



**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

**RECUPERACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS  
BIOMÁSICOS AGRÍCOLAS, URBANOS Y  
FORESTALES**

Autor: Borja Perera Muñoz

Director: Julio Montes Ponce de León

Madrid

Julio de 2021



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título **Recuperación energética de residuos biomásicos agrícolas, urbanos y forestales** en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2020/2021 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.:  Fecha: 06/ 07/ 2021

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.:  Fecha: 06/ 07/ 2021



## **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. **Borja Perera Muñoz** DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: **Recuperación energética de residuos biomásicos agrícolas, urbanos y forestales** 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 6 de Julio de 2021.

**ACEPTA**

Fdo.....

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



**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

**RECUPERACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS  
BIOMÁSICOS AGRÍCOLAS, URBANOS Y  
FORESTALES**

Autor: Borja Perera Muñoz

Director: Julio Montes Ponce de León

Madrid



# RECUPERACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS BIOMÁSICOS AGRÍCOLAS, URBANOS Y FORESTALES.

**Autor: Perera Muñoz, Borja.**

Director: Montes Ponce de León, Julio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto propone la construcción de una planta de gasificación por plasma en la ciudad de Jaén, que aprovecha los residuos sólidos urbanos, agrícolas y forestales para generar energía.

El gobierno español, de cara a promover la instalación de energías renovables en el país y de esa forma reducir la dependencia energética de países colindantes y las emisiones de CO<sub>2</sub>, concedió primas para la instalación de las tecnologías eólica y fotovoltaica de manera desmesurada. Esto ha supuesto un déficit tarifario y un precio de la energía muy elevado al que los españoles hacen frente mensualmente.

Además, este boom renovable ha significado la incorporación a la red de tecnologías que no son gestionables, es decir, dependientes de condiciones meteorológicas para generar energía, lo que supone otro gran problema en el sistema eléctrico español.

Por otro lado, la Unión Europea, entre distintas medidas con el foco puesto en la reducción de gases contaminantes emitidos a la atmósfera, obliga a los países miembros a depositar menos del 10% de los residuos generados en vertederos para 2025. Ese porcentaje en España se eleva a más del 50%, por lo que se necesita de una medida urgente para abordar este gran problema.



Es por ello por lo que la planta trata de aprovechar ya no solo los residuos sólidos urbanos, sino también los agrícolas y forestales, también muy abundantes, que no son revalorizados

energéticamente y causan grandes defectos. De esta forma se introduce a la red una forma de generación gestionable a la vez que se reduce el precio de la energía eléctrica.

Estos residuos son aprovechados gracias a la tecnología del plasma (gas ionizado a alta temperatura), esta consiste en un convertidor que consigue generar un campo eléctrico radiante que alcanza temperaturas próximas a los 4.000°C.

Para dimensionar la planta, se ha elegido utilizar los residuos sólidos urbanos provenientes de los condados de Condado, Segura y las Vilas, Sierra de Cazorla, La mola y Guardiel, de los cuales se aprovechan los residuos de casi 300.000 habitantes. Los residuos agrícolas y forestales provienen de la gran actividad oleica dada en la comunidad jienense, la cual produce más del 20% de aceite de oliva del mundo. Esta actividad genera varias toneladas de residuos formadas principalmente por el orujillo y la poda del olivar, de los cuales cerca de 200.000 toneladas anuales se aprovechan en la planta.

La planta es capaz de procesar un total de 300.000 toneladas de residuos orgánicos al año. Estos, introducidos en la atmosfera de plasma se descomponen en un gas de síntesis formado principalmente por monóxido de carbono e hidrógeno. Gracias a esta tecnología, se consigue producir 2.400 kg/h de hidrógeno. Asimismo, en el caso en el que se introduzca materia inorgánica en la planta, esta se transforma en un material vitrificado que puede ser utilizada en numerosas aplicaciones (construcción, por ejemplo).

Debido a que la temperatura de los gases de síntesis a la salida del proceso es cercana a los 1000°C, estos han de ser enfriados para su siguiente almacenamiento y aprovechamiento. Es por ello por lo que se incluye un ciclo Rankine en la planta, capaz de enfriar este a gas a temperaturas que posibilitan su tratamiento. De esta forma, se consigue enfriar el gas de síntesis y generar 17.323 MWh,

Una vez enfriado, este gas pasa por un reactor Shift en el cual se consigue aumentar la presencia de hidrógeno en el gas de síntesis. Es este hidrógeno resultante el que se utiliza para generar energía. Su almacenamiento se realiza en hidruros metálicos, capaces de absorber o liberar hidrógeno en función de la presión y temperatura a la que se encuentren, de esta forma se consigue disponer de una energía gestionable.

El hidrógeno es aprovechado mediante pilas de combustible, dispositivos en los que, mediante la inyección de hidrógeno y oxígeno, se dan distintas reacciones de las que se consigue energía eléctrica. En este caso, se ha decidido utilizar las pilas de combustible de membrana polimérica, gracias a su baja temperatura de funcionamiento, lo que hace que se reduzca el tiempo para su uso, y a su buena densidad energética comparado con el resto de las opciones valoradas. Contando con 100 pilas de 1MW cada una, y suponiendo un uso de 10 horas diarias de las mismas, estas generarían anualmente 91,25 GWh.

Por último, se ha realizado un estudio económico para estudiar la rentabilidad de la planta. Es importante recalcar que el proyecto no tiene una finalidad económica sino la de la resolución de distintos problemas que urgen de una pronta solución.

Se han evaluado los costes de las tres partes principales del proyecto, la gasificación por plasma, el ciclo Rankine y los tanques y pilas de combustible para almacenar y generar energía eléctrica. Se ha decidido contar con una vida útil de la planta de 25 años, un IPC de 2% durante todos estos años y una curva de aprendizaje que supone un 1,8% a partir del cuarto año. Con todo ello, se han obtenido un coste de inversión inicial de 283,5 millones

de euros, y unos costes de explotación y mantenimiento de 7,79 millones de euros durante el primer año, valor cambiante durante los 25 años debido al IPC y a la curva de aprendizaje.

Los ingresos van de la mano de la energía total producida y de los residuos orgánicos recogidos. Teniendo en cuenta el ciclo Rankine y las pilas de combustible, se generará anualmente 108,57 GW. Para estudiar los ingresos durante los años de vida útil del complejo, se ha tenido en cuenta el histórico del precio de la energía y se ha extrapolado durante los 25 siguientes años. El año 15, por ejemplo, se obtiene un beneficio de 25,81 millones de euros.

Utilizando datos de la empresa Endesa (posible inversor e interesado en la construcción de la planta), el TIR (tasa interna de retorno de retorno) y el WACC (weighted average cost of capital) son 7,6% y 1,79% respectivamente. Por lo que, al ser el TIR inferior porcentualmente, se trata de un proyecto rentable. Aun así y como se ha comentado, la rentabilidad no es el objetivo del proyecto, aunque si resulta de utilidad al ser un proyecto más atractivo a empresas como la comentada.

En resumen, se trata de un proyecto capaz de solventar distintos problemas que España necesita resolver cuanto antes. Aprovecha los residuos orgánicos e incorpora un tipo de generación gestionable, todo ello con un mínimo impacto medioambiental.

# ENERGETIC RECOVERY OF AGRICULTURAL, FOREST AND URBAN WASTES

**Author: Perera Muñoz, Borja.**

Supervisor: Montes Ponce de León, Julio.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## ABSTRACT

This project proposes the construction of a plasma gasification plant in the city of Jaén, which uses solid urban, agricultural and forestry waste to generate energy.

The Spanish government, in order to promote the installation of renewable energies in the country and thus reduce energy dependence on neighboring countries and reduce CO<sub>2</sub> emissions, granted premiums for the installation of wind and photovoltaic technologies in a disproportionate manner. This has led to a tariff deficit and a very high energy price that Spaniards have to pay on a monthly basis.

In addition, this renewable boom has meant the incorporation into the grid of technologies that are not manageable, i.e., dependent on weather conditions to generate energy, which is another major problem in the Spanish electricity system.

On the other hand, the European Union, among various measures focused on reducing the polluting gases emitted into the atmosphere, obliges member countries to deposit less than 10% of the waste generated in landfills by 2025. In Spain, this percentage rises to more than 50%, so an urgent measure is needed to address this major problem.



Therefore the plant tries to take advantage not only of solid urban waste, but also of agricultural and forestry waste, also very abundant, which is not revalued energetically and

causes major defects. In this way, a manageable form of generation is introduced into the grid while reducing the price of energy.

These wastes are used thanks to plasma technology (high temperature ionized gas), which consists of a converter that generates a radiant electric field that reaches temperatures close to 3,000°C.

To size the plant, it has been chosen to use solid urban waste from the counties of Condado, Segura y las Vilas, Sierra de Cazorla, La mola and Guardiel, from which the waste of almost 300,000 inhabitants will be used. The agricultural and forestry waste comes from the great olive oil activity in the community of Jaén, which produces more than 20% of the world's olive oil. This activity generates several tons of waste consisting mainly of olive pomace and olive pruning, of which about 200,000 tons per year are used at the plant.

The plant is capable of processing a total of 300,000 tons of organic waste per year. These, introduced into the plasma atmosphere, decompose into a synthesis gas consisting mainly of carbon monoxide and hydrogen. Thanks to this technology, 2,400 kg/h of hydrogen can be produced. In addition, if inorganic material is introduced into the plant, it is transformed into a vitrified material that can be used in numerous applications (construction, for example).

Since the temperature of the synthesis gases at the exit of the process is close to 1000°C, they have to be cooled for their subsequent storage and use. Therefore a Rankine cycle is included in the plant, capable of cooling this gas to temperatures that make its treatment possible. In this way, the synthesis gas is cooled and 17,323 MWh are generated,

Once cooled, this gas passes through a Shift reactor in which the presence of hydrogen in the synthesis gas is increased. It is this resulting hydrogen that is used to generate energy. It is stored in metal hydrides, capable of absorbing or releasing hydrogen depending on the pressure and temperature at which they are located, thus providing a manageable energy that can be used whenever desired.

The hydrogen is used by means of fuel cells, devices in which, by means of the injection of hydrogen and oxygen, different reactions take place from which electrical energy is obtained. In this case, it has been decided to use polymer membrane fuel cells, thanks to their low operating temperature, which reduces the time for their use, and to their good energy density compared to the rest of the options evaluated. With 100 batteries of 1 MW each, and assuming a daily use of 10 hours, they would generate 91.25 GWh annually.

Finally, an economic study has been carried out to study the profitability of the plant. It is important to emphasize that the project does not have an economic purpose, but rather the resolution of various problems that need to be solved quickly.

The costs of the three main parts of the project, the plasma gasification, the Rankine cycle and the tanks and fuel cells to store and generate electrical energy, have been evaluated. It has been decided to count on a plant lifetime of 25 years, a CPI of 2% during all these years and a learning curve of 1.8% from the fourth year of operation. 283.5 million, and operating and maintenance costs of 7.79 million euros during the first year, a value that will change over the 25 years due to the CPI and the learning curve.

Revenues will come from the total energy produced. Taking into account the Rankine cycle and fuel cells, 108.57 GW will be generated annually. To study the revenues over the years of the complex's lifetime, the historical energy price has been taken into account and extrapolated over the next 25 years. In year 15, for example, a profit of 25.81 million euros is obtained.

Using data from the company Endesa (potential investor and interested in the plant), the IRR (internal rate of return) and WACC (weighted average cost of capital) are 7.6% and 1.79% respectively. Therefore, since the IRR is lower in percentage terms, it is a profitable project. Even so, and as mentioned above, profitability is not the objective of the project, although it is useful as it is more attractive to companies such as the one mentioned above.

In summary, it is a project capable of solving different problems that Spain needs to solve. It takes advantage of organic waste and incorporates a type of manageable generation, all with a minimum environmental impact.

## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>7</b>
1.1 Motivación del proyecto.....	7
1.2 Objetivos .....	10
<b>Capítulo 2. Estado del arte .....</b>	<b>12</b>
2.1 RECUPERACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS CONVENCIONAL.....	12
2.1.1 Residuos sólidos urbanos .....	13
2.1.2 Residuos sólidos agrícolas .....	14
2.1.3 Residuos sólidos forestales.....	15
2.2 LAS MICRORREDES .....	17
2.3 PLANTAS DE GASIFICACIÓN POR PLASMA.....	21
<b>Capítulo 3. La planta de gasificación en Jaén .....</b>	<b>24</b>
3.1 LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA.....	24
3.2 GENERACIÓN EN LA PROVINCIA DE JAÉN.....	27
3.2.1 Cogeneración .....	28
3.2.2 Hidroeléctrica.....	30
3.2.3 Eólica.....	31
3.2.4 Fotovoltaica.....	32
3.2.5 Biomasa .....	32
3.2.6 Resumen de tecnologías .....	34
<b>Capítulo 4. Sistema de reserva de la red: la gasificación por plasma .....</b>	<b>36</b>
4.1 Introducción.....	36
4.2 Formas de valorización energética de residuos .....	37
4.2.1 Digestión anaerobia .....	38
4.2.2 Incineración.....	39
4.2.3 Pirólisis .....	40
4.2.4 Gasificación por plasma.....	42
4.3 Residuos aprovechables en Jaén.....	43
4.3.1 Residuos sólidos urbanos (RSU) .....	43

4.3.2 Residuos forestales y agrícolas .....	45
4.4 El plasma .....	48
4.5 Convertidor de plasma directo.....	50
4.5.1 Etapas del proceso .....	50
4.5.2 Componentes y sistemas de la planta.....	54
4.5.3 Gas de síntesis .....	57
4.5.4 Balance energético [.....	58
4.5.5 Ciclo Rankine .....	60
4.5.6 Secado de los residuos.....	64
4.5.7 Hidrógeno producido .....	65
<b>Capítulo 5. Almacenamiento del hidrógeno y pilas de combustible.....</b>	<b>67</b>
5.1 introducción.....	67
5.2 Funcionamiento de las pilas de combustible .....	68
5.3 Tipos de pilas de combustible .....	70
5.3.1 Pilas de combustible de membrana polimérica (PEM).....	71
5.3.2 Pilas de combustible alcalinas (AFC).....	73
5.3.3 Pilas de ácido fosfórico (PAFC) .....	74
5.3.4 Elección del tipo de pila de combustible.....	75
5.4 Almacenamiento del hidrógeno.....	75
<b>Capítulo 6. Análisis económico.....</b>	<b>78</b>
6.1 Gasificación por plasma .....	79
6.1.1 Inversión inicial.....	79
6.1.2 Costes de explotación y mantenimiento.....	80
6.2 Ciclo de Rankine .....	81
6.3 Pilas de combustible.....	82
6.3.1 Inversión inicial.....	82
6.3.2 Costes de explotación y mantenimiento.....	83
6.4 Costes totales.....	83
6.5 Análisis del complejo .....	84
<b>Capítulo 7. Conclusiones.....</b>	<b>90</b>

<b>Capítulo 8. Anexos.....</b>	<b>92</b>
8.1 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	92
8.2 Pila de combustible Ballard.....	94
<b>Capítulo 9. Referencias .....</b>	<b>95</b>
<b>Capítulo 10. Bibliografía.....</b>	<b>97</b>

## *Índice de Ilustraciones*

Ilustración 1: Costes de acceso vs de energía en distintos países europeos [1].....	7
Ilustración 2: Fases en una planta de recuperación energética de RSU [2].....	13
Ilustración 3: Planta de recuperación de RSU en Bilbao [3].....	14
Ilustración 4: Planta de recuperación energética de residuos agrícolas en Níjar, Almería [4] .....	15
Ilustración 5: Planta de valorización se residuos forestales en Corduente [5] .....	16
Ilustración 6: Microrred en Alabama, EE. UU. [6] .....	18
Ilustración 7: Microrred en Montgomery, EE. UU. [7].....	19
Ilustración 8: Instalaciones del proyecto IOTHER, Huesca [8].....	20
Ilustración 9: Planta de gasificación de residuos mediante plasma Mihama-Mikata, Japón [9] .....	21
Ilustración 10: Planta de gasificación de residuos mediante plasma en Utashinai [9] .....	22
Ilustración 11: Planta de gasificación por plasma en Tees Valley, Inglaterra [9].....	23
Ilustración 12: Mapa de Jaén [10] .....	25
Ilustración 13: Distribución eléctrica en Jaén [11].....	25
Ilustración 14: Leyenda de Imagen 13 [12].....	26
Ilustración 15: Gestión de los RSU en España en 2007 [16] .....	37
Ilustración 16: Ejemplo de instalación para residuos ganaderos (DA) [17].....	39
Ilustración 17: Planta de valorización de residuos por incineración [17].....	40
Ilustración 18: Ejemplo del proceso de una planta por pirólisis [17].....	41
Ilustración 19: Emisiones por procesado de metales por gasificación por plasma e incineración [18].....	42
Ilustración 20: Emisiones contaminantes de la gasificación por plasma e incineración [18] .....	43
Ilustración 21: Mapa de actuación de la empresa Resurja [19].....	44
Ilustración 22: Subproductos del olivar [20] .....	46

---

Ilustración 23: Resultado de la poda del olivo [20].....	47
Ilustración 24: Ejemplo de vasija [9].....	49
Ilustración 25: Etapas en la planta de gasificación [18].....	50
Ilustración 26: Transformaciones de la materia en el reactor [19].....	51
Ilustración 27: Ejemplo de vasija en la planta de gasificación por plasma [18] .....	55
Ilustración 28: Antorcha no transferida y transferida [23] .....	56
Ilustración 29: Composición del gas de síntesis en función de residuos [18].....	58
Ilustración 30: Ciclo Rankine básico [Elaboración propia].....	60
Ilustración 31: Ejemplo de pila de combustible [25].....	69
Ilustración 32: Ejemplo de PEM [25].....	72
Ilustración 33: Ejemplo de AFC [26] .....	73
Ilustración 34: Ejemplo de PAFC [26] .....	74
Ilustración 35: Histórico de los precios de la energía [28].....	85

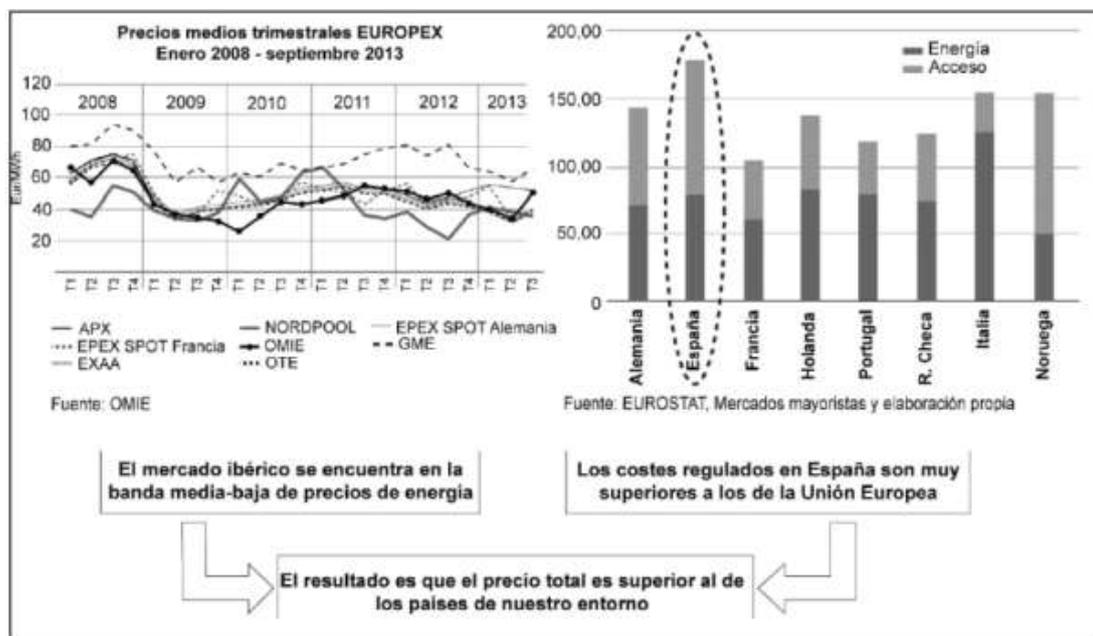
## *Índice de tablas*

Tabla 1: Temperaturas en Jaén durante el año [13].....	27
Tabla 2: Cogeneración (MW) en Jaén en función del combustible en relación a Andalucía a 31/12/2020. [15] .....	29
Tabla 3: Histórico de generación (MW) eléctrica por cogeneración en Jaén [15] .....	29
Tabla 4: instalaciones de cogeneración en Jaén [15].....	30
Tabla 5: Instalaciones hidroeléctricas en Jaén y su potencia instalada [15].....	31
Tabla 6: Instalaciones de generación eléctrica por biomasa y su potencia instalada en Jaén [15] .....	32
Tabla 7: RSU en Jaén [19].....	33
Tabla 8: Producción de biogás y su destino [19].....	34
Tabla 9: Resumen de tecnologías renovables disponibles [Elaboración propia] .....	35
Tabla 10: Propiedades y análisis de los subproductos del olivar [21].....	47
Tabla 11: Características de funcionamiento de la caldera [E.P] .....	61
Tabla 12: Características de funcionamiento de la turbina [E.P] .....	62
Tabla 13: Características de funcionamiento en el condensador [E.P] .....	62
Tabla 14: Características de funcionamiento de la bomba [E.P].....	63
Tabla 15: Presencia de gases en el gas de síntesis [E.P] .....	66
Tabla 16: Tipos de pila de combustible [E.P] .....	71
Tabla 17: Costes de operación y mantenimiento [27] .....	80
Tabla 18: Costes por personal [27].....	81
Tabla 19: Resumen de costes de cada una de las tecnologías [E.P] .....	83
Tabla 20: Costes de amortización, explotación y generación [E.P] .....	84
Tabla 21: Beneficios durante los 25 años de vida útil [E.P].....	86

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

España, como muchos otros países alrededor del mundo, lleva varios años enfocada en una misión en el ámbito energético, esta es relevar a las energías contaminantes abriendo paso a las sostenibles y limpias. Por ello, las políticas empleadas en el sector han favorecido especialmente a las formas de energía renovable con objetivo de fomentar a empresas energéticas e inversores a apostar por estas. Esto se ha traducido en primas favorables, pero a su vez desmedidas, viéndose reflejado en los precios a los que los ciudadanos españoles deben hacer frente.



