eliminación de residuos, el desarrollo económico del medio rural, la creación de empleo o la prevención de riesgo de incendios.

1.2. Objetivos

El principal objetivo al que se enfrenta este proyecto es explorar el potencial de la biomasa en España y sus beneficios, tomando como horizonte temporal el año 2030. El objetivo final del proyecto es la construcción de una curva de oferta y demanda de biomasa en la que se cuantifica la disponibilidad y el coste de cada tipo de biomasa.

Por un lado, la curva de oferta representa la biomasa potencial disponible en cantidad y su coste medio de obtención. Como se verá más adelante, el alcance del proyecto se centra únicamente en la biomasa agrícola y forestal, que es la que mayor potencial presenta en España (Gregorio, 2012).

Por otro lado, la curva de demanda refleja la cantidad de biomasa potencialmente demandada por tres sectores en los que la biomasa presenta un alto potencial y el precio que estarían dispuestos a pagar para rentabilizar la biomasa como combustible. Son la industria del papel y la celulosa, la industria del cemento y la generación eléctrica. Tradicionalmente, la industria del papel reutiliza los residuos biomásicos que genera como combustible. La industria del cemento, por el contrario, aunque no genera residuos biomásicos, es una de las industrias líderes en el uso de combustibles alternativos. El último sector estudiado es el de la generación eléctrica, ya que se trata del principal consumidor de energía. El precio que está dispuesto a pagar cada sector por la biomasa no es más que el coste de oportunidad de sustituir el combustible convencional por la biomasa. Más adelante se detallará el cálculo de dicho coste de oportunidad.

1.3. Metodología

Para llegar al objetivo establecido, la metodología de trabajo seguida se estructura siguiendo los siguientes pasos.

- En primer lugar, se realiza un análisis en detalle la situación actual de la biomasa en España. Este análisis incluye las energías final y primaria procedentes de la biomasa y cómo se distribuye este consumo en los diferentes sectores y subsectores de la economía española.
- A continuación, se analiza el potencial de la biomasa en España, centrándose en la biomasa agrícola y la biomasa forestal. Este potencial se concreta de forma cuantitativa en una curva de oferta, en la que se presenta la disponibilidad y el coste de obtención de los distintos tipos de biomasa analizados. El punto de partida para la realización de este primer análisis es el Plan de Energías Renovables 2011-2020 (IDAE, 2009). Este documento es la referencia vigente para cuantificar el volumen de biomasa potencial en España en 2030, como se precisa en el informe ‘Estrategia española de Bioeconomía, Horizonte 2030’ (Ministerio de economía y competitividad, 2016).
- Posteriormente, se estudia el potencial de la biomasa en España desde el punto de vista de la demanda. Dada la complejidad de este análisis, el proyecto se centra en dos sectores industriales con un fuerte potencial para la biomasa, que son la industria del papel y la celulosa por un lado, y la industria del cemento, por otro. Además, el análisis se extiende al sector de la generación eléctrica, ya que la biomasa está llamada a ser una tecnología de generación importante en el futuro.

El primer paso en este análisis es una descripción exhaustiva de cada sector, en el que se detalla el consumo energético, se estudia el papel de la biomasa, se compara la industria española con otras industrias en Europa, se analiza la situación tecnológica del sector y finalmente se establece un potencial para la biomasa en 2030.

- El siguiente paso en el análisis de la demanda consiste en la construcción de una curva de demanda agregada que se pueda comparar con la curva de oferta. Para ello, además de cuantificar la cantidad de biomasa demandada es preciso estimar el precio medio que estaría dispuesta a pagar cada industria por la biomasa.
- Por último, se comparan las curvas de oferta y demanda y se determina el potencial que realmente tiene sentido desarrollar bajo criterios de rentabilidad.

2. La biomasa

Una vez expuesto el planteamiento general del proyecto, como paso previo al estudio de la biomasa en España, es conveniente profundizar en el concepto de biomasa. Determinar con exactitud qué es la biomasa, identificar los tipos de biomasa estudiados en el proyecto o explorar los beneficios asociados a la utilización de la biomasa son algunas de las cuestiones a tratar en este capítulo.

2.1. Definición de biomasa

En primer lugar, es importante definir de forma precisa el concepto de biomasa.

Según la especificación técnica europea CEN/TS 14588, la definición de biomasa es “todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización”.

Por tanto, la biomasa engloba toda la materia orgánica que puede ser aprovechada desde un punto de vista energético. El origen de la biomasa, de acuerdo con la definición, puede ser de naturaleza muy variada. Una primera distinción se refiere al origen animal o vegetal de la biomasa. Por otro lado, el origen de la biomasa puede ser natural o residual. Estas son algunas de las categorías en las que se puede clasificar la biomasa.

2.2. Tipos de biomasa

Como se deduce de su definición, el concepto de biomasa es muy amplio y es susceptible de muchas clasificaciones. A grandes rasgos, podemos distinguir cuatro tipos de biomasa (National Energy Education Development, 2016).

- Biomasa forestal y agrícola. Es la biomasa procedente de árboles y cultivos. La biomasa forestal se puede presentar en múltiples formas que van desde ramas y troncos hasta virutas, cortezas o serrín. La biomasa agrícola, por el contrario, procede de los residuos y excedentes de cultivos. También se incluyen residuos como huesos de frutas. Casi la mitad de la energía de la biomasa procede de la biomasa forestal y agrícola (National Energy Education Development, 2016).
- Residuos sólidos. Los desechos sólidos de naturaleza orgánica son otra fuente de biomasa. Vulgarmente, es lo que conocemos como basura. Destacan los residuos animales, procedentes de alimentación, residuos municipales, etc.
- Biogás. El biogás es un tipo de biomasa que se presenta en forma gaseosa. Está compuesto por CH₄ (metano) y CO₂. Se genera en medios naturales por la degradación de la materia orgánica a través de la acción de microorganismos. El biogás se genera principalmente a partir de residuos ganaderos, agrícolas y lodos

de depuradoras. Además, es la única energía renovable que puede utilizarse para cualquiera de las grandes aplicaciones energéticas; generación térmica, generación eléctrica y como combustible para el transporte.

- **Biocombustibles.** Se generan por fermentación alcohólica y se presentan en estado líquido. Los más importantes son el bioetanol y el biodiesel. El bioetanol se obtiene por medio de la fermentación de materia orgánica rica en azúcares y almidón, mientras que el biodiesel se obtiene a partir de lípidos naturales presentes en aceites vegetales o grasas animales.

Dada la complejidad y la variedad de la biomasa, el alcance del proyecto se va a centrar únicamente en el análisis del potencial de la biomasa forestal y agrícola en España. Siguiendo la clasificación realizada en el PER 2011-2020 (IDAE, 2009), además de la división entre biomasa forestal y biomasa agrícola, se va a realizar una segunda clasificación entre biomasa existente y biomasa susceptible de implantación.

Como su nombre indica, la primera es la biomasa que ya está desarrollada, mientras que la segunda se refiere a la biomasa que podría desarrollarse en nuestro territorio. El potencial de la biomasa en España es la suma agregada de la biomasa existente y la biomasa susceptible de implantación.

A continuación se explican en detalle los tipos de biomasa analizados en el proyecto: biomasa forestal existente, biomasa procedentes de masas susceptibles de implantación en terreno forestal, biomasa agrícola existente y biomasa herbácea susceptible de implantación en terreno agrícola, y, por último, biomasa leñosa susceptible de implantación en terreno agrícola.

2.2.1. Biomasa procedente de terreno forestal

Biomasa forestal existente

Se trata de la biomasa procedente del aprovechamiento de restos forestales así como de la biomasa procedente de la tala de árboles completos que puede ser utilizada con fines energéticos.

Las masas forestales son sometidas generalmente a operaciones de poda o clareo como parte de los cuidados que reciben para fomentar su desarrollo. Los restos generados por estas operaciones pueden ser utilizados para la obtención de biomasa con fines energéticos. Desde el punto de vista de la sostenibilidad se trata de una solución óptima, ya que no solo se consigue eliminar los deshechos producidos, sino que además estos restos son utilizados como fuente de energía renovable (Margarit i Roset, 2011).

Sin embargo, la corta de árboles completos es más cuestionable desde el punto de vista de la sostenibilidad. Algunos expertos señalan que la obtención de biomasa no solo no es un estímulo para las energías renovables y la descarbonización, sino que fomenta la deforestación y su aplicación a gran escala puede producir efectos irreversibles en términos de emisiones (Fern, 2015) (Booth, 2018).

Biomasa procedente de masas susceptibles de implantación en el terreno forestal

Este grupo comprende las repoblaciones forestales o leñosas destinadas exclusivamente a fines energéticos.

En España, las especies forestales más adecuadas para implantar con fines energéticos en terreno forestal son *Quercus* (roble), *Pinus* (pino) y *Eucalyptus* (eucalipto) (Margarit i Roset, 2011).

2.2.1. Biomasa procedente de terreno agrícola

Biomasa existente y biomasa herbácea susceptible de implantación en terreno agrícola

Este grupo comprende los restos de cultivos agrícolas existentes que pueden ser aprovechados para la obtención de biomasa, así como la biomasa herbácea procedente de cultivos que potencialmente pueden ser implantados en el terreno agrícola español.

La biomasa agrícola puede ser leñosa o herbácea. La biomasa agrícola de origen leñoso procede principalmente de podas de olivares, frutales y viñedos, mientras que la biomasa herbácea se compone de residuos de paja de cereal y caña de maíz. El principal inconveniente que presenta la biomasa agrícola es la estacionalidad.

La biomasa herbácea susceptible de implantación comprende el aprovechamiento con fines energéticos de los residuos generados por cultivos herbáceos que potencialmente pueden ser desarrollados en España (Margarit i Roset, 2011).

Biomasa leñosa susceptible de implantación en terreno agrícola

Comprende una variedad de especies forestales con fines energéticos a implantar sobre terrenos agrícolas, ya sean de secano o de regadío.

Las especies a implantar en terrenos de secano son *Quercus* (roble), *Pinus* (pino) y *Eucalyptus* (eucalipto), con un mayor turno de corta (Margarit i Roset, 2011).

En los terrenos de regadío, el turno o edad de corta es menor y la densidad de plantación mayor. Las especies a implantar son *Eucalyptus* (eucalipto) y *Populus* (chopos o álamos) (Margarit i Roset, 2011).

La explotación del eucalipto genera gran controversia, ya que es una especie muy agresiva. Su alta capacidad de absorción de agua seca de tal manera los suelos que impide el desarrollo de otras especies (FAO, 2019).

2.3. Beneficios de la biomasa

El desarrollo de la biomasa como fuente de energía tiene asociados una serie de beneficios que van más allá de su caracterización como energía renovable.

- La principal ventaja que presenta la biomasa es su carácter renovable, que es la principal razón que ha motivado su desarrollo en los últimos tiempos. Se considera que la biomasa es una tecnología prácticamente neutra en emisiones de carbono. Es lo que se conoce como ciclo neutro del CO₂; las emisiones de CO₂ durante la combustión de la biomasa son iguales al CO₂ que la biomasa ha fijado a lo largo de su vida a través de la fotosíntesis. Sin embargo, en el proceso de explotación, transporte y transformación de la biomasa se producen emisiones de CO₂, que impiden que el ciclo de la biomasa sea completamente nulo. Por tanto, la biomasa puede ser utilizada como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles en la descarbonización de la industria y otros sectores.
- Una parte importante de la biomasa tiene su origen en la reutilización de los residuos. Los residuos aprovechados para la generación de biomasa pueden ser de naturaleza muy variada, desde desechos forestales o residuos industriales hasta lodos de depuradoras o residuos municipales. La eliminación de estos desechos suele tener un coste económico asociado y en ocasiones generan problemas medioambientales, se convierten en focos de contaminación o pueden constituir riesgo de incendios. El aprovechamiento de estos residuos para ser convertidos en biomasa tiene el beneficio adicional de la eliminación de estos residuos y el ahorro que esto supone.
- La actividad económica asociada a la explotación de la biomasa contribuye al desarrollo económico y potenciación del medio rural. En una sociedad eminentemente urbana como la nuestra, uno de los principales retos a los que nos enfrentamos es a la despoblación del entorno rural. La actividad económica se concentra en las ciudades y las áreas industriales, relegando a un segundo plano al medio rural. La biomasa es un sector fuertemente vinculado al medio rural, con una gran capacidad de dinamizar la economía y generar empleo. Además de la propia actividad destinada a la explotación con fines energéticos de la biomasa, la biomasa genera una actividad económica indirecta ligada a la preparación y transformación de la biomasa. No en vano, la biomasa es la energía renovable que más empleos genera en España, con 32.833 puestos de trabajo contabilizados en 2017 sobre un total de 78.667, (APPA, 2017).
- Los cuidados silvícolas asociados a la explotación de la biomasa forestal como recurso con fines energéticos promueven la limpieza y la adecuada conservación

de los bosques. El mejor estado del medio forestal no se refleja meramente en la estética sino que tiene importantes beneficios. La consecuencia más directa y de mayor calado es la prevención de incendios forestales. El riesgo de incendios disminuye notablemente en las áreas explotadas para la obtención de biomasa. Se estima que la superficie quemada en incendios forestales en España podría reducirse hasta un 60% si se produce un amplio desarrollo de la biomasa forestal en España, (Regos, y otros, 2016).

2.4. Emisiones

Como se ha mencionado, una de las principales ventajas que presenta la biomasa, si no la principal, es su comportamiento bajo en emisiones de CO₂. Es importante analizar con detalle esta cuestión, ya que existe gran polémica entre los partidarios y detractores de la biomasa acerca del carácter renovable de la biomasa.

Se dice que la biomasa presenta un balance neutro de emisiones de CO₂, es decir, que las emisiones netas de dióxido de carbono en todo el ciclo de vida de la biomasa son nulas.

Como es evidente, en la combustión de la biomasa para producir energía se generan emisiones de CO₂. Sin embargo, estas emisiones son compensadas a largo plazo con la fijación de CO₂ realizada por las masas agrícolas o forestales durante la fotosíntesis.



Figura 1: Ciclo neutro de la biomasa

Además, como argumentan algunos expertos, existe un efecto indirecto de reducción de emisiones. En caso de no ser aprovechados como combustible por la industria, gran parte de los residuos de biomasa serían incinerados con la consecuente generación de emisiones (CSI/ECRA, 2017). Por tanto, los beneficios son dobles; existe un ahorro de emisiones al reemplazar los combustibles fósiles y un segundo ahorro vinculado a evitar el proceso de eliminación de residuos.

Ahora bien, el ciclo completo de la biomasa, desde su explotación hasta su aprovechamiento no es completamente nulo en cuanto a emisiones. Existen emisiones asociadas a la explotación de la biomasa, su transporte y transformación para ser utilizadas como combustible.

Además, estudios recientes cuestionan el carácter nulo en emisiones de CO₂ de la biomasa a largo plazo. Argumentan que la biomasa puede tener efectos irreversibles en el medio ambiente (Transport & environment, 2010). Una de las causas es la sustitución de grandes superficies forestales, fundamentales en la fijación de CO₂, por superficies de cultivos energéticos. El ciclo neutro de carbono de la biomasa ignora el efecto negativo de la eliminación de estas superficies. Asimismo, la sobreexplotación de la biomasa puede provocar una reducción de las masas forestales y agrícolas con la consecuencia de menor cantidad de CO₂ fijado.

La conclusión es que la biomasa tiene un efecto positivo en términos de emisiones de CO₂ en comparación con los combustibles fósiles tradicionales. La biomasa presenta un comportamiento bajo en emisiones de CO₂, aunque no nulo, ya que existen emisiones asociadas a los procesos de explotación, transformación y transporte de la biomasa. Además, existen algunos riesgos a largo plazo que hay que considerar, como la sustitución de superficies forestales por cultivos energéticos o la reducción de la superficie vegetal como consecuencia de la sobreexplotación de la biomasa. El objetivo es lograr un desarrollo sostenible de la biomasa, evitando los riesgos.

También es importante tener en cuenta otras emisiones más allá del CO₂. La combustión de la biomasa genera otras emisiones contaminantes, principalmente partículas de materia (PM) y óxidos de nitrógeno (NO_x) (IRBEA, 2016).

2.4.1. Partículas en suspensión

Las partículas en suspensión son pequeños cuerpos sólidos o gotas de líquido suspendidos en la atmósfera. Son una de las principales emisiones contaminantes generadas por la combustión de la biomasa. Son resultado de la mezcla de aerosoles primarios y secundarios. Los aerosoles primarios son partículas emitidas directamente por fuentes naturales y antropogénicas, mientras que los secundarios proceden de la transformación en la atmósfera de compuestos como el SO₂ o el NH₃ (Fundación Crana, 2019).

Las partículas en suspensión se clasifican en función de su tamaño en dos categorías; PM_{2,5} y PM₁₀, con diferentes efectos sobre la salud. Las PM_{2,5} o partículas finas, tienen un diámetro aerodinámico $\leq 2,5$ micras, mientras que las partículas PM₁₀ tienen un tamaño ≤ 10 micras. Más del 90% de las emisiones procedentes de la combustión de la biomasa entran dentro de la categoría PM₁₀, de las cuales en torno a un 75% se consideran PM_{2,5} (IRBEA, 2016). La inhalación de partículas finas es especialmente nocivas para la salud ya que pueden afectar gravemente a los pulmones.

2.4.2. Óxidos de nitrógeno (NO_x)

La combustión de la biomasa genera emisiones de algunos óxidos de nitrógeno; óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y, en menor medida, óxido nitroso (N₂O). Las emisiones de NO_x provocan graves efectos en el medio ambiente.

El NO₂ es un óxido que produce fuertes irritaciones en los pulmones y puede provocar problemas respiratorios si entra en contacto frecuente con el ser humano (IRBEA, 2016).

Por su parte, el N₂O, es un gas de efecto invernadero que contribuye de forma directa al cambio climático (IRBEA, 2016).

Además, la reacción de los óxidos de nitrógeno NO_x con SO₂ da lugar a la conocida como lluvia ácida, muy agresiva con la vegetación (IRBEA, 2016).

3. La biomasa en España

3.1. Estructura energética en España

Para entender bien el papel que juega la biomasa en la estructura energética en España, resulta de gran utilidad conocer las características del sector energético en su totalidad.

En primer lugar, es importante determinar la diferencia entre los conceptos de energía primaria y energía final, a los cuales se hace referencia a lo largo del proyecto.

La energía primaria se refiere a todas las formas de energía disponible en la naturaleza antes de ser sometida a procesos de transformación. La energía final, por el contrario, se refiere a la energía empleada en usos directos, como el calor o la electricidad.

El consumo de **energía primaria** en 2016 ascendió a **123.484 ktep**, de las cuales **5.185 ktep** procedieron de la **biomasa** como se puede ver en la Tabla 18. Por tanto, la biomasa supone un 4,2% de la producción total de energía primaria (Ministerio de Energía, 2016).

La energía primaria es transformada a través de los procesos de producción eléctrica (47.564 ktep) y el refinado y usos directos (72.480 ktep) (Ministerio de Energía, 2016). Además, parte de la energía primaria se contabiliza como pérdida en los procesos de transformación.

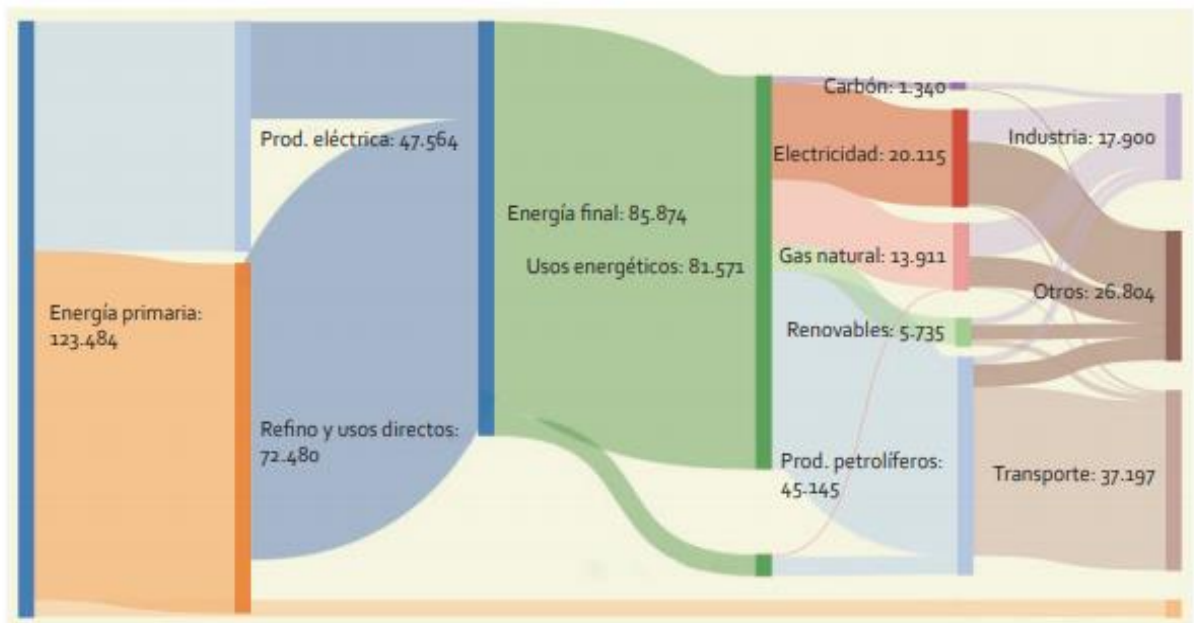


Figura 2: Diagrama de Sankey de la estructura energética de España 2016, (Ministerio de Energía, 2016)

Una vez transformada, la **energía final** empleada para uso directo es de **85.874 ktep**, de las cuales se utilizan **81.571 ktep** con **fines energéticos**.

Generalmente, se suele distinguir entre energía eléctrica por un lado, y el resto del consumo energético por otro. Esto se debe a que no se puede determinar el origen del MWh eléctrico que se consume de la red, mientras que sí se puede conocer el combustible utilizado en el resto de consumos energéticos.

Como se puede ver en la Figura 2, la electricidad se trata como una fuente de energía más, equiparable al resto de combustibles.

El consumo de **energía eléctrica** total en 2016 es igual a **20.115 ktep**, es decir, 233.937 GWh, que como se puede comprobar en la Tabla 20, se corresponde con la demanda eléctrica neta. Según los datos publicados en el balance de energía final (IDAE, 2017) la demanda eléctrica total en 2016 alcanzó **19.996 ktep**, que es prácticamente igual a los 20.115 ktep citados anteriormente. Se considera despreciable la ligera diferencia entre las dos fuentes.

El desglose de consumo por sectores revela que el sector transporte es el más intensivo energéticamente, con una demanda aproximada de 35.000 ktep. Esta demanda es abastecida principalmente por combustibles fósiles, entre los que destacan la gasolina, el gasóleo y el queroseno. Aunque exceda los límites del proyecto, es interesante señalar el aumento del uso de biocarburantes en el sector transporte. A día de hoy, la energía eléctrica tiene una presencia minoritaria en el transporte, aunque se espera un aumento paulatino en los próximos años con la irrupción del vehículo eléctrico.

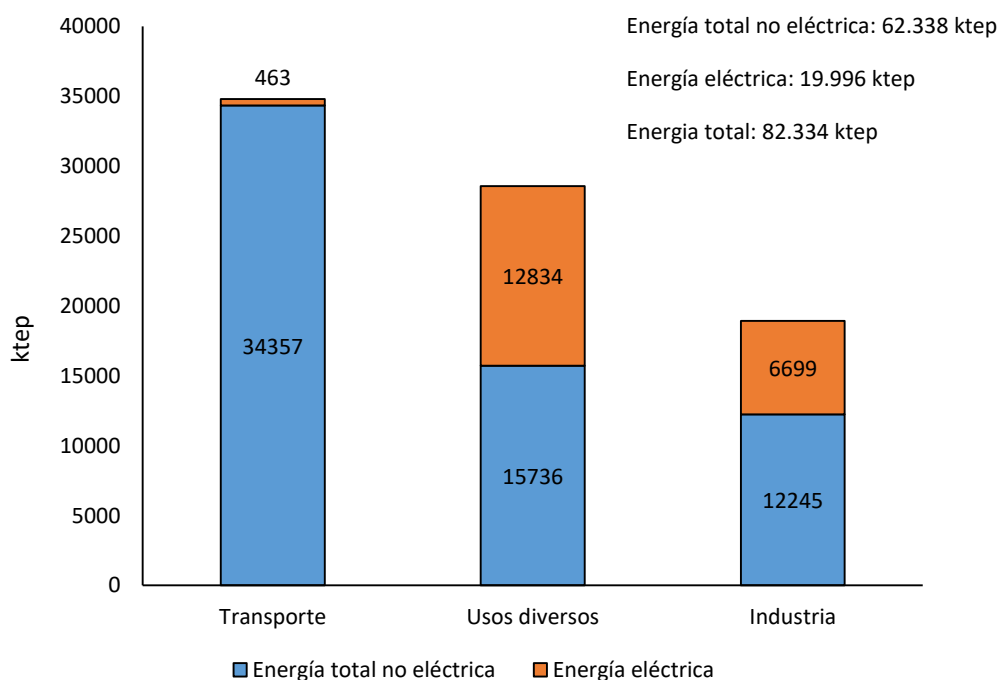


Figura 3: Consumo de energía final por sector, (IDAE, 2017)

En usos diversos se incluyen el sector servicios, el residencial, la agricultura y la pesca así como otros consumos energéticos sin determinar. El sector residencial es el principal consumidor de energía dentro de este grupo.

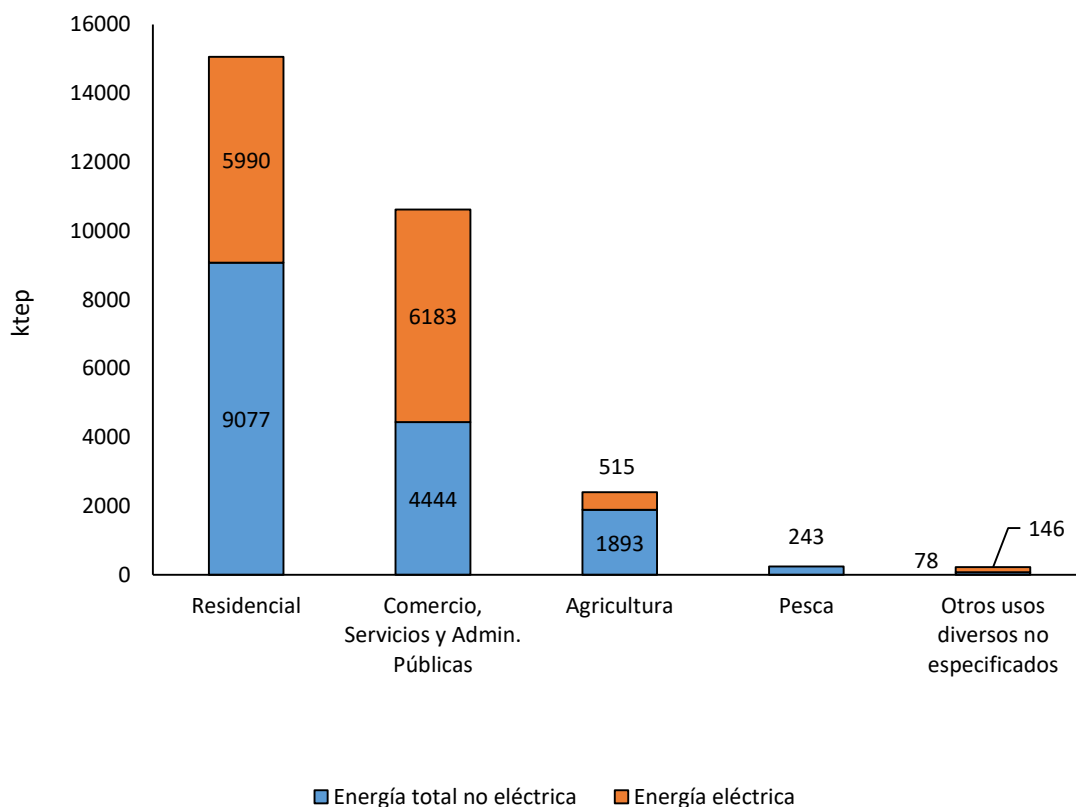


Figura 4: Consumo energético total en usos diversos, IDAE, 2016

Por último, aparece la industria como un sector clave en la demanda energética.

Dentro del sector industrial, las actividades más intensivas son la industria de los minerales no metálicos como el vidrio, la cerámica o el cemento, seguida de cerca por la industria siderúrgica. El sector de la pasta, papel e impresión, que es uno de los sectores estudiados en profundidad en este proyecto, presenta una demanda energética de 1.146 ktep a los que se suman 499 ktep de demanda eléctrica.

El otro sector industrial analizado en el proyecto es la industria del cemento. En la clasificación realizada por IDAE, que se muestra en la Figura 5, la industria del cemento no aparece por separado, si no que se incluye dentro del grupo de industrias de minerales no metálicos.

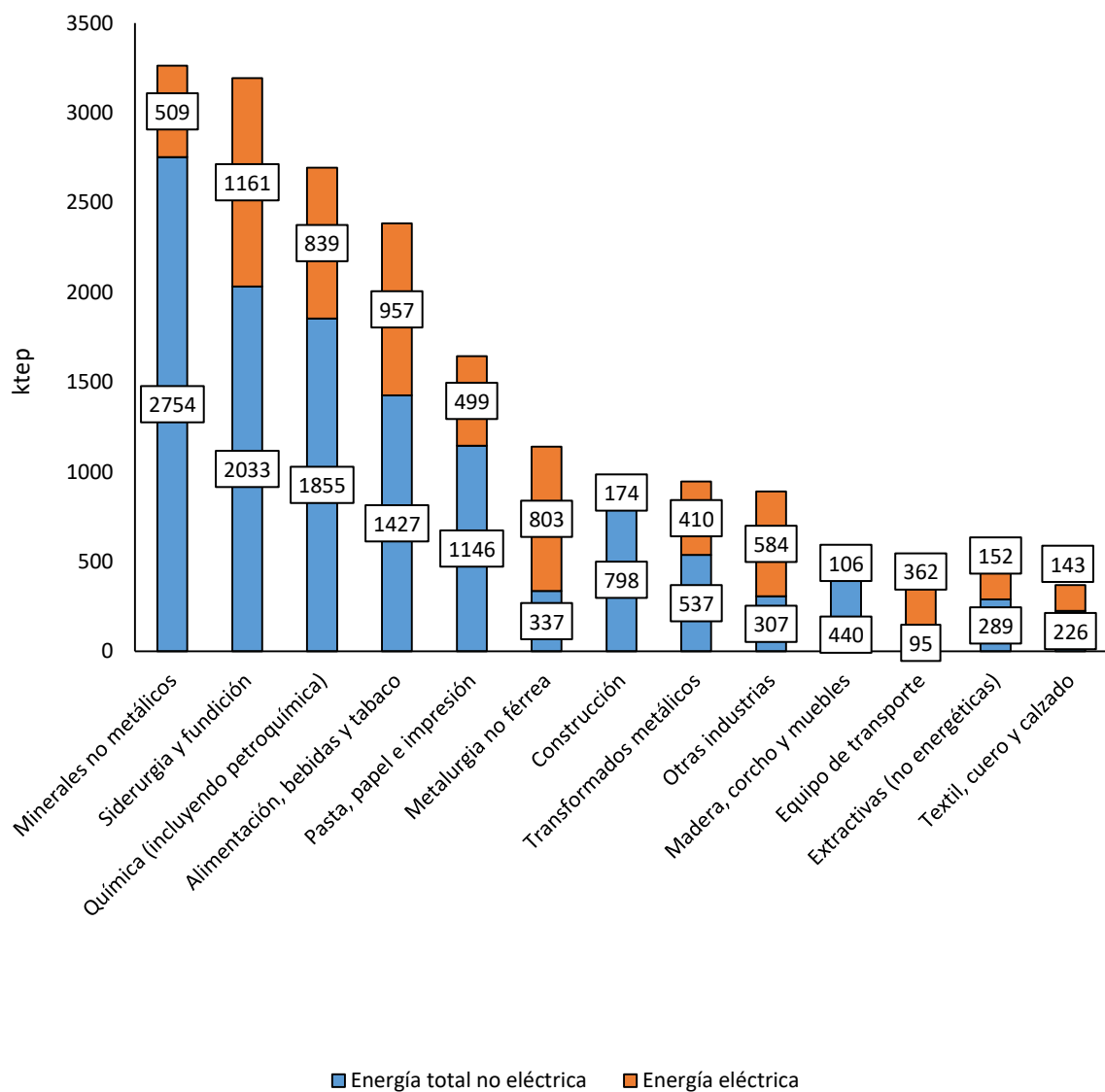


Figura 5: Consumo energético total en el sector industrial, IDAE, 2016

3.2. Energía de la biomasa

La biomasa es responsable de casi tres cuartas partes de la energía final de origen renovable, dejando de lado la energía eléctrica. En 2016, la energía final procedente de la biomasa ascendió a 4.011 ktep, es decir, un 4% de la energía final, Tabla 19. 3.464 ktep se consumieron en instalaciones térmicas, calderas, estufas y chimeneas ubicadas en los sectores residencial, industrial y servicios, mientras que los 547 ktep restantes se corresponden al calor generado en cogeneración. Además, aunque no se incluya como energía final procedente de la biomasa, también se consume una cantidad importante de biomasa en la generación de electricidad.

En resumen, la producción de **energía primaria** con origen en biomasa es de **5.185 ktep**. Tras pasar por los correspondientes procesos de transformación, la **energía final** consumida es de **4.011 ktep**, además de 4.038 GWh eléctricos, es decir, **347 ktep**, de energía eléctrica generada con biomasa.

La energía final procedente de la biomasa, excluyendo energía eléctrica, se destina principalmente al sector residencial, seguido de la industria. El alto consumo en el sector residencial se debe a la implantación de calderas y sistemas de calefacción que utilizan biomasa como combustible para cubrir la demanda térmica. La presencia de la biomasa en el sector residencial vive un periodo de expansión. En los últimos años se han desarrollado calderas con altos niveles de eficiencia, que, unidos a la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles, han convertido a la biomasa en una alternativa más que rentable. Asimismo, en áreas menos desarrolladas, especialmente en el medio rural, la biomasa se mantiene como combustible en sistemas de calefacción tradicionales, e incluso se utiliza en ocasiones como fuente de calor para cocinar. En 2016, el consumo energético de biomasa por parte del sector residencial fue de **2.502 ktep**, Tabla 21.

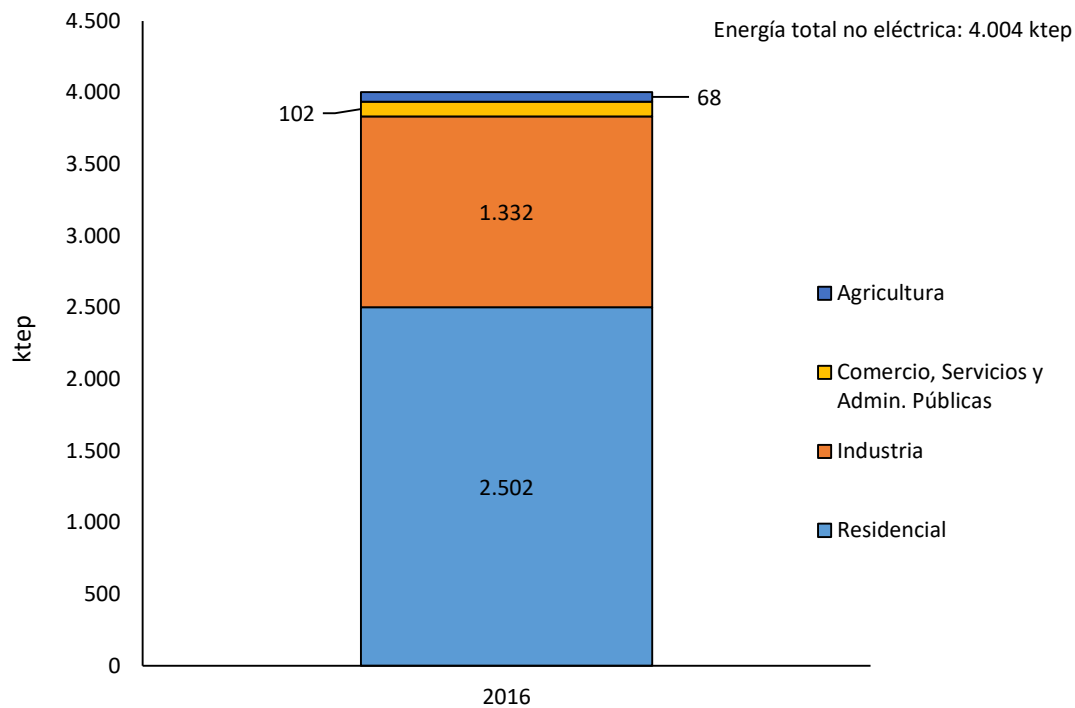


Figura 6: Consumo de energía final procedente de biomasa por sector, (IDAE, 2017)

Otro importante consumidor de biomasa es el sector industrial, que tiene especial relevancia en el desarrollo económico y social del país. La industria es un sector altamente intensivo desde el punto de vista energético, con una fuerte demanda tanto eléctrica como térmica.

La relevancia de la biomasa en el consumo energético de algunos sectores tiene su origen en el aprovechamiento de residuos biomásicos generados en el propio proceso productivo de la industria. Es el caso de las industrias de la pasta, papel e impresión, o la industria de la madera, corcho y muebles, que precisamente son los principales consumidores de biomasa a nivel industrial. La industria papelera tiene un consumo anual de 535 ktep, mientras que el consumo de la industria de la madera, corcho y muebles es de 312 ktep.

Por detrás de estas dos industrias, se sitúa la industria de los minerales no metálicos, con un consumo anual de 205 ktep. Dentro de este sector, destaca la industria del cemento, que junto con la industria del papel y la celulosa, es objeto de estudio de este proyecto.

El objetivo es que la biomasa incremente su relevancia en los próximos años para avanzar en el proceso de descarbonización de la industria. La industria es uno de los mayores generadores de emisiones, por lo que la biomasa tiene un papel importante en el futuro del sector industrial.

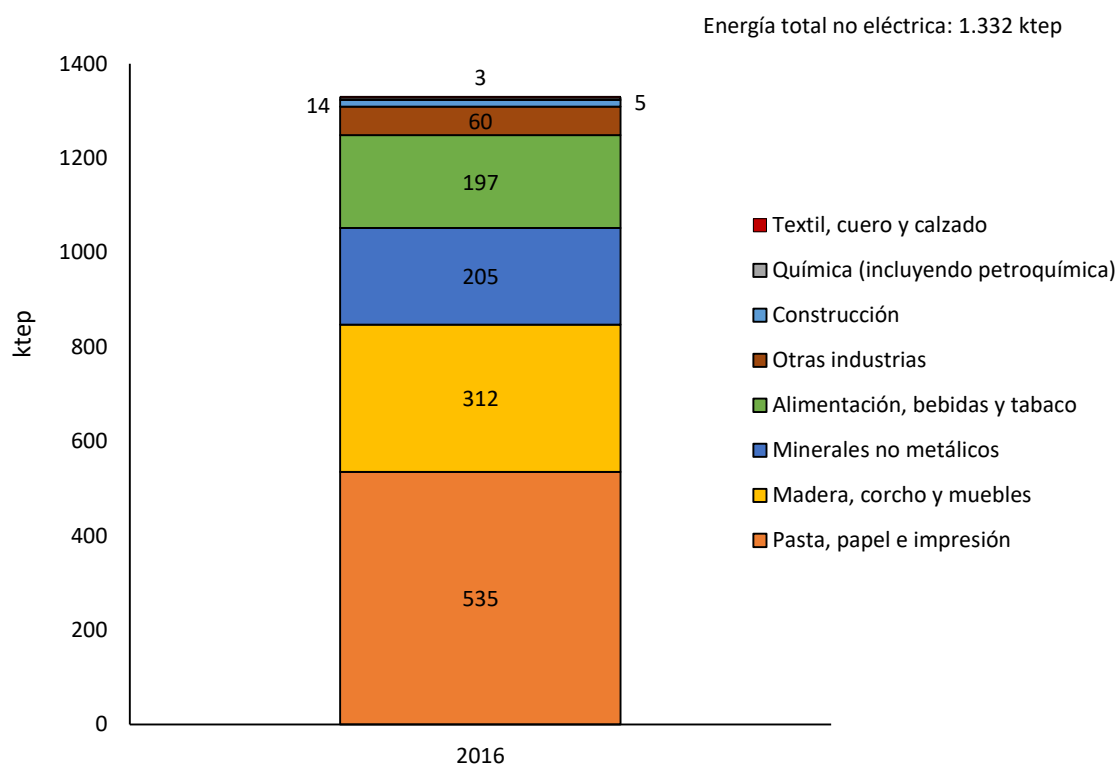


Figura 7: Consumo de energía final procedente de biomasa en el sector industrial, (IDAE, 2017)

Otras industrias en las que la biomasa tiene una presencia importante como combustible son la industria de la alimentación, bebidas y tabaco con un consumo de 197 ktep y la industria de la construcción, con una demanda de 205 ktep.

En la industria textil y la industria química, por el contrario, la biomasa tiene un papel muy limitado actualmente.

Por último, una pequeña parte del consumo energético del sector agrícola y el sector servicios es abastecida con biomasa, como se muestra en la Figura 6.

La energía final correspondiente a electricidad es de **20.115 ktep**, o, lo que es lo mismo, 233.937 GWh. Como es lógico, esta energía final coincide con la demanda neta de electricidad. Además, dentro de la generación eléctrica total, 4.038 GWh se producen con tecnologías que utilizan biomasa como combustible. Esta cifra equivale a **347 ktep**, o, en cifras relativas, un 1,5% de la generación eléctrica total.

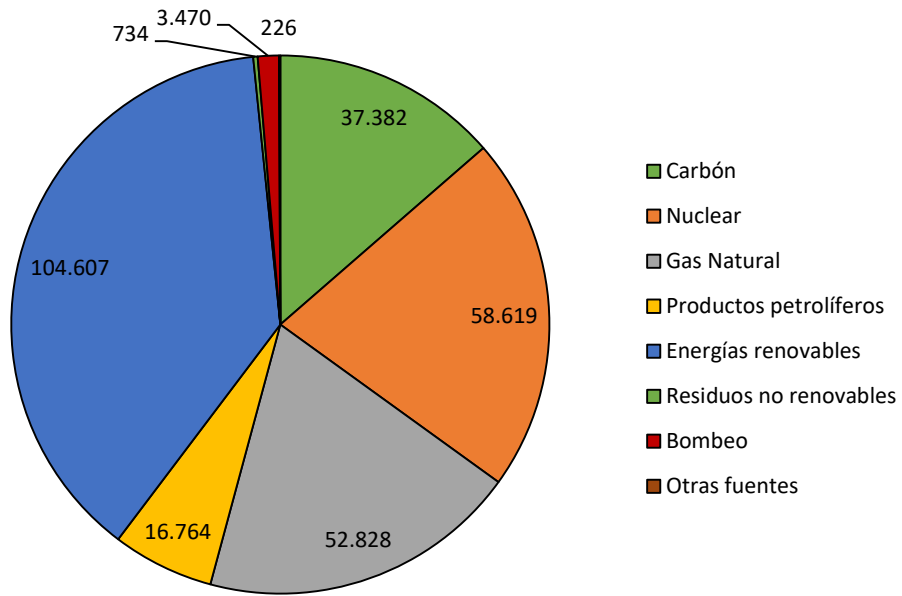


Figura 8: Estructura de generación eléctrica 2016 en GWh, (IDAE, 2017)

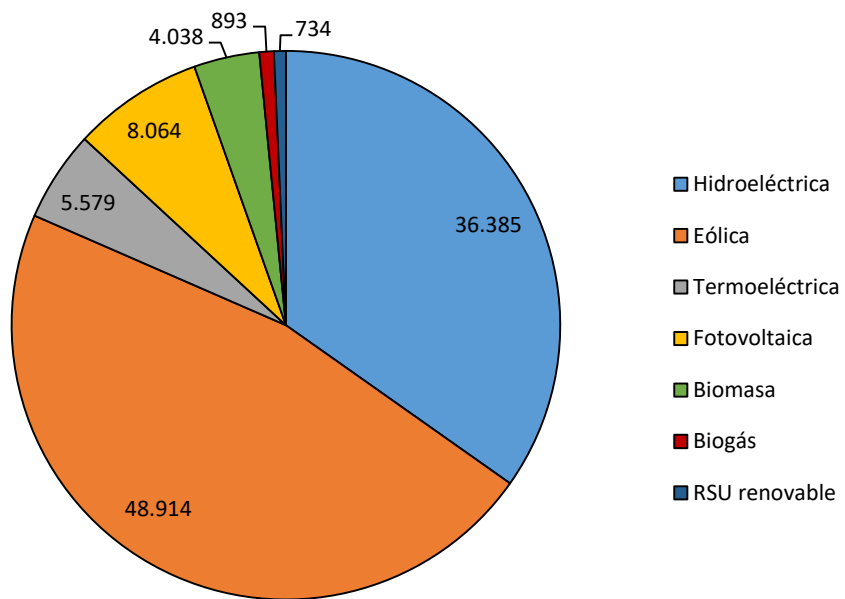


Figura 9: Generación eléctrica renovable 2016 en GWh, (IDAE, 2017)

4. El potencial de la biomasa en España

4.1. Presentación del potencial de la biomasa en España

España presenta unas condiciones óptimas para el desarrollo de la biomasa. El alto potencial que posee nuestro país está lejos de ser explotado en su totalidad.

España es el segundo país de la UE con mayor superficie forestal, con 27,7 millones de hectáreas, solo superado por Suecia (Ministerio de Agricultura, 2014). Sin embargo, de estas 27,7 millones de hectáreas, 9,3 millones están desarboladas.

A pesar de ser el segundo país de la Unión en superficie forestal, o el tercero, según algunas fuentes, nuestro país se sitúa en octava posición en cuanto a aprovechamiento de recursos forestales para fines energéticos (COSE, 2019).

Estos datos muestran que nuestro país presenta un alto potencial forestal todavía por desarrollar.

El Plan de Energías Renovables 2011-2020 (IDAE, 2009), incluye un análisis del potencial de la biomasa en España. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 1. Para realizar los cálculos se ha tenido en cuenta un valor medio de humedad del 45% y para el cálculo de costes se ha tomado un coste medio de transporte similar en todos los casos (distancia media de 60 km). El precio de venta puede incrementarse de 1,5 a 2 veces como consecuencia de la variabilidad de los costes de transporte o el nivel de humedad de la biomasa. Asimismo, el precio de venta impuesto por el vendedor también está influido por los precios de otros combustibles alternativos, así como por el margen de venta que persigue el vendedor. Sin embargo, se pueden utilizar como referencia de carácter general los costes medios de obtención publicados.

Tabla 1: Biomasa potencial disponible en España, (IDAE, 2009)

Biomasa potencial disponible				
Procedencia		Biomasa (t/año)	Biomasa (tep/año)	Coste Medio (€/t)
Masas forestales existentes	Restos de aprovechamientos madereros	2.984.243	636.273	26,59
	Aprovechamiento del árbol completo	15.731.116	3.414.158	43,16
Restos agrícolas	Herbáceos	14.434.566	6.392.631	20,97
	Leñosos	16.118.220		
Masas herbáceas susceptibles de implantación en terreno agrícola		17.737.868	3.593.148	53,39
Masas leñosas susceptibles de implantación en terreno agrícola		6.598.861	1.468.173	36,26
Masas leñosas susceptibles de implantación en terreno forestal		15.072.320	1.782.467	42,14
		88.677.194	17.286.850	

Cada año se producen en España en torno a 4 millones de tep de biomasa procedente de masas forestales existentes, lo que supone casi un 25 % del potencial total (IDAE, 2009).

Los restos agrícolas aportan más de 6 millones de tep, es decir, un 37% del potencial. La biomasa existente, por tanto, representa un 62% de la biomasa potencial total. Las masas susceptibles de implantación representan el 38% restante, es decir, alrededor de 7 millones de tep al año (IDAE, 2009).

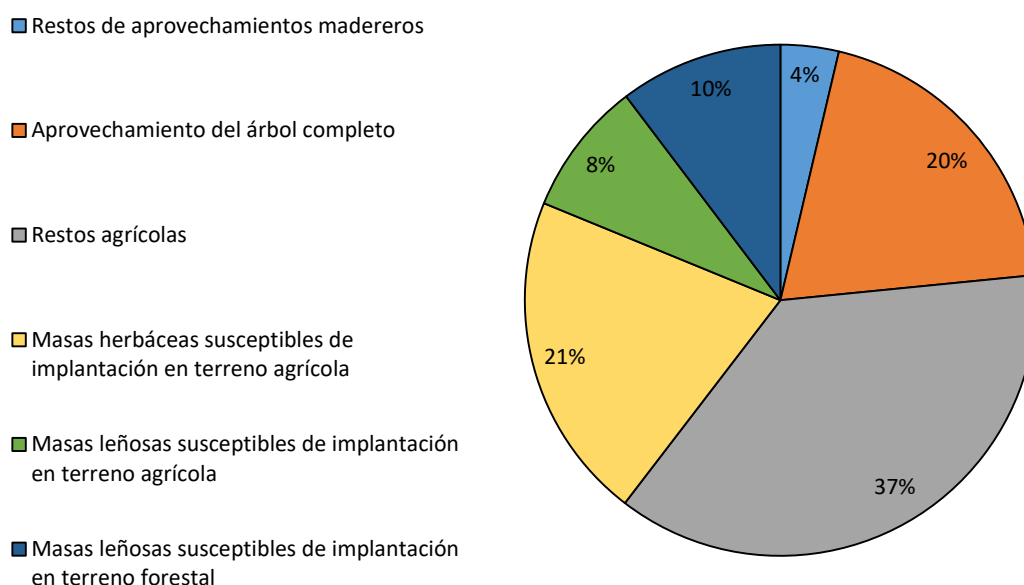


Figura 10: Porcentaje de biomasa potencial disponible sobre el total, (IDAE, 2009)

De esta forma, España se sitúa como el tercer país europeo en potencial de biomasa (Gregorio, 2012).

Actualmente, la **demand**a de biomasa con fines energéticos asciende a una cifra aproximada de **5.185 ktep**, es decir, menos de la tercera parte de la biomasa que potencialmente se puede producir en nuestro territorio (IDAE, 2017). El **potencial** estimado por el PER 2011-2020 es de **17.286 ktep** anuales. Este hecho es significativo de que todavía queda un largo camino por recorrer para poder explotar al máximo los beneficios de la biomasa.

A partir de los datos publicados, se realiza el cálculo del poder calorífico, es decir, la cantidad de energía por unidad de masa de biomasa. La metodología empleada para realizar dicho cálculo, consiste en calcular el cociente entre la disponibilidad de cada tipo de biomasa en tep/año y en t/año. El siguiente paso es convertir el poder calorífico de tep/t a GJ/t, para tener una visión más clara y poder comparar el poder calorífico con

otros combustibles. Los poderes caloríficos calculados se corresponden a un nivel de humedad del 45%.

Tabla 2: Cálculo del poder calorífico de la biomasa potencial disponible

Biomasa potencial disponible			
Procedencia		tep/t	GJ/t
Masas forestales existentes	Restos de aprovechamientos madereros	0,2132	8,93
	Aprovechamiento del árbol completo	0,2170	9,09
Restos agrícolas		0,2092	8,76
Masas herbáceas susceptibles de implantación en terreno agrícola		0,2026	8,48
Masas leñosas susceptibles de implantación en terreno agrícola		0,2225	9,32
Masas leñosas susceptibles de implantación en terreno forestal		0,1183	4,95

Como es de suponer, el poder calorífico de la biomasa es notablemente inferior al de combustibles fósiles como el petróleo o el carbón. La biomasa estudiada en el Plan de Energías Renovables tiene un poder calorífico ligeramente inferior a los valores estándar de biomasa publicados por IDAE. Esto se debe a que el poder calorífico de la biomasa disminuye con el nivel de humedad. Los poderes caloríficos publicados por IDAE están referidos a niveles de humedad inferiores al 45%. Aplicando el factor de corrección correspondiente para corregir el efecto de la humedad, deberíamos obtener valores similares.

Tabla 3: Poder calorífico inferior por combustible, (IDAE, 2019)

Combustible	GJ/t
GLP	45,89
Petróleo Bruto	42,55
Fuelóleo	39,88
GNL	45,10
Hulla industrial	24,10
Carbón subbituminoso	13,37
Biomasa en general	14,12
Paja de cereales	13,20
Leñas de podas	10,44

4.2. Curva de oferta de la biomasa en España

Por último, a partir de los costes medios de obtención por tonelada de biomasa y del poder calorífico calculado en tep/t mostrados en las Tabla 1 y Tabla 2, se realiza el cálculo del coste de la biomasa por unidad energética. Este resultado se obtiene realizando el cociente entre los costes en €/t y el poder calorífico en tep/t.

El análisis muestra que los restos agrícolas tienen el coste medio de obtención más bajo, en torno a 100 €/tep. Por detrás se sitúan los restos de masas forestales. El aprovechamiento del árbol completo tiene un coste de obtención notablemente mayor, por la mayor complejidad del proceso de obtención de la biomasa y el coste que supone dedicar exclusivamente el árbol a la obtención de biomasa. Por último aparecen las masas susceptibles de implantación, con un mayor coste debido a la inversión necesaria para poner en marcha estos cultivos.

Tabla 4: Cálculo de los costes de la biomasa por unidad energética

Biomasa potencial disponible		
Procedencia		€/tep
Masas forestales existentes	Restos de aprovechamientos madereros	124,71
	Aprovechamiento del árbol completo	198,86
Restos agrícolas		100,22
Masas herbáceas susceptibles de implantación en terreno agrícola		263,56
Masas leñosas susceptibles de implantación en terreno agrícola		162,97
Masas leñosas susceptibles de implantación en terreno forestal		356,33

A partir de los datos publicados en (Gregorio, 2012) y los correspondientes cálculos, se ha construido la curva de oferta de la biomasa potencial en España. En el eje horizontal se muestra la disponibilidad de cada tipo de biomasa en tep/año, mientras que en el eje vertical aparecen los costes medios de obtención de la biomasa a nivel nacional.