Fuente: OMIE y EUROSTAT

Ilustración 1: Costes de acceso vs de energía en distintos países europeos [1]

Actualmente las energías renovables (eólica y fotovoltaica principalmente) representan la mitad de la potencia instalada peninsular española, lo que por supuesto supone un gran avance hacia la descarbonización. Esto es así gracias a las ayudas que han favorecido en especial a la construcción de parques eólicos e implantación de paneles solares, convirtiendo por lo tanto a las energías eólica y fotovoltaica en las primeras formas de generación beneficiadas.

Éstas, a pesar de que ser consideradas energías limpias, tienen un gran inconveniente sin solución, no son gestionables, lo que encarece considerablemente el precio de la energía. Esto es debido a que se depende exclusivamente de condiciones meteorológicas para su aprovechamiento, ya que, si no hay sol, las placas fotovoltaicas no generan energía, si no hay viento, lo mismo ocurre con los aerogeneradores, y en épocas secas no hay hidráulica. Esto supone que el funcionamiento de estas formas de generación sea especialmente aleatorio y genere incertidumbre en el mercado energético.

La ausencia de sistemas de eliminación de gases de efecto invernadero en las plantas de carbón (el carbón español contiene entre el 4% y el 8% en azufre cuando el admitido es del 1%) y la parada de construcción de cinco centrales nucleares convierten que el “backup” de las energías en el que España se lleva apoyando varias décadas sea insuficiente a día de hoy. Si bien este hecho va acorde con los objetivos establecidos por la Unión Europea, ni España ni muchos otros países están preparados para abastecer la demanda energética sin estos tipos de generación. Por lo tanto, surge la necesidad de encontrar una alternativa a los métodos de generación contaminantes para respaldar a las energías renovables que disminuyan el precio de la energía. Adicionalmente existe un firme compromiso de los países miembros de llegar a la descarbonización total antes del 2050.

El proyecto en cuestión plantea por lo tanto resolver este problema, ofreciendo una forma de generación verde pero gestionable. También, la planta en estudio situada en Jaén busca aprovechar la energía renovable generada de alrededor para su propio funcionamiento, de

esta forma aprovechando energía que de otro modo sería inútil en periodos en los que la demanda sea baja. Así se consigue que la planta utilice energía limpia y que estas tecnologías puedan ser aprovechadas más tiempo durante el día, rentabilizando por tanto su coste.

Por otro lado, y con el objetivo de reducir los efectos negativos de los residuos vertidos, la Unión Europea publicó una circular en el 2005 en la cual obliga a los países miembros a acabar con todos los vertederos controlados. Las principales iniciativas aceptadas por parte del organismo fueron las siguientes:

1. El 55% de los residuos urbanos deberán reciclarse para 2025, llegando al 65% para 2035.
2. Solo un 10% de los residuos podrán depositarse en 2025.

Teniendo en cuenta que con el tiempo estas iniciativas tendrán un carácter más ambicioso, los vertederos controlados han de ir desapareciendo. Los efectos negativos que estos residuos tienen en el medioambiente son varios, pero entre los más relevantes encontramos la contaminación de las aguas superficiales, aguas subterráneas, suelo y aire, así como efectos que suponen un riesgo a la salud humana y emisiones de CO<sub>2</sub>. Claro está, que la única alternativa que le queda al país es aprovechar estos residuos, desde los urbanos, hasta los forestales y agrícolas. Estos dos últimos, aunque menos vistos y por lo tanto más desapercibidos, son muy abundantes y generan muchos problemas más allá de emitir gases, por lo que aprovecharlos se convierte también en una necesidad.

En esta línea, la planta en cuestión no solo trata de aprovechar los residuos urbanos de varias localidades de alrededor, sino también parte los residuos agrícolas y forestales generados en la provincia. El lugar donde se situará la planta es Jaén, provincia que

produce el 20% de aceite de oliva del mundo y el 43% de España. Contando con más de 600.000 hectáreas de olivar en toda la provincia, este producto genera muchos residuos fruto de las fases de producción, como son el orujillo y la poda del olivar, que no son aprovechados.

Este aprovechamiento energético puede darse gracias a la tecnología de gasificación por plasma. Una tecnología actualmente utilizada para la propulsión de satélites por su capacidad de alcanzar temperaturas muy superiores a las posibles en la combustión convencional. De esta forma, esta técnica tan puntera es utilizada para llevar a estos residuos orgánicos a una temperatura de descomposición, ionizándola, obteniendo un gas abundante en hidrógeno y un material vitrificado. Este último, con diferentes posibles aplicaciones, también será aprovechado.

A pesar de ser de los elementos con vector energético más prometedor, el hidrógeno no es hoy en día rentable para generar energía, ya que los costes de obtención de este gas son todavía muy elevados. Este proyecto propone utilizar la gasificación por plasma y los residuos biomásicos en un ciclo combinado para su producción, abaratando enormemente el proceso de obtención. De esta forma, contaremos con un hidrógeno verde, más económico y sostenible.

La idea de este proyecto es solucionar los problemas mencionados aprovechando tecnologías ya disponibles en el mercado y el valor energético del hidrógeno.

## ***1.2 OBJETIVOS***

El motivo del proyecto es cubrir las necesidades que actualmente se tienen en España y que aplican también a la gran parte de los países del mundo en el sector energético. Por

tanto, el objetivo principal es estudiar la viabilidad de una planta de regasificación por plasma de residuos orgánicos con las siguientes finalidades:

3. Abaratar el precio de la energía incorporando a la red nuevas energías gestionables. Gracias a las tecnologías viables de almacenamiento de hidrógeno, este puede ser utilizado cuando se necesite.
4. Fomentar la eliminación de vertederos controlados y el aprovechamiento de los residuos orgánicos forestales, agrícolas y urbanos. El proyecto consta de una planta que aprovechará estos residuos y se utilizarán como combustible para la producción de hidrógeno.
5. Disminuir el consumo de combustibles fósiles. Gracias a la tecnología del plasma, los residuos orgánicos se ionizan originando hidrógeno, capaz de generar energía eléctrica. Esto supondría que el papel que juegan los combustibles fósiles en la generación y mix energético español disminuya.
6. Apostar por el hidrógeno como combustible del futuro. Este puede ser utilizado para generar energía a través de pilas de combustible, ciclos combinados, o ser alternativa a las baterías como forma de propulsión de vehículos.
7. Estudiar la viabilidad en términos económicos de implementar esta forma de recuperación de residuos y generación en España de forma global.

## **Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE**

En este apartado se pretende presentar proyectos existentes en el ámbito de este trabajo. A continuación, se distingue en proyectos de recuperación energética de residuos por combustión convencional, aquellos que utilizan energía renovable para su abastecimiento (microrredes) y plantas en las que el plasma forme parte del proceso de gasificación (y el protagonismo) y de su funcionamiento.

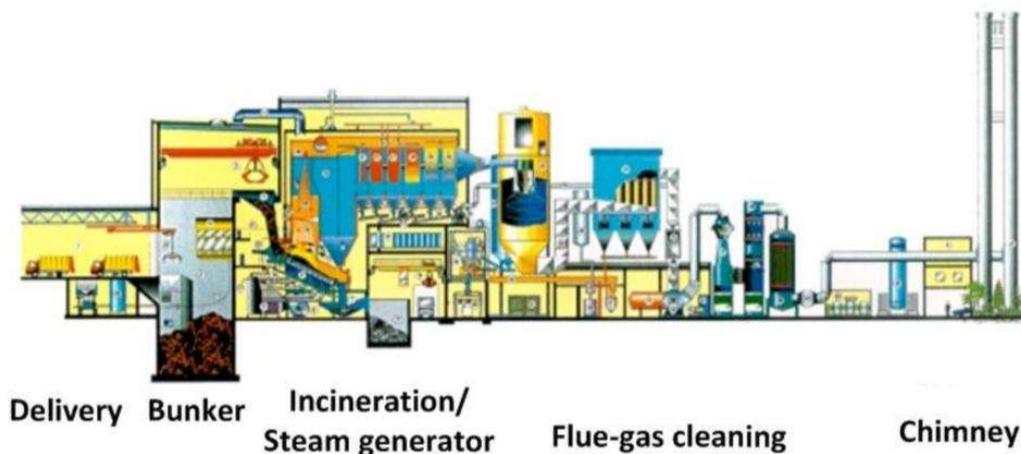
### ***2.1 RECUPERACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS CONVENCIONAL***

Las nuevas corrientes llevadas las dos últimas décadas acerca de la generación de energía limpia y sostenible, no solo han causado el “boom” de las energías renovables, sino que han producido que la recuperación energética de residuos lleve presente varios años tanto en España como en otros países miembros de la Unión Europea. Esta tendencia busca potenciar y fomentar el uso de biocombustibles para generar energía eléctrica y disminuir el porcentaje de residuos depositados en vertederos con el fin de reducir el impacto medioambiental que estos generan. También, buscan ser una forma de generación gestionable alternativa a aquellas en las que los combustibles fósiles y por tanto no renovables, son el combustible.

Así mismo, encontramos diferentes formas de recuperación energética en función de los residuos empleados:

## 2.1.1 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

El funcionamiento de una planta de recuperación de residuos orgánicos es muy similar a las de ciclo combinado convencionales, variando en principalmente el combustible utilizado. El rendimiento es menor, aunque con la adaptación de tecnologías se está consiguiendo que la diferencia entre estos rendimientos sea cada vez menor. A continuación, se muestra una imagen con las fases más relevantes en una planta de aprovechamiento energético de residuos urbanos y un ejemplo de una planta que lo implementa.



*Ilustración 2: Fases en una planta de recuperación energética de RSU [2]*

- Planta de valorización energética en Zabalgardi, Bilbao



*Ilustración 3: Planta de recuperación de RSU en Bilbao [3]*

Esta planta, al adaptar las nuevas tecnologías de las plantas de ciclo combinado, consigue alcanzar un rendimiento energético del 42% frente al 23% de la media de estas plantas en Europa. Las dimensiones habilitan el tratamiento de alrededor de 200.000/240.000 toneladas de residuos urbanos provenientes de diferentes localidades cercanas a la planta y logra un ahorro de energía primaria del 47%, mientras que la fracción renovable de esta biomasa alcanza el 63%.

### **2.1.2 RESIDUOS SÓLIDOS AGRÍCOLAS**

Uno de los mayores retos que la actividad agraria española debe afrontar es la eliminación de sus residuos. Debido a que esta actividad da lugar fuera de centros urbanos, el impacto aparente de estos residuos resulta ser mucho menor de lo esperado. Lo cierto es que según datos del Instituto Tecnológico de la Industria Agroalimentaria (AINIA), el 73% de los

residuos orgánicos relacionados con el sector primario en España, se corresponden con esta actividad aparentemente limpia.

Esta necesidad es aún mayor en lugares en los que la producción agrícola es especialmente intensiva, requiriéndose una alternativa a su simple combustión que beneficie al medio ambiente. En la actualidad, existen diferentes plantas alrededor de España con el objetivo de su aprovechamiento energético como forma de eliminación.

- Planta de valorización de residuos agrícolas en Níjar, Almería.



*Ilustración 4: Planta de recuperación energética de residuos agrícolas en Níjar, Almería [4]*

Se trata de una planta de gasificación y producción de vapor, alimentado de una turbina de 1800 kW. Dispone de una capacidad de procesado de acerca de 21.600 toneladas anuales, generando potencias de hasta 13.600 MW/h anuales.

### **2.1.3 RESIDUOS SÓLIDOS FORESTALES**

Estos provienen de tratamientos silvícolas, procedentes de la explotación maderera y de las operaciones de limpieza y mantenimiento de parques y bosques. Su eliminación, supone grandes ventajas y beneficios más allá de estéticos, como favorecer el hábitat natural, favorecer la regeneración de plantas, evitar plagas y prevenir incendios.

- Planta de valorización de residuos orgánicos forestales en Corduente, Guadalajara.



*Ilustración 5: Planta de valorización se residuos forestales en Corduente [5]*

Siendo la primera planta de recuperación energética de residuos orgánicos forestales en España, es capaz de suministrar energía eléctrica a 20.000 habitantes. Requiere de 14.000 toneladas de residuos al año y puede producir más de un millón de kW a lo largo de un mes.

## **2.2 LAS MICRORREDES**

Las corrientes renovables están suponiendo una verdadera descentralización en el sistema eléctrico español, pasando de grandes grupos generadores de altas potencias instaladas a un sistema más respetuoso con el medioambiente con numerosas instalaciones de generación renovable. Esto se ve reflejado en un porcentaje cada vez mayor de potencia instalada de tipo renovable. En 2019 España añadió 6.456 MW de potencia renovable instalada, pero a pesar de esta incorporación, el peso de estas energías en el mix energético pasó de un 38.5% en 2018 a 37.5% en 2019.

En España, como se ha comentado anteriormente, esta apuesta se ha orientado a las energías eólicas y fotovoltaica, formas de generación no gestionables. Por lo tanto, hemos pasado de un sistema altamente gestionable a dependiente de condiciones meteorológicas.

Para reducir este impacto negativo, la apuesta por parte de la Unión Europea ha sido la de fomentar e impulsar la implantación de redes inteligentes, grupos generadores que aprovechan la generación renovable para su propio funcionamiento, capaces de generar y almacenar energía en menor escala.

De esta forma, se incorporan a la red nuevas formas de generación gestionables, se aumenta la demanda en periodos valle (allanando por lo tanto la curva de demanda) y sobre todo, se aprovechan en mayor medida las instalaciones e infraestructuras de generación renovable ya construidas, otorgándolas por lo tanto un mayor protagonismo y rentabilidad. Cabe destacar que estas redes inteligentes están alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la UE al colaborar con la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

A parte de estas importantes ventajas, estas instalaciones cuentan con otra peculiaridad que abre paso a un futuro no tan lejano. Algunas de estas son capaces de funcionar en modo

isla, esto es, sin estar conectadas a la red y autoabasteciéndose. Esto es importante de cara a posibles próximas instalaciones a las que la red tenga difícil acceso. También existen microrredes inteligentes con un flujo bidireccional, capaces de absorber energía de la red pero también de inyectarla, aumentando la calidad y la robustez del sistema.

A continuación, se muestran distintos ejemplos de microrredes inteligentes:

- Microrred inteligente en Alabama



*Ilustración 6: Microrred en Alabama, EE. UU. [6]*

Esta red inteligente es uno de los proyectos pioneros a media escala, demostrando la gran eficacia y eficiencia de estos proyectos en zonas más rurales y con un exceso limitado a la electricidad. Este campo de pruebas de la compañía Alabama Power, cuenta con el autoabastecimiento de 62 viviendas, todas ellas contando con altas medidas de eficiencia y conexión ala microrred. Este sistema cuenta además con baterías y un sistema generador de gas para abastecer sin cortes de suministro la demanda en horas nocturnas, ya que su generación basa principalmente en el empleo de paneles fotovoltaicos.

- Microrred en el condado de Montgomery (EE. UU.)



*Ilustración 7: Microrred en Montgomery, EE. UU. [7]*

Esta microrred situada en Maryland, recibió la máxima certificación PEER (Performance Excellence in Electricity Renewal). Cuenta con paneles solares de 2 MW capaces de generar 3.3 millones de kW/h anuales y abastece alrededor de 400 viviendas. Consta de números enchufes para coches eléctricos y de seguridad cibernética. El mix energético que abastece esta red consta de un 33% de energía solar y un 66% de cogeneración local. Se prevé que esta microrred reduzca la emisión anual de gases de efecto invernadero en 3.629 toneladas métricas.

- Proyecto IOTHER, Huesca



*Ilustración 8: Instalaciones del proyecto IHER, Huesca [8]*

Este proyecto se alinea en cierto modo a lo ofrecido en este trabajo. Se encuentra en el parque tecnológico de Walqa, y cuenta con parque eólico de 650 kW y con paneles solares de 100kW. La energía producida por este centro no solo es utilizada para abastecerse mediante esta sino también para la producción de hidrógeno mediante electrólisis.

Uno de los mayores inconvenientes de la obtención de hidrógeno mediante esta tecnología es el alto consumo energético que requiere, por lo tanto, el alto coste que supone. Este proyecto se apoya de la energía renovable para su producción, convirtiendo el hidrógeno en hidrógeno verde. Este lo almacenan en tanques para su futuro aprovechamiento, aunque también cuentan con un dispensador para abastecer a automóviles que requieran de este combustible.

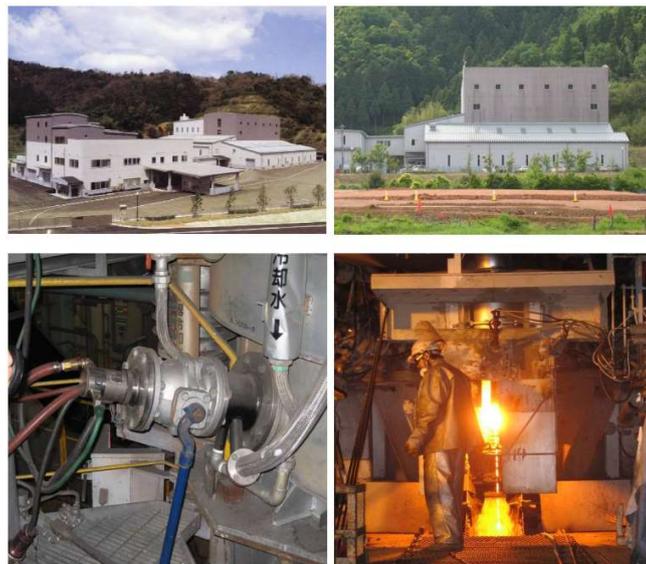
## **2.3 PLANTAS DE GASIFICACIÓN POR PLASMA**

Como se comentó anteriormente, en este proyecto se utilizará la tecnología del plasma para tratar los diferentes residuos orgánicos. A través de este gas ionizado a alta temperatura, se consigue aprovechar estos residuos para la obtención de hidrógeno, elemento que puede ser almacenado y utilizado posteriormente para generar energía.

La empresa Westinghouse Plasma Corporation es una compañía que proporciona tecnología para implementar el plasma. Cuenta con numerosos proyectos tanto en actual funcionamiento como en construcción. Su objetivo es hacer uso de la gasificación por plasma como proceso principal de tratado de residuos, eliminando la alternativa de depositar estos en vertederos.

A continuación, se muestran diferentes proyectos que esta empresa ha llevado a cabo:

- Mihama-Mikata, Japón



*Ilustración 9: Planta de gasificación de residuos mediante plasma Mihama-Mikata, Japón [9]*

Esta planta procesa 20 toneladas de residuos sólidos urbanos provenientes de las ciudades de Mihama y Mikata. También, procesa alrededor de 4 toneladas de lodos fruto de depuración. Utiliza el gas de síntesis para el secado de los lodos y la escoria para agregados de hormigón y adoquines.

- EcoValley – Utashinai, Hokkaido, Japón



*Ilustración 10: Planta de gasificación de residuos mediante plasma en Utashinai [9]*

Esta planta situada cerca de la pequeña localidad de Utashinai es capaz de procesar cerca de las 220 toneladas de residuos sólidos urbanos preorganizados. Esta cuenta con dos trenes gasificadores cada uno de 110 toneladas de capacidad de procesamiento.

Tanto esta planta como la anterior, cumplen rigurosamente con los requisitos de emisiones.