La mayor disponibilidad es de los restos agrícolas con 6.393 ktep anuales. Esta cantidad es superior a la demanda de biomasa en España en 2016, lo que nos da una idea del enorme potencial aún por desarrollar. Además, el coste de obtención es el más bajo, lo que hace de la biomasa de restos agrícolas la más atractiva en términos de cantidad y precio. En niveles de precio superior se sitúan el aprovechamiento del árbol completo de las masas forestales existentes (198,9 €/tep) y las masas herbáceas susceptibles de implantación en terreno agrícola (263,6 €/tep), que también presenta una alta disponibilidad, en torno a 3.000 ktep cada una.

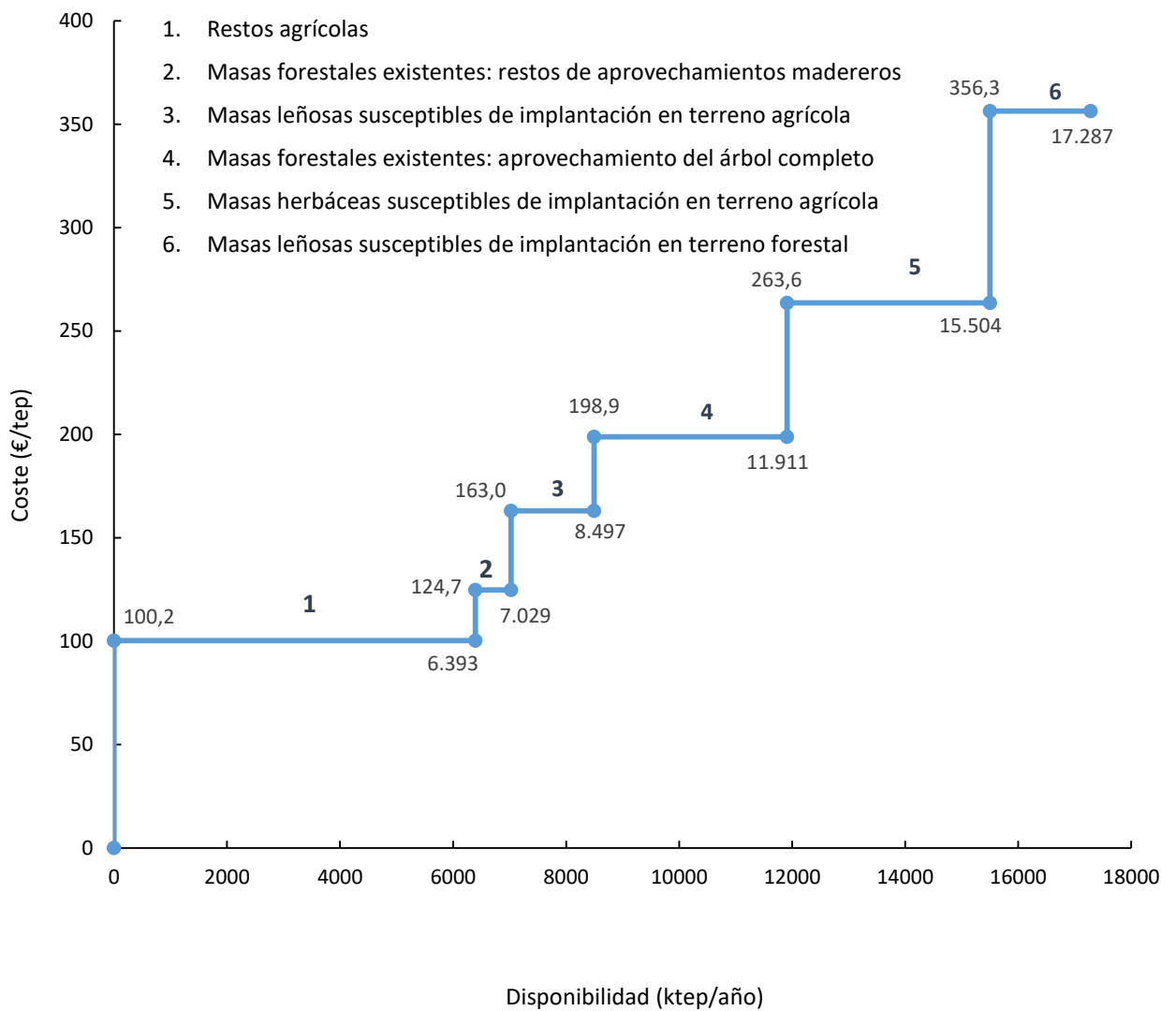


Figura 11: Coste y disponibilidad de la biomasa potencial en España

5. Análisis de los sectores

La descarbonización de la industria es imprescindible para cumplir con los objetivos de emisiones de CO₂ impuestos por la UE, ya que el sector industrial es el principal generador de emisiones a nivel global. Dentro de la industria, sobresalen las industrias energéticamente intensivas (EII), entre las que destacan industrias como el cemento, la cerámica, el cristal o la celulosa y el papel.

La biomasa juega un papel clave en la descarbonización de la industria, ofreciendo un combustible alternativo a los combustibles fósiles con un ciclo nulo de emisiones de CO₂. La alta disponibilidad de la biomasa y el enorme potencial que posee la biomasa en España (Gregorio, 2012) hacen de la biomasa una fuente de energía muy atractiva para la industria.

Los sectores elegidos son tres sectores en los que la biomasa tiene actualmente una presencia importante y, sobre todo, presentan un alto potencial todavía sin explotar. Además, estos sectores presentan naturalezas muy distintas y por ello ofrecen una imagen muy completa de los sectores productivos en su conjunto.

En primer lugar, se realizará un análisis de la industria del papel y la celulosa, que es actualmente el primer consumidor de biomasa a nivel industrial. Se caracteriza porque la biomasa es la propia materia prima del proceso productivo. Otros sectores, como el sector de la madera, poseen características muy próximas al sector del papel, por lo que su estudio es similar.

En segundo lugar, se elige el sector del cemento, que presenta unos rasgos distintos al sector del papel ya que la biomasa no forma parte del proceso productivo. Sin embargo, se trata de una industria altamente intensiva a nivel energético y pionera en el aprovechamiento de residuos como combustible.

Por último, se analiza el sector eléctrico. Se trata de un sector fundamental para tener una visión global del consumo energético de un país. A pesar de que la biomasa todavía tiene un papel limitado en la generación eléctrica, existe un gran potencial y se están dando pasos en su desarrollo con la puesta en marcha de nuevas plantas de generación. Además, la perspectiva de transformar las centrales térmicas de carbón, cuya desconexión está prevista en 2030, en plantas de biomasa, dispara las posibilidades de la biomasa como tecnología de generación en 2030.

5.1. Industria de la celulosa y el papel

La industria de la celulosa y el papel es el principal consumidor de biomasa a nivel industrial en España, lo que demuestra el peso del sector en la economía española y la importancia de la biomasa dentro de esta industria.

La industria de la celulosa y el papel consume grandes cantidades de combustible ya que es un sector altamente intensivo en energía, como se puede observar en la Figura 5. Además, la industria del papel lidera descarbonización de la industria, gracias al efecto combinado de las mejoras en eficiencia, el papel de la cogeneración y el uso de biocombustibles (ASPAPPEL, 2018).

Nuestro país es el 5º fabricante de celulosa de la UE y el 6º fabricante de papel (ASPAPPEL, 2018). A nivel nacional existen 71 plantas de producción papel y otras 10 de celulosa, concentradas principalmente en el litoral del Levante, Cataluña, Aragón, Navarra y País Vasco, como se muestra en la Figura 12. Algunas de estas plantas son plantas integradas, es decir, plantas en las que se produce simultáneamente papel y celulosa.



Figura 12: Mapa de fabricantes de papel y celulosa en España, (ASPAPPEL, 2018)

5.1.2. Los residuos en la industria del papel y su aprovechamiento

La industria del papel es una biondustria circular, ya que emplea materias primas locales, renovables y reciclables. La cadena de valor de la industria es circular, ya que los residuos generados durante el proceso productivo se reutilizan como materia prima o fuente de energía en la propia industria o en otras industrias. Además, el producto final que se fabrica es reciclable, ya sea aprovechado por la propia industria o por otras.

En el proceso papelerero se generan residuos con alto contenido en biomasa (cortezas, lignina, restos de fibras no aptos ya para el reciclaje...), que son reaprovechados para diversos usos, entre los que destaca la valorización energética, es decir, la reutilización de los residuos como combustible.

El sector papelerero es el mayor productor y consumidor industrial de biomasa en nuestro país, como se puede ver en la Figura 5. Alrededor de una tercera parte del combustible que utiliza el sector es renovable (biomasa y biogás) y el resto es gas natural.

La industria papelera genera miles de toneladas de residuos cada año, que se clasifican en tres categorías en función de la peligrosidad.

- Residuos no peligrosos específicos de la actividad papelera. Se componen principalmente de la materia prima que no puede ser aprovechada en el proceso productivo y los residuos generados.
- Otros residuos no peligrosos
- Residuos peligrosos. Proceden de las actividades de operación y mantenimiento. Proceden de restos de aceites, fluorescentes, baterías, etc.

Casi la totalidad de los residuos generados por la industria son residuos no peligrosos específicos de la actividad papelera, que son aquellos residuos que a priori pueden ser reutilizados dado su alto contenido en biomasa.

Tabla 5: Residuos generados por la industria papelera en toneladas, (ASPAPPEL, 2018)

	2015	2016	2017
Residuos no peligrosos específicos de la actividad papelera	1.488.563	1.344.009	1.269.041
Otros residuos no peligrosos	90.877	239.579	114.021
Residuos peligrosos	1.753	1.601	1.192
Total (toneladas)	1.581.193	1.585.189	1.384.254

Los residuos específicos de la actividad papelera son reutilizados para diversos fines, ya que presentan unas características heterogéneas adecuadas para distintos usos. Incluso una gran parte de los residuos, en torno a un 20%, son enviados directamente a vertederos y por tanto no son reutilizados. A pesar de que la cifra es alta y el objetivo de la industria es que este porcentaje disminuya en el futuro, se trata de una cifra positiva ya que hace apenas una década el 38% de los residuos eran directamente enviados al vertedero.

El principal uso al que se destinan los residuos es la valorización energética en la propia industria, es decir, como fuente de energía. Otros usos están orientados a la agricultura, como el compostaje o el uso directo agrícola, y al aprovechamiento en otras industrias, ya sea como materia prima o como fuente directa de energía.

Los resultados de 2017 son especialmente positivos, ya que los residuos destinados a la valorización energética dentro de la propia industria aumentaron del 27,8% al 36,7%.

Tabla 6: Gestión de los residuos papeleros %, (ASPAPPEL, 2018)

	2015	2016	2017
Vertedero	19,8	20,9	19,3
Valorización energética en la propia fábrica	25,2	27,8	36,7
Valorización energética en otras industrias	2,6	2,3	2,3
Uso directo agrícola	15,2	13,6	8,8
Compostaje	14,6	14,5	7,3
Reciclado como materia prima en la industria cerámica	6,3	9,7	4,6
Reciclado como materia prima en la industria cementera	0,4	2,2	2,7
Materia prima en otras industrias	4,3	2,2	1,8
Otros destinos	4,6	5,2	3,2
No indicado	7,0	1,5	13,4

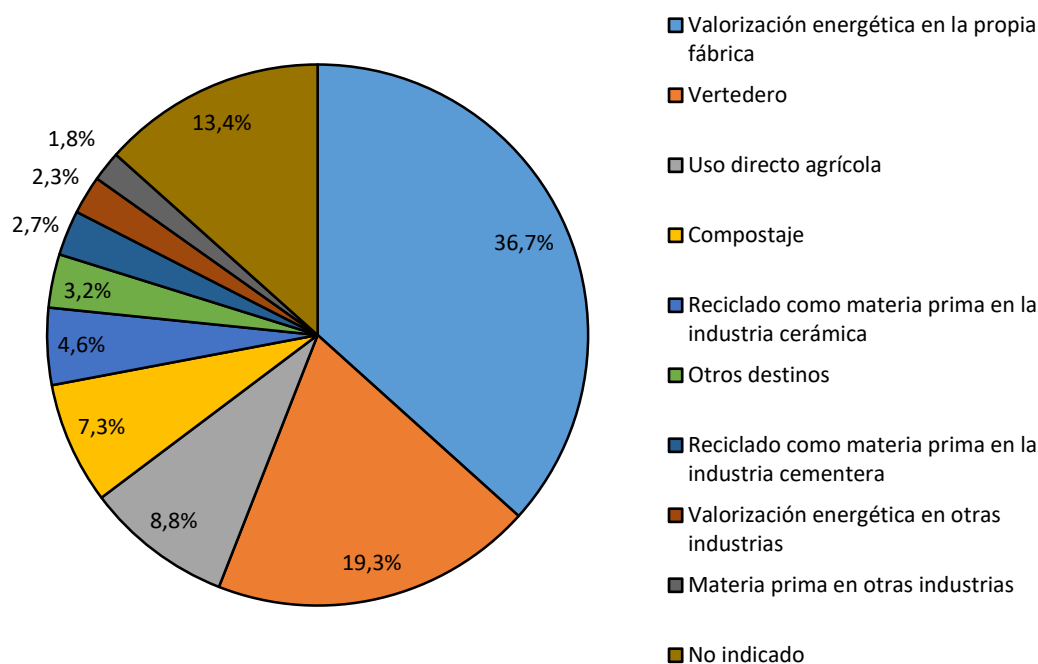


Figura 13: Gestión de los residuos papeleros 2017, (ASPAPPEL, 2018)

5.1.2. Consumo energético en la industria del papel en España

El análisis de los residuos generados por la industria muestra que gran parte de la biomasa es reutilizada como combustible en la propia industria, concretamente un 36,7% en 2017. Los residuos biomásicos generados por el proceso papelerero son capaces de abastecer energéticamente en torno a una tercera parte del consumo total de combustibles de la industria (ASPAPPEL, 2018). Los combustibles obtenidos tras la valorización energética de los residuos proceden de las cortezas de la madera y el licor negro o *'black liquor'*, un líquido oscuro con alto contenido en lignina, que es el componente que contiene el poder calorífico de la madera (AFANDPA, 2015) (La Información, 2009).

En general, la industria española emplea únicamente estos residuos como fuente de energía procedente de la biomasa, lo que limita claramente el potencial de la biomasa en el mix energético de la industria papelera.

Sin embargo, en algunas plantas, el uso de la biomasa se ha extendido a otros tipos de biomasa, principalmente biomasa forestal procedente de bosques cercanos. Es el caso de la planta integrada de Smurfit Kappa Nervión, en Vizcaya, que presenta una tasa de autosuficiencia energética del 65% gracias al aprovechamiento de residuos forestales generados por operaciones silvícolas como podas, clareos o desbroces (ASPAPPEL, 2012). Las inversiones realizadas en esta planta desde 2008 se sitúan en torno a los 20 millones de euros (Bioenergy International, julio de 2012).

Otro ejemplo del avance de la biomasa en la industria papelera en España es la biofábrica de papel de Ence en Pontevedra, prácticamente autosuficiente en el consumo de energía, que utiliza los residuos del proceso papelero y biomasa de los bosques gallegos (ASPAPPEL, 2013). Esta planta está preparada para utilizar un 100% de biomasa como combustible.

En los últimos años, la tendencia en la industria papelera en España se dirige en esta dirección. Cada vez más plantas están equipándose para aumentar las tasas de utilización de biomasa en la producción energética. Recientemente, la papelera LC Paper 1881 ha culminado la instalación de una caldera de biomasa Binder RKK en su planta de Besalú (Gerona), con una capacidad de producción de 4 toneladas/hora de vapor industrial. Se estima que la nueva caldera supondrá un ahorro del 10% en el consumo de combustible y reducirá las emisiones de CO₂ en 6.800 toneladas anuales, que significa una reducción del 83% (INYPESA, 2017). La planta se alimenta exclusivamente de biomasa local dada la alta disponibilidad de biomasa en los alrededores de la planta. La inversión realizada por la papelera se sitúa en torno al millón de euros, concretamente 950.000 euros (La Vanguardia, 2017).

Si esta tendencia es adquirida por la industria española a nivel general, la biomasa podrá desarrollar su potencial como combustible en el consumo energético de la industria. Mientras tanto, la situación es que la biomasa aporta únicamente una tercera parte del consumo total (ASPAPPEL, 2018). Esta tendencia lleva presente en la industria aproximadamente desde 2009, como se puede ver en la Figura 14.

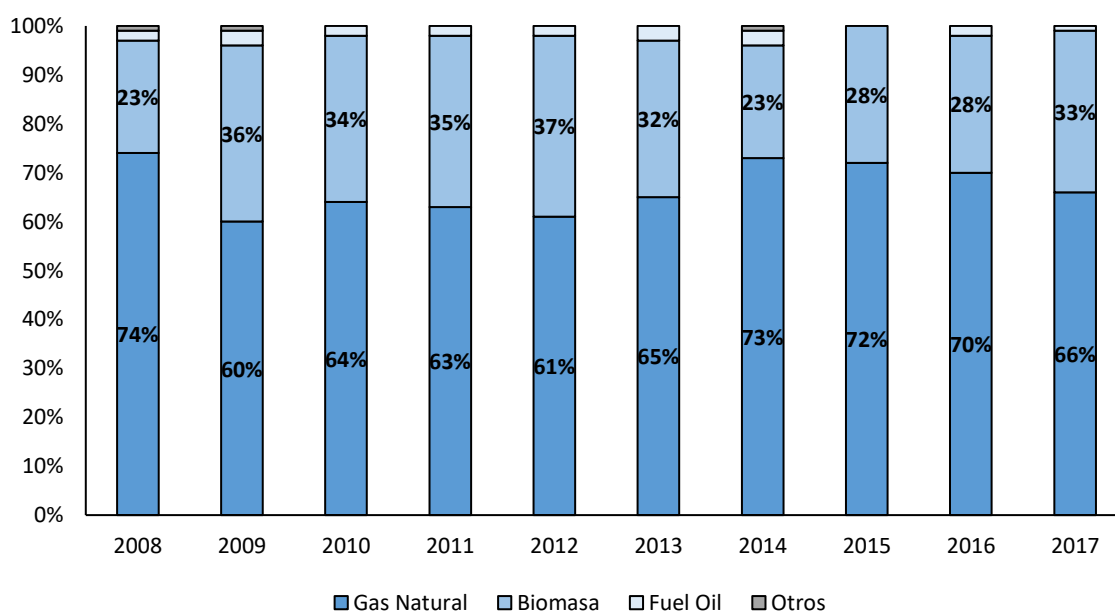


Figura 14: Porcentaje de consumo de combustible sobre el total, (ASPAPPEL, 2018)

El principal combustible utilizado por la industria papelera es el gas natural, seguido por la biomasa. El fuelóleo y otros combustibles son utilizados ocasionalmente de forma marginal, como se puede ver en la Figura 14. El estudio del consumo energético del sector se centra en los combustibles consumidos de forma directa para la generación de energía, excluyendo del análisis el consumo de energía eléctrica. Posteriormente se realizará el análisis del sector eléctrico de forma separada.

El consumo total en 2017 ascendió a 87170 TJ, es decir, **2.040 ktep**, de los cuales 29078 TJ proceden de la biomasa, esto es, **680 ktep**, (ASPAPPEL, 2018).

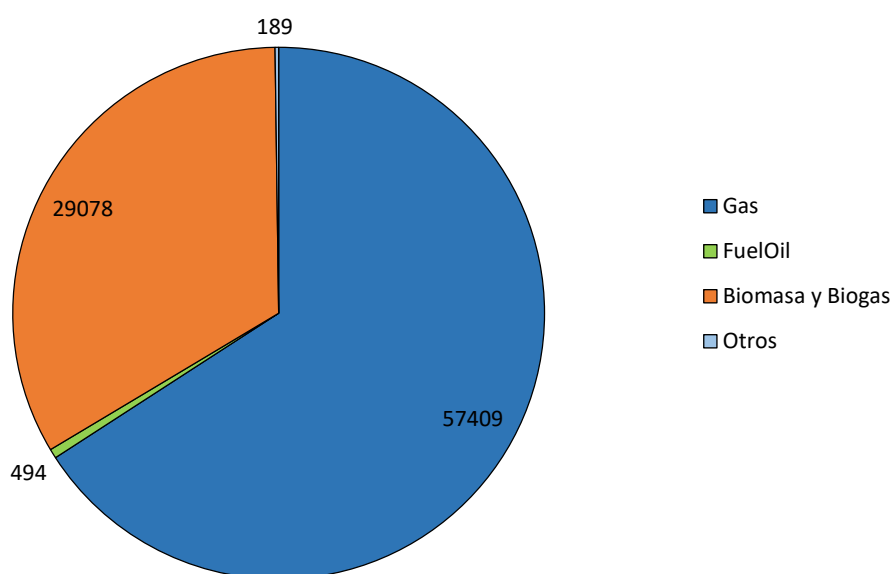


Figura 15: Consumo de combustibles 2017 sector papel (TJ), (ASPAPPEL, 2018)

En resumen, dos terceras partes del consumo de energía proceden del gas natural, mientras que únicamente una tercera parte de la energía tiene su origen en la biomasa, tendencia que lleva presente en la industria a lo largo de toda la última década.

El consumo total de energía de la industria está estrechamente ligado a la producción de papel y celulosa como es evidente, que a su vez está determinada por la situación económica que atraviesa la industria. Tras sufrir fuertemente los efectos de la crisis económica, la industria del papel ha experimentado un periodo de recuperación, como se observa en la Figura 16. Las estadísticas publicadas por ASPAPPEL, solo revelan el consumo de combustibles del sector en 2014 y 2017.

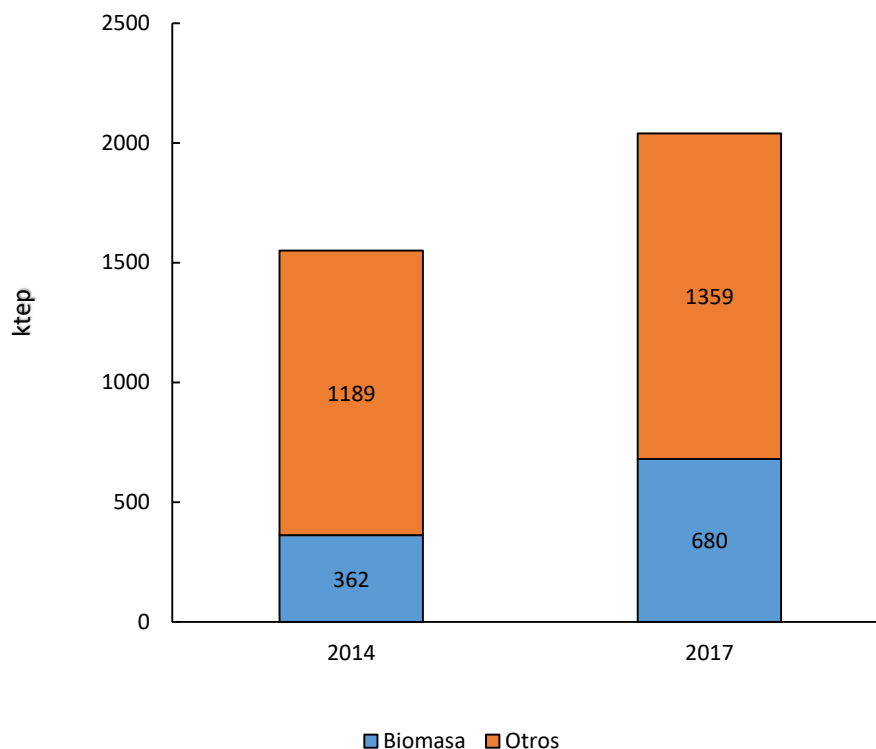


Figura 16: Consumo energético del sector papel, ASPAPEL

La mayor parte de la energía consumida se genera en plantas de cogeneración instaladas adyacentemente a las plantas de producción. Actualmente, la potencia instalada es de 1086 MW (ASPAPEL, 2018). Las plantas de cogeneración producen electricidad y calor simultáneamente optimizando el consumo de combustible. Además, frecuentemente generan excedente de electricidad, que puede ser aportada a la red.

El objetivo de la industria europea, al que se suscribe la industria española a través de ASPAPEL, es alcanzar un grado de descarbonización del 80% en 2050 (CEPI, 2011). El 60% de esta reducción se conseguirá a través de una mayor penetración de los combustibles renovables en la industria, destacando la biomasa, combinado con avances tecnológicos y mejoras en eficiencia (CEPI, 2011). De esta forma, se confirma que las perspectivas de la industria pasan por un mayor peso de la biomasa en el mix energético.

5.1.3. Consumo energético a nivel europeo

A día de hoy, el consumo medio de biomasa en la industria del papel y la celulosa asciende al 58,8% a nivel europeo, lo cual supone un nivel notablemente superior al 33% logrado en España (CEPI, 2018). Este dato incluye a los países miembros de la Confederation of European Paper Industries (CEPI), excluyendo a Eslovenia, Hungría y Rumanía.

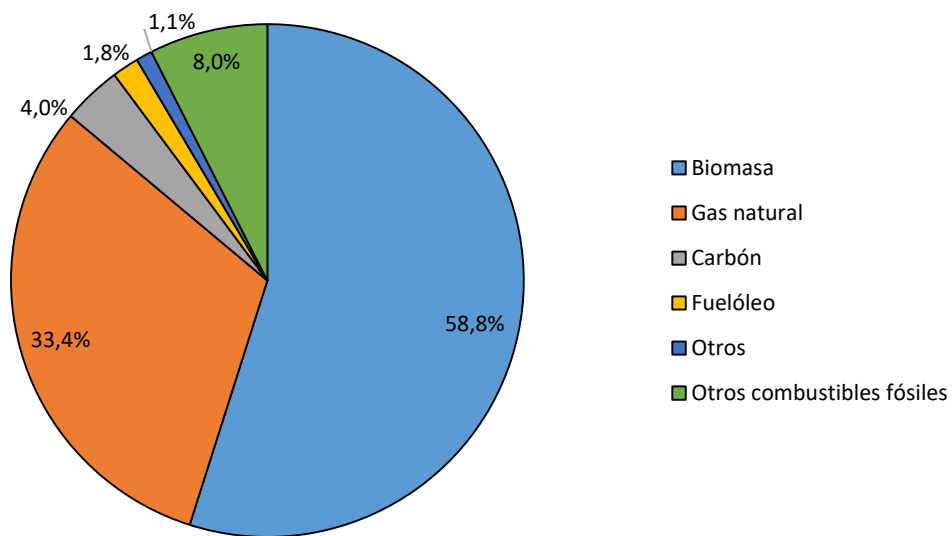


Figura 17: Consumo de combustible en la industria del papel en Europa 2016, (CEPI, 2018)

La contribución de la biomasa al mix energético del sector del papel y la celulosa ha aumentado progresivamente en los últimos años y se espera una tendencia similar en el futuro, como se puede ver en la Figura 18.

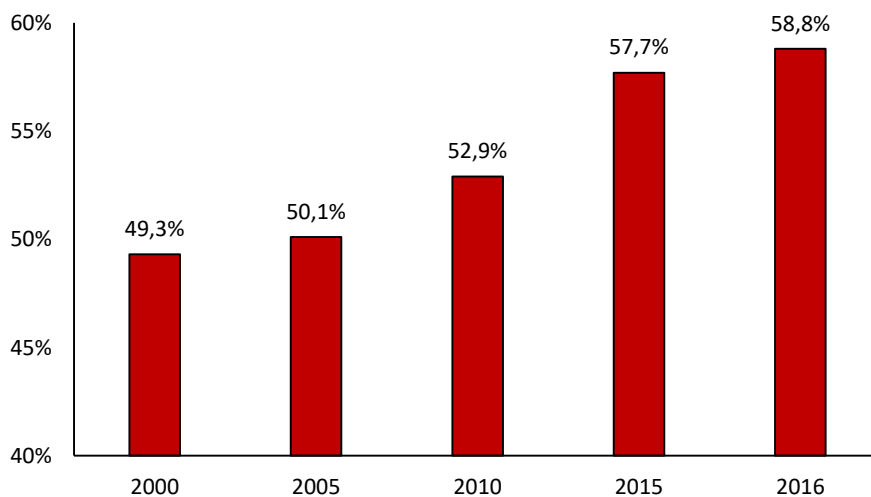


Figura 18: Consumo de biomasa sobre el consumo energético total de la industria del papel en Europa, (CEPI, 2018)

El país líder en el uso de biomasa en la industria del papel y la celulosa es, indiscutiblemente, Suecia. La industria sueca es una de las más importantes de Europa, siendo el primer productor de celulosa y el tercero de papel, (ASPAPPEL, 2018). Además, es el país europeo con mayor superficie forestal, (Ministerio de Agricultura, 2014). El país escandinavo combina una industria sólida y tecnológicamente avanzada con una alta disponibilidad de biomasa. En el ranking le siguen Portugal, Finlandia y Polonia, con una contribución de la biomasa en el mix energético alrededor del 70%. La media de los 27 se sitúa en un 50% en el periodo comprendido entre 2005 y 2007, como se ha visto anteriormente.

España es uno de los países con menor uso de biomasa como combustible en la industria, con un 32%. Esta cifra coincide con las estadísticas publicadas por ASPAPPEL, que se pueden ver en la Figura 14.

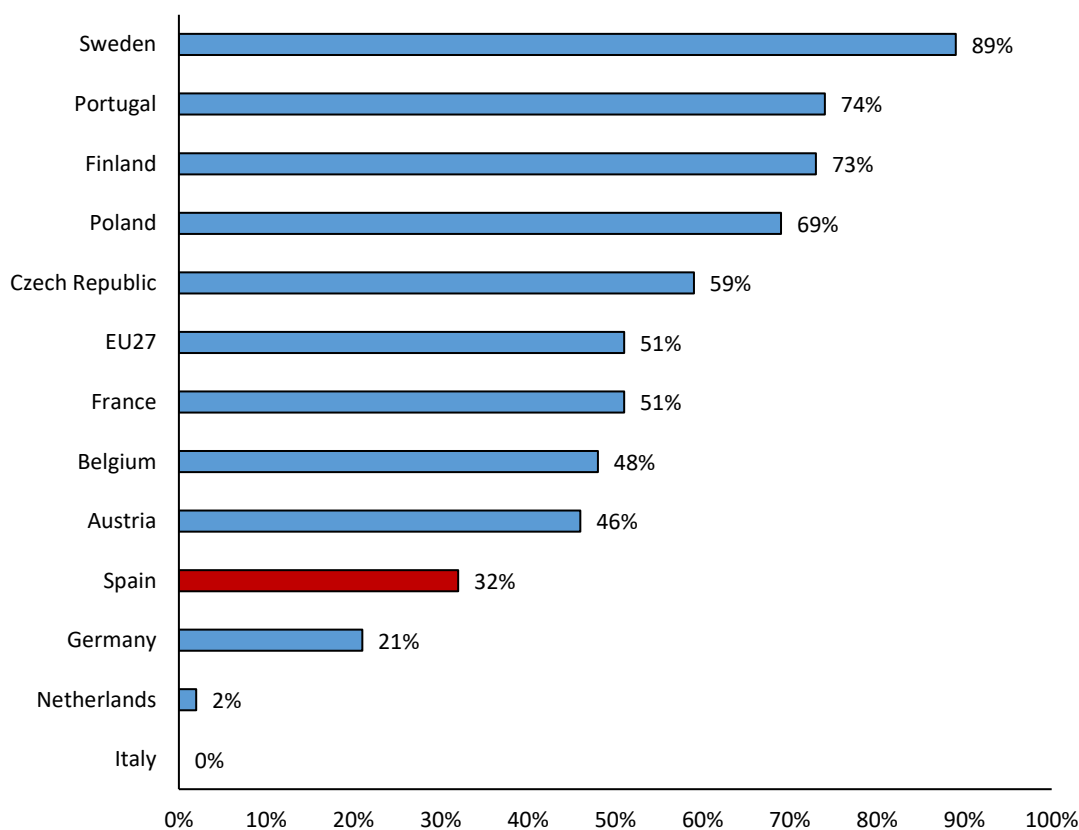


Figura 19: Consumo de biomasa sobre el total, industria del papel (2005-2007), (Ecofys, 2009)

5.1.4. Estimación del potencial de la biomasa en la industria del papel en 2030

El principal obstáculo para una mayor presencia de la biomasa en el mix energético de la industria papelera es la disponibilidad de biomasa. La disponibilidad limitada de recursos junto con la creciente demanda de biomasa por parte de otros sectores, que en ocasiones provocan que el precio de la biomasa no sea competitivo para la industria, limitan la contribución de la biomasa como combustible en la industria de la celulosa y el papel (Laurijssen, 2013).

Es difícil estimar el potencial exacto de la biomasa como combustible en la industria española del papel y la celulosa con las condiciones actuales. Lo que es evidente es que ese potencial existe, ya que el peso de la biomasa en el mix se sitúa en torno al 33% desde la última década, claramente por debajo de la media de los países europeos. Además, existen ejemplos dentro de la industria española de que se puede incrementar el aprovechamiento de la biomasa a niveles que se sitúan en torno al 65%, incluso llegando al 100% con las inversiones pertinentes.

Desde nuestro punto de vista, consideramos que un escenario en el que la industria del papel sea completamente autosuficiente a partir de la biomasa es prácticamente utópico, especialmente teniendo en cuenta que el porcentaje de contribución a día de hoy es del 33%. Sin embargo, analizando la situación en países de nuestro entorno y en algunas plantas a nivel nacional, es evidente que existe un gran potencial de desarrollo.

La planta de Smurfit Kappa Nervión es una clara referencia para la industria del papel y la celulosa a nivel nacional. Esta planta presenta un porcentaje de utilización de biomasa del 65%, que puede ser utilizado como referencia para la penetración de la biomasa en España en 2030.

5.2. Industria del cemento

El sector del cemento en España, fuertemente ligado al sector de la construcción, es un sector industrial con fuerte presencia en España. A pesar de que en los últimos años ha experimentado una clara desaceleración como consecuencia de la crisis económica, el sector ha sobrevivido en gran parte gracias a las exportaciones. España cuenta con 33 plantas destinadas a la producción de cemento y clínker, distribuidas por toda la geografía.

La industria del cemento está considerada como una de las industrias electrointensivas de la economía española, dado el gran consumo energético que requiere.

Además, la industria del cemento tiene un impacto ambiental particularmente nocivo. La industria cementera es responsable del 5% de las emisiones de CO₂ a nivel global (Andrew, 2018). Indudablemente, se trata de un sector clave en el proceso de descarbonización de la industria.

5.2.1. Consumo energético de la industria del cemento en España

La industria cementera está firmemente comprometida con la descarbonización y el uso sostenible de los recursos. En las últimas décadas, los combustibles fósiles que se han utilizado tradicionalmente en el sector, principalmente carbón y petróleo, están siendo gradualmente reemplazados por combustibles alternativos procedentes de residuos, como la biomasa.

Sin embargo, los combustibles fósiles siguen siendo mayoritarios en el consumo de combustible de la industria. La presencia de los combustibles alternativos en la industria se sitúa aún en torno al 25% del consumo energético total, como se ve en la Figura 24. El 75% restante del consumo energético corresponde a combustibles fósiles. En el detalle del consumo de combustibles de las empresas asociadas a OFICEMEN, mostrado en el Anexo 10.5, se puede ver que de las 2.306.158 toneladas de combustibles consumidas en 2016, un total de 1.518.242 proceden de combustibles fósiles, de las cuales 1.464.800 corresponden a coque de petróleo, que es claramente el combustible más utilizado en la industria del cemento (CEMA, 2016). Estos datos se muestran gráficamente en la Figura 20.

El uso de combustibles alternativos en nuestro país está regulado por licencias que requieren un largo proceso burocrático para ser obtenidas. De las 33 plantas de cemento que operan en España, 29 tienen permiso para utilizar combustibles alternativos (Oficemen, 2016). Además, se necesita autorización para cada uno de los 78 combustibles alternativos catalogados.

Los combustibles alternativos se clasifican en tres categorías, en función de su origen más o menos renovable (CEMA, 2016).

Combustible alternativo de origen fósil:

- Residuos de hidrocarburos.
- Aceites minerales usados.
- Plásticos.
- Disolventes, pinturas, barnices y otros residuos líquidos.
- Otros.

Combustible alternativo con contenido parcial en biomasa:

- Neumáticos fuera de uso.
- Residuos de fragmentación de vehículos fuera de uso.
- Lodos de papelería, procedentes del procesamiento de la pasta de papel y ricos en celulosa y plástico.
- Combustible preparado a partir del rechazo de plantas de tratamiento de residuos municipales e industriales (CDR).
- Otros residuos con biomasa, que incluyen residuos de envases y residuos de las industrias del cuero, de la piel y textil.

Combustible alternativo procedente de biomasa:

- Biomasa forestal y residuos de origen vegetal.
- Residuos de industrias cárnicas, que incluyen harinas cárnicas y grasas animales.
- Lodos de depuradora de aguas residuales urbanas.

Como se ha mencionado antes, el consumo de combustibles fósiles está cerca del 75% del consumo total. El 26,6% restante se reparte entre combustibles alternativos fósiles, alternativos con contenido parcial en biomasa, y en combustibles alternativos de biomasa.

Dentro de los combustibles alternativos, el mayor protagonismo le corresponde a los combustibles alternativos con contenido parcial en biomasa. El consumo en 2016 ascendió a 442.310 toneladas, como se puede ver en la Figura 20. En este grupo, el consumo se reparte principalmente entre los combustibles derivados de residuos (CDR) y los residuos de neumáticos, Figura 21.

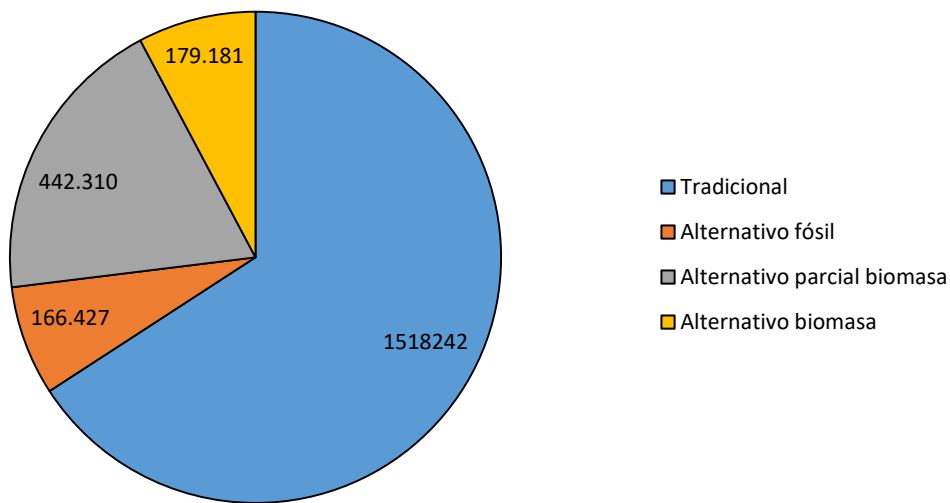


Figura 20: Consumo de combustibles OFICEMEN 2016 en toneladas, (CEMA, 2016)

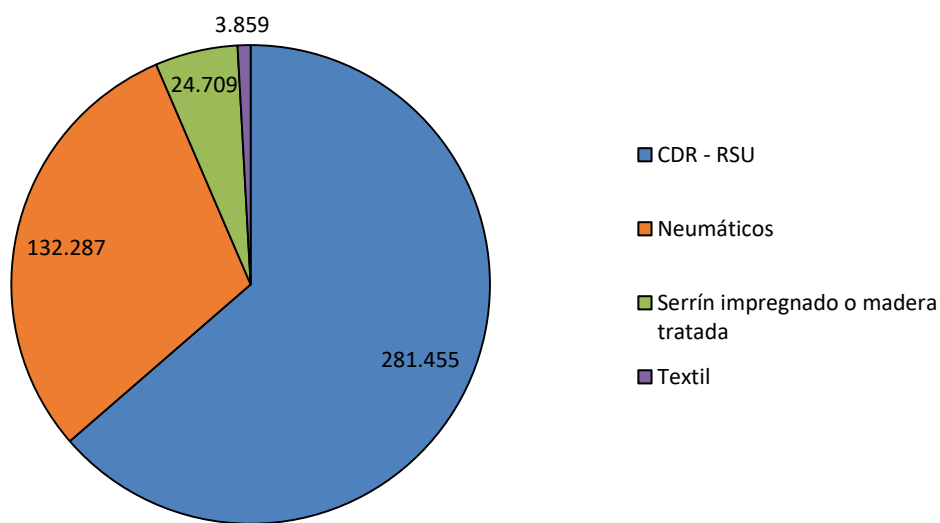


Figura 21: Consumo de combustibles alternativos con contenido parcial en biomasa en toneladas, (CEMA, 2016)

Por último, los combustibles procedentes de la biomasa aportaron 179.181 toneladas en 2016, en torno a un 10% del consumo total. La biomasa más utilizada procede de las harinas animales, seguido de la madera y los lodos de depuradoras.

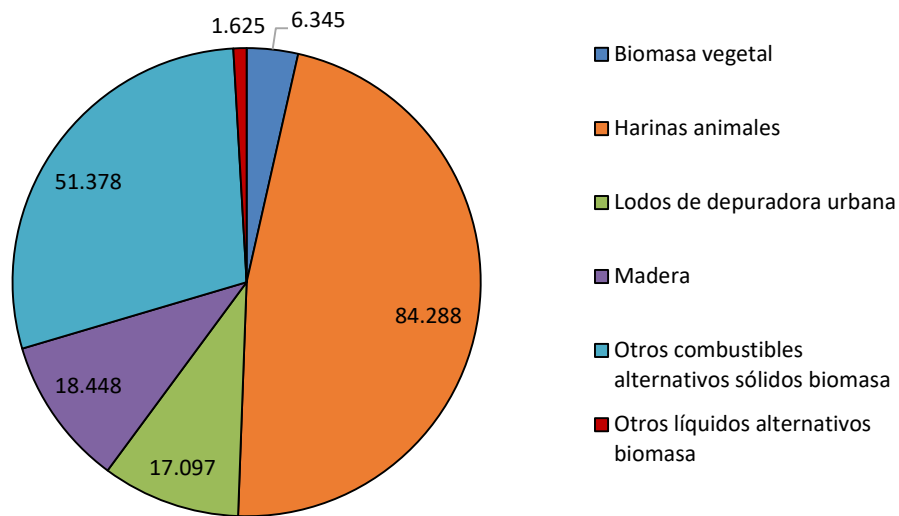


Figura 22: Consumo de combustibles alternativos de biomasa en toneladas, (CEMA, 2016)

Desde un punto de vista netamente energético, las toneladas de combustible alternativo consumidas se traducen en una aportación de 401 ktep (CEMA, 2016). Esta aportación supone un 25,2% de porcentaje de sustitución de combustibles alternativos sobre el consumo total (CEMA, 2016).

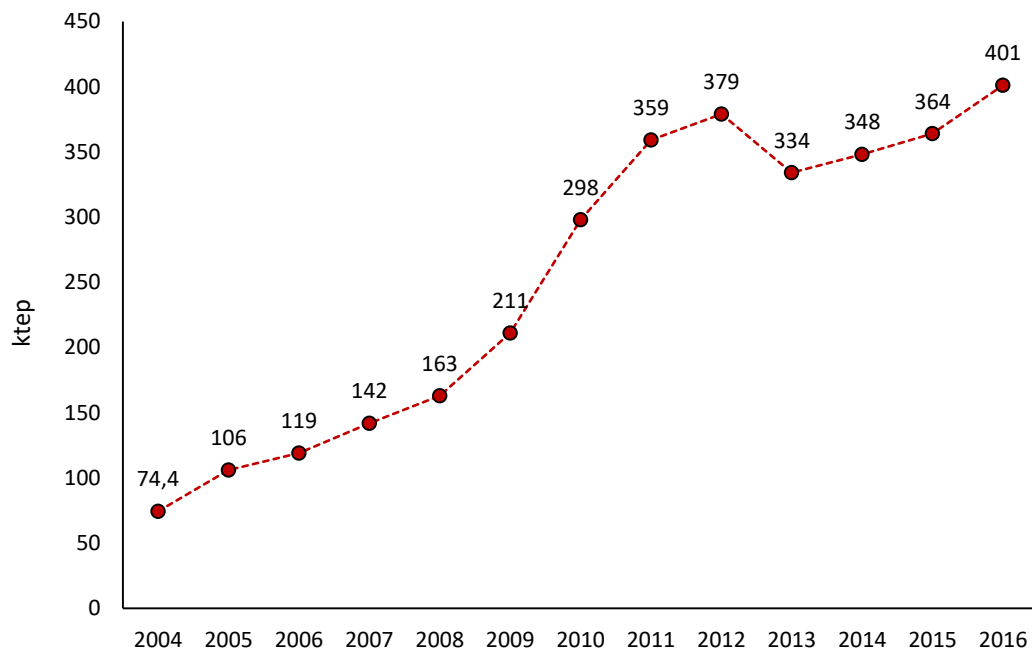


Figura 23: Consumo energético mediante combustibles alternativos, (CEMA, 2016)

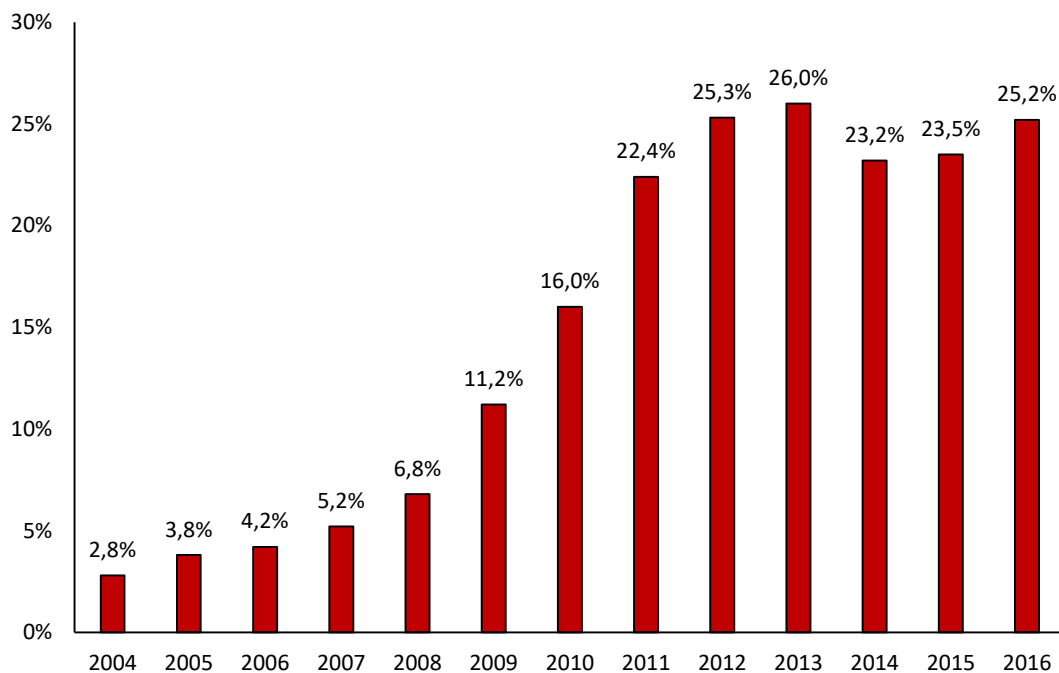


Figura 24: Porcentaje de sustitución de los combustibles alternativos respecto al consumo total, (CEMA, 2016)

El uso de los combustibles alternativos ha aumentado considerablemente en los últimos años en España, en detrimento de los combustibles fósiles empleados tradicionalmente en la industria. El consumo de los combustibles alternativos se ha quintuplicado desde 2004, pasando de 74,4 ktep de consumo en dicho año a 401 ktep en 2006.

Traduciendo estos datos a la contribución de los combustibles alternativos sobre el consumo energético total, se ha pasado del 2,8% al 25,2% en este periodo, como se puede observar en la Figura 24.

A partir de los datos de consumo energético de combustibles alternativos (Figura 23) y del porcentaje de sustitución de los combustibles alternativos (Figura 24), se obtienen los resultados de consumo energético total de la industria del cemento. El cálculo realizado consiste en dividir el consumo de combustibles alternativos entre el porcentaje de sustitución. El resultado obtenido es el consumo energético directo procedente de combustibles, por lo que este consumo no incluye el consumo de electricidad procedente de la red.

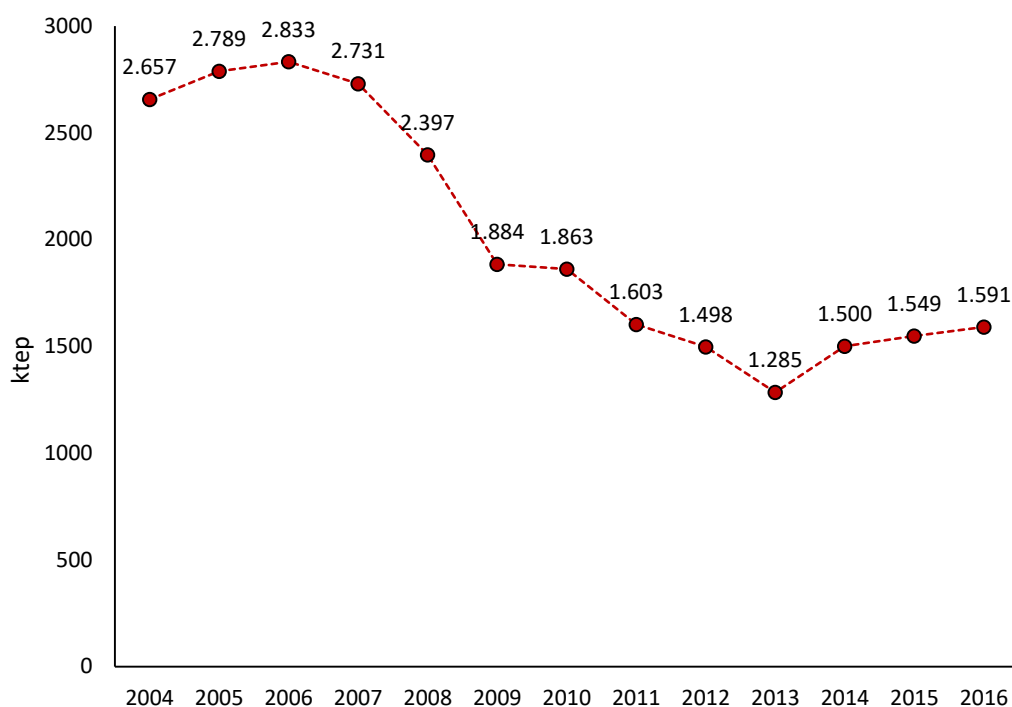


Figura 25: Consumo energético total del sector cemento, (CEMA, 2016)

Uno de los efectos de la grave crisis atravesada por el sector de la construcción desde 2007 es la caída en el consumo de cemento a nivel nacional. Esta reducción del consumo y, por tanto, de la producción de cemento tiene como consecuencia un menor consumo energético del sector, como se puede constatar en la Figura 25.

Además, gracias a la mejora progresiva en la eficiencia energética del sector, la energía térmica requerida para generar una tonelada de clínker es cada vez menor. Este efecto también contribuye a la reducción del consumo energético del sector.

5.2.2. Consumo energético a nivel europeo

A pesar del crecimiento en los últimos años, España es uno de los países de la Unión Europea con menor tasa de sustitución de combustibles alternativos, como se puede ver en la Figura 26. La contribución de los combustibles alternativos en España apenas se sitúa en el 26,6%, solo por encima de Italia y Grecia. La media de los 28 países de la Unión Europea es del 44,4%, llegando a tasas por encima del 60% en países como Alemania o Suiza.

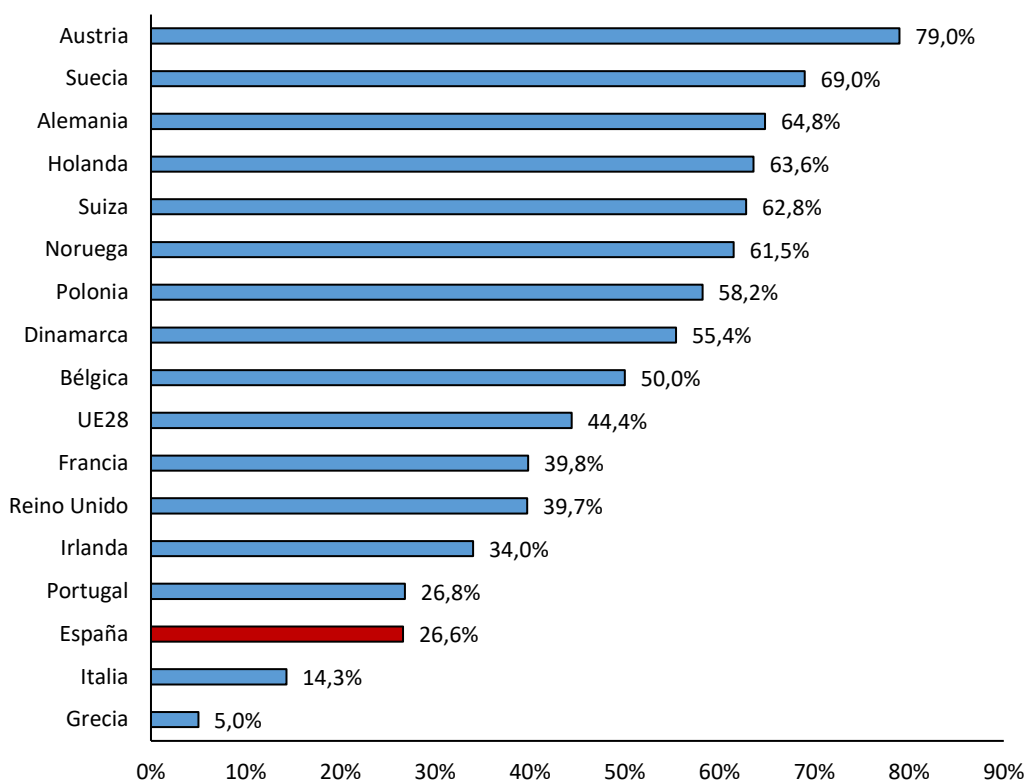


Figura 26: Porcentaje de sustitución de combustibles alternativos UE (2017), CEMA

Este análisis comparativo de los países de nuestro entorno sirve para confirmar que la penetración de los combustibles alternativos, y por ende la biomasa, en la industria del cemento posee un potencial que todavía no se ha explotado completamente.