- Tees Valley, Inglaterra



*Ilustración 11: Planta de gasificación por plasma en Tees Valley, Inglaterra [9]*

La planta inglesa procesa cerca de las 1000 toneladas de residuos sólidos urbanos preorganizados y cuenta con el gasificador por plasma de mayor dimensión, capacidad de procesado de residuos y de gas sintético producido, el G65.

Produce electricidad a través de una isla de energía de ciclo combinado, combinando varias turbinas de gas productoras de vapor y un generador de vapor recuperador de calor. Esta es la considerada la tecnología más eficiente para la conversión de gas en electricidad.

## **Capítulo 3. LA PLANTA DE GASIFICACIÓN EN JAÉN**

### ***3.1 LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA***

En capítulo anterior sirve de introducción a diferentes métodos, conceptos y tecnologías que la planta de este proyecto trata de incorporar. La recuperación energética de residuos, el concepto de red inteligente y el plasma, son las bases de este trabajo.

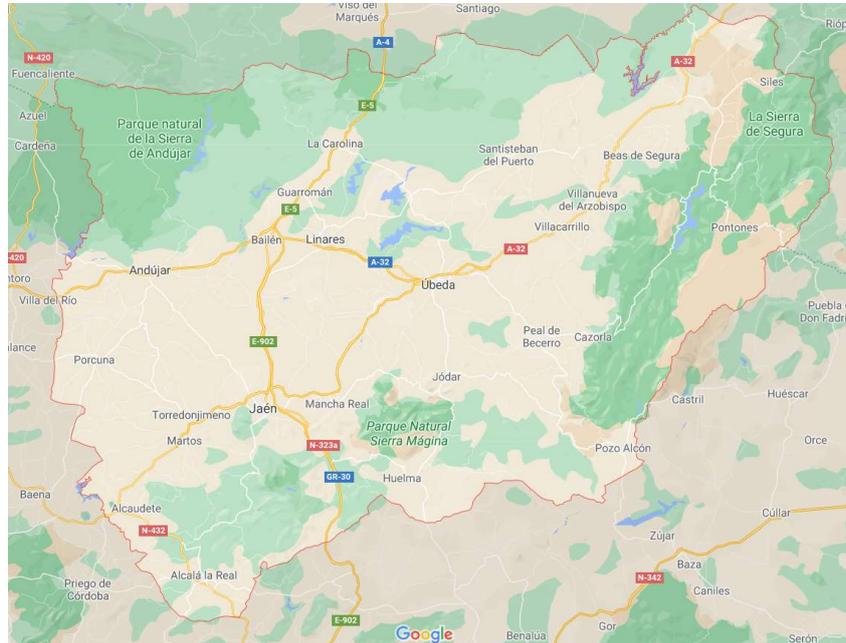
A diferencia de los ejemplos comentados previamente en los que solo se daba una de estas tres características, en este trabajo se busca concentrar todas estas en una sola planta. Es decir, aprovechar la energía renovable y los residuos sólidos urbanos y utilizar el plasma para el tratado de estos mismos.

De esta forma, se aprovecharían de forma sostenible los residuos y en mayor medida la energía renovable, actualmente altamente dependiente.

Para asegurar que el funcionamiento de la planta sea independiente de la red y por lo tanto funcione de forma gestionable, será necesario incorporar un sistema de reserva que suministre energía en caso de que no se disponga de energía renovable.

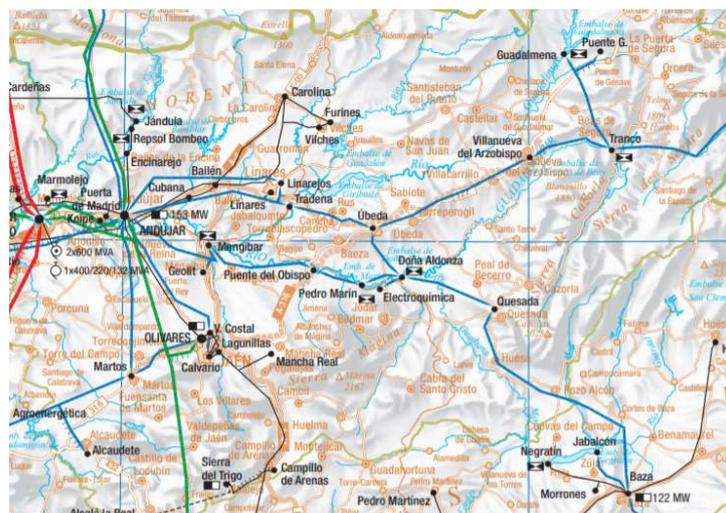
La provincia elegida para situar la planta es Jaén, al noreste de la comunidad autónoma de Andalucía y situada en el sur de la península ibérica. Esta provincia cuenta con 14.500  $km^2$  y con más de 638.000 habitantes.

Su orografía está marcada por las cordilleras subbética y bética, la depresión del Guadalquivir y Sierra Morena. Su hidrografía, por el río Guadalquivir, cuyas cuencas alta y baja pasan por toda la provincia andaluza.

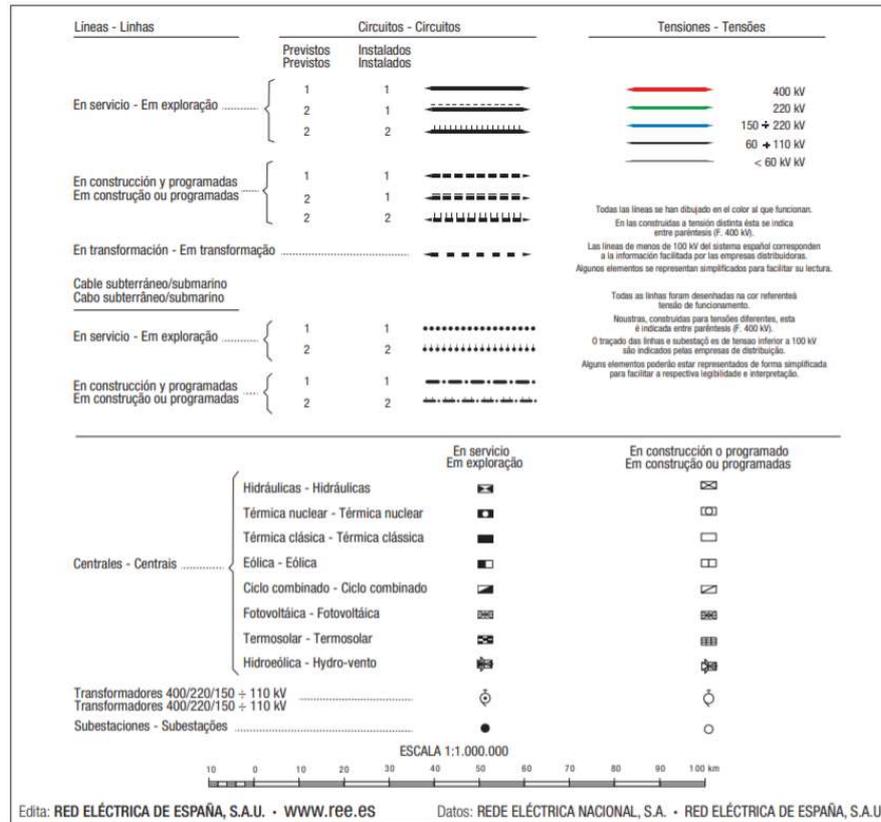


*Ilustración 12: Mapa de Jaén [10]*

Por otro lado, la distribuidora eléctrica mayoritaria en la comunidad autónoma es Endesa, que junto a Gas Natural Fenosa se encargan de la total distribución en la comunidad andaluza. A continuación, se muestra el mapa del sistema eléctrico español ampliado en Jaén.



*Ilustración 13: Distribución eléctrica en Jaén [11]*



*Ilustración 14: Leyenda de Imagen 13 [12]*

La economía jienense se basa principalmente en el sector agrario con el cultivo de olivar, afectando al desarrollo de otros sectores, principalmente en las zonas rurales. Por lo tanto, el sector industrial y el de la construcción están muy ligados al monocultivo de este, convirtiendo a Jaén el mayor productor de aceite del mundo. Este cultivo, como se comentará más adelante, genera toneladas de residuos actualmente no utilizados que la planta trata del proyecto de aprovechar.

El PIB por persona jienense ha vivido un alto crecimiento desde el 1977 hasta la fecha, pasando del 59% de la media nacional en 1977 a superar la media tanto andaluza como nacional.

El clima en esta provincia se califica como mediterráneo, mezclando el subtropical, continental y templado, estando muy influenciado por el Valle del Guadalquivir. A

continuación, se adjunta una tabla con diferentes parámetros anuales de temperatura en Jaén ciudad.

Mes	Temperatura media min (°C)	Temperatura media (°C)	Temperatura media máx (°C)	Horas de sol
Enero	1.8	6.7	11.8	192
Febrero	2.8	8.0	13.3	196
Marzo	5.2	10.9	16.6	254
Abril	7.8	13.8	19.3	260
Mayo	11.5	18.1	23.8	346
Junio	16.3	23.7	30	378
Julio	19.1	27.1	33.9	402
Agosto	19.4	27	33.7	375
Septiembre	15.9	22.1	28.1	310
Octubre	11.6	17.1	22.6	267
Noviembre	5.8	10.5	15.4	204
Diciembre	3.1	7.7	12.8	198

*Tabla 1: Temperaturas en Jaén durante el año [13]*

### **3.2 GENERACIÓN EN LA PROVINCIA DE JAÉN**

Como se ha comentado ya anteriormente, el proyecto trata de aprovechar la energía renovable instalada en la zona para su propio funcionamiento. Por ello, es estrictamente necesario evaluar y analizar su sistema y red de generación. La idea que se plantea es la de incorporar una forma de generación gestionable, esto es, capaz de proporcionar energía

cuando se desee, no cuando se disponga de ella, y de adaptarse a la demanda variando la potencia entregada.

Para garantizar seguridad de suministro, será también necesario conectar la planta a la red (en otro caso, dependeríamos solo de energía no gestionable) posibilitando el intercambio de energía entre ambos, ya sea para apoyar a la red en momentos pico, o para ayudar a la planta a generar hidrógeno. Por otro lado, también se conectará la planta a un sistema de alimentación de reserva gestionable en caso de falta de suministro que se diseñará más adelante.

A continuación, se analiza la generación eléctrica en Jaén. Se considera toda la energía generada en la provincia (con un radio de aproximadamente de 60 kilómetros). Esta dispone de una red de generación atípica, ya que solo cuenta con generación renovable y cogeneración. Durante los últimos veinte años, esta provincia ha instalado más del 65% de energía renovable que disponía anteriormente, y se ha caracterizado por el desarrollo de nuevas redes e infraestructuras energéticas y construcción de gaseoductos.

### **3.2.1 COGENERACIÓN**

La cogeneración es una forma de generación que simultáneamente genera energía eléctrica y aprovecha el calor para cualquier otro proceso (por ejemplo, climatización). Esto hace que tanto el rendimiento como la eficiencia del proceso sea elevado comparado con los métodos de generación térmicos convencionales al utilizar el calor generado en la cogeneración.

La cogeneración en Jaén dispone de una potencia total instalada de 175.5 MW y cuenta con 16 instalaciones que mayoritariamente usan gas natural como combustible (13), aunque también las hay de gasóleo (2) y fuel oil (1).

Fuente de energía	Jaén	Andalucía	% Provincia
Calor residual	0,00	11,52	0,00%
Gas Natural	152,42	700,72	21,75%
Gas de refinería	0,00	57,00	0,00%
Gasóleo	2,08	20,04	10,38%
Fuel Oil	21,00	105,65	19,88%
<b>TOTAL</b>	<b>175,50</b>	<b>894,93</b>	<b>19,62 %</b>

*Tabla 2: Cogeneración (MW) en Jaén en función del combustible en relación a Andalucía a 31/12/2020.*

[15]

Jaén lleva varios años contando con esta forma de generación, y actualmente lleva más de cinco produciendo la misma potencia en el territorio.

Jaén	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<b>Potencia</b>	190,49	190,49	190,49	190,50	175,50	175,50	175,50	175,50	175,50	175,50

*Tabla 3: Histórico de generación (MW) eléctrica por cogeneración en Jaén [15]*

NOMBRE	MUNICIPIO	POTENCIA (MW)
Energética Las Villas (CELVI) (ant. San Miguel Arcangel)	Villanueva del Arzobispo	24,98
Cerámica MALPESA 3	Villanueva de la Reina	0,99
Compañía Energética Linares	Linares	24,99
C.E. Puente del Obispo	Baeza	24,8
Bioener (Biogás y Energía)	Puente de Génave	9,19
BECOSA 2 (MENGIBAR, S.A.)	Mengibar	3,60
Santo Rostro Generación	Bailén	0,92
Andaluza de Cogeneración, SA (ANCOSA)	Bailén	1,84
Cogeneración de Andújar (COANSA / Moltuandujar)	Andújar	19,63
Cerámicas de Alcalá Villalta, SA	Bailén	0,96
Cerámica La Unión	Bailén	0,48
GALEY Cogeneración	Bailén	1,60
Aceites Coosur, SA / Compañía Energética Linares	Vilches	21,00
Smurfitt kappa (Alabe Mengibar)	Mengibar	24,70
Compañía Energética de Jabalquinto (Extractora de Ecología del Olivar) (CEJABAL)	Jabalquinto	15,30
Cover Design (Cog Marmolejo)	Marmolejo	0,50
<b>TOTAL</b>		<b>175,50</b>

*Tabla 4: instalaciones de cogeneración en Jaén [15]*

### 3.2.2 HIDROELÉCTRICA

Esta tecnología no ha sufrido un desarrollo tan pronunciado comparado con el resto de formas de generación renovables en los últimos años. Esto se debe a que la provincia de Jaén es seca y el uso de agua se prioriza para el abastecimiento de la población, usos agrarios, industriales y regadío. Aun así, es la provincia con más potencia instalada de la comunidad andaluza, contando con 212.22 MW y 23 centrales, llegando así al 32.6% de potencia instalada de la comunidad situada al sur de la península. Esto se debe al buen aprovechamiento de su orografía (propicia para un buen aprovechamiento hidroeléctrico), presas y a la renovación y rehabilitación de instalaciones ya existentes.

A continuación, se adjuntan todas las instalaciones hidroeléctricas en Jaén.

CENTRAL	MUNICIPIO	POTENCIA (MW)
Encinarejo	Andújar	8,32
Jándula	Andújar	15,00
Valtodano	Andújar	3,15
Pedro Marín	Baeza	13,20
El Rumblar	Baños de La Encina	2,50
Mata Bejid	Cambil	0,20
La Fernandina	Carboneros	5,00
Puente de la Cerrada	Cazorla	7,52
Guadalmena	Chiclana de Segura	15,20
Salto de San Rafael	Espeluy	3,20
Tranco de Beas	Hornos	39,80
Arquillos	Ibros	1,44
CH Giribaile	Ibros	20,00
Mengibar	Jabalquinto	4,20
Marmolejo	Marmolejo	16,96
Salto del Yeguas	Marmolejo	4,90
Olvera	Navas de San Juan	2,39
Los Órganos	Santiago-Pontones	1,92
Miller	Santiago-Pontones	27,00
Doña Aldonza	Úbeda	10,40
Racioneros	Úbeda	2,24
Guadalén	Vilches	5,12
Salto del Molino de Guadalén	Vilches	2,56
<b>TOTAL</b>		<b>212,22</b>

*Tabla 5: Instalaciones hidroeléctricas en Jaén y su potencia instalada [15]*

### 3.2.3 EÓLICA

La provincia jienense cuenta con solo un parque eólico en la Sierra del Trigo (municipio de Noalejo) de 15.18 MW, aunque también se encuentran minieólicas aisladas de potencias inferiores (un total de 4.68 kW). Estas últimas no son rentable de utilizar ya que están distribuidas por toda la provincia, aumentando por lo tanto las pérdidas por transporte. Al tratarse de una potencia muy pequeña, se ha optado por no utilizarlas de cara a reducir costes.

### 3.2.4 FOTOVOLTAICA

Jaén cuenta con 108.50 MW de potencia conectada a la red, además de 1.17 MW en zonas de generación aislada y autoconsumo. El número de parques fotovoltaicos distribuidos por la provincia es elevado, por tanto, se ha decidido no incorporar una tabla con todas las instalaciones. Más adelante se explicará que criterio se ha elegido para definir la potencia con la que se cuenta referida a esta tecnología renovable.

### 3.2.5 BIOMASA

La provincia al noroeste de Andalucía cuenta con tres plantas de potencia media dedicadas a la generación de energía eléctrica por biomasa. Es la tercera provincia de la comunidad autónoma con más potencia instalada de esta energía. A continuación, se adjunta una tabla con las tres plantas y la potencia de estas.

PLANTA	MUNICIPIO	POTENCIA (MW)
Bioenergética de Linares	Linares	15,00
La Loma	Villanueva del Arzobispo	16,00
Aldebarán Energía del Guadalquivir	Andújar	6,00
<b>TOTAL</b>		<b>37,00</b>

*Tabla 6: Instalaciones de generación eléctrica por biomasa y su potencia instalada en Jaén [15]*

En cuanto a tratamiento de RSU, Residuos Urbanos de Jaén, S.A. (Resurja) realiza su tratamiento, mezclados a todos los municipios de la provincia de Jaén, estos residuos son transportados a las Plantas de Tratamiento de R.U.

Como se comentará más adelante, Jaén dispone de dos plantas de tratamiento de RSU, una en Jaén y otra en Linares. Según la cercanía del municipio, los RU mezclados recogidos llegarán finalmente a una u otra planta. Ambas plantas cuentan con un sistema combinado de separación automático de tecnología óptica, balística e inductiva de materiales que

permite incrementar la eficiencia en la selección que se realiza. Con este sistema se consigue recuperar el mayor volumen posible de materiales aptos para ser reciclados. El material orgánico sigue el proceso, pasando a una etapa de compostaje, donde después de varias fases, se producirá su fermentación acelerada y su estabilización. Tras estas fases que durarán varias semanas, se conseguirá un material bioestabilizado, siempre después de su paso por la planta de afino, donde se cribarán impurezas. Este material ya es apto para su venta y utilización como enmienda orgánica.

	Cantidad en 2020 (toneladas) <sup>a</sup>	Variación respecto a 2019
R.U. mezclados tratados	241.353	0,02 % ↑
R.U. mezclados recuperados	10.274	-20,05 % ↓
Material bioestabilizado recuperado	4.525	8,98 % ↑

<sup>a</sup>Total gestionado entre las dos plantas de tratamiento de R.U. de Jaén y Linares.

*Tabla 7: RSU en Jaén [19]*

A partir de los residuos orgánicos que se depositan en las plantas de tratamiento de R.U., se consigue además producción de energía eléctrica. Mediante un sistema de extracción forzado de los vasos donde se vierten los rechazos de la planta se obtiene el gas metano que posteriormente se combustiona en un moto-generador, que permite producir energía eléctrica. La producción anual de energía en las plantas de Guadiel y Sierra Sur ha sido de 1.245.248 kWh en 2020.

Planta de tratamiento Sierra Sur	VERTEDERO		DIGESTOR		BIOGÁS QUEMADO					
	%CH <sub>4</sub> medio	Nm <sup>3</sup>	%CH <sub>4</sub> medio	Nm <sup>3</sup>	Generador		Antorcha de la planta		Antorcha del vertedero	
					%CH <sub>4</sub> medio	Nm <sup>3</sup>	%CH <sub>4</sub> medio	Nm <sup>3</sup>	%CH <sub>4</sub> medio	Nm <sup>3</sup>
	4,8%	2.683.173	71%	800.193	18%	60.433	68%	756.505	4,8%	2.666.436

Planta de tratamiento Guadial	COLECTOR		ANTORCHA		MOTOR	
	Nm <sup>3</sup>					
	1.443.141		638.625		804.516	

Tabla 8: Producción de biogás y su destino [19]

### 3.2.6 RESUMEN DE TECNOLOGÍAS

En los puntos anteriores se han contemplado todas las instalaciones y las potencias totales de cada una de las tecnologías. Al criterio elegido de la distancia de las instalaciones hay que sumarle la rentabilidad de conectar una instalación a la planta en cuestión, por lo tanto, se ha decidido que solo se considerarán aquellas con potencias superiores a los 5MW. Por ello, las comentadas anteriormente no son estrictamente las que se utilizarán en la planta.

Acerca de la fotovoltaica se ha realizado una estimación debido a la dificultad de recopilación de datos sobre respectivos parques. Se supondrá que solo se dispone del 50% de la potencia total formado por 7 parques fotovoltaicos.

Es importante tener en cuenta los ciclos de funcionamiento de cada una de las tecnologías, tanto en las más marcadas como la solar (aún dependiendo de la presencia de nubes), que es nula durante la noche y alcanza un máximo del 40% a las 15:00 siguiendo una curva prácticamente simétrica, como aquellas en las que el patrón de disponibilidad es desconocido, como la eólica o la cogeneración, ya que dependen del viento y de la demanda energética respectivamente. En definitiva, todas son formas de generación no gestionable.