5.2.3. Estimación del potencial de la biomasa en la industria del cemento en 2030

El objetivo es continuar esta tendencia en los próximos años con un aumento progresivo de los combustibles alternativos en la industria, destacando los combustibles alternativos basados en biomasa por su carácter renovable.

La cantidad de biomasa que puede ser utilizada como combustible en la industria del cemento viene determinada por restricciones técnicas de los hornos. Los hornos de cemento empleados en la industria actualmente están diseñados para quemar combustibles con un poder calorífico igual o superior al intervalo de 20-22 GJ/t. La biomasa, por el contrario, presenta un poder calorífico notablemente inferior, entre 10 y 18 GJ/t, dado su alto contenido en impurezas y otros componentes. Sin embargo, la tecnología actualmente implantada en la industria europea ofrece la posibilidad de que en torno a un 60% del combustible utilizado en las plantas sea quemado a temperaturas más bajas en los pre calcinadores, (CSI/ECRA, 2017). Estas temperaturas inferiores permiten emplear combustibles de poder calorífico menor, como es el caso de la biomasa. Por tanto, desde un punto de vista técnico, es viable una penetración del 60%

de la biomasa en el sector del cemento sin necesidad de incurrir en inversiones adicionales.

Además, teniendo en cuenta la situación en otros países de nuestro entorno, algunos de los cuales han llegado ya a valores próximos o incluso superiores al 60%, como se puede ver en la Figura 26, el umbral del 60% parece un horizonte razonable. Países como Austria, Suecia, Alemania, Holanda o Suiza ya han superado este porcentaje de sustitución de combustibles alternativos en la industria del cemento.

Por otro lado, existe la posibilidad de instalar un bypass a la entrada del horno principal para reducir el contenido en cloro y azufre de la biomasa, que impiden una combustión adecuada en el horno. Esta medida permitiría superar el umbral del 60% de sustitución de combustibles alternativos, al que está limitado la industria sin inversiones adicionales.

La inversión necesaria para el reequipamiento de la industria se estima en 5-15 millones de euros por instalación, según (CSI/ECRA, 2017). Ahora bien, este reequipamiento tiene asociado un ahorro de 2 a 2,5 euros por tonelada de clínker producido. Estas estimaciones están realizadas para una planta estándar con una capacidad de producción de 2 millones de toneladas de clínker al año, lo cual supone un ahorro de 4 a 5 millones de euros cada año. El break-even point del proyecto se situaría a los 3-4 años.

Además, la utilización de biomasa como combustible supone una reducción de 30 a 50 kg de CO₂ por tonelada de clínker, (CSI/ECRA, 2017).

Desde nuestro punto de vista, el potencial de los combustibles alternativos, y por ende, la biomasa, en el consumo energético de la industria del cemento en España, se sitúa en una tasa de sustitución del 60%, dado que este objetivo se puede alcanzar sin necesidad de realizar inversiones adicionales en la industria. Aunque a nivel técnico es viable superar un nivel de consumo energético de biomasa del 60%, este valor representa un alto volumen de consumo de biomasa y se puede considerar como una buena estimación del potencial de la biomasa en el sector en 2030.

5.3. Generación eléctrica

5.3.1. La biomasa en el sector eléctrico en España

La biomasa tiene a día de hoy un papel muy limitado en la generación de energía eléctrica en España. Es la tecnología de generación más importante dentro del grupo de otras renovables, al que pertenecen otras tecnologías con escasa participación en el mix energético como la geotermia, el biogás o la hidráulica marina.

En 2016, la generación eléctrica procedente de la biomasa ascendió a 4038 GWh. Esta cifra representa un 3,9% de la generación eléctrica de origen renovable, y únicamente un 1,5% de la generación eléctrica total.

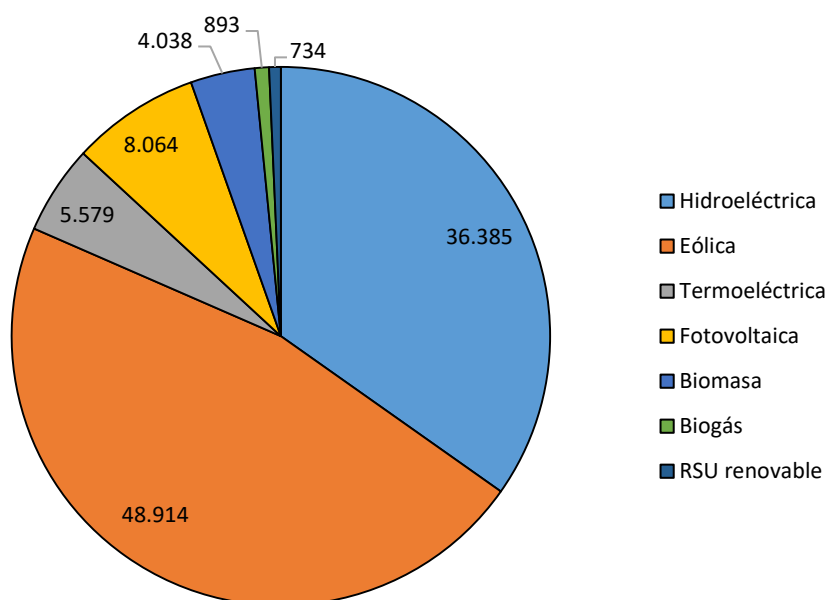


Figura 27: Generación eléctrica renovable en 2016 en GWh, (IDAE, 2017)

En cuanto a la potencia eléctrica instalada, en 2016 había 677 MW las instalaciones con tecnología de biomasa como combustible (MINETAD/IDAE, 2017). En los últimos años el crecimiento de la biomasa para usos eléctricos ha sido prácticamente nulo. Sin embargo, se espera que con la puesta en marcha de varios proyectos, la potencia instalada aumente a 877 MW en 2020. Estas proyecciones se describirán a continuación.

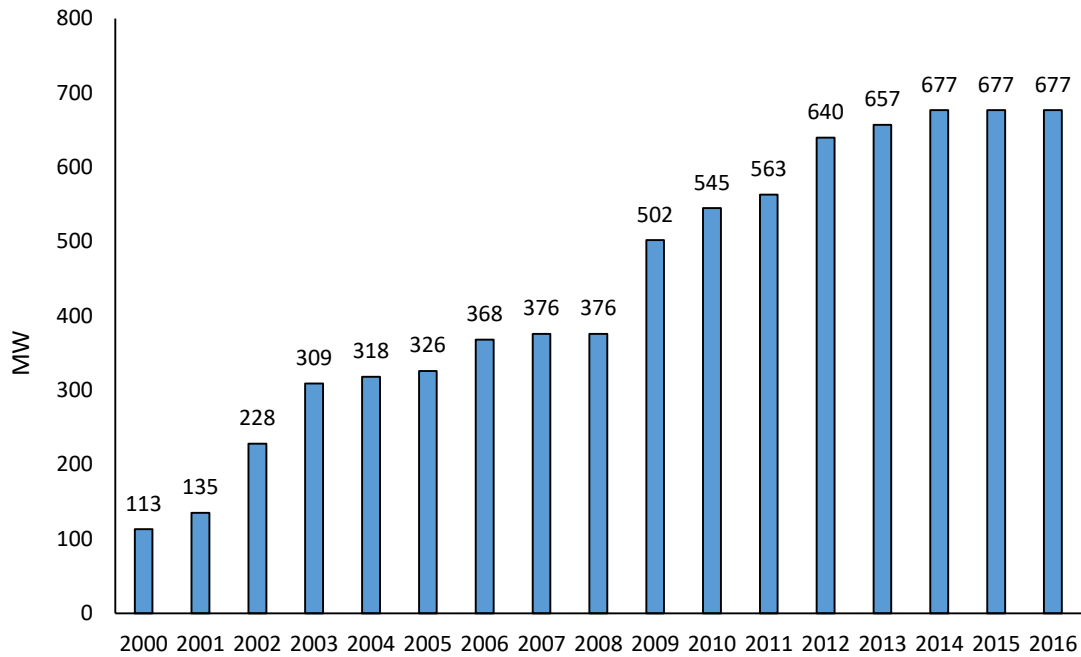


Figura 28: Evolución de la potencia eléctrica instalada de biomasa en España, (IDAE, 2017)

REE publica sus propios datos acerca de la potencia eléctrica instalada de biomasa. La biomasa pertenece al grupo de otras tecnologías renovables, dentro del cual se distinguen cuatro bloques: biomasa y biogás (853 MW), residuos renovables (162 MW), hidroeléctrica (11 MW) e hidráulica marina (5 MW) (REE, 2017).

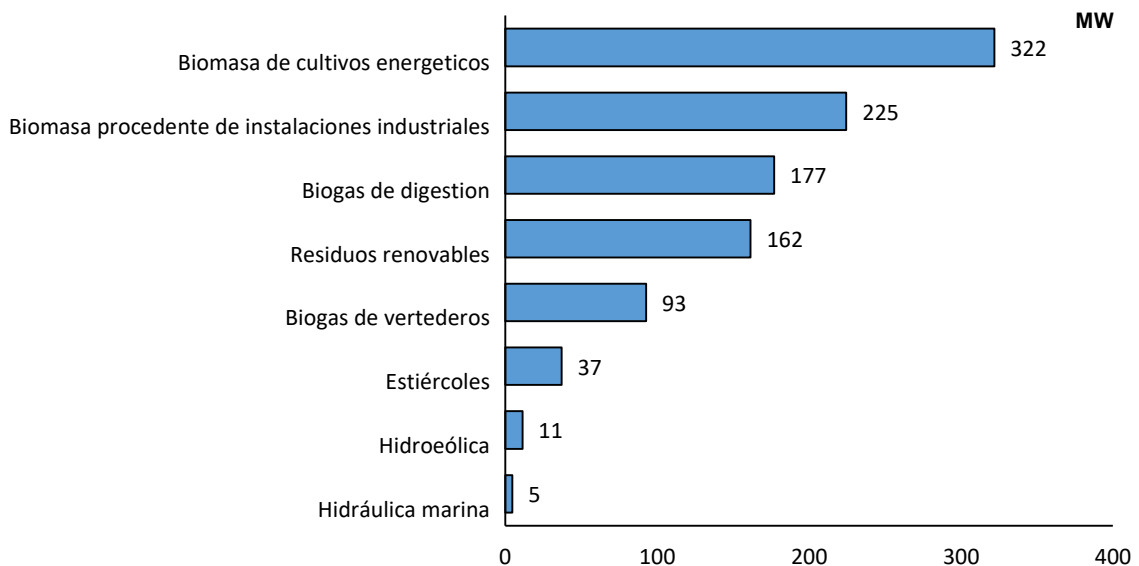


Figura 29: Potencia instalada de otras renovables por tipo de combustible, (REE, 2017)

5.3.2. Estimación del potencial de la biomasa en el sector eléctrico en 2030

A partir de los datos de generación y potencia eléctrica instalada, se puede realizar el cálculo de las horas equivalentes del parque de biomasa en España.

$$\text{horas equivalentes} = \frac{4.038 \text{ GWh}}{677 \text{ MW}} = 5964,55 \text{ h}$$

La normativa vigente limita las horas de funcionamiento retribuidas de las centrales eléctricas de biomasa a 6.500 horas anuales, regulado por la Orden IET/2212/2015 publicada en el BOE. Desde el sector, algunas voces reclaman un cambio en una normativa que consideran insuficiente, ya que las centrales están capacitadas para operar al menos 8.000 horas al año. La eliminación de limitación permitiría incrementar la producción eléctrica hasta un 23% adicional con la potencia instalada actualmente (APPA, 2018).

Asimismo, el potencial posible para las instalaciones de biomasa para generación eléctrica en España se estima en torno a los 8.000 MW (IDAE, 2009). Sin embargo, este potencial parece inalcanzable a corto y medio plazo ya que la potencia instalada a día de hoy se sitúa en los 677 MW.

El objetivo establecido en el PER 2011-2020 (IDAE, 2009), se situaba en 1.350 MW de potencia eléctrica instalada. Además, se formulaba un objetivo de 6.000 horas medias de funcionamiento al año. Esto se traduce en una producción de 8.100 GWh.

Sin embargo, los acontecimientos no se han desarrollado como se esperaba, ya que la potencia apenas ha crecido en el periodo 2009-2016. La crisis que ha atravesado el sector de las renovables ha paralizado la expansión de la biomasa de forma drástica. Sin embargo, esta tendencia se está revertiendo en los últimos años. En 2016 y 2017, se convocaron tres subastas de renovables, adjudicándose en total casi 9 GW. En la primera subasta, se adjudicaron 700 MW, de los cuales 200 MW eran de biomasa (BOE, 21 de enero de 2016). Además de la retribución de mercado, la biomasa adjudicada en esta subasta recibe una prima adicional variable en función del precio del combustible, que se denomina retribución a la operación. En la segunda subasta, celebrada en mayo de 2017, se repartieron 3.000 MW (BOE, 26 de mayo de 2017), mientras que en la tercera la potencia adjudicada fue de 5.037 MW (BOE, 28 de julio de 2017). En estas dos últimas pujas, las tecnologías subastadas eran únicamente eólica y solar fotovoltaica.

Se prevé que en 2020 hayan entrado en funcionamiento gran parte de los **200 MW** de biomasa que se adjudicaron en la primera subasta. La planta de biomasa de Forestalia en Cubillos del Sil (León), con una potencia instalada de **49,9 MW**, comenzará su producción en enero de 2020 (La Crónica, 2018). Aunque en la subasta Forestalia logró una adjudicación de 108,5 MW, los derechos sobre los 58,5 MW restantes han sido

vendidos a Ence. Gracias a esta operación, Ence está construyendo una planta de biomasa de **50 MW** en Elcogás, en los antiguos terrenos de la central de carbón, y se prevé su conexión al sistema en el segundo semestre de 2019 (El Economista, 2018). Además, Ence está finalizando la construcción de una nueva planta de **46 MW** en Huelva, que tiene previsto entrar en funcionamiento en la segunda mitad de 2019 (ENCE, 2019). En esta misma subasta, otros **50 MW** fueron a parar a Renova Generación, hoy en día llamado Greenalia, que se concretan en la planta de biomasa de Curtis (Galicia), que entrará en actividad el primer trimestre de 2020 (La Voz de Galicia, 2019).

Por tanto, a los 677 MW de potencia eléctrica instalada en 2016, se le suman los 200 MW que entrarán en funcionamiento en 2020. De esta forma, se puede considerar una potencia eléctrica instalada total de 877 MW de biomasa pura en 2020. Estos datos coinciden con los objetivos establecidos en el Borrador del Plan de Energía y Clima 2021-2030 (MITECO, 2019).

Sin embargo, si se considera un horizonte de tiempo más largo, el potencial es aún mayor. A día de hoy, en algunas centrales de carbón ya se utiliza biomasa como combustible, en una mezcla que combina la propia biomasa con carbón. Esta tecnología, que recibe el nombre de co-combustión, mejora el comportamiento en emisiones de las plantas. La proporción de biomasa en la mezcla es relativamente baja, generalmente entre un 5 y un 10% de biomasa y el resto carbón para co-combustión directa (IRENA, 2012). Se pueden alcanzar ratios superiores mediante co-combustión indirecta, pero para ello es necesaria la adecuación de las instalaciones (IRENA, 2012). Ahora bien, la co-combustión es una tecnología de transición en el proceso de descarbonización del sector eléctrico. El objetivo final es que el carbón desaparezca completamente del mix energético en los próximos años.

En todos los países de nuestro entorno, los esfuerzos se dirigen en esta dirección. Se busca sustituir el carbón por otras tecnologías menos contaminantes, entre las que se encuentra la biomasa. En España, se está produciendo un proceso paulatino de desconexión de las centrales térmicas de carbón. Está previsto que antes de 2030 el carbón desaparezca completamente del mix de generación.

En este contexto, surge la cuestión de qué hacer con estas enormes centrales térmicas que pronto van a quedar obsoletas. Su desconexión es un proceso que implica altos costes, por lo que parece interesante encontrar una alternativa a esta situación. Además, muchas de las características técnicas de las centrales son aprovechables, como la conexión a la red. Ante esta situación, una de las respuestas que se presenta con más fuerza es la adecuación de las centrales térmicas de carbón para ser transformadas en plantas de biomasa.

El ejemplo más claro de la transformación de centrales térmicas de carbón en biomasa es la megacentral de Drax, en Reino Unido. Es el mayor proyecto de descarbonización en toda Europa (Drax, 2018). A día de hoy, 4 de los 6 grupos de generación funcionan íntegramente con biomasa. Cada uno de los grupos tiene una potencia instalada de 645 MW, lo que significa que actualmente 2,6 GW utilizan biomasa como combustible (Clean coal centre, 2018). Se han invertido alrededor de 700 millones de libras para convertir las tres primeras unidades y las infraestructuras asociadas a la cadena de

suministro de la biomasa. El coste de conversión de la cuarta unidad ha sido claramente menor, en torno a 30 millones de libras, en euros, 33,5 millones (Drax, 2018) (Energías renovables, 2018).

Este no es el único ejemplo, ya que en otros países de nuestro entorno se están poniendo en marcha proyectos en esta dirección. La mayor central de carbón de Francia, Cordemais, con una potencia instalada de 1.200 MW, se va a transformar en una planta 100% de biomasa en 2022 (Reuters, 2019).

En nuestro país, se están dando algunos pasos en este sentido, dado que ya se está planteando la transformación de la central térmica de Meirama (Energías renovables, 2019).

Recientemente, el ministerio de para la transición ecológica (MITECO), se ha pronunciado a favor de la conversión del parque térmico de carbón en España a la biomasa (Energías renovables, 2019).

Según las estadísticas de REE, la potencia instalada de carbón en España asciende a 10.030 MW en 2018, que potencialmente se pueden transformar en biomasa en 2030, año en que está prevista la desaparición completa del carbón de la generación.

De esta forma, en 2030 tendríamos una potencia eléctrica total de biomasa aproximada de 10.907 MW; 10.030 MW de la transformación de centrales de carbón y 877 MW de biomasa pura.

Es una tarea de gran complejidad dar una cifra exacta de los costes asociados a la conversión de una central térmica de carbón en una planta de biomasa. Los costes dependen de multitud de factores como la antigüedad de la central o la potencia instalada entre otras. A pesar de ello, vamos a realizar una estimación de costes para evaluar su posible aplicación en España.

Si tomamos el ejemplo de la central de Drax, recientemente citada, sabemos que la conversión de la cuarta unidad de 645 MW ha supuesto una inversión de 33,5 millones de euros.

$$\text{Coste conversión} \left(\frac{\text{€}}{\text{kW}} \right) = \frac{33.500.000 \text{ €}}{645.000 \text{ kW}} = 51,9 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$$

Por tanto, una primera cifra aproximada de inversión asociada a la conversión de una central de carbón en biomasa se sitúa alrededor de los 50 €/kW.

Otra cifra que nos da una idea de los costes viene de la central de biomasa de Thunder Bay, en Ontario. Se trata de una de las primeras plantas en ser reconvertidas a la biomasa en todo el mundo. La inversión realizada para la transformación de esta central se estima en \$30/kW, lo que equivale a unos 26 €/kW, (Power Engineering, 2018).

De esta forma, se puede afirmar que, de forma estimada, los costes en los que se incurre en la transformación de una central térmica de carbón en una de biomasa, oscilan entre los 25 y los 50 €/kW.

Para la realización de nuestros cálculos se va a utilizar un valor promedio de 37,5 €/kW.

6. Curva de demanda de biomasa

El siguiente paso en el proyecto es la construcción de una curva de demanda a partir del análisis realizado en los distintos sectores. Los sectores estudiados son la industria del papel, la industria del cemento y el sector de la generación eléctrica. El horizonte temporal que se va a emplear en la curva de demanda es el año 2030.

La metodología que se va a emplear es la siguiente:

1. Estimación del consumo total de energía final para cada sector en 2030.
2. Cálculo de la cantidad de energía final que potencialmente podría proceder de la biomasa para cada sector.
3. Conversión de la energía final procedente de biomasa a energía primaria.
4. Análisis de costes para determinar el precio de demanda de la biomasa para cada sector.
5. Construcción de la curva de demanda de biomasa por parte de los sectores estudiados en 2030.

6.1. Estimación del consumo total de energía final en 2030

Para realizar una estimación del consumo energético de la industria del papel y el cemento, se utilizará como punto de partida las proyecciones del consumo de materias primas por industria (Gerres, y otros, 2019). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7.

El sector del papel tiene un consumo per cápita prácticamente constante a lo largo del tiempo; el consumo actual se sitúa en 130 kg y el consumo futuro se estima en la franja de 130 a 150 kg. Para nuestros cálculos, asumiremos una demanda per cápita de 140 kg.

En cuanto al sector del cemento, se espera una recuperación del sector a niveles cercanos al periodo previo a la crisis de 2007. Las proyecciones estiman que el consumo actual de 270 kg se incrementa hasta llegar a un nivel consumo de entre 300 y 500 kg. En nuestro caso, tomaremos un valor medio de 400 kg per cápita.

Tabla 7: Proyecciones de consumo de materias primas, (Gerres, y otros, 2019)

	Consumo actual	Futuro consumo
Cemento	270 kg	300 – 500 kg
Papel	130 kg	130 – 150 kg

Existe una clara correlación entre el consumo de materias primas y la demanda energética del sector en cuestión. A pesar de que el consumo per cápita no coincide exactamente con la producción, ya que ignora el efecto de las exportaciones e importaciones, vamos a considerar que se trata de un buen indicador, ya que el consumo nacional supera con creces al intercambio neto.

Para calcular el consumo total, simplemente habría que multiplicar el consumo per cápita por la población total. Para ello, habría que tener en cuenta las proyecciones de población a 2030. Sin embargo, según el INE, el crecimiento de la población a 2030 es muy pequeño (<5%), por lo que se despreciará el efecto de crecimiento y se supondrá una población similar a la actual. De esta forma, se establece una correlación directa entre consumo per cápita y consumo energético del sector.

6.1.1. Industria del papel y la celulosa

Tabla 8: Consumo energético del sector papel

	Sector del papel	
	Consumo materia prima	Consumo energético
Actual	130 kg	2040 ktep
2030	140 kg	2.196 ktep

Aplicando la correlación entre consumo per cápita y el consumo energético, obtenemos el consumo energético del sector del papel en 2030.

$$140 \text{ kg} * \frac{2.040 \text{ ktep}}{130 \text{ kg}} = 2.196 \text{ ktep}$$

6.1.2. Industria del cemento

Análogamente, se realiza el cálculo para la industria del cemento.

Tabla 9: Consumo energético del sector cemento

Sector del cemento		
	Consumo materia prima	Consumo energético
Actual	270 kg	1.591 ktep
2030	400 kg	2.357 ktep

De nuevo, aplicando la correlación entre consumo per cápita y el consumo energético, obtenemos el consumo energético del sector del papel en 2030.

$$400 \text{ kg} * \frac{1.591 \text{ ktep}}{270 \text{ kg}} = 2.357 \text{ ktep}$$

6.1.3. Generación eléctrica

En el caso del sector eléctrico, la metodología que se va a seguir es distinta a la utilizada en las industrias convencionales. En vez de calcular el consumo total del sector y establecer un porcentaje potencial de biomasa en el mix, como se ha realizado para la industria, se establece un número potencial de horas equivalentes y se estima la producción correspondiente a esas horas de funcionamiento, teniendo en cuenta la potencia instalada.

6.2. Cálculo de la energía final procedente de la biomasa

El siguiente paso para construir la curva de demanda potencial es calcular cuánta biomasa podría llegar a demandar cada sector, a partir de la estimación de demanda energética total calculada anteriormente.

6.2.1. Industria del papel y la celulosa

El estudio realizado acerca del consumo de combustible en la industria del papel revela que la contribución actual de la biomasa en el sector en España es de un 33% sobre el consumo total. Tomando como referencia la planta de Smurfit Kappa Nervión (ASPAPPEL, 2012), se ha establecido un potencial del 65% de utilización de biomasa en la industria en 2030.

$$E_{final} = 65\% * 2.196 \text{ ktep} = 1.428 \text{ ktep}$$

De esta forma, de las 2.196 ktep de demanda energética estimadas en 2030, **1.428 ktep**, serían susceptibles de tener su origen en la biomasa.

6.2.2. Industria del cemento

En el análisis previamente realizado del sector del cemento, se concluye que la industria actual es capaz de aumentar la presencia de la biomasa dentro del mix de combustibles hasta un 60%, gracias a la combustión en los precalcinadores. No sería necesaria ninguna inversión a tener en cuenta para alcanzar este escenario.

$$E_{final} = 60\% * 2.357 \text{ ktep} = 1.414,2 \text{ ktep}$$

Por tanto, partiendo de un escenario con una demanda energética total de 2.357 ktep en el año 2030, la máxima demanda potencial de biomasa sería de **1.414,2 ktep**.

6.2.3. Generación eléctrica

El sector eléctrico cuenta actualmente en España con una potencia eléctrica instalada de 677 MW, que se convertirá en 877 MW en 2020, como se expone en el apartado 5.3.2. En 2030, si se produce la transformación de las centrales térmicas de carbón en biomasa, la potencia total instalada ascendería a 10.907 MW. Además, las horas de funcionamiento medias al año se sitúan en torno a las 6.000 horas. El sistema de retribución actual únicamente considera 6.500 horas de funcionamiento. Desde la Asociación de Empresas de Energías Renovables (APPA), consideran que el parque biomásico español está perfectamente capacitado para operar, al menos, 8.000 horas al año.

Se analiza, por un lado, la potencia instalada de biomasa pura, y por otro, la potencia de carbón que potencialmente podría ser convertida en biomasa.

En primer lugar, calculamos la producción asociada a la biomasa pura:

$$E_{final} = 877 \text{ MW} * 8000 \text{ horas} = 7.016 \text{ GWh}$$

A continuación, la generación de las centrales de carbón convertidas en biomasa:

$$E_{final} = 10.030 \text{ MW} * 8000 \text{ horas} = 80.240 \text{ GWh}$$

Por tanto, el potencial de generación eléctrica con biomasa en 2030, se sitúa en 87.256 GWh, frente a los 4.038 GWh de 2016. Traducido a ktep, la energía eléctrica final procedente de la biomasa equivale a **7.503 ktep**, de las cuales, **603 ktep** corresponden a la potencia instalada de biomasa pura en 2020 y **6.900 ktep** a las centrales térmicas de carbón convertidas a biomasa.

Tabla 10: Proyecciones de energía final procedente de la biomasa

Industria	Energía Final procedente de la biomasa	
	Actual	2030
Papel	680 ktep	1.428 ktep
Cemento	401 ktep *	1.414 ktep
Biomasa eléctrica pura	347 ktep	603 ktep
Centrales térmicas	-	6900 ktep

(*): No solo biomasa, incluye todos los combustibles alternativos.

6.3. Conversión de la energía final a energía primaria

Para poder construir una curva de demanda que se pueda comparar a la curva de oferta construida en el capítulo 4, Figura 11, es preciso expresar el consumo energético de los sectores estudiados en forma de energía primaria. Para ello, es necesario transformar la demanda energética final en energía primaria. Como ya se ha explicado, la energía final es la energía que es finalmente consumida en usos directos, mientras que la energía primaria es la energía bruta, antes de ser transformada. Para realizar el paso de energía final a energía primaria, se van a utilizar los factores de conversión, (IDAE, 2011). Estos factores se muestran en las Tabla 11 y Tabla 12.