Con todo lo comentado, se resumen a continuación todas las tecnologías incluidas en el proyecto:

Tecnología	P(MW)	Número de centrales
Eólica	15	1
Hidroeléctrica	183	12
Fotovoltaica	55	7
Cogeneración	165	8
Biomasa	37	3

*Tabla 9: Resumen de tecnologías renovables disponibles [Elaboración propia]*

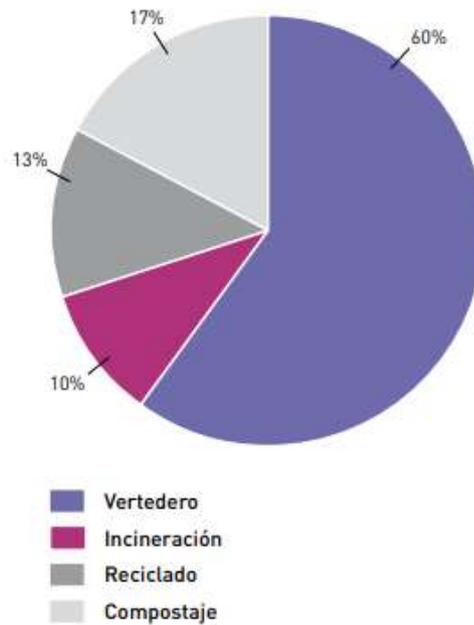
## **Capítulo 4. SISTEMA DE RESERVA DE LA RED: LA GASIFICACIÓN POR PLASMA**

### ***4.1 INTRODUCCIÓN***

El plasma es un gas ionizado a alta temperatura. Este consigue descomponer la materia orgánica en compuestos simples (prioritariamente hidrógeno y monóxido de carbono), y vitrificar aquellos compuestos inorgánicos, quedando en la base del contenedor.

Como se ha comentado anteriormente, la nueva legislación europea obliga a todos los países que la forman a eliminar sus vertederos controlados. Esto en definitiva supone, por un lado, el aprovechamiento de los residuos ya existentes en VC, y por otro el aprovechamiento de los residuos orgánicos forestales, agrícolas y urbanos que se generen.

En España, cada ciudadano genera más de media tonelada anual de residuos, de los cuales, en 2007, como se observa en la figura a continuación, el 60% iban destinados a vertedero. Cabe destacar que el porcentaje es aún mayor ya que el rendimiento de las plantas de reciclaje no es del 100% (se estima en un 70%). Por ello, la idea es aprovechar el potencial energético que tienen estos residuos para generar energía verde y gestionable y reducir al máximo este porcentaje.



*Ilustración 15: Gestión de los RSU en España en 2007 [16]*

También, se debe contar con un sistema de reserva no contaminante capaz de alimentarla en caso de falta en la red o de déficit de generación, que por supuesto, aproveche estos residuos orgánicos.

#### **4.2 FORMAS DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS**

Hoy en día existen varias formas de revalorización de residuos orgánicos, unas más utilizadas que otras y en un nivel de desarrollo diferente. Por un lado, están las formas de aprovechamiento térmico como son la incineración, gasificación o la gasificación por plasma. Por otro, las de fracción orgánica del biogás obtenido como la biometanización o digestión anaerobia. También se ha estudiado atentamente la creación de combustibles bio

como el CDR o CSR, utilizados como sustituto de combustibles convencionales en centrales térmicas o cementeras.

Los puntos a tener en cuenta de cara a elegir cual es la tecnología apropiada para cada caso son los siguientes:

- La mezcla de residuos a emplear.
- Flexibilidad suficiente de la tecnología para poder procesar variaciones en el mix orgánico. Esto es especialmente importante, ya que no es lo mismo procesar materia orgánica proveniente de un mismo proceso industrial (poca variación) que procesar materia orgánica proveniente de diferentes procesos y con posibilidad de variar durante el año.
- Madurez y desarrollo de la tecnología a emplear.
- Practicabilidad económica.

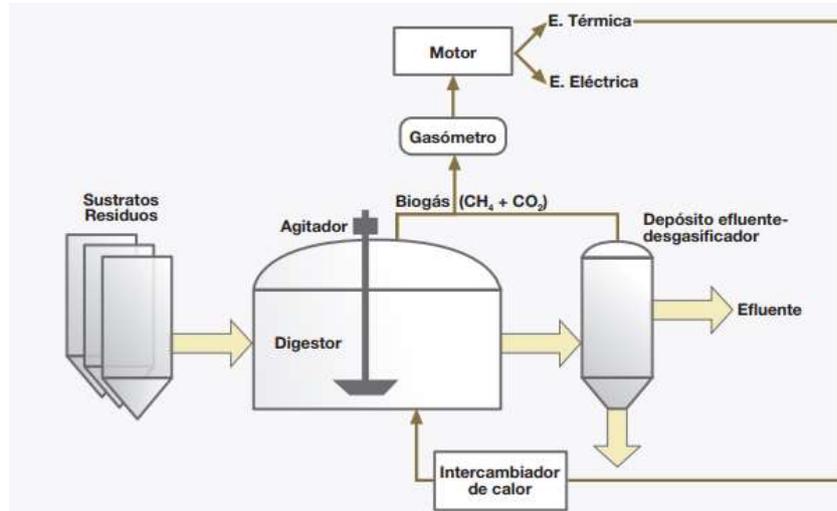
Los procesos más conocidos de revalorización de residuos orgánicos, aunque poco comunes en España, son la incineración y la digestión anaerobia, mientras que la gasificación, pirólisis y gasificación por plasma no se utilizan en la península, pero disponen de un mayor margen de desarrollo.

A continuación, se explican las distintas formas de aprovechar energéticamente los residuos orgánicos.

#### **4.2.1 DIGESTIÓN ANAEROBIA**

Es un proceso biológico que, con ausencia de oxígeno, parte de la materia orgánica se transforma en una mezcla de gases, principalmente metano y dióxido de carbono. Estos, pueden utilizarse posteriormente como combustible. Es un proceso adecuado para el tratamiento de materia orgánica agrícola, ganadera y urbana (sobre todo para el tratamiento de aguas urbanas).

Es una tecnología muy desarrollada y con cierta experiencia, por lo que podría considerarse madura.



*Ilustración 16: Ejemplo de instalación para residuos ganaderos (DA) [17]*

## 4.2.2 INCINERACIÓN

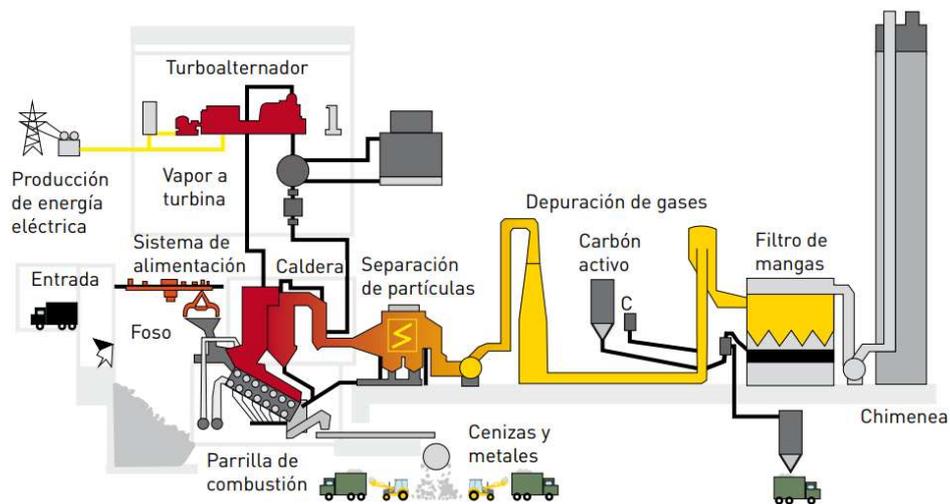
Es un proceso térmico en que se requiere exceso de oxígeno respecto al estequiométrico para la combustión, de forma que se asegura la oxidación de la materia. Las temperaturas alcanzan temperaturas comprendidas entre los  $850^{\circ}\text{C}$  y los  $1100^{\circ}\text{C}$  en la última inyección de oxígeno. Fruto de la combustión se obtiene mayoritariamente agua, dióxido de carbono y oxígeno, los componentes minoritarios dependerán del tipo de materia orgánica utilizada. También se obtiene materia en estado sólido, formado por cenizas y escorias inertes.

El proceso consiste pues en convertir toda la energía química contenida en energía térmica, calor que será utilizado para generar vapor de agua, este mueve en definitiva una turbina transformando energía mecánica en energía eléctrica, aunque el proceso de generar energía eléctrica es excesivamente lento.

Los residuos que pueden utilizados para esta forma de valorización energética de residuos orgánicos son muchos gracias a la flexibilidad del proceso, desde RSU hasta industriales y hospitalarios. Es un método maduro y extendido, por ello el 90% de las plantas de incineración en Europa llegan a capacidades de procesamiento de hasta 30t/h.

Por todo ello, es una forma de valorización de residuos muy atractiva y por lo tanto utilizada, aunque está más enfocada al aprovechamiento calorífico (calefacción) que para la obtención de energía eléctrica debido a la lentitud del proceso.

A continuación, se muestra un proceso típico en la incineración de residuos:



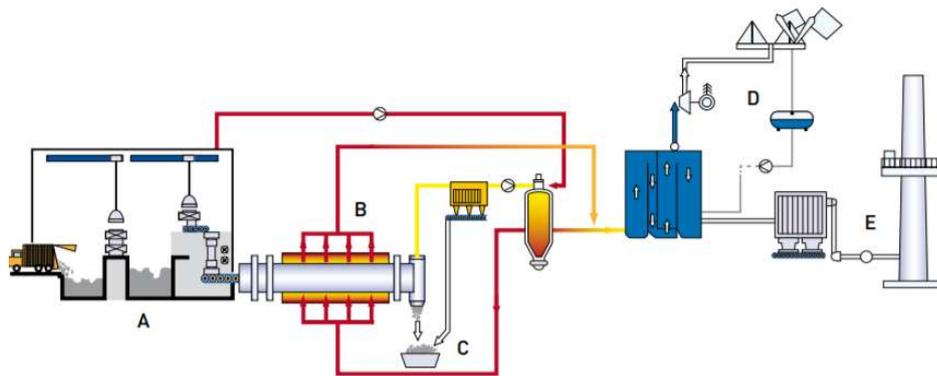
*Ilustración 17: Planta de valorización de residuos por incineración [17]*

### 4.2.3 PIRÓLISIS

A diferencia de la incineración, a este proceso térmico no se le añade oxígeno al mix material, por lo que no existen reacciones de combustión y el único oxígeno presente es el de los propios residuos. Las temperaturas del proceso se contemplan entre los 300°C y los 800°C, en función del objetivo final del proceso. Esto es así ya que en función de la temperatura se obtienen más o menos cantidades de gas, aceites o residuos.

La recuperación energética puede darse de varias formas, ya sea por un ciclo de vapor que use como combustible los aceites y gases para generar energía eléctrica, como etapa anterior a un proceso de gasificación o como aprovechamiento de los derivados sólidos como combustible para instalaciones industriales.

Los residuos para este tratamiento dependen del tipo de reactor y de las condiciones en las que se desee operar. Aun así, los más adecuados son el papel, cartón, ciertos plásticos, residuos agrícolas y residuos madereros. Independientemente de las condiciones de trabajo, la materia antes de ser trasladada al proceso de pirólisis debe ser seleccionada, de forma que solo se traten materiales deseados.



- A - Zona de descarga y trituración
- B - Pirólisis
- C - Recogida y selección de residuos procedentes del sistema
- D - Recuperación de energía
- E - Depuración de gases

*Ilustración 18: Ejemplo del proceso de una planta por pirólisis [17]*

Debido a los gases de síntesis que se obtienen en este proceso, la revalorización de residuos por pirólisis no difiere mucho de la gasificación por plasma. Sus principales desventajas con respecto a este son la limitación de materia a tratar y el alto control de operación que requiere, aumentando pues considerablemente el coste del proceso.

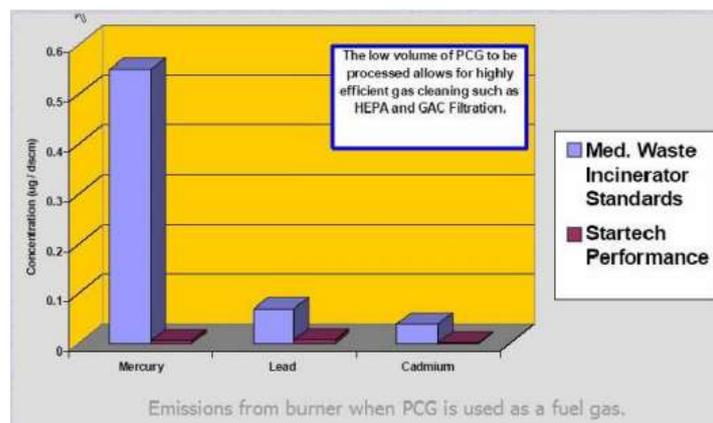
#### 4.2.4 GASIFICACIÓN POR PLASMA

La gasificación por plasma consiste en introducir la materia en una atmósfera de plasma, que es un gas ionizado a alta temperatura (próximas a los 3000°C). De esta forma, la materia orgánica se descompone mayoritariamente en hidrógeno y monóxido de carbono.

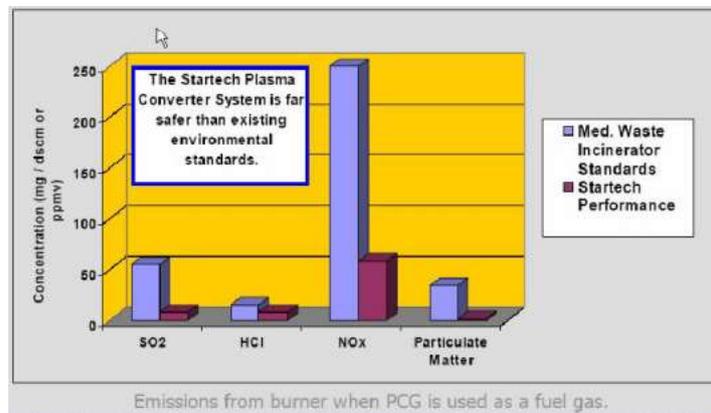
Los productos del proceso son estos gases y una masa sólida vitrificada que puede utilizarse para la industria constructora (entre otros posibles usos). Esto la convierte en el método de revalorización de materia más limpio de todos, ya que queda exento de generar residuos tóxicos y cenizas. Además, cuenta con la ventaja de poder procesar todo tipo de residuos, ya sean forestales, agrícolas o urbanos, sin necesidad de controlarlos o separarlos de forma minuciosa como se tiene que hacer en la pirólisis.

La mayor desventaja que tiene es la dificultad del aprovechamiento y almacenamiento de los gases de síntesis obtenidos, más concretamente del hidrógeno. Aun así, respectivas tecnologías están en desarrollo y cada vez son menos costosas.

Por todo ello, será el recurso a emplear debido a su versatilidad y bajas emisiones para procesar toda la materia comentada y que se verá más adelante.



*Ilustración 19: Emisiones por procesado de metales por gasificación por plasma e incineración [18]*



*Ilustración 20: Emisiones contaminantes de la gasificación por plasma e incineración [18]*

### **4.3 RESIDUOS APROVECHABLES EN JAÉN**

La localidad de Jaén cuenta con numerosos residuos que no son aprovechados. La idea del proyecto es tratar tanto los urbanos como agrícolas y forestales, de los poblados más próximos y de los terrenos oleícolas que se sitúan en esta provincia.

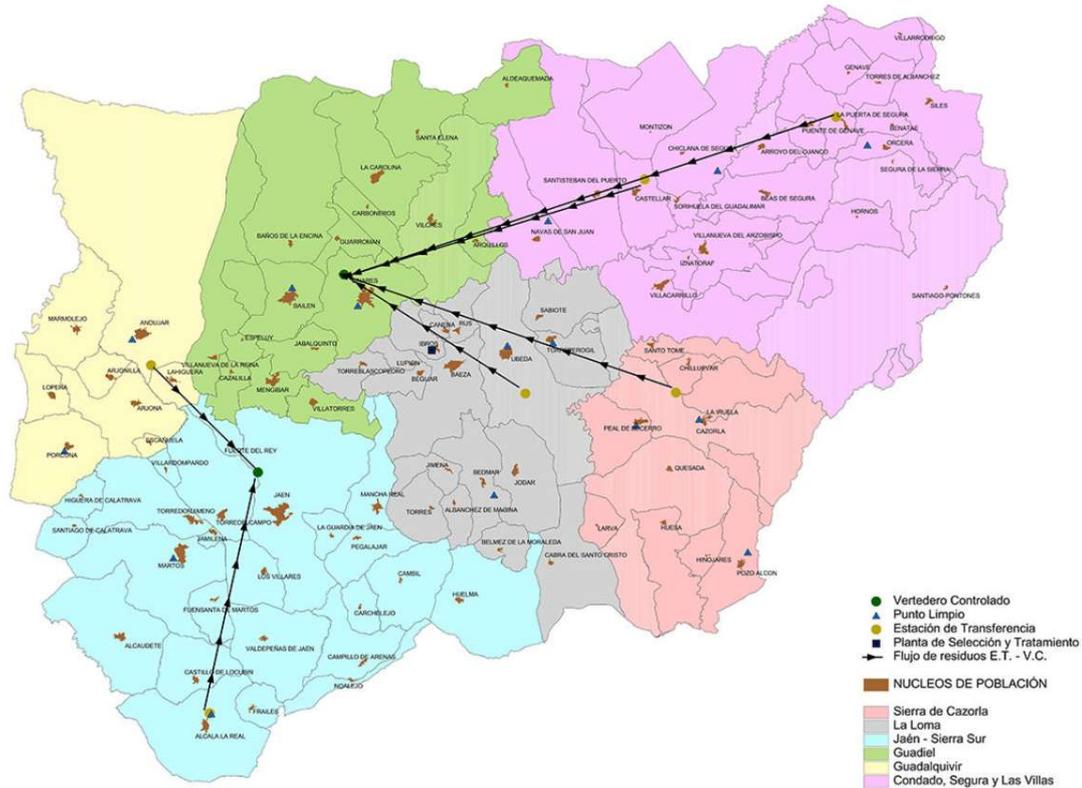
Para ello, es fundamental conocer las cantidades de residuos que aportarán cada una de estas partes.

#### **4.3.1 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)**

Según la Eurostat, los españoles generamos alrededor de 450 kg de residuos anuales. De los cuales, el 60% son materia orgánica, el 10% son materiales plásticos, el 13% papel y cartón, metales y vidrio el 6% y el 11% son determinados como fracción resto. En 2017 la tasa de reciclado en España era solo del 33%, mientras que la tasa de disposición en vertederos era del 54%, aún muy lejos del objetivo de la UE para 2035 (<10%).

Jaén cuenta actualmente con dos complejos medioambientales de tratamiento de residuos urbanos, uno en Sierra Sur y el otro en Guadiel, ambas bajo cargo de la empresa Resurja,

encargada de la recogida, tratamiento y eliminación de residuos por vertedero controlado y producción de compost de 96 de los 97 municipios de la provincia.



*Ilustración 21: Mapa de actuación de la empresa Resurja [19]*

La planta en cuestión se situará en los alrededores de linares, ya que es ahí donde se sitúa el complejo medioambiental de Guadiel, lugar en el que se tratan todos los residuos provenientes de Condado, Segura y las Vilas, Sierra de Cazorla, La mola y Guadiel. Los dos motivos por los que se han elegido este complejo son porque dispone de más RSU al dar cobertura a más población (321.000 en vez de 209.000) y porque el complejo de Sierra Sur realiza un aprovechamiento de los residuos al generar cerca de los 3000 MW/año por biometanización.

En cuanto a RSU se refiere, la planta procesará todo aquello que no sea reciclable (71% de la materia). Con todo ello, y sabiendo que esta materia orgánica tiene un poder calorífico de 3000 kcal/kg:

$$102.559,5 \frac{Tm}{año} * 1000 \frac{kg}{Tm} * 3000 \frac{kcal}{kg} = 307.678,5 \frac{Gcal}{año}$$

Lo que es lo mismo que 357,8 GWh. Teniendo en cuenta que un año tiene 8.760 horas:

$$357,8 \text{ GWh} * 1 \frac{año}{8760 \text{ h}} = \mathbf{40.84 \text{ MW}}$$

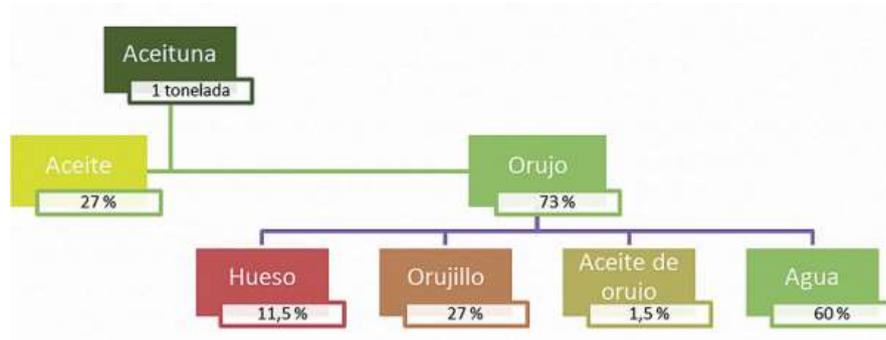
Hay que tener en cuenta que estos cálculos se han realizado sin tener en cuenta los rendimientos del aprovechamiento energético de estos residuos.

#### **4.3.2 RESIDUOS FORESTALES Y AGRÍCOLAS**

Debido a que Jaén es uno de los lugares de mayor producción de aceite a nivel mundial y a que la producción del mismo genera grandes cantidades de residuos, se plantea centrar estos residuos solo y exclusivamente a los generados por el cultivo del olivar, la industria oleícola y la poda del olivo. Andalucía cuenta con acerca de 1.400.000 hectáreas destinadas al olivar, siendo esto el 16% de la región. Por otro lado, la provincia jienense ocupa el 85% de su terreno para este cultivo, el mayor porcentaje de toda la península.

Hoy en día, la ventana más utilizada para deshacerse de estos residuos es la incineración, lo que ya no solo supone un no aprovechamiento energético, sino que esto puede fomentar plagas, incremento de riesgo de incendios, mineralización del suelo y contaminación atmosférica.

Entre los residuos provenientes de la poda del olivar y de las distintas fases de la producción del aceite de oliva se encuentra la leña, ramón y hoja, el orujo, orujillo, alperujo y alpechín, la parte sólida de la aceituna (hueso, mesocarpio y piel) y los restos grasos. Entre todos ellos, los más susceptibles de revalorización son el orujo, poda de olivar orujillo y hueso.



*Ilustración 22: Subproductos del olivar [20]*

Como se observa en la imagen 23, solo es aprovechado el 27% de una tonelada de aceituna. El resto 73%, llamado Orujo, se somete a un proceso químico en extractoras, obteniéndose lo mostrado en la gráfica. Esto tiene como objetivo la producción de aceite de orujo, que es aproximadamente el 1.5% restante. Un porcentaje de orujo también se destina a la producción de energía eléctrica mediante un previo secado (llegando a humedades relativas del 40%). En una campaña media se generan 840.000 toneladas de orujillo, con excelentes propiedades caloríficas (4.200 kcal/kg). En 2010, el orujillo destinado a la producción eléctrica (no ideal ni limpia como la del caso de esta planta) alcanzaba las 510.000 toneladas anuales, mientras que el autoconsumo en la propia industria consumía cerca de 125.000 toneladas. Por lo tanto, queda una disponibilidad de cerca de 200.000-300.000 toneladas anuales de orujillo sin aprovechar.

Por otro lado, las industrias del aderezo se deshacen del hueso de la aceituna en el 80% de las veces para comercializar la aceituna de mesa sin hueso. Esto genera alrededor de 33.000 toneladas de hueso, que se utiliza principalmente en calderas para obtención de energía térmica. Respecto a la aceituna destinada al aceite de oliva, aproximadamente el 70% del orujo se separa, obteniendo cerca de 360.000 toneladas al año de hueso. Parte de esta cantidad se destina (gracias también unas buenas propiedades caloríficas) a calderas, carbón activo y productos naturales. Por lo tanto y debido a que no se dispone de información suficiente al respecto, supondremos que el hueso proveniente de la producción de aceite es también aprovechado para no sobredimensionar la planta.



*Ilustración 23: Resultado de la poda del olivo [20]*

Por último, la poda del olivo genera otra cantidad muy alta de residuos orgánicos. Esta es necesaria para mantener la salud de los propios olivos y maximizar su producción. La poda del olivo destinado a la aceituna debe realizarse anualmente, mientras que la destinada al aceite cada dos años. Se estima que una hectárea de olivar genera aproximadamente 1.7 toneladas de residuos de poda, incluyendo olivos viejos, troncos, ramones (troncos con radios inferiores a 5cm) y hojas. Actualmente se han destinado estos residuos para uso de leña doméstica, pero aun así, no se llega ni al 10% del aprovechamiento de este residuo biomásico. De todas formas, se contará con solo el 15% de estos debido a la poca información disponible y a que todos esos residuos están repartidos por toda la provincia y de cara a reducir costes solo se recogerán aquellos más cercanos a la planta.

	Poda de olivar	Orujo	Orujillo	Hueso
Análisis inmediato (% peso)				
Carbono	14,67	7,31	22,13	21,98
Volátiles	72,83	30,65	72,29	76,40
Cenizas	1,55	6,75	4,58	1,62
Humedad	10,95	55,29	12,69	13,12
Análisis elemental (% peso)				
Carbono	49,52	47,03	50,54	50,79
Hidrogeno	5,90	5,64	5,86	5,95
Nitrógeno	0,39	0,97	0,97	0,48
Azufre	<0,05	0,09	0,07	0,04
Oxigeno	44,19	46,27	42,56	42,74
Poder Calorífico (kcal/kg seco)				
Superior	4600	4500	4500	4800
Inferior	4300	4250	4300	4500

*Tabla 10: Propiedades y análisis de los subproductos del olivar [21]*

Con todo lo comentado y sabiendo que la producción tanto de aceituna como de aceite en jaén es el 50% la andaluza, contamos con los siguientes recursos agrícolas y forestales:

8. Orujillo:

$$100.000 \frac{Tn}{año} * 1000 \frac{kg}{Tn} * 4300 \frac{kcal}{kg} = 430.000 \frac{Gcal}{año} = \mathbf{57.05 MW}$$

9. Poda del olivar:

$$100.000 \frac{Tn}{año} * 1000 \frac{kg}{Tn} * 4300 \frac{kcal}{kg} = 430.000 \frac{Gcal}{año} = \mathbf{57.05 MW}$$

#### **4.4 EL PLASMA**

Se define al plasma como gas ionizado a muy alta temperatura, capaz de sobrepasar los 4.000°C, cuando la combustión con combustibles fósiles convencionales se da a los 2.000°C. Debido a sus diferencias de propiedades con los estados sólido, gaseoso y líquido, es considerado el cuarto estado de la materia. El resultado es un fluido compuesto por partículas neutras libres, iones y electrones, que es conductor de la electricidad. A estas temperaturas consigue que toda materia que se introduzca en el plasma se disocie por completo.

Aunque de momento su uso no ha sido muy expandido, se ha ido desarrollando durante estos últimos años. Se utiliza para el lanzamiento de satélites, en la industria metalúrgica y en la soldadura.



*Ilustración 24: Ejemplo de vasija [9]*

El principal motivo por el cual se ha elegido esta tecnología es como se comentaba anteriormente, su gran versatilidad, capaz de procesar cualquier tipo de material que se introduzca en la vasija. Estos son descompuestos en gases de síntesis, formados mayoritariamente por monóxido de carbono e hidrógeno. En caso de que se introduzca una cantidad considerable de materia inorgánica, se obtendría un material vitrificado, que si se retira del cristal puede ser reutilizado (como material de construcción, por ejemplo).

En definitiva, la aplicación de la gasificación por plasma es a priori, una gran alternativa como sustituto de los vertederos controlados, y una excelente forma de aprovechar los residuos agrícolas y forestales.

Actualmente, se dispone de diferentes tecnologías de convertidor de plasma, pero la gran mayoría tienen un porcentaje de nitrógeno en el gas de síntesis superior al 30%, lo que supone un alto coste en la limpieza y separación para la obtención de hidrógeno verde. Por ello, se ha elegido utilizar un sistema de plasma directo, tecnología facilitada por *Materiales Renovados*, del cual se habla a continuación.

## 4.5 CONVERTIDOR DE PLASMA DIRECTO

### 4.5.1 ETAPAS DEL PROCESO

A continuación, se resumen las etapas del proceso que se realizaría en la planta:



*Ilustración 25: Etapas en la planta de gasificación [18]*

#### 1) Alimentación:

Es el proceso de incorporación de la materia al sistema, previo a la disociación de los mismos. Para que la eficiencia del proceso sea la mayor, en esta etapa se realizarán diferentes fases sobre la materia introducida.

En primer lugar, y debido a que parte de los residuos son de un tamaño considerable, se realizará una disminución de este mediante trituradores. Después y con el objetivo de que la materia introducida sea lo más heterogénea posible (solo así se conseguirá un gas de síntesis heterogéneo), se dispondrá a separar los residuos mediante separadores ópticos. Una vez separada la materia se dispondrá a compactarla en cubos de pequeño tamaño, de esta forma se optimizará tanto el transporte como el almacenamiento del mismo. El siguiente proceso será el del secado, ya que la biomasa introducida tendrá una humedad relativa superior al 30%, obteniendo una cerca del 5%. Este secado se realizará aprovechando el calor

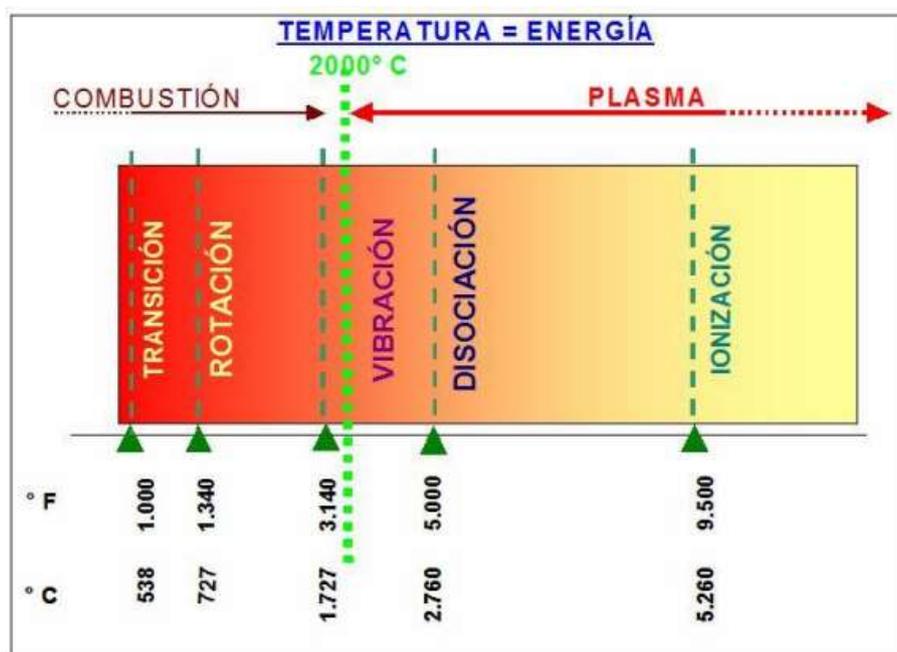
proveniente de la salida de los gases de síntesis, mejorando pues la eficiencia de la planta. Una vez secada, se dispondrá a introducir los residuos en el reactor mediante una cinta transportadora, dirigida y regulada por un control del reactor, que decidirá cuanta masa es necesaria introducir en función de las condiciones requeridas y definidas de trabajo.

## 2) Disociación

En este proceso es donde se consigue la total disociación de la materia, se introduce en el reactor y se transforma en gases de síntesis formados principalmente por como ya se comentó, monóxido de carbono e hidrógeno y la materia sólida vitrificada.

Una diferencia de potencial entre dos electrodos generado en la antorcha de plasma produce el arco eléctrico. Este es el que sube la temperatura para disociar la materia introducida en el reactor.

A continuación, se muestran las transformaciones a las que se somete la materia:



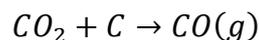
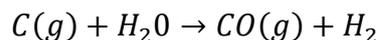
*Ilustración 26: Transformaciones de la materia en el reactor [19]*

A temperaturas cercanas a los 550°C se produce la traslación de la materia, que cuando pasa de los 727°C comienza el proceso de rotación. La vibración de esta se da a temperaturas entre los 1.727°C y los 2.760. Esta sería la última transformación a la que llegaría la materia si se sometiera a combustión y no a gasificación por plasma, ya que suelen llegar alrededor de los 2.000 grados. Pasados los 2.760 los residuos comenzaran a disociarse, mientras que partir de los 5.260 a ionizarse. Por lo tanto, será necesario mantener temperaturas en la vasija superiores a los 5.000°C para asegurarse de que se disocia e ioniza por completo.

Se inyecta oxígeno en el reactor para generar el ambiente oxidante, mientras que también se inyecta aire en las antorchas para la formación del arco.

Los procesos térmicos que se dan en la vasija son los siguientes:

- Cracking térmico: Se disocian las moléculas más complejas formando gases de hidrocarburos e hidrógeno.
- Oxidación parcial: gracias al medio oxidante, se forma el monóxido de carbono tan presente en el gas de síntesis. También se forma, aunque en menor medida, agua y dióxido de carbono, algo indeseable por su efecto sobre el poder calorífico del gas de síntesis, por lo que hay que controlar bien el oxígeno entrante en el reactor para evitarlo.
- Reformación: Estos elementos resultantes en la disociación reaccionan formando nuevas moléculas, dándose las siguientes reacciones:



Una vez ocurrido lo anterior, se consigue reducir el volumen de los residuos introducidos de 300:1. Toda la materia introducida se transforma en un gas de síntesis del cual podremos

aprovechar el hidrógeno para poder generar energía eléctrica, esto se comentará más adelante. En el fondo del reactor se encontrará una masa fundida rica en silicio, que es lo que reaccionará con la materia inorgánica introducida, generando el material vitrificado.

### **3) Enfriamiento**

Es un proceso necesario ya que los gases salen del reactor con temperaturas superiores a los 1000°C. Se aprovecha esa necesidad de enfriar el gas con la necesidad de generar energía eléctrica a través de vapor con un ciclo Rankine y de secar los residuos que entran en el reactor a humedades cercanas al 5% que ya se comentó anteriormente.

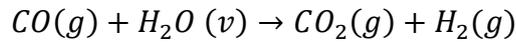
### **4) Filtrado**

El gas de síntesis estará formado también por gases indeseados que se han de separar, por lo que es necesario un filtrado. Este se realizará mediante un ciclón, que utiliza las diferencias de densidades entre los gases y partículas sólidas entrantes. Es el método mecánico más utilizado gracias a su buen rendimiento, aunque su único inconveniente es que este rendimiento es alto solo para el procesado de partículas superiores a los 10µm de diámetro. El rendimiento variará en función del tipo de gas de entrada y del ciclón utilizado, pudiendo variar entre un 70 y 99%.

### **5) Neutralización**

Debido a que el gas todavía obtiene cantidades de  $H_2S$ , se elimina mediante un sistema Scrubber, que captura el gas y mediante un líquido (agua, por ejemplo, ya que para absorber el azufre hace falta un medio alcalino u oxidante) neutraliza estos componentes contaminantes.

Aun así, el gas resultante contiene cantidades altas de dióxido de carbono que se debe capturar. Para ello, se somete primero por la llamada “Reacción Shift”, en la cual mediante un catalizador de hierro se produce la siguiente reacción:



A continuación, se separan ambos gases mediante un baño de ánimas, tras el cual se podrá aprovechar el hidrógeno resultante.

## 4.5.2 COMPONENTES Y SISTEMAS DE LA PLANTA

### 1) Vasija

Es la parte de la planta en la que se produce la disociación de todos los residuos introducidos por el sistema de alimentación. Debido a que las temperaturas alcanzadas dentro de este son muy altas, es importante que estén bien soldadas y juntas todas las partes, desde el cuerpo hasta la tapa. De esta forma, se evitan pérdidas de gas de síntesis que podrían en otro caso provocar daños a otros elementos.

Se tienen dos opciones para diseñar el sistema utilizado para el escape del contenido resultante, o bien se decide evacuar todo por una salida (tanto los gases de síntesis como la materia sólida), o bien se utilizan dos salidas, una para los gases resultantes y otra para el material vitrificado. En nuestro caso, se utilizará una misma salida ya que se presupone que el contenido entrante de materia inorgánica, proveniente solo de los residuos sólidos urbanos, será mínima (es lo que genera este material vitrificado).

Se muestra una imagen de un ejemplo de reactor:

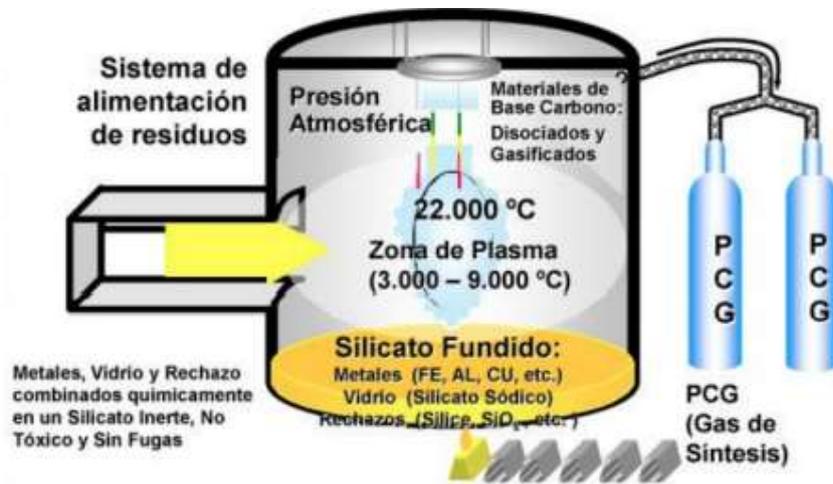


Ilustración 27: Ejemplo de vasija en la planta de gasificación por plasma [18]

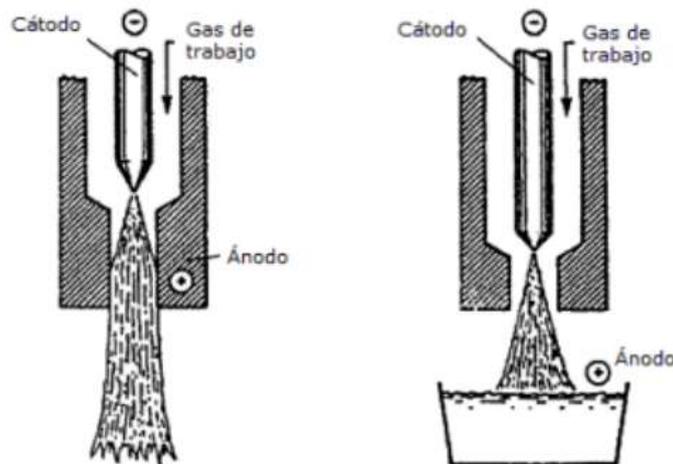
## 2) Antorcha

La antorcha de plasma es un dispositivo complejo, pero con una función muy simple, la de la calefacción a alta temperatura. Está compuesta por dos electrodos ánodo y cátodo que forman el arco eléctrico. Este es el elemento que se encarga de elevar la temperatura para la ionización de la materia, producida en la vasija de la planta.

Existen dos tipos de antorchas, la transferida y la no transferida. En la planta en cuestión, y debido a que la antorcha transferida es más costosa, se utilizará la antorcha no transferida. En esta tanto el ánodo como el cátodo serán elementos de sacrificio, esto es, estarán sometidos a desgaste, por lo que tendrán que ser cambiados periódicamente. La energía será transferida por radiación del haz, pudiendo calentar materia sólida, líquidos y materiales pastosos.

Para alimentar la antorcha será necesario un generados de corriente continua, y para no sobrecalentarla también será necesario refrigerarla periódicamente. Para proteger sus diferentes componentes y gestionar la temperatura del electrodo se utilizará agua a presión

ionizada. Consistirá en dos intercambiadores de calor, el principal de agua-agua, que a su vez consta de uno secundario de agua-aire.



*Ilustración 28: Antorcha no transferida y transferida [23]*

### 3) Sistema de control

Se utilizará un programa lógico programable (PLC) que se encargará de controlar la cantidad de residuos entrante en el reactor, la cantidad de aire entrante para alimentar la antorcha de plasma y el generador de corriente continua que alimenta también a la antorcha. Por otro lado, se encargará de estudiar la supervisar la composición de los gases resultantes para controlar su composición.

### 4) Sistema de gas

El aire introducido en la antorcha o gas plasmógeno es necesario para la formación del arco eléctrico. Se inyecta a presiones cercanas a los 7 bares. Este puede ser reductor, inerte u oxidante, por lo que se ha decidido utilizar aire al ser el más económico.