Tabla 11: Factores de conversión energía final - energía primaria uso directo, (IDAE, 2011)

Fuente energética	Combustibles			
	Consumo final directo		Energía primaria	
	<i>tep</i>	<i>Volumen específico</i>	<i>tep</i>	<i>MWh</i>
Biomasa agrícola	1	3,34 t	1,25	14,53
Biomasa industria forestal	1	2,87 t	1,25	14,53

Tabla 12: Factores de conversión energía final - energía primaria electricidad, (IDAE, 2011)

Tecnología	Electricidad					
	Energía final		Energía primaria			
			Bornas de central		En punto de consumo	
	MWh	tep	MWh	tep	MWh	tep
Biomasa eléctrica	1	0,086	4,88	0,42	5,29	0,46

A continuación, se utilizan los factores para convertir la demanda energética final de biomasa en energía primaria. El factor utilizado para la industria del papel y la industria del cemento se corresponde con el uso directo de la biomasa como combustible, igual a 1,25, mientras que el factor utilizado para la generación eléctrica es de 5,29, Tabla 11 y Tabla 12. Este factor representa la cantidad de energía primaria necesaria para producir una unidad de energía final.

Tabla 13: Cálculo de la demanda energía primaria por sector

Industria	Energía final	Factor	Energía primaria
Papel	1.428 ktep	1,25	1.785 ktep
Cemento	1.414 ktep	1,25	1.768 ktep
Biomasa eléctrica pura	603 ktep	5,29	3.191 ktep
Centrales térmicas	6.900 ktep	5,29	36.498 ktep

6.4. Análisis de costes

Una vez determinada la demanda de energía primaria para cada uno de los sectores en 2030, el siguiente paso consiste en estimar el precio que estarían dispuestos a pagar de media en cada una de las industrias por la biomasa. La metodología que se va a llevar es distinta para las industrias del papel y el cemento, por un lado, y el sector eléctrico, por otro.

En el caso de las industrias, lo que se va a calcular es el coste de oportunidad de utilizar la biomasa en vez del combustible mayoritario empleado en la industria. Este cálculo parte de la suposición de que la biomasa va a sustituir a ese combustible mayoritario.

Por su parte, en el sector eléctrico el cálculo va a consistir en determinar la rentabilidad de la biomasa como tecnología de generación, teniendo en cuenta las inversiones necesarias para equipar el parque térmico y el precio medio estimado de comercialización del MWh eléctrico en 2030.

Para realizar este análisis, es necesario partir de una serie de precios de combustibles, emisiones de CO₂, precio del MWh eléctrico para 2030 y estimaciones de las inversiones necesarias, que se irán detallando a lo largo del proceso.

6.4.1. Industria del papel y la celulosa

En el caso de la industria del papel y la celulosa, el mix energético se reparte entre la biomasa y el gas natural, Figura 15.

Por tanto, el análisis de precios se centra en calcular el coste de oportunidad del gas natural en 2030. Este coste de oportunidad es el coste que cuesta generar 1 unidad de energía final a partir de este combustible. Una vez calculado ese precio, se calcula el precio que correspondería a la biomasa generar esa misma unidad de energía final al mismo precio.

El punto de partida es el precio del gas natural en Europa en 2030, publicado por el Miteco.

En primer lugar, se realiza la conversión a €/tep.

$$10,5 \frac{\text{€}}{\text{GJ}} * \frac{1 \text{ GJ}}{0,0239 \text{ tep}} = 439 \frac{\text{€}}{\text{tep}}$$

El precio obtenido se corresponde al precio en euros por unidad de energía primaria del gas natural. A continuación, realizamos la conversión de energía primaria de gas a energía final, utilizando el factor de uso directo que estamos empleando en el caso de la industria, 1,07.

$$439 \frac{\text{€}}{\text{tep GN}} * \frac{1,07 \text{ tep GN}}{1 \text{ tep } E_{Final}} = 470 \frac{\text{€}}{\text{tep } E_{Final}}$$

El coste de generar una unidad de energía final a partir de gas natural es de 470 €. Ahora, aplicando el factor de conversión de energía final a energía primaria procedente de biomasa, obtenemos el coste unitario de la biomasa.

$$470 \frac{\text{€}}{\text{tep } E_{Final}} * \frac{1 \text{ tep } E_{Final}}{1,25 \text{ tep biomasa}} = 376 \frac{\text{€}}{\text{tep biomasa}}$$

El precio asociado al coste de oportunidad del gas natural es claramente mayor con esta fuente, de unos 375,9 euros por tep.

De esta forma, hemos calculado el coste equivalente de la biomasa en 2030 a partir del gas natural. A esta cifra, hay que sumarle el coste asociado a las emisiones de CO₂. Se toma un precio de referencia de 25 euros por tonelada de CO₂ (Rivier, y otros, 2018). El factor de emisiones del gas natural es de 2,34 toneladas de CO₂ por cada tep de energía final producida (IDAE, 2011).

$$25 \frac{\text{€}}{\text{t CO}_2} * \frac{2,34 \text{ t CO}_2}{1 \text{ tep } E_{Final}} * \frac{1 \text{ tep } E_{Final}}{1,25 \text{ tep biomasa}} = 46,8 \frac{\text{€}}{\text{tep biomasa}}$$

El precio total medio al que estaría dispuestos a utilizar biomasa como combustible en la industria del papel sería igual al coste del combustible más el coste de las emisiones asociadas.

$$\text{Precio biomasa} = 375,9 \frac{\text{€}}{\text{tep}} + 46,8 \frac{\text{€}}{\text{tep}} = 422,7 \frac{\text{€}}{\text{tep}}$$

Ahora bien, también hay que modelar el efecto de las inversiones necesarias para equipar a la industria. La consecuencia será que el precio que esté dispuestos a pagar los agentes de la industria del papel será menor para compensar las inversiones en tecnología.

La inversión realizada por la planta de Smurfit Kappa Nervión para aumentar la contribución de biomasa es de 20 millones de euros. Tomando la hipótesis de que todas las plantas a nivel nacional tienen unas características similares a esta planta de referencia, la inversión total en la industria papelera ascendería a 1.620 millones de euros, teniendo en cuenta que hay 81 plantas de papel y celulosa a nivel nacional.

$$\text{inversión} = 20 \text{ M€} * 81 \text{ plantas} = 1620 \text{ M€}$$

Esta inversión se reparte a lo largo de la vida útil de las instalaciones. Se estima que la vida útil de una planta de papel y/o celulosa es de 50 años, (Mpac, 2016). Se toma una tasa de descuento del 5 % para calcular el valor de la amortización en 2030.

$$\text{anualidad} = \frac{\text{coste de capital}}{\frac{1 + \frac{1}{(1+i)^n}}{i}}$$

$$\text{anualidad} = \frac{1620 \text{ M€}}{\frac{1 + \frac{1}{(1+0,05)^{50}}}{0,05}} = 88,7 \text{ M€}$$

A su vez, la amortización anual se reparte entre las tep consumidas a lo largo de un año por la industria, estimada en 1.785 ktep en 2030. Las inversiones tienen un efecto de 18,15 euros por cada tep de biomasa consumida.

$$\frac{88,7 \text{ M€}}{1.781 \text{ ktep}} = 49,7 \text{ €/tep}$$

El precio final que desde la industria del papel se pagaría por la biomasa es igual al coste de oportunidad del gas natural menos la amortización de las inversiones.

$$422,7 \frac{\text{€}}{\text{tep}} - 49,7 \frac{\text{€}}{\text{tep}} = 373,0 \frac{\text{€}}{\text{tep}}$$

6.4.2. Industria del cemento

El procedimiento seguido para calcular el precio de la demanda de biomasa en el sector del cemento es similar al de la industria papelera. En este caso, el combustible mayoritario es el coque de petróleo, como se indica en el análisis sectorial de la industria del cemento, en el capítulo 6.

Realizando el cálculo análogo, se obtiene un coste equivalente por unidad de energía primaria de biomasa de 228,8 €/tep. Se han utilizado las proyecciones de precios publicadas en el PNIEC.

A esta cifra, hay que sumarle el coste asociado a las emisiones de CO₂. Partimos de un escenario en el que el precio de las emisiones es de 25 €/t de CO₂ (Rivier, y otros, 2018). Aplicando el factor de emisiones correspondiente, obtenemos un coste de emisiones de CO₂ de 82,4 euros por tep de biomasa. La disponibilidad a pagar de la biomasa como combustible en la industria del papel sería igual al coste del combustible más el coste de las emisiones asociadas.

$$\text{Precio biomasa} = 228,8 \frac{\text{€}}{\text{tep}} + 82,4 \frac{\text{€}}{\text{tep}} = 311,2 \frac{\text{€}}{\text{tep}}$$

6.4.3. Generación eléctrica

La metodología empleada para el sector eléctrico es diferente a la seguida en la industria. En este caso el análisis se basa en rentabilidad de la generación. Para ello, el precio pagado por la biomasa más los costes de inversión y otros costes asociados como los de operación y mantenimiento deben ser cubiertos por la venta de electricidad.

Con el objetivo de realizar un análisis más detallado, se van a dividir las horas de generación anuales en tres tramos distintos con un precio de venta eléctrica en cada uno, que se pueden denominar períodos punta, llano y valle. Se establecerá un precio de

demanda para la biomasa para cada uno de estos períodos. Para calcular dichos precios de referencia se utilizan las previsiones de precio eléctrico horario procedente del análisis de escenarios a 2030, (Rivier, y otros, 2018). El precio medio anual del escenario elegido es de 42 €/MWh. El precio de referencia de cada uno de los periodos de generación se corresponde con el precio medio de cada periodo.

El primer paso es, a partir del perfil horario, determinar cuántas horas son punta, llano y valle. Para ello, se dibuja la curva monótona de carga, en la que aparecen las horas en el eje horizontal y el precio del MWh en el eje vertical. Como se ha comentado, los precios horarios proceden del análisis a 2030 de (Rivier, y otros, 2018).

La representación gráfica de las horas y sus respectivos precios muestran claramente los tres períodos señalados. Las primeras 1.700 horas presentan un precio notablemente más alto. Se agrupan dentro del tramo de horas punta. El tramo más grande es el periodo llano, en el que, de forma aproximada, se incluyen desde la hora 1.700 hasta la 7.000. El resto de horas, con precios inferiores, pertenecen al periodo de valle. Se ha estimado el potencial de horas de funcionamiento en 8.000 horas. Por tanto, las horas restantes para el período de valle son 1.000.

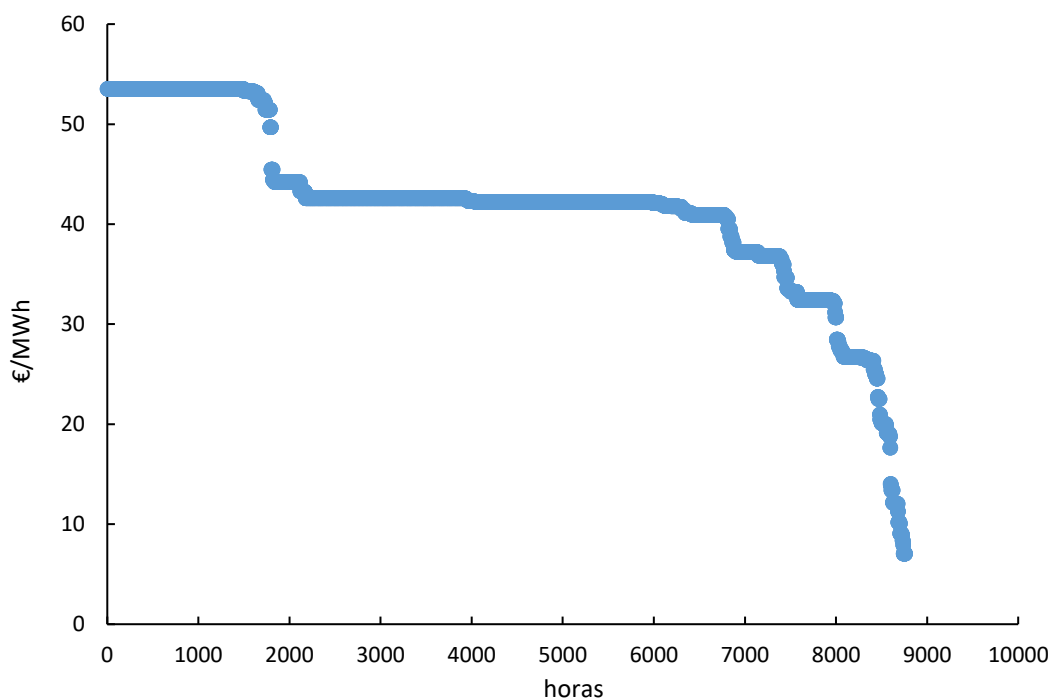


Figura 30: Curva monótona de precios eléctricos en 2030

En resumen, cada uno de los tres periodos de generación incluye el siguiente número de horas.

$$horas_{punta} = 1.700 h$$

$$horas_{llano} = 5.300 \text{ h}$$

$$horas_{valle} = 1.000 \text{ h}$$

Los precios medios de venta de electricidad de cada periodo son los siguientes.

$$Precio_{punta} = 53,5 \text{ €/MWh}$$

$$Precio_{llano} = 42,4 \text{ €/MWh}$$

$$Precio_{valle} = 34,5 \text{ €/MWh}$$

A la vista de la gráfica y de los resultados, parece evidente que no tiene sentido explotar al máximo el potencial de 8.000 horas de funcionamiento de la biomasa eléctrica. Las 1.000 horas correspondientes al tramo de valle presentan un precio a priori demasiado bajo como para que sea rentable generar. Los resultados del estudio presumiblemente confirmarán esta hipótesis.

Se analiza, por un lado, el parque de biomasa pura previsto para 2020, con una potencia eléctrica instalada de 877 MW, y por otro, el parque térmico de carbón que potencialmente puede ser transformado en biomasa en 2030.

Del lado de los costes, se tendrá en cuenta la inversión necesaria para transformar las centrales de carbón. Lo lógico sería utilizar el Levelised Cost of Energy (LCOE). Sin embargo, como el LCOE incluye el precio del combustible y nuestro objetivo es determinar el precio al que es rentable la biomasa, estaríamos contando dos veces el combustible. Además del precio del fuel, el LCOE engloba las inversiones en tecnología y el O&M (operación y mantenimiento). Las inversiones las vamos a tener en cuenta de forma separada, así que el único término que queda es el del O&M. Vamos a utilizar como una aproximación del coste de O&M en 2030, el coste de O&M en 2017, (IRENA, 2018). El coste oscila entre los 4 y los 5 dólares por MWh. Se toma un valor aproximado de 4,5 \$/MWh que equivale a 4 €/MWh, (IRENA, 2018).

Tabla 14: Costes O&M biomasa en 2017, (IRENA, 2018)

	Variable O&M (2016 USD/MWh)
Calderas Stoker/ Lecho fluidizado burbujeante/ Lecho fluidizado circulante	4,08 – 5,03
Gasificador	4,08
Digestor anaerobio	4,49

Plantas de biomasa puras

En primer lugar, vamos a realizar el análisis de las plantas de biomasa eléctrica puras. La potencia total instalada asciende a 877 MW.

$$E_{punta} = 877 \text{ MW} * 1.700 \text{ horas} = 1.491 \text{ GWh}$$

$$E_{llano} = 877 \text{ MW} * 5.300 \text{ horas} = 4.648 \text{ GWh}$$

$$E_{valle} = 877 \text{ MW} * 1.000 \text{ horas} = 877 \text{ GWh}$$

Considerando el precio medio de venta para cada período mostrado anteriormente, y un coste de O&M de 4 €/MWh, se obtendrían los siguientes beneficios.

$$Beneficio_{punta} = 1.491 \text{ GWh} * 1000 * 53,5 \text{ €/MWh} = 73,7 \text{ M€}$$

$$Beneficio_{llano} = 4.648 \text{ GWh} * 1000 * 42,4 \text{ €/MWh} = 178,1 \text{ M€}$$

$$Beneficio_{valle} = 877 \text{ GWh} * 1000 * 34,5 \text{ €/MWh} = 26,7 \text{ M€}$$

Del lado de costes, únicamente nos queda por considerar el coste de la biomasa, ya que el O&M ya ha sido incluido y no hay que incurrir en ninguna inversión en el caso de las centrales de biomasa. Por tanto, los costes se imputan íntegramente a la biomasa. El precio máximo que estaría dispuestos a pagar los productores es el break-even point, donde no se producen pérdidas ni ganancias. Para ello, es necesario calcular el consumo de energía primaria de la biomasa en cada tramo. A partir de la energía final producida y el factor de conversión de energía eléctrica a energía primaria de la biomasa (IDAE, 2011), se calcula el consumo de energía primaria asociada a cada período.

$$E_{biomasa_{punta}} = 1.491 \text{ GWh} * \frac{85,985 \text{ tep}}{1 \text{ GWh}} * \frac{5,29 \text{ tep biomasa}}{1 \text{ tep } E_{final}} = 678,1 \text{ ktep}$$

$$E_{biomasa_{llano}} = 4.648 \text{ GWh} * \frac{85,985 \text{ tep}}{1 \text{ GWh}} * \frac{5,29 \text{ tep biomasa}}{1 \text{ tep } E_{final}} = 2.114,2 \text{ ktep}$$

$$E_{biomasa_{valle}} = 877 \text{ GWh} * \frac{85,985 \text{ tep}}{1 \text{ GWh}} * \frac{5,29 \text{ tep biomasa}}{1 \text{ tep } E_{final}} = 398,9 \text{ ktep}$$

La suma de los tres consumos de energía final es igual a 3.191 ktep, que coincide con la demanda final de la generación eléctrica de biomasa calculada en el capítulo 6.3.

El último paso consiste en distribuir los beneficios de la generación de cada período entre la biomasa consumida. De esta forma se calcularía el beneficio de la biomasa por unidad de energía primaria. El precio máximo que estaría dispuestos a pagar los productores de electricidad por una unidad de biomasa coincide con este coste. Cualquier precio de compra de energía por debajo supondría beneficios para el productor. El precio calculado se corresponde con el break-even point, es decir, beneficio nulo.

$$\text{Precio demanda biomasa}_{punta} = \frac{73,7 \text{ M€}}{678,1 \text{ ktep}} = 108,6 \frac{\text{€}}{\text{tep}}$$

$$\text{Precio demanda biomasa}_{llano} = \frac{178,1 \text{ M€}}{2.114,2 \text{ ktep}} = 84,3 \frac{\text{€}}{\text{tep}}$$

$$\text{Precio demanda biomasa}_{valle} = \frac{26,7 \text{ M€}}{398,9 \text{ ktep}} = 66,9 \frac{\text{€}}{\text{tep}}$$

Centrales térmicas de carbón transformadas a biomasa

El cálculo realizado para las centrales térmicas de carbón es el mismo, pero además incluyendo la inversión necesaria para transformar las centrales. También se realiza la división en tres tramos al año. No es necesario repetir los cálculos, ya que tanto la producción como el beneficio son proporcionales a los cálculos de la biomasa pura. Lo único que cambia es la potencia instalada, que es mucho mayor, de 10.030 MW. Las horas de funcionamiento equivalentes son también 8.0000. Las horas de generación se reparten de forma similar en los tres periodos estudiados y el precio de venta eléctrico es, como cabe suponer, el mismo.

En primer lugar, calculamos la generación eléctrica asociada a cada uno de los tramos.

$$E_{punta} = 10.030 \text{ MW} * 1.700 \text{ horas} = 17.051 \text{ GWh}$$

$$E_{llano} = 10.030 \text{ MW} * 5.300 \text{ horas} = 53.159 \text{ GWh}$$

$$E_{valle} = 10.030 \text{ MW} * 1.000 \text{ horas} = 10.030 \text{ GWh}$$

A continuación, se calcula la demanda de energía primaria de la biomasa para cada uno de los tramos.

$$E_{biomasa_{punta}} = 17.051 \text{ GWh} * \frac{85,985 \text{ tep}}{1 \text{ GWh}} * \frac{5,29 \text{ tep biomasa}}{1 \text{ tep } E_{final}} = 7.755,8 \text{ ktep}$$

$$E_{biomasa_{llano}} = 53.159 \text{ GWh} * \frac{85,985 \text{ tep}}{1 \text{ GWh}} * \frac{5,29 \text{ tep biomasa}}{1 \text{ tep } E_{final}} = 24.179,8 \text{ ktep}$$

$$E_{biomasa_{valle}} = 10.030 \text{ GWh} * \frac{85,985 \text{ tep}}{1 \text{ GWh}} * \frac{5,29 \text{ tep biomasa}}{1 \text{ tep } E_{final}} = 4.562,2 \text{ ktep}$$

La suma de las tres demandas es igual a 36.498 ktep, que es la demanda total calculada anteriormente.

Ahora bien, en el caso de las centrales térmicas de carbón transformadas a biomasa, hay que considerar el coste de las inversiones realizadas.

Como se ha determinado en el capítulo de análisis sectorial de la generación eléctrica, el coste medio estimado de la transformación de las centrales es de 37,5 €/kW. Teniendo en cuenta que la potencia total instalada de carbón que puede ser transformada en biomasa es de 10.030 MW, el coste total de la transformación es el siguiente.

$$inversión = 37,5 \frac{€}{kW} * 10.030 \text{ MW} * 1000 = 376,125 \text{ M€}$$

Esta inversión se reparte a lo largo de los 25 de años de vida útil que tiene una planta de biomasa. Se toma una tasa de descuento del 5 % para calcular el valor de la amortización en 2030.

$$anualidad = \frac{\text{coste de capital}}{\frac{1 + \frac{1}{(1+i)^n}}{i}}$$

$$anualidad = \frac{376,125 \text{ M€}}{\frac{1}{0,05} + \frac{(1 + 0,05)^{50} - 1}{0,05}} = 26,7 \text{ M€}$$

La hipótesis que se va a tomar es que la inversión se amortizará con la venta eléctrica en las horas punta, ya que son aquellas horas en las que la biomasa va a estar produciendo seguro, y además el margen es mayor al ser más alto el precio de venta. La amortización anual se reparte entre el consumo de energía primaria en el tramo de punta.

$$\frac{26,7 \text{ M€}}{7.755,8 \text{ ktep}} = 3,4 \frac{\text{€}}{\text{tep}}$$

El coste de inversión imputable al consumo de energía primaria de la biomasa es de 3,4 euros por tep. Esta cifra representa la diferencia en el precio de demanda de las horas punta de las plantas de biomasa ya instaladas y las centrales de carbón transformadas, que tienen que amortizar esta inversión.

El precio de demanda es distinto únicamente en las horas punta, que es el único tramo donde las centrales de carbón convertidas modifican su precio de demanda para amortizar la inversión. En el resto de tramos el precio de demanda es el mismo, ya que las inversiones no afectan.

$$Precio \text{ demanda biomasa}_{punta} = 108,6 \frac{\text{€}}{\text{tep}} - 3,4 \frac{\text{€}}{\text{tep}} = 105,2 \frac{\text{€}}{\text{tep}}$$

$$Precio \text{ demanda biomasa}_{llano} = 84,2 \frac{\text{€}}{\text{tep}}$$

$$Precio \text{ demanda biomasa}_{valle} = 66,9 \frac{\text{€}}{\text{tep}}$$

En resumen, existen 4 precios de demanda de biomasa. Dos se corresponden a la demanda en horas punta de las plantas de biomasa convencionales y de las centrales térmicas convertidas, con una ligera diferencia por la amortización de la inversión. Las otras dos demandas se corresponden con los tramos de llano y de valle.

$$Demanda_{punta\ 1} = 678,1\ ktep$$

$$Demanda_{punta\ 2} = 7.755,8\ ktep$$

$$Demanda_{llano} = 2.114,2\ ktep + 24.179,8\ ktep = 26.294,0\ ktep$$

$$Demanda_{valle} = 398,9\ ktep + 4.562,2\ ktep = 4.961,1\ ktep$$

6.5. Construcción de la curva de demanda

El último paso del análisis consiste en construir la curva de demanda de biomasa de los diferentes sectores estudiados en 2030 a partir de los resultados obtenidos. Esta demanda se cuantifica en cantidad de energía primaria, medida en ktep, y en precio de demanda en €/tep.

Tabla 15: Resultados del análisis del potencial de la demanda de biomasa en 2030

Sector	Demanda de Energía primaria (ktep)	Precio (€/tep)
Papel	1.785	373,0
Cemento	1.768	311,2
Biomasa eléctrica punta 1	678	108,6
Biomasa eléctrica punta 2	7.756	105,2
Biomasa eléctrica llano	26.294	84,2
Biomasa eléctrica valle	4.961	66,9

La demanda potencial total de biomasa en 2030 asciende a 43.241,9 ktep, esencialmente por la alta demanda de las centrales térmicas, que asciende a 36.498 ktep.

En el primer escalón de la curva de demanda se encuentra la demanda energética de la industria del papel. El máximo precio que estarían dispuestos a pagar desde la industria del papel es de 373,0 € por tep de biomasa, que equivale al coste del gas natural equivalente más las emisiones de CO₂ asociadas a la generación de la misma cantidad de energía final. Además, el precio de demanda se ve alterado por las inversiones necesarias para transformar la industria.

En el caso de la industria del cemento, el uso de la biomasa reemplazaría al coque de petróleo, que tiene un precio unitario más bajo al tratarse de un residuo. El coste de oportunidad de sustituir el gas natural como combustible con el efecto de las inversiones es de 331,2 € por tep de energía primaria de biomasa.

Por último, aparece la biomasa para generación eléctrica. En el análisis, utilizando como referencia el escenario de precios de venta eléctrico de las proyecciones a futuro realizadas en (Rivier, y otros, 2018), se han considerado tres tramos de generación con un precio de venta de electricidad para cada tramo. Además, en el tramo de punta, las

centrales térmicas de carbón alteran ligeramente su precio de demanda para compensar las inversiones realizadas.

Se ha considerado que el precio máximo de demanda de la biomasa es áquel que supone beneficio nulo. Además, se ha utilizado como referencia un total de 8.000 horas de funcionamiento del parque de generación y un escenario de O&M de 4 €/MWh.

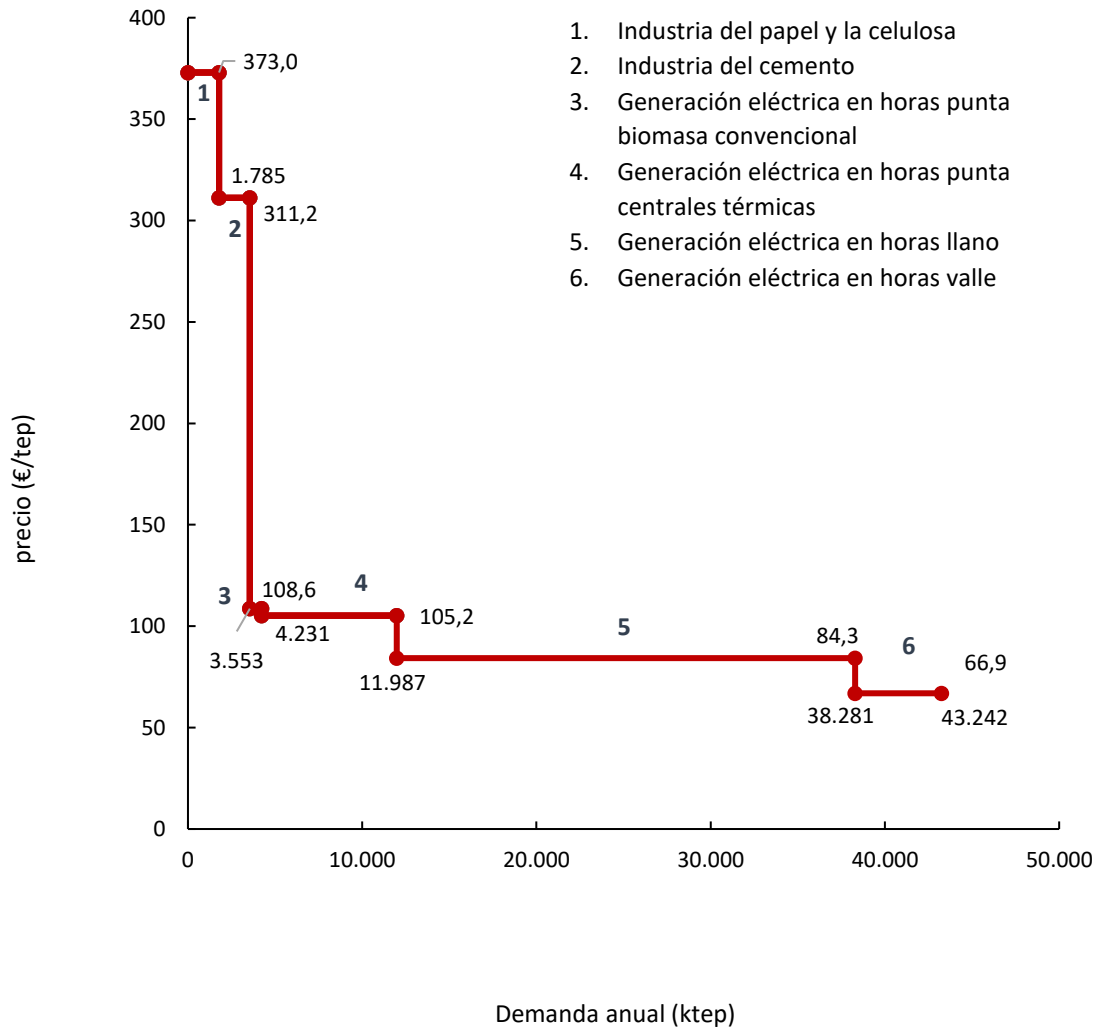


Figura 31: Demanda potencial de biomasa en 2030

7. Análisis de resultados

El último paso del proyecto consiste en el análisis de los resultados obtenidos. Se analizan conjuntamente las curvas de oferta y demanda construidas para determinar el potencial de la biomasa que, desde un criterio económico, tiene sentido explotar.

Para la correcta comprensión de este análisis, es interesante resumir tanto la oferta como la demanda de energía primaria procedente de la biomasa en 2030.

7.1. Oferta

En primer lugar, se ha cuantificado el potencial de la biomasa en España a partir de los datos publicados en el PER 2011-2020 (IDAE, 2009). Como se ha mencionado durante el proyecto, el análisis se centra en la biomasa de origen forestal y agrícola, que se clasifica en 6 categorías. En la Tabla 16 se detalla la cantidad de biomasa disponible y el coste medio de obtención por tipo de biomasa.

Tabla 16: Resumen de la oferta potencial de energía primaria de la biomasa en 2030

Tipo de biomasa	Disponibilidad de energía primaria (ktep)	Coste medio de obtención (€/tep)
Restos agrícolas	6.393	100,2
Masas forestales existentes: Restos de aprovechamientos madereros	636	124,7
Masas leñosas de implantación en terreno agrícola	1.468	163,0
Masas forestales existentes: Aprovechamiento del árbol completo	3.414	198,9
Masas herbáceas susceptibles de implantación en terreno agrícola	3.593	263,6
Masas leñosas susceptibles de implantación en terreno forestal	1.782	356,3
Total	17.287	

7.2. Demanda

Por otro lado, se ha realizado un análisis de la demanda potencial de biomasa para determinados sectores en los que la biomasa presenta un alto potencial. Estos sectores son la industria papelera, la industria del cemento y la generación eléctrica. En ese último sector se diferencia entre la potencia instalada de biomasa prevista en 2020 por un lado, y las centrales térmicas de carbón susceptibles de ser convertidas para el uso de biomasa, por otro.

En la

se resume la demanda de energía primaria procedente de la biomasa para cada uno de los sectores, incluyendo el precio de demanda en euros por tep.

Tabla 17: Resumen de la demanda potencial de energía primaria de la biomasa en 2030

Industria	Demanda de Energía primaria (ktep)	Precio (€/tep)
Papel	1.785	373,0
Cemento	1.768	311,2
Biomasa eléctrica punta 1	678	108,6
Biomasa eléctrica punta 2	7.756	105,2
Biomasa eléctrica llano	26.294	84,2
Biomasa eléctrica valle	4.961	66,9
Total	43.242	

7.3. Análisis de las curvas de oferta y demanda

A continuación se estudian de forma conjunta las curvas de oferta y demanda. De esta forma, se puede determinar cuál es el potencial de la biomasa que puede ser explotado y cuál no tiene sentido utilizar desde un punto de vista meramente económico, en el caso de que exista. El coste medio de obtención de la biomasa potencial oscila entre 100,2 y 356,3 euros por tep.

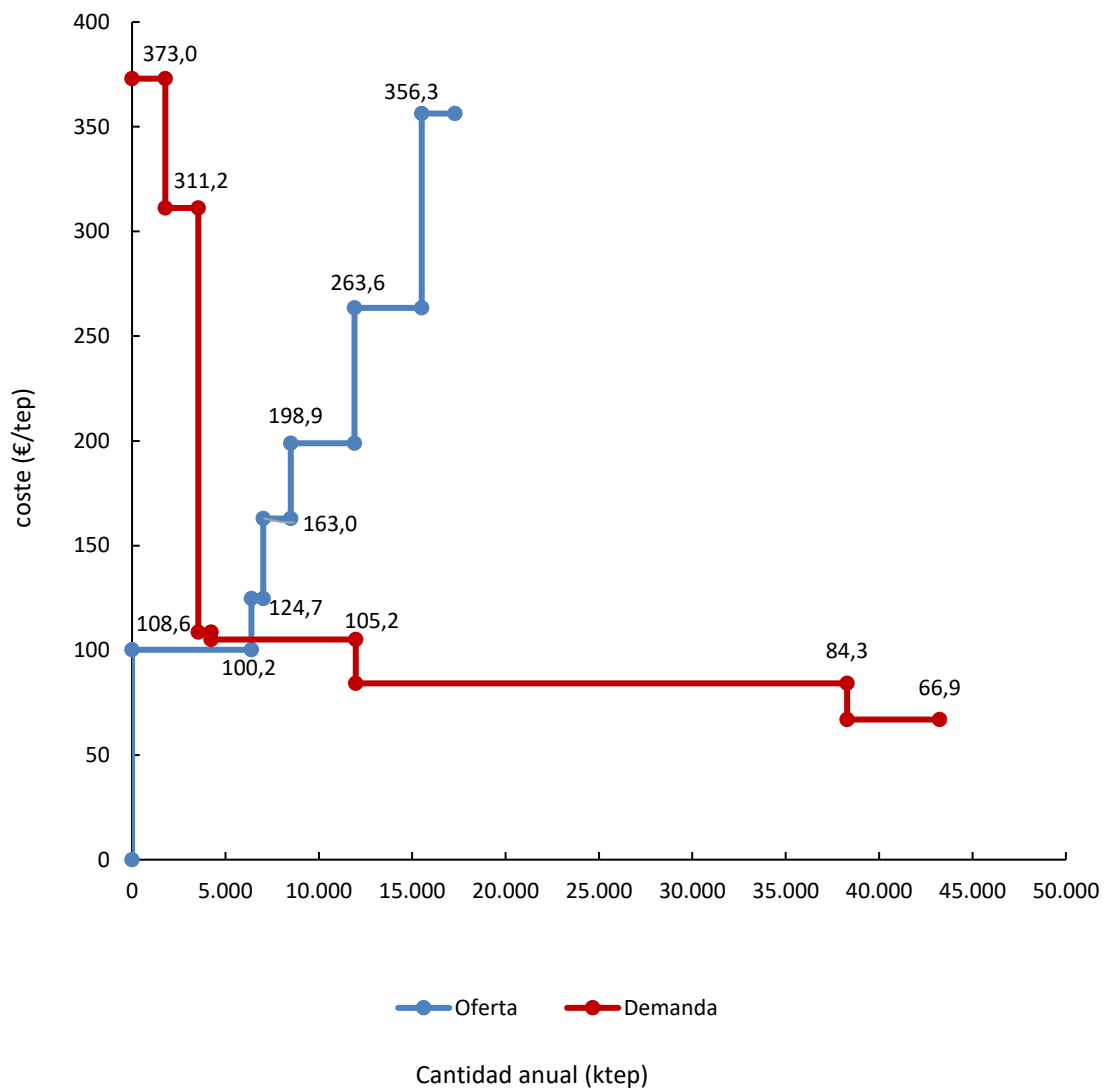


Figura 32: Oferta y Demanda de energía primaria de biomasa en 2030

Desde el punto de vista de la demanda, la industria del papel tiene el precio de demanda más alto, de unos 373,0 euros por tep, dado el precio del gas natural, que es el combustible mayoritario en esta industria. Cualquiera de las biomásas sería rentable como combustible para la industria. La cantidad de biomasa demandada en 2030 asciende a 1.785 ktep.

El siguiente sector en aparecer en la curva de demanda es la industria del cemento. El precio de demanda se corresponde al coste equivalente del coque de petróleo, que es el principal combustible en la industria, como se ha visto antes. Este precio es de 311,2 euros por tep de biomasa, que coincide prácticamente con el coste de obtención de 163,0 euros por tep de biomasa. Cualquier tipo de biomasa, con excepción de las masas leñosas susceptibles de implantación en terreno forestal, serían rentables como combustible de la industria.

Por último, aparece la biomasa para generación eléctrica, separada en cuatro tramos distintos. En primer lugar, se encuentra la demanda de biomasa para generación eléctrica en horas punta, por parte de la potencia instalada de biomasa convencional. El precio de demanda es de 108,6 euros por tep de biomasa. Esta demanda, de 678 ktep podría ser satisfecha por la oferta de restos agrícolas con un coste medio de obtención de 100,2 euros por tep. A continuación, aparece la demanda de las centrales térmicas de carbón transformadas. El precio de demanda es ligeramente inferior al de las centrales convencionales, de 105,2 euros por tep, para compensar las inversiones realizadas. La disponibilidad de restos agrícolas no es suficiente para cubrir completamente la demanda potencial. El potencial anual es de 6.393 ktep de biomasa procedente de restos agrícolas, mientras que la demanda a cubrir es igual a la suma de 678 ktep a 108,6 euros por tep y 7.756 ktep a 105,3 euros. En principio, se cubriría totalmente la demanda de las centrales convencionales y el resto de la oferta se destinaría a las centrales del carbón. La oferta restante para las centrales de carbón sería de 5.037 ktep, en torno a un 65% de la demanda total.

Sin embargo, es probable que los sectores industriales, que presentan un precio de demanda mayor, compitan con el sector de la generación por los restos agrícolas, ya que presentan el precio más bajo. La demanda total de los sectores industriales es de 3.553 ktep. En este escenario, las centrales convencionales seguirían cubriendo su demanda de 678 ktep íntegramente. En el caso de las centrales de carbón, solo quedarían 2.162 ktep de restos agrícolas, lo que equivale a un 28% de la demanda.

Por debajo, aparece la demanda de biomasa para generación eléctrica en llano, con un precio de demanda de 84,3 euros por tep, y en valle, a 66,9 euros. Los dos precios de demanda son demasiado bajos para ser cubiertos bajo un criterio de mercado. Sería necesario acudir a un sistema de ayudas para que esta tecnología sea competitiva en las horas de llano y valle. De hecho, en un escenario en 2030 en el que se persigue la descarbonización, es bastante razonable que se fomente la generación a partir de la biomasa como una de las tecnologías clave en el mix eléctrico.

Para concluir, podemos afirmar que la demanda potencial de energía primaria de la biomasa de la industria del papel, que asciende a 1.785 ktep, puede ser suplida desde un criterio económico por todas las biomásas.

La demanda de la industria del cemento, de 1.768 ktep, puede ser cubierta por todos los tipos de biomasa salvo las masas leñosas susceptibles de implantación en terreno forestal). La biomasa de restos agrícolas, que presenta una alta disponibilidad, 6.393 ktep, a un bajo coste, 100,2 €/tep, es la alternativa más económica para abastecer la demanda energética de la industria del papel.

Por último, la demanda de biomasa para generación eléctrica en horas punta, con 678 ktep a 108,6 euros por tep y 7.756 ktep a 105,3 euros por tep podrían ser cubiertos parcialmente por la biomasa de restos agrícolas. Los 678 ktep de las centrales convencionales siempre se cubrirían, mientras que el resto dependerá de la estrategia de los sectores industriales que compiten por biomasa.

En el caso de que las industrias del papel y el cemento acudan a la biomasa de restos agrícolas, la disponibilidad de biomasa estaría limitada a 2.162 ktep, de las 7.756 demandadas. Esta situación es la que se puede deducir de la curva de oferta y demanda, Figura 32. Los restos agrícolas cubren la demanda de los sectores industriales, la generación eléctrica convencional y parte de la demanda de las centrales térmicas. La demanda agregada cubierta sería igual a la oferta de biomasa de restos agrícolas, es decir, 6.393 ktep.

Si por el contrario, el escenario es que los sectores industriales optan por otro tipo de biomasa, la disponibilidad de la biomasa de restos agrícolas para cubrir la demanda de las centrales térmicas ascendería a 5.037 ktep de las 7.756 ktep de demanda.

A la vista de los resultados, parece claro afirmar que la disponibilidad de la biomasa limita el potencial de transformación de las centrales de carbón a biomasa. No tiene sentido abordar la transformación completa del parque térmico de carbón de 10.030 MW, sino simplemente una parte del mismo.

8. Conclusiones

La biomasa está llamada a ser una de las claves dentro del consumo energético de nuestra sociedad en el futuro próximo. Se caracteriza por una gran versatilidad, ya que puede ser utilizada para generación eléctrica, térmica e incluso como combustible en el transporte en el caso de los biocombustibles. Su carácter renovable le confiere un papel fundamental en la sustitución de los combustibles fósiles como el carbón y el petróleo dentro del proceso de descarbonización que persiguen la industria y otros sectores, como el de la generación eléctrica.

Además, la explotación de la biomasa con fines energéticos tiene asociados otros beneficios de gran valor para la sociedad como son el desarrollo económico y social del medio rural, el ahorro económico y el impacto medioambiental derivados de la eliminación de residuos para su aprovechamiento como biomasa o la reducción del riesgo de incendios.

A pesar de los incontables beneficios asociados a la biomasa, es importante ser conscientes de algunos riesgos como la emisión de partículas en suspensión y NO_x, o la posible contribución a la deforestación. Sin embargo, el desarrollo sostenible de la biomasa reduce enormemente estos riesgos.

España es uno de los países con mayor potencial para el desarrollo de la biomasa, dada la gran extensión de superficie forestal y agrícola con la que cuenta. El potencial estimado de biomasa anual en el PER 2011-2020, que se ha utilizado como referencia en este proyecto, es de aproximadamente 17.000 ktep.

A día de hoy, únicamente se explotan unas 5.000 ktep de energía primaria de biomasa, principalmente para uso residencial y de la industria. Otra parte importante se utiliza para generación eléctrica en plantas de biomasa. Dentro de las industrias que más biomasa utilizan destaca claramente la industria del papel y la celulosa, que aprovecha la biomasa generada en el proceso productivo de la industria. Sin embargo, la biomasa todavía aporta únicamente una tercera parte de la energía total consumida por esta industria. El potencial que tiene la biomasa en este sector es claramente mayor. Otra industria que presenta un fuerte atractivo para el desarrollo de la biomasa es la industria del cemento. Se trata de una de las primeras industrias en remplazar los combustibles convencionales por combustibles alternativos. La biomasa forestal y agrícola se encuentra dentro de los combustibles alternativos, que a día de hoy cubren alrededor de una cuarta parte de la demanda energética de la industria en España.

El sector de la generación eléctrica presenta un enorme potencial, principalmente debido a la posibilidad de transformación de las centrales térmicas de carbón en centrales de biomasa. Esta transformación ya se ha producido en algunas centrales de países de nuestro entorno, entre las que destaca la mega central de Drax en Reino Unido. El desarrollo al máximo del potencial de la biomasa eléctrica también pasa por aumentar las horas de funcionamiento hasta 8.000 horas, como señalan algunos agentes del sector.

En este proyecto se ha cuantificado el potencial de la biomasa forestal y agrícola en términos de disponibilidad anual y coste de obtención, partiendo de los datos publicados

en el PER 2011-2020. Este potencial puede ser considerado como la oferta potencial y su precio.

Por otro lado, se ha realizado una estimación del potencial de la biomasa en la industria del papel y la celulosa, la industria del cemento y el sector de la generación eléctrica, tomando como horizonte el año 2030. Como se ha mencionado anteriormente, son tres sectores en los que la biomasa está presente a día de hoy y poseen un gran potencial de desarrollo de la biomasa.

Los resultados obtenidos revelan que la industria del cemento presenta la disponibilidad a pagar más alta de biomasa, que equivale al coste de oportunidad del combustible convencional mayoritario, que en esta industria es el coque de petróleo. Por debajo, se sitúa la demanda de la industria del papel y la celulosa, cuyo combustible mayoritario a día de hoy es el gas natural. Además, la industria papelera necesita realizar inversiones para poder explotar el potencial de biomasa en 2030. Estas inversiones tienen como efecto una reducción en la disponibilidad a pagar para conseguir la amortización de estas inversiones. Ambas demandas pueden ser fácilmente cubiertas por el potencial disponible, tanto en términos de precio como de disponibilidad. La demanda agregada de las dos industrias es de unos 3.500 ktep, y la oferta potencial asciende a unos 17.000 ktep. Los sectores industriales, por tanto, verían satisfecha su demanda de biomasa en 2030 sin problema.

Además, se ha realizado el análisis de la biomasa eléctrica, diferenciando entre la potencia instalada de biomasa convencional y el potencial de las centrales térmicas de carbón susceptibles de transformación. Los resultados muestran que bajo un criterio puramente económico, la generación con biomasa solo es rentable en el tramo de horas punta con biomasa procedente de restos agrícolas como combustible. Sin embargo, la demanda es mucho más alta que la disponibilidad de biomasa de restos agrícolas. Esta disponibilidad está además condicionada por la demanda de los sectores industriales. En resumen, la demanda de las centrales convencionales puede ser cubierta íntegramente, pero la demanda de las centrales térmicas solo puede ser cubierta parcialmente. Para poder operar competitivamente en los tramos de llano y valle, la biomasa eléctrica tiene que recibir algún tipo de ayuda o subvención que contemple los posibles beneficios del uso de biomasa y compense los desequilibrios entre oferta y demanda. La conclusión es que la disponibilidad de la biomasa limita el potencial de las centrales térmicas. Parece desproporcionado convertir en su totalidad el parque térmico de carbón de 10.030 MW, lo más lógico a la vista de la disponibilidad de biomasa es convertir únicamente una parte. La máxima demanda de las centrales térmicas que potencialmente puede ser cubierta se sitúa en torno al 65%, como se ha mostrado en el análisis de resultados. Esto quiere decir que el máximo potencial aprovechable asciende al 65% de la potencia instalada, es decir, en torno a 6.500 MW de los 10.030 MW del parque total. Si se quiere abordar la conversión completa son necesarias las ayudas y probablemente la adquisición de biomasa no autóctona.

En definitiva, la biomasa es una fuente de energía renovable fundamental en los objetivos de descarbonización de nuestra sociedad. La biomasa posee un alto potencial en España que, con las medidas necesarias, puede ser desarrollado en de aquí a 2030 en diversos sectores. En las industrias del papel y el cemento, por ejemplo, la biomasa

tiene el potencial de convertirse en el combustible mayoritario sustituyendo a los combustibles fósiles. En el sector de la generación eléctrica el potencial también es alto, especialmente con la conversión de las centrales de carbón a biomasa, aunque los márgenes en los precios son más bajos que en la industria. El desarrollo del potencial de las centrales de carbón está limitado por la disponibilidad de la biomasa, insuficiente para satisfacer la demanda energética de la potencia de 10.030 MW de las centrales de carbón. Por otro lado, los desequilibrios económicos entre oferta y demanda pueden ser paliados fácilmente con ayudas económicas y subvenciones con el objetivo de promover los beneficios de la biomasa. La biomasa sería capaz de cubrir la demanda energética de las horas punta de las plantas convencionales de biomasa y parte del parque térmico de carbón sin necesidad de ayudas, mientras que en las horas con menor precio de venta eléctrico sería necesario corregir los desequilibrios entre oferta y demanda con la oferta restante, que no sería capaz de cubrir todo el potencial de generación.

Entre los futuros desarrollos que ha sido imposible abordar en este proyecto se encuentra el análisis de la retribución adicional que debería recibir la biomasa para poder operar en tramos en los que el precio de venta eléctrico sea demasiado bajo. Esta retribución debería tener en cuenta la fiabilidad que aporta al sistema un recurso renovable que además puede ser almacenado como es la biomasa.

9. Bibliografía

- AFANDPA. 2015.** *What is Black Liquor?* 2015.
- Andrew, Robbie M. 2018.** *Global CO2 emissions from cement production.* 2018.
- APPA. 2017.** *Estudio del impacto macroeconómico de las energías renovables en España.* 2017.
- . **2018.** *Nota de prensa.* 2018.
- ASPAPPEL. 2018.** *Agenda Sectorial Industria Papelera.* 2018.
- . **2013.** La fábrica de ence en pontevedra, autosuficiente al 100% con biomasa. *ASPAPPEL.* 2013.
- . **2018.** *Memoria de sostenibilidad. La bioindustria circular del papel y su descarbonización.* 2018.
- . **2012.** Smurfit kappa nervión estrena su planta de cogeneración por biomasa de 21,4 mw. *ASPAPPEL.* 2012.
- Bioenergy International. julio de 2012.** Smurfit Kappa Nervión mejora su rendimiento. julio de 2012.
- BOE. 21 de enero de 2016.** *BOE.* 21 de enero de 2016.
- . **26 de mayo de 2017.** *BOE.* 26 de mayo de 2017.
- . **28 de julio de 2017.** *BOE.* 28 de julio de 2017.
- Booth, Mary S. 2018.** *Not carbon neutral: Assessing the net emissions impact of residues burned for bioenergy.* 2018.
- CEMA. 2016.** *Anuario del sector cementero español.* 2016.
- . **2016.** *Reciclado y valorización de residuos en la industria cementera en España.* 2016.
- CEPI. 2011.** *The forest fibre industry in 2050.* 2011.
- CEPI, Confederation of european paper industries. 2018.** *Key Statistics 2017, European Pulp & Paper Industry.* 2018.
- . **2014.** *Resource efficiency in the pulp and paper industry. Making more from our natural resources.* 2014.
- Clean coal centre, IEA. 2018.** *Uk: utility of agility: Drax group boss plots coal-free future for £1.5B U.K. energy outfit.* 2018.
- COSE. 2019.** *España es la tercera superficie forestal europea, pero octava en aprovechamiento de la madera para energía.* 2019.
- CSI/ECRA. 2017.** *Development of State of the Art Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead.* 2017.
- Drax. 2018.** Drax closer to coal-free future with fourth biomass unit conversion. 2018.

- Ecofys, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, Öko-Institut. 2009.** *Sector report for the pulp and paper.* 2009.
- El Economista. 2018.** Ence instala una planta de biomasa de 115 millones al comprar derechos a Forestalia. *El Economista.* 2018.
- ENCE. 2017.** <http://encepontevedra.com/biofabrica/>. [Online] 2017.
- . **2019.** <https://ence.es/energia-renovable/huelva/>. [Online] 2019.
- Energías renovables. 2018.** De megacentral de carbón a 2.600 MW generados con biomasa. *Energías renovables.* 2018.
- . **2019.** El Miteco ve con buenos ojos que las centrales de carbón pasen a biomasa. *Energías renovables.* 2019.
- . **2019.** La central térmica de carbón de Meirama vuelve a sonar para convertirla en biomasa. *Energías renovables.* 2019.
- European Commission. 2012.** *Energy Efficiency and CO2 Reduction in the Pulp and Paper Industry.* 2012.
- FAO. 2019.** www.fao.org. [Online] 2019.
- Fern. 2015.** *How biomass burning wrecks Europe's forests.* 2015.
- Fundación Crana. 2019.** www.crana.org. [Online] 2019.
- Gerres, Timo, Chaves, José Pablo and Linares, Pedro. 2019.** *El futuro de las materias primas en España.* 2019.
- Gregorio, Margarita de. 2012.** *El potencial de la biomasa en España. Condiciones para su desarrollo y viabilidad económica.* 2012.
- IDAE. 2017.** *Balance del consumo de energía final.* 2017.
- . **2011.** *Factores de conversión energía final a energía primaria.* 2011.
- . **2019.**
http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_PCI_Combustibles_Carburantes_final_valores_Update_2014_0830376a.xlsx. [Online] 2019.
- . **2017.** *Informe estadístico de energías renovables.* 2017.
- . **2009.** *Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020.* 2009.
- IEA. 2016.** *Bioenergy and biofuels.* 2016.
- . **2018.** *Renewables 2018, Analysis and Forecasts to 2023.* 2018.
- Institute, Renewable Energy. 2017.** *Biomass co-firing: For the reduction of coal-fired power plants.* 2017.
- INYPSA. 2017.** *INYPSA inaugura una planta de biomasa para la producción de vapor industrial.* 2017.
- IRBEA, Irish bioenergy association. 2016.** *Study on biomass combustion emissions.* 2016.

- IRENA. 2012.** *Biomass for power generation.* 2012.
- . **2014.** *Global bioenergy supply and demand projections.* 2014.
- . **2018.** *Renewable power generation costs in 2017.* 2018.
- La Crónica . 2018.** Forestalia instalará su caldera de biomasa en Cubillos del Sil el próximo semestre. *La Crónica.* 2018.
- La Información. 2009.** Smurfit Kappa invierte 25 millones para energía renovable de biomasa forestal en planta de Iurreta (Vizcaya). *La Información.* 2009.
- La Vanguardia. 2017.** LC Paper de Besalú invierte 950.000 euros en una caldera de biomasa para producir de forma más sostenible. *La Vanguardia.* 2017.
- La Voz de Galicia. 2019.** Greenalia ya tiene casi lista para empezar a operar en Curtis la segunda mayor planta de biomasa de España. *La Voz de Galicia.* 2019.
- Laurijssen, Jobien. 2013.** *Energy use in the paper industry, an assessment of improvement potentials at different levels .* 2013.
- Margarit i Roset, Jaume. 2011.** *Evaluación del potencial de energía de la biomasa. Estudio técnico PER 2011-2020.* Madrid : s.n., 2011.
- MINETAD/IDAE. 2017.** *Informe estadístico de energías renovables.* 2017.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2014.** *Diagnóstico del Sector Forestal Español.* 2014.
- Ministerio de economía y competitividad. 2016.** *Estrategia española de bioeconomía, Horizonte 2030.* 2016.
- Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital. 2016.** *La energía en España.* 2016.
- MITECO. 2019.** *Borrador del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030.* 2019.
- Mpac. 2016.** *Assesing pulp and paper mills in Ontario.* 2016.
- National Energy Education Development. 2016.** *Biomass at a glance.* 2016.
- Oficemen. 2016.** *Anuario del sector cementero español.* 2016.
- Power Engineering. 2018.** *World's First Coal to Biomass Conversion Using Advanced Wood Pellets.* 2018.
- REE. 2017.** *Las energías renovables en el sistema eléctrico español.* 2017.
- Regos, Adrián, et al. 2016.** *Synergies Between Forest Biomass Extraction for Bioenergy and Fire Suppression in Mediterranean Ecosystems: Insights from a Storyline-and-Simulation Approach.* 2016.
- Reuters. 2019.** *France's EDF in race to convert Cordemais plant from coal to biomass.* *Reuters.* 2019.
- Rivier, Michel, et al. 2018.** *Análisis de escenarios futuros para el sector eléctrico en España para el periodo 2025-2050.* 2018.
- Transport & environment. 2010.** *Bioenergy, a carbon accounting time bomb.* 2010.