### **5) Sistema de vaciado de materia sólida**

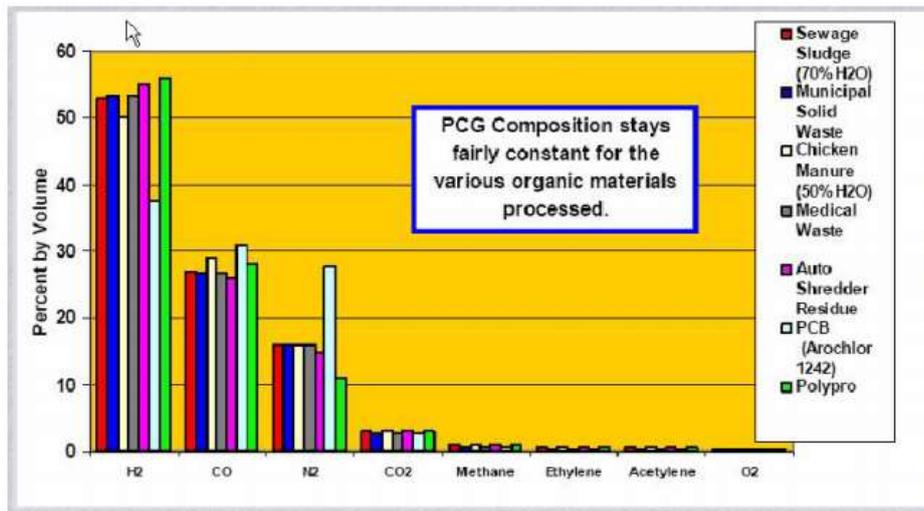
Como ya se comentó, en caso en que se incorporé materia inorgánica al proceso, esta se convierte en un material sólido vitrificado. Esta materia resultante debe ser retirada de la vasija de forma que no suponga un impacto negativo en la eficiencia de la planta.

Esta extracción podrá realizarse de dos formas, mediante inclinación y mediante un tornillo sinfín (extracción mecánica). El primero de estos se realiza de forma discontinua y cuando se detecta que la cantidad del material vitrificado es alta. Es el más utilizado y se usa en aquellas plantas en las que la cantidad de materia inorgánica introducida en el proceso es baja. En nuestro caso, como no se realiza ningún proceso previo para asegurarse esto, se optará por la extracción continua (tornillo sinfín). Una vez extraída, se depositará en un recipiente de agua para enfriarla y poder reutilizarse.

### **4.5.3 GAS DE SÍNTESIS**

Como se ha ido comentando, el gas de síntesis resultante del proceso de gasificación por plasma está formado principalmente por monóxido de carbono e hidrogeno. Aparecen también, aunque en menores cantidades gases como nitrógeno y dióxido de carbono.

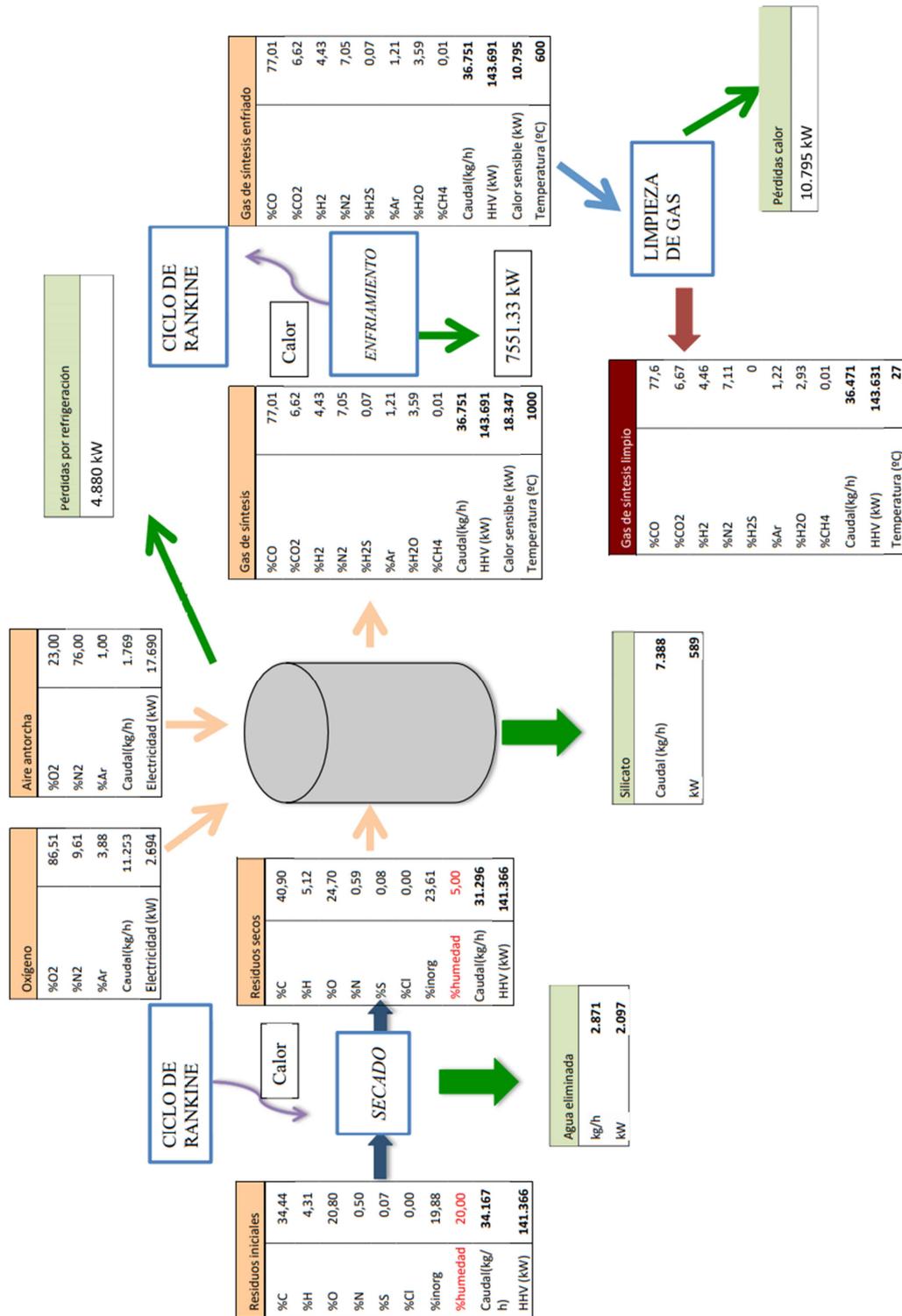
Como se observará a continuación, esta dominancia protagonizada por estos compuestos y por los no deseados no varía en función de los materiales utilizados en la planta. Esto es especialmente interesante y oportuno, ya que no será necesario ningún proceso anterior a la alimentación que determine la composición de la materia introducida.



*Ilustración 29: Composición del gas de síntesis en función de residuos [18]*

#### 4.5.4 BALANCE ENERGÉTICO [

Teniendo en cuenta todos los residuos empleados (agrícolas, forestales y urbanos), se dispone de una cantidad aproximada de 300.000 toneladas anuales, lo que supone procesar cerca de 820 toneladas de residuos diarias. Sabiendo que los residuos agrícolas y forestales aparecen durante seis meses, se procesarán la mitad en este periodo mientras que la otra mitad se almacenan para los meses restantes. Con todo ello y suponiendo entonces una variación de residuos disponibles mensuales insignificante, contaremos con 820 toneladas diarias.



### 4.5.5 CICLO RANKINE

El ciclo de Rankine se instala debido a dos motivos fundamentales en la planta. En primer lugar, porque se necesita un sistema que seque la materia mediante un condensador antes de introducirla en el reactor, y por otro porque los gases de síntesis deben enfriarse al salir a temperaturas próximas a los 1000°C.

De esta forma, se enfriarán los gases mediante un intercambiador de calor y así se consigue una gran potencia calorífica. Además, parte del calor resultante se utilizará en una turbina que genere energía eléctrica. Esta será aprovechada para procesos de la planta, lo que mejorará su rendimiento y eficiencia.

A continuación, se muestra un ejemplo de un esquema básico de ciclo Rankine:

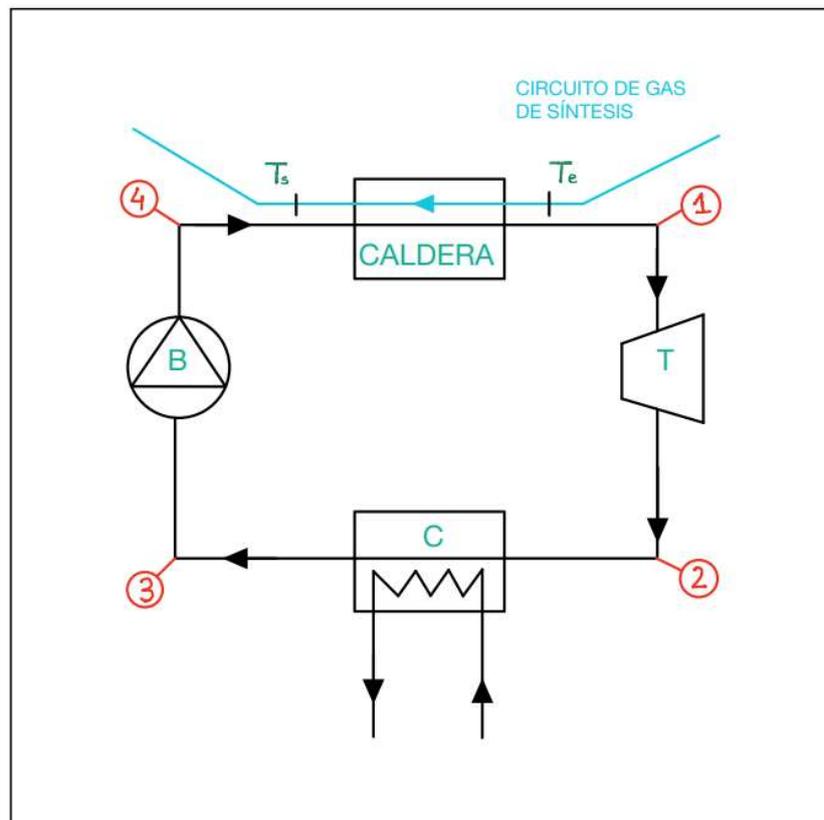


Ilustración 30: Ciclo Rankine básico [Elaboración propia]

### - *Caldera de recuperación de calor*

La caldera utilizada en la planta contará con dos circuitos distintos.

Por un lado, se encuentra el respectivo al gas de síntesis, que debido a su paso por la caldera su temperatura disminuye desde los 1000°C hasta los 600°C aproximadamente. En este proceso, se libera un calor de 7551.33 kW que se cede al agua (es el otro circuito independiente) de forma que la temperatura de esta a la salida sea de 600°C.

Se supone que la caldera trabaja a una presión de 50 bares (convencional), por lo que se asume sobrecalentamiento.

También hay que tener en cuenta que el intercambiador no es ideal, y se pondrá que tiene un rendimiento del 85%. Por lo tanto, el calor cedido al agua es menor al comentado anteriormente y resulta ser:

$$Q = 7.551.33 * 0,85 = 6.418,63 \text{ kW}$$

El gasto másico:

$$\dot{m} = \frac{7.551,33}{3.666,8 - 178,9} * 60^2 = 7.793,8 \text{ kg/h}$$

El funcionamiento del agua por la caldera:

Punto	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
4	50	41.7	178.9
1	50	600	3.666.8

*Tabla 11: Características de funcionamiento de la caldera [E.P]*

### - *Turbina*

Es la siguiente máquina después de la caldera. Esta convierte la energía cinética del vapor proveniente sobrecalentado en energía eléctrica que podrá ser utilizada en distintos procesos de la planta.

La siguiente tabla muestra el comportamiento de este vapor en su paso de la turbina:

Punto	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
1	50	600	3.666,8
2	0.08	41.5	2.576,2

*Tabla 12: Características de funcionamiento de la turbina [E.P]*

Considerando de nuevo un rendimiento del 85%, el trabajo proveniente de la turbina es:

$$W_{turb} = 0.85 * \dot{m} * \frac{h_1 - h_2}{60^2} = 2.006,9 \text{ kW}$$

### - *Condensador*

Consta de un intercambiador de calor que enfría el flujo de agua mediante un líquido refrigerante externo. Sus dos objetivos son enfriar de nuevo el vapor proveniente de la turbina para repetirse el proceso y utilizar el calor residual de este para el secado de los residuos orgánicos entrantes en la planta.

Condiciones dadas en el condensador:

Punto	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
2	0.08	41.5	2.576,2
3	0.08	41,5	173,8

*Tabla 13: Características de funcionamiento en el condensador [E.P]*

El intercambio de calor que ocurre en el condensador es similar al dado en la caldera, intercambiándose en este caso entre los circuitos de agua/vapor con los residuos comentados anteriormente. De esta forma se reducirá la humedad en torno a un 15% para que estos comiencen el proceso. Igual que antes, suponemos pérdidas en el intercambio del condensador, asignando un rendimiento al sistema del 85%. El calor entregado a los residuos es pues:

$$Q_{res} = 0,85 * \dot{m} * (h_2 - h_3)/60^2 = 4.420,9 \text{ kW}$$

### - *Bomba*

Donde se produce la compresión isentrópica del agua, volviendo de nuevo a la presión de la caldera de los 50 bares. Para ello, se acciona la bomba mediante la energía obtenida del ciclo de Rankine, mejorando la eficiencia del proceso.

Las características en la máquina en cuestión son las siguientes:

Punto	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
3	0.08	41.5	173,8
4	50	41.7	178.8

*Tabla 14: Características de funcionamiento de la bomba [E.P]*

El trabajo necesario para accionar la bomba, teniendo de nuevo un rendimiento del 85%, es el siguiente:

$$W_{turb} = \dot{m} * \frac{h_4 - h_3}{60^2 * 0.85} = 14.98 \text{ kW}$$

### - *Potencia neta del proceso*

La potencia total generada en el proceso es la generada en la turbina menos la consumida por la alimentación de la bomba;

$$W_{result} = W_{turb} - W_{bom} = 2.006,9 - 14.98 = 1.991,2 \text{ kW}$$

Teniendo en cuenta el calor cedido y la energía neta resultante, el rendimiento del proceso es:

$$\eta_{proceso}(\%) = \frac{1.991,2}{6.418,63} * 100 = 31\%$$

Se observa que el rendimiento no es muy elevado, aunque válido teniendo en cuenta cual es el objetivo del ciclo Rankine.

Por otro lado, para asignar a la planta la potencia capaz de generar de forma anual y teniendo en cuenta que funcionará 8.700 horas anuales:

$$E_{tot} = 1.991,2 * 8.700 \text{ h} = 17.323 \text{ MWh}$$

#### **4.5.6 SECADO DE LOS RESIDUOS**

Como método de optimización y de mejora del rendimiento del proceso se decide utilizar el calor proveniente de los gases de síntesis para el secado de la materia orgánica que más tarde es incorporada al proceso. El objetivo es el de reducir de 20% a 5% la humedad de los mismos.

Para ello se utilizará el concepto de calor latente, comúnmente representado como  $L_{Material}$  (en este caso  $L_{agua} = 2255 \text{ KJ/KG}$ ). También resulta necesario conocer el gasto másico de humedad que se desea eliminar. Teniendo en cuenta que se incorporan 34.167 kg/h en el reactor:

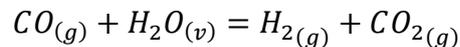
$$Q = \dot{m}_{vapor} * L_{agua} = (0.2 - 0.05) * 34.167 * 2255 = 11,5 * 10^6 \frac{kJ}{h} = 3.222,39 kW$$

El calor provendrá del condensador, que como ya se calculó cede 4.420,9 kW por lo que nos aseguramos de que se podrá realizar el secado sin alguna fuente o máquina externa, optimizando pues el proceso.

#### 4.5.7 HIDRÓGENO PRODUCIDO

Una vez los gases de síntesis abandonan el reactor se enfría, filtra y neutraliza. Todo ello con el objetivo de obtener hidrógeno. Por ello, es conveniente el tratado del gas resultante en un reactor shift, ya que aumenta la proporción de gas formado por hidrógeno.

El proceso consiste en incorporar agua dándose la siguiente reacción 1:1:



La composición del gas de síntesis inicialmente es la siguiente:

Tipo de gas	Presencia en el gas de síntesis (%)
CO	77,6
CO2	6.67
H2	4.46
N2	7.11
H2S	0.00
Ar	1,22

H <sub>2</sub> O	2.93
CH <sub>4</sub>	0.01

Tabla 15: Presencia de gases en el gas de síntesis [E.P]

El hidrógeno obtenido después de la reacción:

$$\dot{m}_{H_2, Shift} = \frac{\dot{m}_{CO}}{MM_{CO}} * MM_{H_2} = \frac{77,6}{100} * 36.741 * 2 = 2.035,77 \frac{kg}{h}$$

Teniendo en cuenta el hidrógeno inicial:

$$\dot{m}_{H_2, Ini} = \frac{4.46}{100} * 36.741 = 1.638,65 \frac{kg}{h}$$

Por lo tanto, se consigue más que duplicar el hidrógeno generado, resultando un total de:

$$\dot{m}_{H_2, Shift} + \dot{m}_{H_2, Ini} = 2.035,77 + 1.638,65 = 3.674,42 \frac{kg}{h}$$

## **Capítulo 5. ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE**

### **5.1 INTRODUCCIÓN**

Uno de los objetivos principales del proyecto es la de la obtención de hidrógeno de forma que se pueda aprovechar su vector energético tan prometedor. Como ya se comentó en la introducción, uno de los mayores problemas que tiene el hidrógeno es su coste de obtención. En este trabajo se propone una alternativa a la transformación molecular y a la electrolisis de agua como métodos más utilizados. La propuesta va de la mano de la valorización de residuos orgánicos y de la gasificación por plasma, obteniéndose como se ha observado en el apartado anterior, grandes cantidades de hidrógeno.

En este apartado se quiere abordar tanto la forma en la que se aprovechará este hidrógeno para generar energía eléctrica y como el método que se utilizará para almacenarlo.

Entre las formas de generación eléctrica a partir del hidrógeno destacan los motores de combustión interna y las pilas de combustible. Debido a que la primera de estas tiene un rendimiento menor, en este proyecto se opta por utilizar pilas de combustible.

Estas disponen de una gran ventaja frente a las tecnologías renovables, y es que la energía obtenida a raíz de las mismas es gestionable. También, destacan por su bajo impacto medioambiental y su baja emisión de gases indeseados a la atmósfera. Estas pueden utilizarse para diferentes fines, tanto para vehículos, sistemas de cogeneración o en instalaciones de producción eléctrica.

A continuación, se dimensionarán y elegirán las pilas de combustible y el método de almacenamiento de hidrógeno para asegurar un sistema de reserva de la red en momentos puntuales de necesidad.

## **5.2 *FUNCIONAMIENTO DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE***

Estas celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que transforman energía química mediante un flujo constante de combustible y oxidante y una reacción controlada en energía eléctrica. Son sistemas en cierta manera similares a las baterías, aunque las pilas de combustibles pueden generar energía de forma constante si se las alimenta con el combustible utilizado mientras que las baterías proporcionan energía hasta que alguno de sus reactivos almacenados se agota.

Disponen del combustible (hidrógeno) y de un comburente oxidante (oxígeno). La reacción química está libre de combustión, por lo que no se emiten gases tóxicos.

Estas celdas de combustible están compuestas por tres elementos principales, dos electrodos y un electrolito. Este último es el que une a los electrodos ánodo y cátodo y sirve como catalizador de las reacciones que se dan en el interior de la pila. También disponen de unas placas bipolares, cuyo objetivo es el separar las celdas, conducir los gases y evacuar el agua proveniente de las reacciones.

A continuación, se muestra una pila de combustible convencional:

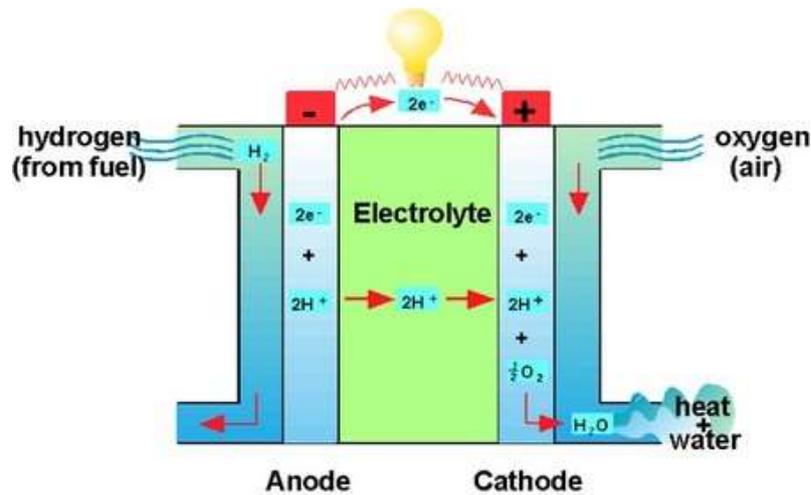
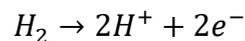


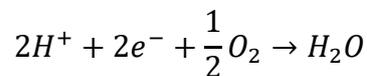
Ilustración 31: Ejemplo de pila de combustible [25]

Aunque existan distintas pilas de combustible, el proceso general es el siguiente:

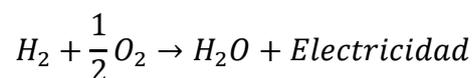
Primero, al introducir el hidrógeno en la pila, se extraen dos de sus electrones:



De esta forma los átomos de hidrógeno quedan ionizados con carga positiva. Son los dos electrones extraídos los que generan la corriente a través de conexiones eléctricas. Por el otro lado, se inyecta de igual manera el oxígeno por el lado del cátodo. Ahí se combina con los electrones que van a través del circuito eléctrico además del hidrógeno que viaja por el electrolito, produciéndose la siguiente reacción:



Teniendo en cuenta la combinación de ambas reacciones, el resultado final es la siguiente:



Ese puede conocer el rendimiento de la reacción mediante la ecuación de Nerst:

$$E = E_o - \left[ \frac{RT}{nF} \right] * \ln(Q)$$

Donde:

- $E_o=1,229$ , potencial estándar
- R es una constante de los gases ideales, 8,31J/Kmol
- T es la temperatura medida en Kelvin
- F es la constante de Faraday, 96.480 J/Vmol
- n es la cantidad de mol de electrones que forman parte de la reacción
- Q es el coeficiente de la reacción correspondiente

Como se puede observar, todos los valores de la ecuación son constantes, excepto el valor de la temperatura (K), por lo que esta jugará un papel fundamental a la hora de elegir la pila de combustión utilizada.

### **5.3 TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE**

Existen varios tipos de pilas de combustible. Su diferencia fundamental es el tipo de electrolito utilizado, que como ya se comentó es lo que separa el ánodo y el cátodo de la pila. Este juega un papel fundamental, ya que debe dejar pasar exclusivamente a los átomos de hidrógeno y no a electrones libres u otro tipo de sustancias, algo que podría evitar las reacciones deseadas.

Las pilas de combustible consideradas para el proyecto son las siguientes:

Pila	Electrolito	Temperatura (°C)	Potencia	Ventajas	Aplicaciones
PEM	Polímero sólido	60-80	5-250 kW	Baja Temperatura Arranque rápido Bajo mantenimiento Reacción catódica rápida	Portátiles Automóvil
AFC	Hidróxido de potasio	90-120	5-150 kW	Muy eficiente	Ámbito militar y espacial
PAFC	Ácido fosfórico	200-250	50 kW-10 MW	Puede usarse con hidrógeno impuro	Generación eléctrica distribuida
MFCF	Solución de potasio, litio y sodio	600-700	0.1-2 MW	Mayor eficiencia y catalizador más económico	Generación eléctrica distribuida
SOFC	Óxido de Zr sólido con itrio	700-1000	100-250 kW	Electrolito sólido	Portátiles

Tabla 16: Tipos de pila de combustible [E.P]

Lo ideal para el proyecto sería elegir un tipo de pila que trabaje a las más bajas temperaturas posibles de cara a reducir costes, por lo que se descartan las pilas de óxidos sólidos (SOFC) y las de carbonatos fundidos (MFCF). A continuación, se estudian más detenidamente los otros tres tipos de pilas PEM, AFC y PAFC.

### 5.3.1 PILAS DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA POLIMÉRICA (PEM)

Esta pila utiliza un electrolito polimérico sólido que suele ser el nafion, acompañado de electrodos porosos de carbono cada uno con un catalizador de platino. Destacan por ser pilas ligeras y de tamaño reducido. También, disponen de una densidad energética elevada si se compra con otro tipo de pilas de combustible.

Una de sus principales ventajas es que trabajan a temperaturas bajas si se comparan con el resto ( $80^{\circ}\text{C}$ ), lo que permite que en el momento de necesidad sean rápidamente calentadas y puedan generar energía eléctrica. Esto también supone que los elementos de la misma estén expuestos a temperaturas relativamente bajas, lo que alarga su vida útil y por lo tanto el coste de mantenimiento. Además, solo necesitan de los combustibles comentados, hidrógeno y agua, y no de fluidos corrosivos como si necesitan otros tipos de pilas.

Dadas las bajas temperaturas de trabajo, los catalizadores de platino son especialmente sensibles a la presencia de CO. Esto es debido a que a temperaturas menores de los  $150^{\circ}\text{C}$  el CO se pega mucho al platino, lo que supone menos acceso para el  $\text{H}_2$ . Por ello y como desventaja principal de las PEM, el hidrógeno introducido ha de obtener la menos cantidad de CO posible, lo que supondría añadir un reactor adicional para reducir su presencia en el gas resultante.

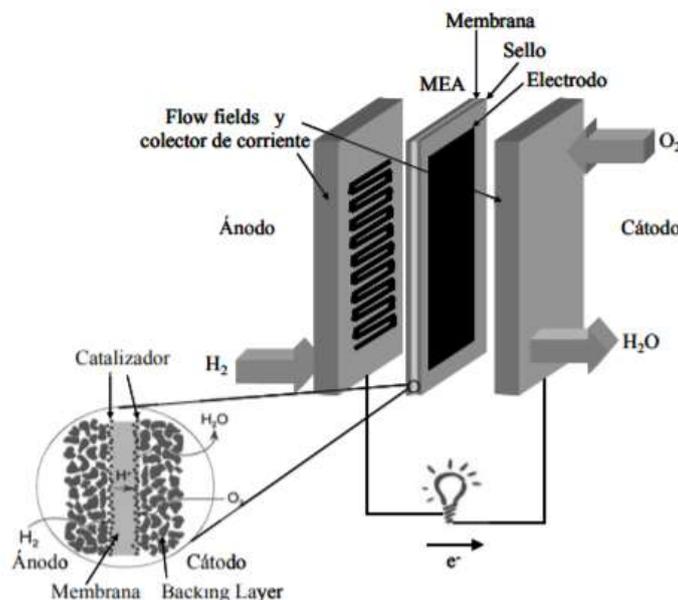


Ilustración 32: Ejemplo de PEM [25]

### 5.3.2 PILAS DE COMBUSTIBLE ALCALINAS (AFC)

El electrolito en este caso es una solución formada por agua e hidróxido de potasio (85%-15%) y el catalizador en los electrodos no es necesario que esté formado por metales preciosos, lo que reduce su precio. Existen dos tipos de pilas de combustible alcalinas que se diferencian por la temperatura de trabajo, por un lado, las que trabajan entre temperaturas entre 100°C y 250°C, y por otro las que trabajan a temperaturas de entre los 23°C y 70°C, siendo estas últimas las más modernas.

Presentan un rendimiento alto debido a la velocidad a la que se producen las reacciones en su interior, aunque necesitan de hidrógeno y oxígeno puro lo que incrementa su coste.

También, son capaces de trabajar solo 8.000 horas con eficiencia y rendimiento alto, lejos de las 40.000 necesarias para que sean económicamente rentables.

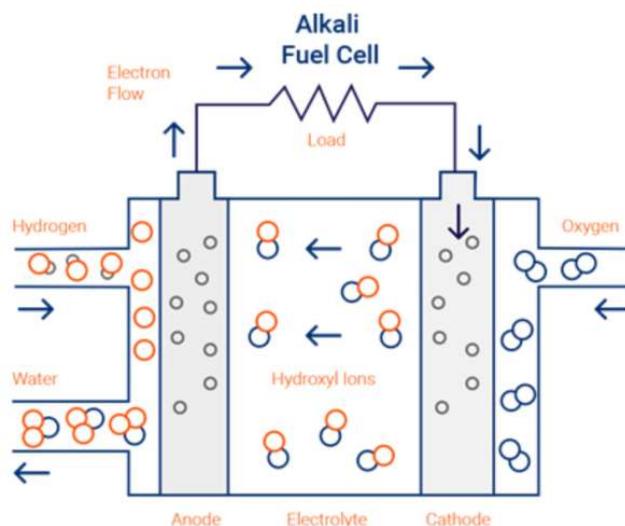


Ilustración 33: Ejemplo de AFC [26]

### 5.3.3 PILAS DE ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFC)

Su electrolito está compuesto solo por ácido fosfórico cubierto por una membrana de carburo de silicona. Los catalizadores de los electrodos son de carbono poroso con catalizadores de platino. Las temperaturas de trabajo de esta pila oscilan entre los 150°C y los 200°C, de esta forma se procura que no se estropeen los catalizadores al contaminarse de monóxido de carbono.

El rendimiento de las pilas de ácido fosfórico se encuentra alrededor del 40%, mientras que si se combina con el aprovechamiento del calor desprendido puede alcanzarse un 85%.

No son capaces de generar grandes cantidades de energía, por lo que las pilas PAFC no son a priori buenas candidatas, ya que son costosas, de gran tamaño y por tanto disponen de menor densidad energética.

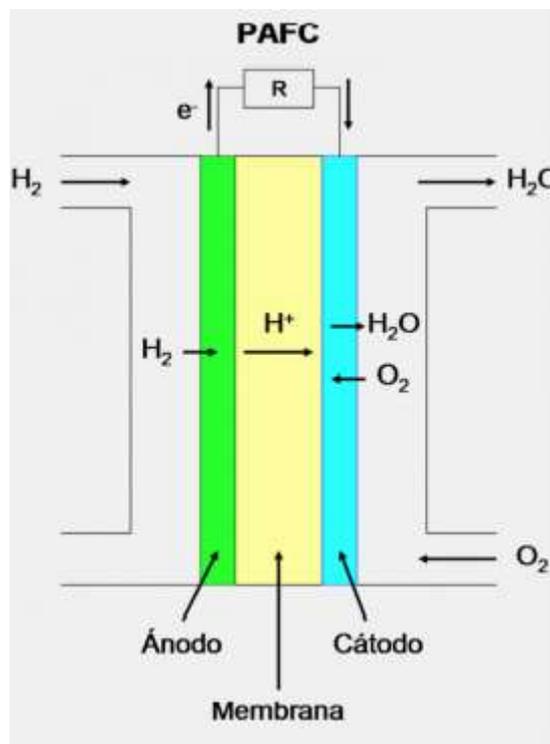


Ilustración 34: Ejemplo de PAFC [26]

### **5.3.4 ELECCIÓN DEL TIPO DE PILA DE COMBUSTIBLE**

Debido a que la energía generada por estas pilas debe obtenerse lo antes posible al ser el sistema de reserva de la red utilizado, se necesita un arranque rápido de las mismas. Por ello, cuanto más bajas sean las temperaturas de funcionamiento de las pilas antes comenzarán a funcionar. Es por eso que se ha decidido utilizar las pilas de combustible de membrana polimérica (PEM) por su baja temperatura de operación (próxima a los 80°C). Por otro lado y como se ha comentado anteriormente, también cuentan con una densidad energética mayor comparada con el resto.

Cuentan con una de las tecnologías más maduras y desarrolladas, lo que hace que empresas del sector como Ballard o Fuel Cell Energy apuesten por ellas. De entre las posibles opciones, se ha decidido una de las pilas fabricadas por Ballard, capaces de generar 1 MW de potencia con 63kg/h de hidrógeno a la entrada y eficiencias del 40%. Su ficha técnica esta incluida en el anexo al final del documento.

## **5.4 ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO**

Una de las mayores ventajas del hidrógeno es su posibilidad de almacenaje. Esto resulta de especial interés ya que se supone una forma de almacenar la energía. En este trabajo se almacenará para utilizarlo en aquellos momentos en los que la red no pueda alimentar a la planta.

Los métodos principales de almacenamiento de hidrógeno se estudian a continuación.

- **En estado gaseoso**

Para ello se debe comprimir el gas, sometiéndolo a presiones entre los 200 y 700 bares. Es una forma cara de almacenar hidrógeno y que necesita de mucha energía lo cual complica su aplicación en el proyecto.

Esta tecnología es la más utilizada en el sector automovilístico y naval, en donde se utilizan tanques que soportan tales presiones.

**- En estado líquido**

Para ello es necesario enfriarlo a temperaturas inferiores a los 23 K (hidrógeno criogénico) mediante un proceso de licuación ya que su forma natural en el ambiente es el estado gaseoso. También es una tecnología cara al necesitar de tanques criogénicos para el almacenaje.

**- En estado sólido**

Presenta al igual que las tecnologías anteriores, un coste elevado. Este se realiza mediante hidruros metálicos formados por diferentes posibles metales que reaccionan formando este compuesto. Controlando la temperatura y la presión se puede modificar el sentido de la reacción, lo que supone la posibilidad de añadir o descargar el hidrógeno.

Es una forma muy atractiva de almacenar el hidrógeno ya que son muy seguros y tienen unas características muy positivas en cuanto al almacenamiento se refiere. Es una tecnología más eficiente en volumen, ya que los hidruros metálicos tienen capacidades de almacenaje de 1.5% en peso, lo que supone que no se necesite un volumen disparatado para almacenar el hidrógeno como si ocurre en las tecnologías de almacenaje en estado líquido y gaseoso.

Al ser la tecnología más segura, eficiente y que requiere de menos espacio para emplearse, esta será la utilizada para el proyecto.

Ariema es una empresa que ofrece sistemas de almacenaje del hidrógeno en hidruros metálicos, desde tanques de decenas de litros hasta de varios miles. En nuestro caso se utilizará el depósito de 10.000 litros.

Se establece que la capacidad de generación por parte de las pilas de combustible debe de ser de 100 MW, de esta forma se podrá apoyar a la red en aquellos momentos en los que sea necesario. Por un lado, se necesitarán 100 pilas de combustible de tipo PEM al ser de 1 MW cada una. Por otro y teniendo en cuenta el flujo de hidrógeno que aceptan es de 63 kg/h y que disponen de un rendimiento del 40%, necesitaran 157,5 kg/h para generar 1 MW. Por lo tanto, se necesitará:

$$\dot{m}_{H_2} = 157,5 * 100 = 15.750 \frac{kg}{h}$$

Sabiendo que los tanques de almacenamiento de 10.000 L admiten 70 kg de hidrógeno, se necesitarán:

$$N_{depósitos} = \frac{15.750}{70} = 225$$

## **Capítulo 6. ANÁLISIS ECONÓMICO**

El proyecto se centra en dos focos principales, la eliminación de los vertederos y de la incorporación de nuevas formas de generación gestionable fruto del aprovechamiento de residuos orgánicos. A la hora de estudiar la viabilidad económica de este proyecto es imprescindible tener en cuenta que la planta no tiene un fin económico, independientemente de los beneficios que pueda generar. Aun así, es un apartado fundamental a la hora de valorar su impacto y evaluar una idea relevante y posible que solucione antiguas inquietudes que hoy en día resultan ser verdaderos problemas.

El proyecto está dividido en tres partes distintas, por lo que lo mismo se hará en el estudio económico. Estas tres partes son la gasificación por plasma, el ciclo Rankine y por último el almacenamiento en tanques del hidrógeno y su aprovechamiento para generación de energía eléctrica en pilas de combustible. Para ello, se utilizará información relevante aportada por la empresa Materiales Renovados y por el trabajo final de carrera de Almudena Valenciano.

Se tendrán en cuenta las siguientes hipótesis:

- La vida útil de la planta se establece en 25 años, igual que el periodo de amortización de la inversión inicial.
- Esta inversión se realizará durante el primer año (año cero) de estudio.
- Se considera un IPC que aplique en los costes de explotación durante los 25 años de vida útil de la planta del 2%.
- Se considera a partir del cuarto año una mejora en la curva de aprendizaje que supondrá una mejora del 1,8%.

## **6.1 GASIFICACIÓN POR PLASMA**

Como se ha comentado, se procesarán tanto residuos sólidos urbanos como orgánicos forestales y agrícolas. Todos ellos suponen alrededor de 300.000 toneladas anuales, lo que resultan ser 820 toneladas diarias de residuos si se suponen 8.700 horas de funcionamiento de la planta anuales.

Sumergir estos residuos bajo una atmosfera de plasma los descompone en gases de síntesis principalmente formados por hidrógeno y monóxido de carbono, siendo el primero aprovechado para generar energía eléctrica. Por tanto, la implicación de esto se tendrá cuenta más adelante en el precio del kilovatio-hora.

A continuación, se estudian los costes de inversión y de explotación anual del proceso de la gasificación por plasma, que se incorporará junto con el resto en un análisis conjunto. Como se ha dicho, se utilizarán los datos económicos elaborados por Almudena Valenciano.

### **6.1.1 INVERSIÓN INICIAL**

La gasificación por plasma cuenta con distintos elementos cuyos costes forman parte de la inversión inicial. Este está compuesto por el reactor o vasija, sistemas de control del encendido de antorcha y retirada de residuos, sistema de alimentación de la planta...

Se considera una inversión inicial de 20 millones de euros, amortizables durante los 25 años de vida útil del complejo. También se consideran unos intereses del 5%, obteniéndose entonces la siguiente amortización:

$$P = C_0 * \frac{r * (1 + r)^N}{(1 + r)^N - 1}$$

Siendo:

$C_o$  = Coste de inversión total

$N$  = Años de vida útil del complejo

$P$  = la amortización anual de la parte de la gasificación por plasma

Resulta una amortización anual  $P = 1,42$  millones de euros.

### 6.1.2 COSTES DE EXPLOTACIÓN Y MANTENIMIENTO

Estos son formados por los costes de mantenimiento, sueldos asignados a los trabajadores de la planta y a los costes de operación y de mantenimiento.

Para los costes de operación y mantenimiento dividimos en productos químicos, electrodos, mantenimiento general, refractario y antorchas.

Elemento	€/Tm	Tm	Total (k€)
Productos químicos	9	300.000	1.200
Electrodos	5	300.000	1.500
Mantenimiento refractario y antorchas	5	300.000	1.500
Mantenimiento general	6	300.000	1.800
Total			6.000

*Tabla 17: Costes de operación y mantenimiento [27]*

Por otro lado, la planta se considera que funcionará las 24 horas al día, por lo que serán necesarios nueve operarios y tres jefes de planta. A continuación, se adjuntan sus salarios y lo que suponen anualmente:

Personal	Num	€/Trabajador	Total (k€)
Operarios	9	22.000	198
Jefes de planta	3	45.000	135
Total			333

*Tabla 18: Costes por personal [27]*

El total de los costes de explotación y mantenimiento resulta ser de 6,333 millones de euros. Teniendo en cuenta la aplicación del IPC y de la curva de aprendizaje, se obtiene durante los 25 años un coste medio de explotación y de mantenimiento de 6,7 millones de euros.

## **6.2 CICLO DE RANKINE**

Para evaluar el impacto económico que tiene el ciclo Rankine en la planta es importante tener en cuenta la energía total producida por el mismo. En este proyecto se consigue generar 17.323 MWh.

El coste del ciclo se calculará teniendo en cuenta los datos procedentes del trabajo de fin de grado de Almudena Valenciano y la empresa Materiales Renovados. Debido a que las dimensiones de esta planta difieren, se estimará y se adaptará en función de las mismas y se considerará una inversión de 2,5 millones de euros, amortizados de nuevo durante los 25 años de la vida útil de la planta. El coste anual de amortización relativo al ciclo Rankine es de 0.17 millones de euros.

Por otro lado, el ciclo también tiene costes de explotación y de mantenimiento que se consideran de 100.000 euros anuales. Teniendo de nuevo en cuenta el IPC y la curva de aprendizaje, el coste anual respecto a los costes a explotación y mantenimiento del ciclo Rankine es de 0,106 millones de euros anuales.

### **6.3 PILAS DE COMBUSTIBLE**

Es entre las tecnologías utilizadas en el complejo jienense la menos madura y desarrollada, lo que tendrá un impacto negativo en los costes de la planta. Aún así, es completamente necesario su uso en la planta ya que es entre el resto de las formas de generar energía eléctrica a partir de hidrógeno, la más adecuada en nuestro caso. Además, es una forma sostenible, verde y sin impacto medioambiental ideal para generar energía.

Con todo ello, y teniendo en cuenta de nuevo el trabajo realizado por Almudena Valenciano, se analizan la inversión inicial respecto a las pilas de combustible y a sus costes de mantenimiento y explotación.

#### **6.3.1 INVERSIÓN INICIAL**

Teniendo en cuenta tanto los hidruros metálicos para el almacenaje como las pilas de combustible para el aprovechamiento energético, se supondrán 2,61 millones de euros por cada megavatio instalado.

En nuestro caso, se ha decidido instalar 100 pilas de 1 MW cada una, lo que supondría una inversión inicial de 261 millones de euros.

Amortizando tal coste durante de nuevo, los 25 años de vida útil de la planta se obtiene un coste de amortización anual de 18,5 millones de euros anuales.