World Bank. 2019. *Commodities Price Forecast*. 2019.

10. Anexos

10.1. Consumo de energía primaria por combustible

	2016	
	(ktep)	Estructura (%)
Carbón	10.442	8,5
Petróleo	54.633	44,2
Gas natural	25.035	20,3
Nuclear	15.260	12,4
Energías renovables	17.213	13,9
-Hidráulica	3.130	2,5
-Otras energías renovables	14.083	11,4
-Eólica	4.205	3,4
-Biomasa y residuos	5.659	4,6
-R.S.U.	243	0,2
-Biomasa	5.185	4,2
-Biogás	231	0,2
-Biocarburantes	1.023	0,8
-Geotérmica	19	0
-Solar	3.177	2,6
-Fotovoltaica	693	0,6
-Solar termoeléctrica	2.190	1,8
-Solar térmica	293	0,2
Residuos no renovables	243	0,2
Saldo eléctrico	659	0,5
Total	123.485	100

Tabla 18: Consumo de energía primaria, (MINETAD/IDAE, 2017)

10.2. Consumo energía final por combustible

	2016	
	(ktep)	Estructura (%)
Carbón	1.340	1,6
Productos petrolíferos	41.266	48,1
Gas	13.446	15,7
Electricidad	20.115	23,4
Energías renovables	5.385	6,3
-Biomasa y otros	4.011	4,7
- Biomasa térmica	3.464	4
- Calor útil de la cogeneración	547	0,6
-Biogás	38	0
- Biogás térmico	23	0
- Calor útil de la cogeneración	15	0
-Biocarburantes	1.023	1,2
-Solar térmica	293	0,3
-Geotérmica	19	0
Total consumo final energético	81.551	95
Usos no energéticos:		
- Carbón	0	0
- Productos petrolíferos	3.879	4,5
- Gas	445	0,5
Total consumo final no energético	4.324	5
Total	85.275	100

Tabla 19: Consumo de energía final, (MINETAD/IDAE, 2017)

10.3. Balance eléctrico nacional

	2016	
	(GWh)	Estructura (%)
Carbón	37.382	13,6
Nuclear	58.619	21,3
Gas natural	52.828	19,2
Productos petrolíferos	16.764	6,1
Energías renovables	104.607	38,1
- Hidroeléctrica	36.385	13,2
- Eólica	48.914	17,8
- Eólica marina	0	0,0
- Termoeléctrica	5.579	2,0
- Fotovoltaica	8.064	2,9
- Biomasa	4.038	1,5
- Biogás	893	0,3
- RSU renovable	734	0,3
- Energías del mar	0	0,0
- Geotermia	0	0,0
Residuos no renovables	734	0,3
Generación procedente del bombeo	3.470	1,3
Otras fuentes	226	0,1
Producción bruta	274.629	100,0
Consumos en generación	10.319	
Producción neta	264.311	
Consumo en bombeo	4.819	
Saldo de intercambios	7.667	
DEMANDA (bc)	267.159	
Consumo sectores transformadores	6.507	
Pérdidas transp, distrib + diferencias estadísticas	26.716	
Demanda final de electricidad	233.936	

Tabla 20: Balance eléctrico nacional 2016, (IDAE, 2017)

10.4. Consumo de energía final por sector

	Consumo Energía Final (ktep)		
	Biomasa	Energía Total (excluyendo E. Eléctrica)	Energía Eléctrica
Industria	1.332	12.245	6.699
Extractivas (no energéticas)		289	152
Alimentación, bebidas y tabaco	197	1427	957
Textil, cuero y calzado	3	226	143
Pasta, papel e impresión	535	1146	499
Química (incluyendo petroquímica)	5	1855	839
Minerales no metálicos	205	2754	509
Siderurgia y fundición	0	2.033	1.161
Metalurgia no férrea	0	337	803
Transformados metálicos	0	537	410
Equipo de transporte	0	95	362
Construcción	14	798	174
Madera, corcho y muebles	312	440	106
Otras industrias	60	307	584
Transporte		34.357	463
Carretera		27495	24
Ferrocarril		80	224
Marítimo interior		626	
Aéreo: aviación interior		1940	
Aéreo: aviación internacional		4091	
Oleoductos		0	
Otros transporte no especificados		125	216
Usos diversos	2.672	15.736	12.834
Agricultura	68	1893	515
Pesca		243	
Comercio, Servicios y Admin. Públicas	102	4.444	6.183
Residencial	2.494	9.077	5.990
Otros usos diversos no especificados		78	146
Total (excluyendo E. Eléctrica)	4.004	62.338	19.996

Tabla 21: Consumo energía final biomasa 2016, (IDAE, 2016)

10.5. Consumo de combustibles de la industria del cemento

Consumo de combustibles por tipo de las empresas asociadas a Oficemen (cifras en t)

		2014	2015	2016	Tasas de variación 2015/2014	Tasas de variación 2016/2015
Tradicional						
a - Tradicional	Antracita importada	1.293			-100,0%	–
	Coque de petróleo de importación	613.476	495.832	474.778	-19,2%	-4,2%
	Coque de petróleo nacional	784.695	944.248	990.022	20,3%	4,8%
	Fuel oil hornos	12.886	13.455	12.635	4,4%	-6,1%
	Fuel oil otras instalaciones	110	90	1.077	-18,2%	1096,4%
	Gasóleo otras instalaciones	1.657	132	115	-92,0%	-12,7%
	Gasóleo para hornos	125	758	805	506,5%	6,1%
	Hulla importación	10.827	12.185	18.152	12,5%	49,0%
	Hulla nacional	1.542	10		-99,4%	-100,0%
	Otros combustibles tradicionales sólidos	8.965	29.101	17.611	224,6%	-39,5%
	Propano	101	130	108	28,7%	-16,9%
	Gas natural	3.240	3.060	2.939	-5,6%	-4,0%
Alternativo						
b - Alternativo fósil	Aceite mineral usado y emulsiones	16.199	25.144	36.456	55,2%	45,0%
	Disol., Barni., Pinturas y mezclas	22.349	32.942	52.975	47,4%	60,8%
	Lodos industriales	3.584	3.935	1.989	9,8%	-49,4%
	Otros líquidos alternativos no biomasa	31.539	25.631	24.987	-18,7%	-2,5%
	Otros sólidos alternativos no biomasa	12.773	12.690	5.176	-0,7%	-59,2%
	Plásticos	11.050	5.359	6.204	-51,5%	15,8%
	Residuos líquidos de hidrocarburos	7.707	6.265	18.471	-18,7%	194,8%
	Residuos procedentes de vehículos fuera de uso	21.998	35.698	20.169	62,3%	-43,5%
	Residuos sólidos de hidrocarburos	146	1.616		1006,8%	-100,0%
c - Alternativo PARC biomasa	CDR - RSU	276.633	277.247	281.455	0,2%	1,5%
	Neumáticos	114.855	97.155	132.287	-15,4%	36,2%
	Serrín impregnado o madera tratada	26.440	19.185	24.709	-27,4%	28,8%
	Textil	2.816	4.366	3.859	55,0%	-11,6%
d - Alternativo biomasa	Biomasa vegetal	47.218	41.065	6.345	-13,0%	-84,5%
	Harinas animales	64.856	77.648	84.288	19,7%	8,6%
	Lodos de depuradora urbana	23.046	20.347	17.097	-11,7%	-16,0%
	Madera	39.471	22.282	18.448	-43,5%	-17,2%
	Otros combustibles alternativos sólidos biomasa	3.557	40.662	51.378	1043,2%	26,4%
	Otros líquidos alternativos biomasa			1.625	–	–
	Aceites vegetales y glicerina	6			-100,0%	–
Total general	2.165.161	2.248.238	2.306.158	3,8%	2,6%	

Fuente: Oficemen.

10.6. Factores de conversión energía primaria a energía final y emisiones de CO₂

FACTORES DE CONVERSIÓN ENERGÍA FINAL -ENERGÍA PRIMARIA y FACTORES DE EMISIÓN DE CO₂ - 2010
CARBURANTES

FUENTE ENERGÉTICA	CONSUMO FINAL DIRECTO		ENERGÍA PRIMARIA ⁽¹⁾		FACTOR DE EMISIÓN ⁽²⁾
	tep	Volumen específico	tep	MWh	tCO ₂ /tep
Gasolina	1	1.290 l	1,10	12,79	2,90
Gasóleo A y B	1	1.181 l	1,12	13,02	3,06
Gas natural	1	910 Nm ³	1,07	12,44	2,34
Biodiesel	1	1.267 l	1,24	14,42	neutro
Bioetanol	1	1.968 l	1,70	19,77	neutro
Gases Licuados de Petróleo (GLP)	1	1.763 l	1,05	12,21	2,72
Queroseno	1	1.213 l	1,12	13,02	3,01

COMBUSTIBLES

FUENTE ENERGÉTICA	CONSUMO FINAL DIRECTO		ENERGÍA PRIMARIA ⁽¹⁾		FACTOR DE EMISIÓN ⁽²⁾
	tep	Volumen específico	tep	MWh	tCO ₂ /tep
Hulla	1	2,01 t	1,14	13,21	4,23
Lignito negro	1	3,14 t	1,14	13,21	4,16
Carbón para coque	1	1,45 t	1,14	13,26	4,40
Biomasa agrícola	1	3,34 t	1,25	14,53	neutro
Biomasa industria forestal	1	2,87 t	1,25	14,53	neutro
Coque de petróleo	1	1,29 t	1,42	16,49	4,12
Gas de coquerías	1	1,08 t	1,14	13,26	1,81
Gasóleo C	1	1.092 l	1,12	13,02	3,06
Fuelóleo	1	1.126 l	1,11	12,91	3,18
Gas Natural	1	910 Nm ³	1,07	12,44	2,34
Gases Licuados de Petróleo (GLP)	1	1.763 l	1,05	12,21	2,72
Butano	1	1.670 l	1,05	12,21	2,72
Propano	1	1.748 l	1,05	12,21	2,67
Gas de refinería	1	0,85 t	1,12	13,07	2,30

ELECTRICIDAD

TECNOLOGÍA	ENERGÍA FINAL		ENERGÍA PRIMARIA				FACTOR DE EMISIÓN		
			Bornas de central		En punto de consumo		En bornas de alternador (bruta)	En bornas de central (neta)	En punto de consumo
	MWh	tep	MWh	Tep	MWh	tep	tCO ₂ /MWh	tCO ₂ /MWh	tCO ₂ /MWh
Hulla+ antracita	1	0,086	2,52	0,22	2,73	0,24	1,13	1,17	1,27
Lignito pardo	1	0,086	2,68	0,23	2,91	0,25	0,90	0,93	1,01
Lignito negro	1	0,086	2,68	0,23	2,91	0,25	0,97	1,00	1,09
Hulla importada	1	0,086	2,52	0,22	2,73	0,24	0,90	0,94	1,02
Nuclear	1	0,086	3,03	0,26	3,29	0,28	0	0	0
Ciclo Combinado	1	0,086	1,93	0,17	2,09	0,18	0,34	0,35	0,38
Hidroeléctrica	1	0,086	1,00	0,09	1,09	0,09	0	0	0
Cogeneración MCI ⁽³⁾	1	0,086	1,67	0,14	1,74	0,15	0,37	0,38	0,42
Cogeneración TG ⁽⁴⁾	1	0,086	1,61	0,14	1,69	0,15	0,33	0,34	0,37
Cogeneración TV ⁽⁵⁾	1	0,086	1,72	0,15	1,80	0,16	0,41	0,42	0,46
Cogeneración CC ⁽⁶⁾	1	0,086	1,54	0,13	1,61	0,14	0,31	0,32	0,35
Eólica y fotovoltaica	1	0,086	1,00	0,09	1,09	0,09	0	0	0
Solar termoeléctrica	1	0,086	4,56	0,39	4,95	0,43	0	0	0
Biomasa eléctrica	1	0,086	4,88	0,42	5,29	0,46	0	0	0
Biogás	1	0,086	3,70	0,32	4,02	0,35	0	0	0
RSU	1	0,086	4,02	0,35	4,36	0,38	0,24	0,25	0,27
Centrales de fuelóleo	1	0,086	2,52	0,22	2,73	0,24	0,71	0,73	0,79
Gas siderúrgico	1	0,086	2,86	0,25	3,10	0,27	0,64	0,69	0,75
Energía Eléctrica General	1	0,086	0,17		0,18		0,23	0,23	0,25
			tep /MWh neto		tep /MWh		tCO ₂ /MWh bruto	tCO ₂ /MWh neto	tCO ₂ /MWh final
			1,94		2,11		2,63	2,72	2,95
			MWh primario/MWh neto	MWh primario/MWh final	tCO ₂ /tep bruto	tCO ₂ /tep neto	tCO ₂ /tep final		
Energía Eléctrica Baja Tensión (Sector Doméstico)	1	0,086	0,17		0,19		0,23	0,23	0,27
			tep /MWh neto		tep /MWh final		tCO ₂ /MWh bruto	tCO ₂ /MWh neto	tCO ₂ /MWh final
			1,94		2,21		2,63	2,72	3,09
			MWh primario/MWh neto	MWh primario/MWh final	tCO ₂ /tep bruto	tCO ₂ /tep neto	tCO ₂ /tep final		

(1) Incluye las pérdidas en las transformaciones para la obtención del combustible y/o carburante y transporte del mismo.

(2) En punto de consumo

(3) MCI: Motor de Combustión Interna Alternativo

(4) TG: Turbina de Gas

(5) TV: Turbina de Vapor

(6) CC: Ciclo combinado

10.7. Previsión de precios de materias primas

World Bank Commodities Price Forecast (constant US dollars)

Released: April 23, 2019

Commodity	Unit	2014	2015	2016	2017	2018	Forecasts							
							2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2030
Energy														
Coal, Australia	\$/mt	64.8	60.2	70.3	91.0	105.1	90.5	85.2	80.5	75.9	71.7	67.6	63.8	47.7
Crude oil, avg	\$/bbl	88.9	51.9	45.5	54.3	67.1	63.5	61.5	61.0	60.4	59.8	59.2	58.6	55.6
Natural gas, Europe	\$/mmbtu	9.3	7.0	4.9	5.9	7.5	5.8	5.7	5.7	5.7	5.7	5.6	5.6	5.6
Natural gas, US	\$/mmbtu	4.0	2.7	2.7	3.0	3.1	2.7	2.7	2.8	2.8	2.9	2.9	3.0	3.2
Natural gas LNG, Japan	\$/mmbtu	14.8	11.2	7.8	8.8	10.5	7.1	7.1	7.1	7.0	7.0	7.0	6.9	6.8
Non Energy Commodities														
Agriculture														
Beverages														
Cocoa	\$/kg	2.83	3.20	3.07	2.09	2.25	2.21	2.23	2.25	2.26	2.28	2.29	2.31	2.38
Coffee, Arabica	\$/kg	4.09	3.60	3.84	3.42	2.87	2.74	2.74	2.74	2.74	2.73	2.73	2.73	2.70
Coffee, Robusta	\$/kg	2.05	1.98	2.08	2.29	1.84	1.68	1.69	1.70	1.70	1.71	1.72	1.72	1.75
Tea, auctions (3), average	\$/kg	2.51	2.84	2.86	3.24	2.80	2.36	2.38	2.39	2.41	2.43	2.44	2.46	2.54
Food														
Fats and Oils														
Coconut oil	\$/mt	1,184	1,128	1,576	1,697	979	693	714	736	757	780	803	826	954
Groundnut oil	\$/mt	1,289	1,408	1,468	1,502	1,420	1,348	1,349	1,350	1,350	1,351	1,351	1,352	1,351
Palm oil	\$/mt	774	678	782	772	627	578	589	601	613	625	638	650	715
Soybean meal	\$/mt	483	398	398	360	398	342	343	345	346	348	349	351	358
Soybean oil	\$/mt	837	772	867	874	775	732	738	744	749	755	761	767	795
Soybeans	\$/mt	448	401	431	404	387	375	380	384	388	392	396	400	421
Grains														
Barley	\$/mt	135	124	111	100	124	120	122	124	126	128	130	132	143
Raize	\$/mt	178	173	169	159	161	162	162	163	163	164	164	165	167
Rice, Thailand, 5%	\$/mt	391	394	421	410	413	395	391	387	382	378	374	370	350
Wheat, US, HRW	\$/mt	263	209	177	179	206	204	203	202	201	199	198	197	191
Other Food														
Bananas, US	\$/kg	0.86	0.98	1.06	1.11	1.13	1.10	1.08	1.05	1.03	1.01	0.99	0.97	0.87
Meat, beef	\$/kg	4.67	4.66	4.32	4.51	4.12	4.19	4.10	4.02	3.94	3.86	3.78	3.71	3.34
Meat, chicken	\$/kg	2.15	2.03	1.97	2.18	2.20	2.02	2.00	1.99	1.97	1.95	1.93	1.92	1.83
Oranges	\$/kg	0.72	0.69	0.95	0.83	0.78	0.64	0.65	0.66	0.66	0.67	0.68	0.68	0.72
Shrimp, Mexico	\$/kg	16.44	13.50	11.93	13.69	12.01	11.55	11.52	11.49	11.45	11.41	11.37	11.34	11.13
Sugar, World	\$/kg	0.35	0.30	0.42	0.36	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.29	0.30
Raw Materials														
Timber														
Logs, Cameroon	\$/cum	430	397	412	406	406	385	383	380	378	375	373	370	358
Logs, Malaysia	\$/cum	261	251	292	273	265	265	264	263	262	261	260	259	254
Sawnwood, Malaysia	\$/cum	830	851	786	722	715	693	692	691	689	688	686	685	676
Other Raw Materials														
Cotton A Index	\$/kg	1.69	1.59	1.74	1.89	1.98	1.81	1.81	1.80	1.80	1.79	1.78	1.78	1.75
Rubber, Malaysian	\$/kg	1.80	1.61	1.71	2.05	1.54	1.64	1.66	1.69	1.71	1.73	1.76	1.78	1.91
Tobacco	\$/mt	4,611	5,015	5,111	4,810	4,774	4,717	4,602	4,492	4,380	4,272	4,166	4,062	3,577
Fertilizers														
DAP	\$/mt	397	426	336	332	386	356	357	357	357	357	357	358	358
Phosphate rock	\$/mt	102	123	117	92	86	101	101	101	101	101	100	100	99
Potassium chloride	\$/mt	274	303	277	224	212	231	233	235	237	240	242	244	254
TSP	\$/mt	353	386	310	291	340	327	325	323	321	318	316	314	302
Urea, E. Europe, bulk	\$/mt	285	284	206	220	245	241	241	241	240	240	240	240	238
Metals and Minerals														
Aluminum	\$/mt	1,725	1,701	1,706	2,023	2,070	1,868	1,865	1,854	1,843	1,831	1,820	1,808	1,749
Copper	\$/mt	6,340	5,631	5,177	6,342	6,411	6,248	6,323	6,248	6,169	6,091	6,015	5,939	5,565
Iron ore	\$/dmt	89.6	57.1	62.1	73.8	68.5	74.8	69.1	67.7	66.2	64.8	63.4	62.1	55.6
Lead	\$/mt	1,936	1,827	1,985	2,379	2,200	1,906	1,893	1,871	1,848	1,825	1,802	1,780	1,669
Nickel	\$/mt	15,606	12,121	10,204	10,700	12,875	12,399	12,968	13,107	13,237	13,370	13,504	13,638	14,309
Tin	\$/mt	20,230	16,417	19,072	20,621	19,778	20,418	20,427	20,219	19,996	19,778	19,563	19,348	18,283
Zinc	\$/mt	1,996	1,974	2,223	2,972	2,869	2,763	2,508	2,453	2,396	2,341	2,288	2,235	1,987
Precious Metals														
Gold	\$/toz	1,169	1,186	1,328	1,293	1,246	1,261	1,287	1,260	1,233	1,206	1,180	1,155	1,033
Silver	\$/toz	17.6	16.1	18.2	17.5	15.4	15.1	14.8	14.6	14.5	14.4	14.3	14.1	13.5
Platinum	\$/toz	1,278	1,076	1,050	975	863	809	805	826	847	868	890	913	1,033

Next update: October 2019

10.8. Resultado del análisis de escenarios futuros del sector eléctrico 2030

Caso de estudio	2030							
	Cierre nuclear ordenado				Cierre nuclear 40 años			
	Sin capacidad firme	Capacidad firme	Capacidad firme + Restricción renovable	Capacidad firme + Coste bajo solar, eólico & precio bajo CO2	Sin capacidad firme	Capacidad firme	Capacidad firme + Restricción renovable	Capacidad firme + Coste bajo solar, eólico & precio bajo CO2
Precio CO2	25	25	25	6	25	25	25	6
Demanda EV (GWh)	4503	4503	4503	4503	4503	4503	4503	4.503
Capacidades Iniciales (MW)	-	-	-	-	-	-	-	-
Nuclear	7.118	7.118	7.118	7.118	-	-	-	-
Carbón	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
Ciclo abierto	-	-	-	-	-	-	-	-
Ciclo combinado	24.948	24.948	24.948	24.948	24.948	24.948	24.948	24.948
Cogeneración	5.997	5.997	5.997	5.997	5.997	5.997	5.997	5.997
Solar (Térmica)	2.300	2.300	2.300	2.300	2.300	2.300	2.300	2.300
Térmica renovable	1.760	1.760	1.760	1.760	1.760	1.760	1.760	1.760
Hidráulica	13.920	13.920	13.920	13.920	13.920	13.920	13.920	13.920
Hidráulica fluyente	636	636	636	636	636	636	636	636
Bombeo	2.517	2.517	2.517	2.517	2.517	2.517	2.517	2.517
Solar (utility)	8.372	8.372	8.372	8.372	8.372	8.372	8.372	8.372
Eólica (terrestre)	25.553	25.553	25.553	25.553	25.553	25.553	25.553	25.553
Baterías	0	-	0	0	0	0	0	0
Inversiones (MW)	-	-	-	-	-	-	-	-
Nuclear	0	0	0	0	0	0	0	0
Carbón	0	0	0	0	0	0	0	0
Ciclo abierto	0	14.197	12.886	14.166	1.356	21.069	20.389	21.107
Ciclo combinado	0	0	0	0	0	0	0	0
Cogeneración	0	0	0	0	0	0	0	0
Solar (Térmica)	0	0	0	0	0	0	0	0
Térmica renovable	0	0	0	0	0	0	0	0
Hidráulica	0	0	0	0	0	0	0	0
Hidráulica fluyente	0	0	0	0	0	0	0	0
Bombeo	0	0	0	0	0	0	0	0
Solar (utility)	21.694	21.692	19.153	28.426	22.800	27.978	25.312	35.313
Eólica (terrestre)	0	0	17.556	0	24.921	4.389	13.713	3.847
Baterías	0	0	0	0	0	0	0	0
Resultados generales	-	-	-	-	-	-	-	-
Coste anual de operación (M€)	4.560	4.574	3.206	4.079	3.741	5.328	4.632	4.880
Coste de CO2 (M€)	1.001	1.004	632	274	892	1.310	1.111	343
Coste anual mantenimiento (M€)	4.969	5.224	5.644	5.291	5.072	4.930	5.140	4.990
Coste anual inversión (M€)	1.128	1.767	3.226	1.490	3.589	2.816	3.523	2.282
Coste total (M€)	11.657	12.569	12.708	11.134	13.294	14.384	14.405	12.495
Precio Marginal Medio (€/MWh)	42	42	37	34	49	43	42	34
Desviación estándar del precio (€/MWh)	10	10	11	12	37	12	12	13
Ratio Producción Renovable/Producción Total	41%	0	54%	44%	62%	48%	54%	51%
Energía Producida (TWh)	312	312	313	315	313	312	313	315
Emissiones (Mton)	40	40	25	46	36	52	44	57
Cobertura de la demanda punta con potencia firm	77%	1	100%	100%	71%	100%	100%	100%
Horas equivalentes de producción	-	-	-	-	-	-	-	-
Nuclear	7.796	7.796	7.733	7.796	0	0	0	0
Carbón	795	795	0	7.222	795	1.483	795	7.216
Ciclo abierto	0	0	0	0	743	179	127	165
Ciclo combinado	4.657	4.673	3.072	3.680	4.068	5.754	5.035	4.879
Cogeneración	4.170	4.166	4.001	3.998	4.019	4.159	4.120	3.981
Solar (Térmica)	1.903	1.903	1.903	1.863	1.840	1.903	1.903	1.877
Térmica renovable	2.804	2.818	2.670	2.747	2.673	2.813	2.748	2.636
Hidráulica	1.897	1.897	1.897	1.897	1.897	1.897	1.897	1.897
Hidráulica fluyente	4.028	4.028	4.030	3.989	3.954	4.026	4.019	3.960
Solar (utility)	1.738	1.738	1.726	1.735	1.730	1.738	1.737	1.738
Eólica (terrestre)	2.197	2.197	2.440	2.197	2.495	2.286	2.408	2.271
Bombeo (generación)	434	492	662	923	718	497	565	1.004
Energía No Suministrada	0	0	0	0	0	0	0	0
Generación y ENS (GWh)	-	-	-	-	-	-	-	-
Nuclear	55.495	55.495	55.040	55.495	0	0	0	0
Carbón	1.987	1.987	0	18.054	1.987	3.707	1.987	18.041
Ciclo abierto	0	0	0	0	1.007	3.781	2.582	3.476
Ciclo combinado	116.187	116.592	76.628	91.818	101.498	143.549	125.604	121.720
Cogeneración	25.008	24.983	23.994	23.978	24.103	24.942	24.712	23.872
Solar (Térmica)	4.376	4.376	4.376	4.284	4.233	4.376	4.376	4.318
Térmica renovable	4.935	4.960	4.698	4.834	4.704	4.951	4.833	4.640
Hidráulica	26.407	26.407	26.407	26.407	26.407	26.407	26.407	26.407
Hidráulica fluyente	2.562	2.562	2.563	2.537	2.515	2.561	2.556	2.518
Solar (utility)	52.246	52.242	47.499	63.852	53.920	63.165	58.506	75.911
Eólica (terrestre)	56.137	56.137	105.194	56.137	125.954	68.440	94.549	66.774
Bombeo Generación	1.092	1.238	1.667	2.324	1.807	1.251	1.422	2.526

Tabla 22: Resultado del análisis de escenarios futuros del sector eléctrico 2030, (Rivier, y otros, 2018)