### 6.3.2 COSTES DE EXPLOTACIÓN Y MANTENIMIENTO

Todos los costes relativos al almacenaje y aprovechamiento del hidrógeno constan en este apartado, resultando ser de 14,92 euros por megavatio-hora. Como se desconoce en qué momentos del año se necesitará de esta energía para alimentar a la planta se realiza una estimación para su inclusión. Suponiendo que estas funcionan una media de 10 horas diarias produciendo 250 MWh diarios, resultan ser 91.250 MWh generados por las pilas de combustible de forma anual. Por tanto, el coste de explotación respectivo será de 1,36 millones de euros anuales. Teniendo en cuenta el IPC y la curva de aprendizaje queda un coste medio anual de 1,44 millones de euros anuales.

## 6.4 COSTES TOTALES

Para concluir los costes totales una vez analizados el ciclo Rankine, la gasificación por plasma y el almacenaje y aprovechamiento del hidrógeno es importante concretar cuánto es capaz de generar el complejo en cuestión de forma anual. Para ello, se tendrá en cuenta tanto la generación del ciclo Rankine como lo generado por las pilas de hidrógeno.

Proceso	Inversión inicial (M€)	Coste de explotación anual (M€)	Producción anual en GWh
Gasificación por plasma	20	6,333	-
Ciclo Rankine	2,5	0,1	17,32
Pilas de combustible	261	1,36	91,25
<b>Total</b>	<b>283,5</b>	<b>7,793</b>	<b>108,57</b>

*Tabla 19: Resumen de costes de cada una de las tecnologías [E.P]*

A continuación, se adjunta el coste de amortización total, es coste de explotación total, la energía generada por la planta y el coste del kilovatio-hora a lo largo de los 25 años.

	Año 1	Año 5	Año 10	Año 15	Año 20	Año 25
Coste de amortización (M€)	20,09	20,09	20,09	20,09	20,09	20,09
Coste de explotación (M€)	7,79	8,13	8,21	8,29	8,38	8,46
Electricidad generada (GWh)	108,57	108,57	108,57	108,57	108,57	108,57
Coste del kWh (€/kWh)	0,25679	0,25992	0,26066	0,26139	0,26222	0,26296

*Tabla 20: Costes de amortización, explotación y generación [E.P]*

## **6.5 ANÁLISIS DEL COMPLEJO**

Resumiendo las tablas anteriores, la planta de gasificación por plasma supondría una inversión inicial 283,5 millones euros. Durante los 25 años supuestos de vida útil de la planta, teniendo en cuenta el IPC del 2% y la curva de aprendizaje de un 1,8% a partir del cuarto año, se tienen unos costes anuales de explotación y mantenimiento de la planta de 7,79 millones de euros el primer año y 8,46 el último.

De cara a considerar los ingresos por la planta, se tendrá en cuenta tanto el total de la energía generada como el coste de la recogida de residuos. Para ello se especulará sobre el precio de la energía durante los próximos años teniendo en cuenta el histórico de los últimos 10 años.

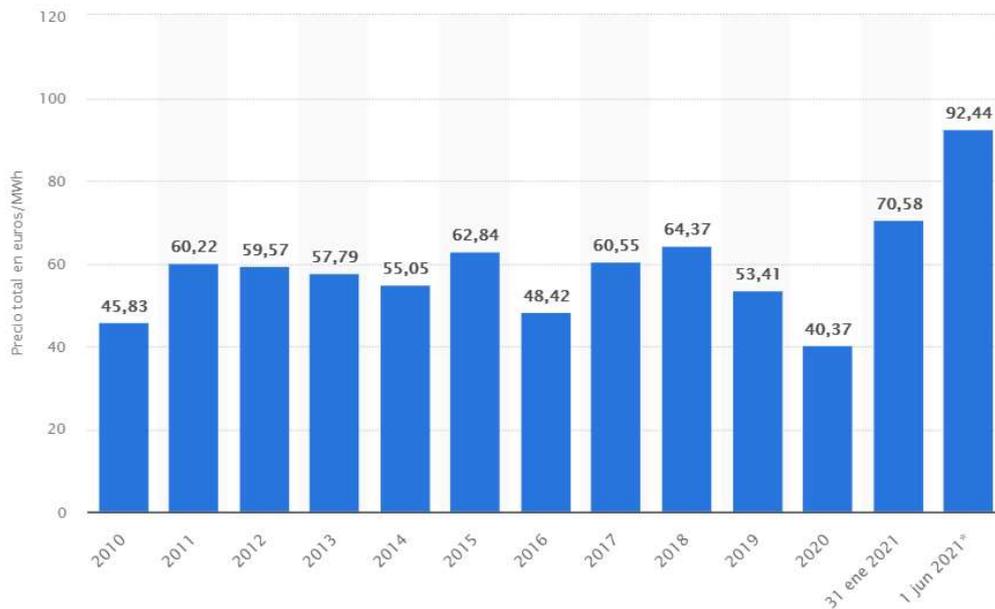


Ilustración 35: Histórico de los precios de la energía [28]

En Europa, según la empresa *Residuos Profesional*, la recogida de residuos cuesta entre 60 y 100 euros la tonelada, por lo que se supondrá que España se encuentra en un punto intermedio y se paga alrededor de los 80€/Tm.

Teniendo en cuenta que se recogerán 300.000 toneladas, incluyendo todos los residuos orgánicos que se procesan en la planta, se generaran anualmente una cantidad de 24 millones de euros en concepto de recogida de residuos.

A continuación, se muestra una tabla con los ingresos y los gastos durante los 25 años de vida útil de la planta.

Año	Gastos (M€)	Ingresos (€)	Beneficio (M€)
<b>Año 0</b>	283,5	-	-147,7
<b>Año 1</b>	7,79	31.662.871	23,87
<b>Año 2</b>	7,9458	31.816.128	23,87
<b>Año 3</b>	8,104	31.972.451	23,87
<b>Año 4</b>	8,120	32.131.900	24,01
<b>Año 5</b>	8,120	32.294.538	24,16
<b>Año 6</b>	8,136	32.460.428	24,31
<b>Año 7</b>	8,152	32.629.637	24,46
<b>Año 8</b>	8,168	32.802.230	24,62
<b>Año 9</b>	8,184	32.978.274	24,78
<b>Año 10</b>	8,200	33.157.840	24,94
<b>Año 11</b>	8,216	33.340.997	25,11
<b>Año 12</b>	8,232	33.527.816	25,28
<b>Año 13</b>	8,249	33.718.373	25,45
<b>Año 14</b>	8,265	33.912.740	25,63
<b>Año 15</b>	8,281	34.110.995	25,81
<b>Año 16</b>	8,297	34.313.215	26,00
<b>Año 17</b>	8,314	34.519.479	26,19
<b>Año 18</b>	8,330	34.729.869	26,38
<b>Año 19</b>	8,346	34.944.466	26,58
<b>Año 20</b>	8,363	35.163.356	26,78
<b>Año 21</b>	8,379	35.386.623	26,99
<b>Año 22</b>	8,396	35.614.355	27,20
<b>Año 23</b>	8,412	35.846.642	27,42
<b>Año 24</b>	8,439	36.083.575	27,64
<b>Año 25</b>	8,462	36.325.247	27,86

Tabla 21: Beneficios durante los 25 años de vida útil [E.P]

Ahora se calcula la Tasa Interna de Retorno para estudiar la tasa de rentabilidad que tendría una inversión en este proyecto. Para calcularlo, hace falta conocer también el concepto de Valor Actual Neto, ya que son términos directamente relacionados. Este último es otra forma de evaluar la rentabilidad de una inversión, si es positivo es rentable, financieramente indiferente si igual a cero y no rentable si es negativo. El TIR pues es la tasa de descuento que hace que el VAN sea cero. En el caso de esta planta, se obtiene un TIR del 7,6%.

Para evaluar la rentabilidad el proyecto se compara este valor con el WACC, de forma que si el TIR es porcentualmente superior al WACC (Weighted Average Cost of Capital), la inversión será considerada rentable. Este es la tasa de descuento que se utiliza para descontar los flujos de caja futuros a la hora de valorar un proyecto de inversión. Ya que el proyecto va dirigido a empresas energéticas, los datos necesarios se extraerán de Endesa.

Se aplica el CAPM para obtener el WACC:

$$KE = RF + \beta(RM - RF)$$

Para:

KE como la tasa de costo de oportunidad e los accionistas.

RF como el valor español del bono a 10 años (0,42)

$\beta$  como la relación entre mercado y empresa (estimado a 0,42)

RM como retorno esperado (riesgo de mercado) en el IBEX 35. (7,12%)

Teniendo en cuenta los valores comentados, se obtiene que obtienen los accionistas en esta empresa energética es del 3,23%. A continuación, se calcula el WACC:

$$WACC = \frac{E}{E + D} * KE + \frac{D}{E + D} * KD * (1 - t)$$

Para (datos extraídos del informe anual del 2020 de la compañía Endesa):

E como el capital de la compañía (1.271 M€)

D como la deuda de la compañía (6.303 M€)

KE es el Cost equity calculado anteriormente (3,23%)

KD como el coste de la deuda financiera de Endesa (2,0%) [30]

1-T como el escudo fiscal o más comúnmente conocido como el Tax Shield

Con todo ello, se obtiene un WACC de 1,79%, inferior porcentualmente al TIR calculado anteriormente. Por lo tanto, se trata de un proyecto rentable. En cualquier caso, como se comentó anteriormente, la atención del proyecto está enfocada en la resolución de distintos problemas que España debe hacer frente, por lo que en el caso en el que el TIR fuera menor que el WACC, sería recomendable invertir en el proyecto por necesidad más que por conveniencia.



## Capítulo 7. CONCLUSIONES

Una vez analizadas la parte técnica de la planta y el estudio económico, se concluye que la planta en cuestión es un proyecto viable. Cumple con los objetivos vistos inicialmente, todos ellos con el punto de mira en la situación energética española actual.

Por un lado, las primas cedidas a las energías renovables que se establecieron para promover este tipo de instalaciones a principios del siglo XXI, se concedieron pensando que permitirían reducir la dependencia energética española del exterior, pese a que su coste de construcción, que por no ser tecnologías plenamente consolidadas, era demasiado alto frente a otras tecnologías más convencionales.

Este boom renovable en España ha supuesto varios inconvenientes y está por lo tanto repercutiendo seriamente a la gestión de la energía, ya que además, la demanda energética española presenta fuertes oscilaciones que hacen aún más compleja la operación del sistema. Por lo tanto, esta forma de generación introducida durante todo el proyecto resulta ser una opción muy atractiva, ya que si comúnmente introducida en la red eléctrica, haría frente a los problemas del precio que tan alto tiene la energía actualmente y a la gestionabilidad de la misma.

Por otro lado, esta forma de generación va de la mano del aprovechamiento energético de residuos orgánicos, tanto forestales como agrícolas y urbanos. Por lo tanto, los problemas que estos residuos generan en el país también se verían solventados con implantaciones de plantas de este tipo. Se conseguiría entre muchas otras cosas, evitar que los vertederos controlados jueguen el papel tan imprescindible que juegan hoy en día, acercándonos pues a los objetivos establecidos por la UE.

Así mismo, se ha comprobado que mediante la tecnología del plasma se obtiene hidrógeno, probablemente uno de los combustibles del futuro por su vector energético tan prometedor.

De esta forma, se reduce el coste de producción del mismo y gracias a las tecnologías existentes, puede ser almacenado y utilizado cuando se desee.

Así mismo, se ha comprobado también que es un proyecto económicamente viable, que, aunque no sea el objetivo del proyecto, lo hace más atractivo para posibles inversores y empresas energéticas.

En definitiva, este proyecto consigue hacer frente a diferentes asuntos energéticos en España que con el tiempo se están convirtiendo problemas con necesidad de inmediata solución.

## Capítulo 8. ANEXOS

### *8.1 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE*

El proyecto en cuestión está muy vinculado a varios de los objetivos establecidos en el 2015 en la Cumbre de Desarrollo Sostenible.

A continuación, se explican los objetivos que más se alinean con el trabajo realizado:

- Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento. El proyecto, al aprovechar los residuos orgánicos urbanos reduce la contaminación de aguas tanto superficiales como subterráneas, disminuyendo el porcentaje de aguas contaminadas.
- Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna. La generación de energía eléctrica cuenta con el 60% de todas las emisiones mundiales del efecto invernadero. Introduciendo una nueva forma de generar energía sostenible y respetuosa con el medioambiente, se reduce la dependencia de los combustibles fósiles, principal fuente de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.
- Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. El aprovechamiento de un mayor porcentaje de los residuos generados

en los poblados y ciudades supone un avance hacia núcleos urbanos más limpios y sostenibles.

- Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. En línea con el objetivo 7, se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub>, principal causa del efecto invernadero.
- Objetivo 15: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad. Este proyecto fomenta el avance a la eliminación de residuos, y por ello de nuevos vertederos controlados. Esto se traduce a que no se contaminen suelos, bosques o terrenos fértiles. Por otro lado, al aprovechar los residuos agrícolas y forestales frutos de la producción de aceite, se evitan los efectos negativos que estos pueden ocasionar, como plagas e incendios.

## 8.2 PILA DE COMBUSTIBLE BALLARD

**BALLARD**<sup>®</sup>

SMARTER SOLUTIONS FOR A CLEAN ENERGY FUTURE

**ClearGen**<sup>™</sup>

SPECIFICATION SHEET



### ❖ Distributed Generation - 1MW

Ballard's ClearGen<sup>™</sup> fuel cell system is a complete turnkey solution, providing a supply of zero-emission power. The system can operate continuously for baseload power generation, or intermittently, providing peak power during times of high demand.

The self-contained power modules run on hydrogen fuel; customers range from utilities to chemical companies with available by-product hydrogen. The 1 MW modular units are completely scalable in 500 kW increments, enabling tailored solutions to meet each customer's needs.

Ballard's fuel cell stacks are at the core of this modular solution. Commercially available today, the fuel cells feature dynamic response, high efficiency, robust and reliable operation. Various annual service packages are available for the fuel cell system that include preventative and corrective maintenance, to support the product's 20-year lifetime.

Please contact us for product availability and pricing.

### ▶ PRODUCT SPECIFICATIONS

Type:	PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell generator	
Performance:	Net Power	1 MW
	Efficiency	40% (± 2%) <sup>1</sup>
	Output voltage	380 - 480 V AC
	Output frequency	50 - 60 Hz
Physical Characteristics:	Fuel Cell Module: Dimensions (H x W x L)	2.9 x 2.4 x 9 meters (x2)
	Weight	<40,000 kg
	Electrical Module: Dimensions (H x W x L)	2.9 x 2.4 x 6.3 meters
	Weight	15,000 kg
Fuel:	Hydrogen	>98% <sup>2</sup>
	Fuel consumption	63 kg/hr (700 m <sup>3</sup> /hour)
	Available heat:	Output heat load
Emissions:	Available water temperature	60 - 65°C
	Noise	<80db @ 7 M
	Pollutants	Zero emissions (no GHG or local air pollutants)

1. At beginning of life (BOL).  
2. Ballard can work with customer to provide customized fuel purification system.  
3. System interface cooling flow rate and rejection temperature to be determined.



Specifications and descriptions in this document were in effect at the time of publication. Ballard Power Systems, Inc. reserves the right to change specifications, product appearance or to discontinue products at any time (02/2012) SPC6103076-0E

BALLARD<sup>®</sup>, Ballard<sup>®</sup>, Powered by Ballard<sup>®</sup>, FCgen<sup>®</sup>, FCvictory<sup>®</sup>, ClearGen<sup>™</sup>, ElcetraGen<sup>™</sup> and HydroPlus<sup>™</sup> are trademarks of Ballard Power Systems Inc.

## Capítulo 9. REFERENCIAS

- [1] OMIE y EUROSTAT
- [2] <https://www.ennomotive.com/es/aprovechamiento-energetico-residuos>
- [3] <https://www.residuosprofesional.com/valorizacion-energetica-residuos-en-2016/>
- [4] <https://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/8793-Nueva-planta-de-valorizacion-de-residuos-agricolas-en-Almeria.html>
- [5] <https://madera-sostenible.com/forestal/la-central-biomasa-corduente-funcionara-normalidad-este-ano/>
- [6] <https://www.energynews.es/microrredes-inteligentes-para-eficiencia-medio-ambiente-y-sin-interrupcion-energia/>
- [7] <https://www.smartgridsinfo.es/2019/05/23/microrred-condado-montgomery-ejemplo-instalaciones-publicas>
- [8] <https://www.ptwalqa.com/empresa-detalle/52/fundacion-para-el-desarrollo-de-las-nuevas-tecnologias-del-hidrogeno-en-aragon/>
- [9] Tecnología de gasificación por plasma de Westinghouse.
- [10] <https://www.google.es/maps/place/Ja%C3%A9n/@37.922554,-3.8481968,9.33z/data=!4m5!3m4!1s0xd6ef5befabda4c5:0x303d278a575caa0!8m2!3d37.7795594!4d-3.7849716?hl=es>
- [11] [https://www.ree.es/sites/default/files/01\\_ACTIVIDADES/Documentos/Mapas-de-red/mapa\\_transporte\\_iberico\\_2018.pdf](https://www.ree.es/sites/default/files/01_ACTIVIDADES/Documentos/Mapas-de-red/mapa_transporte_iberico_2018.pdf)
- [12] [https://www.ree.es/sites/default/files/01\\_ACTIVIDADES/Documentos/Mapas-de-red/mapa\\_transporte\\_iberico\\_2018.pdf](https://www.ree.es/sites/default/files/01_ACTIVIDADES/Documentos/Mapas-de-red/mapa_transporte_iberico_2018.pdf)
- [13] <https://es.climate-data.org/europe/espana/andalucia/jaen-1125/>
- [14] Asignatura de ICAI “The challenge of future electricity systems”
- [15] [https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/Planificaci%C3%B3n/if\\_orme\\_prov\\_ja\\_miea\\_2020\\_12\\_31.pdf](https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/Planificaci%C3%B3n/if_orme_prov_ja_miea_2020_12_31.pdf)
- [16] [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_11227\\_e15\\_residuos\\_c3ead071.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e15_residuos_c3ead071.pdf)
- [17] <http://www.arc.cat/es/altres/purins/guia/pdf/ficha6.pdf>

- [18] Materiales Renovados
- [19] Resurja
- [20] Aprovechamiento de los residuos del olivar
- [21] OPET, 2002
- [22] [www.acciona.es](http://www.acciona.es)
- [23] [www.google.com](http://www.google.com)
- [24] <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/ha-avanzado-algo-el-hidrogeno-en-estos-anos>
- [25] Pilas de combustible de Membrana polimérica. Juan Antonio Asensio
- [26] <https://www.greencarcongress.com/2021/01/20210115-afc.htm>
- [27] TFG de Almudena Valenciano
- [28] Estadista
- [29] Expansión
- [30] Resultados financieros Endesa 2020

## Capítulo 10. BIBLIOGRAFÍA

- Circular europea sobre la gestión de residuos. Comisión Europea.
- Tecnología de gasificación por plasma de Westinghouse. Westinghouse Plasma Corporation
- Agencia andaluza de la energía.
- Situación y potencial de valorización energética directa de residuos (Estudio técnico PER 2011-2020).
- Apuntes de la asignatura de ICAI “Ingeniería Medioambiental”.
- Información sobre Recogida y Tratamiento de Residuos. Resurja.
- Gestión y Tratamiento de los Residuos Urbanos. Uned.
- Plasma Processing of MSW at coal-fired power plants. Louis J. Circeo and Michael S. Smith.
- Plasma Gasification: An Examination of the Health, Safety, and Environmental Records of Established Facilities. Jim Bowyer and Katie Fernholz.
- Trabajo de final de grado de Almudena Valenciano.
- Aprovechamiento de los residuos del olivar. Alberto J. Moya López.
- Materiales Renovados.
- Apuntes de la asignatura de ICAI “Termodinámica”.
- Página web de la empresa Resurja.
- Thermal Plasma Gasification of Municipal Solid Waste (MSW). Youngchul Byun, Moohyun Cho, Soon-Mo Hwang and Jaewoo Chung.
- Plasma Arc Gasification of Municipal Solid Waste. Louis Circeo.
- Trabajo de final de máster de Marta Romeo Guillén.
- Informe anual Endesa. Endesa.
- Pilas de combustible de Membrana polimérica. Juan Antonio Asensio.
- [www.ballard.com](http://www.ballard.com). Ballard
- Hydrogen-based energy storage solutions. SBC Energy institute.
- Almacenamiento del hidrógeno. Ariema.

- Principales técnicas de almacenamiento de Hidrógeno. María Esther Cuervos Sánchez.
- Apuntes de la asignatura de ICAI “Centrales y Subestaciones Eléctricas”.
- Tipos de pilas de combustible y su clasificación. Oscar Santiago.
- Objetivos de Desarrollo Sostenible. Naciones Unidas.