



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

## **ESTUDIO DE UNA MICRORRED EN ALMENDRALEJO**

**ANÁLISIS DE LA IMPLANTACIÓN DE GENERACIÓN DE  
ENERGÍA POR GASIFICACIÓN POR PLASMA  
DE LA BIOMASA**

Autor: Víctor Barrena Cárdenas  
Director: Dr. Julio Montes Ponce de León

Madrid  
Junio 2018



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

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

El autor D. VÍCTOR BARRENA CÁRDENAS DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: ESTUDIO DE UNA MICRORRED EN ALMENDRALEJO. ANÁLISIS DE LA IMPLANTACIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA POR GASIFICACIÓN POR PLASMA DE LA BIOMASA, 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) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

### ***4º. Derechos del autor.***

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

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

### ***5º. Deberes del autor***



El autor se compromete a:

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

**6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.**

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

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 19 de junio de 2018

**ACEPTA**

Fdo. Víctor Barrena Cárdenas



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
**Estudio de una microrred en Almendralejo. Análisis de la  
implantación de generación de energía por plasma de la biomasa**  
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico **2017/2018** es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es  
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada  
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Víctor Barrena Cárdenas

Fecha: 19/06/18

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Julio Montes Ponce de León

Fecha: 19/06/2018



## *Resumen del proyecto*

Este proyecto propone el diseño una microrred inteligente que integra las fuentes de generación renovables no gestionables presentes en los alrededores del emplazamiento escogido, con fuentes de energía gestionables, como la gasificación por plasma de la biomasa. Se propone, por tanto, un mix de generación teórico exclusivamente a partir de energía limpia y renovable y cerca de los puntos de consumo.

La disposición del sistema eléctrico español se basa en la conexión de los todos generadores a la red nacional, para luego ser distribuidos a los puntos de consumos. Esto provoca que en las líneas de transporte se pierda hasta un 4% de la electricidad generada, cuyo importe se carga al consumidor, según la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia.

Los centros de generación de régimen retributivo, que producen alrededor de un 40% de la producción nacional, incluyen los grupos de cogeneración, solar fotovoltaica, solar térmica, eólica, hidráulica y biomasa. Con estas elevadas pérdidas en el transporte no parece lógico conectar estos grupos a la red nacional. Como solución, se proponen microrredes o *smart-grids*, situando estas fuentes de generación cerca de los pequeños puntos de consumo, de manera que se optimice el flujo de la energía eliminando estas pérdidas en las líneas de la red nacional. En estas microrredes pueden incluirse sistemas de generación gestionables, como la biomasa, que dotan de flexibilidad a el sistema eléctrico de la microrred para suavizar los picos de demanda y optimizar el coste de la energía de esta.

El concepto de microrred eléctrica es real, y existen varias en funcionamiento en diferentes puntos de la geografía mundial, como es el caso de la microrred en Hachinoche en Japón o Santa Rita Jail en Estados Unidos.

En este proyecto, el emplazamiento escogido es la ciudad de Almendralejo (Badajoz, Extremadura). Es una localidad que cuenta con unos 35.000 habitantes según el último censo de 2016 del Instituto Nacional de Estadística. En los alrededores, a un radio de unos 50 kilómetros, encontramos instalaciones solares fotovoltaicas que van a ser consideradas para la microrred. Concretamente, la microrred a diseñar integra el parque solar fotovoltaico SPEX de 30 MW.

La comarca de Tierra de Barros, en la que se encuentra Almendralejo, cuenta con una gran actividad agraria, con lo que anualmente se genera una cantidad muy relevante de residuos agrícolas. Por otra parte, los residuos sólidos urbanos que se generan en la localidad diariamente son enviados a Mérida, en donde existe un Ecoparque de tratamiento de residuos. Los RSU, son tratados y después depositados en vertederos controlados. En este proyecto se propone un aprovechamiento





energético de los mismos y, al ser diaria la recogida de estos, constituyen un recurso energético de gran valor para la microrred a diseñar.

Se ha realizado un estudio de la cantidad de residuos disponibles de cada tipo, obteniéndose los siguientes resultados:

*Resumen de residuos disponibles en los alrededores de Almendralejo.*

<b>Tipo de residuo</b>	<b>Cantidad (Tn/año)</b>	<b>Periodicidad de recogida</b>
RSU	7.894,31 Tn/año	Diaria
Forestales	25.470 Tn/año	Desconocida
Orujo de oliva	4.000 Tn/año	Noviembre y Diciembre
Alperujo de oliva	16.000 Tn/año	Noviembre y Diciembre
Orujo de uva	15.000 Tn/año	Septiembre y Octubre

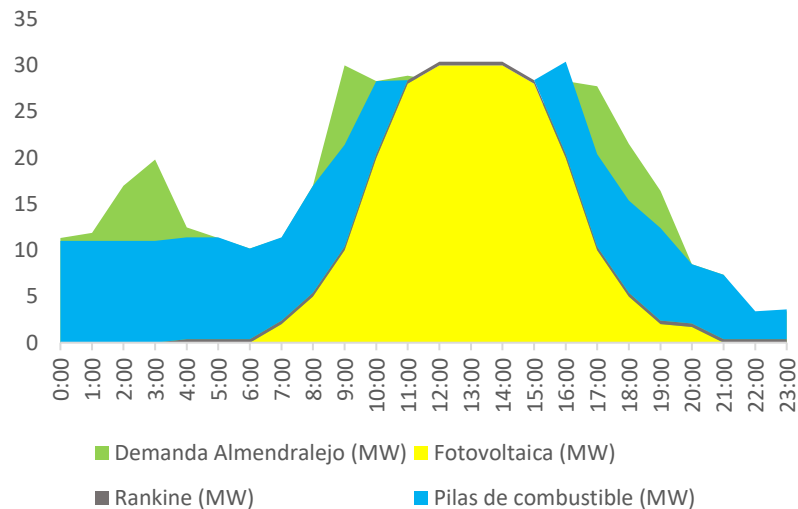
Estos residuos son procesados en la planta de gasificación por plasma a través de un sistema convertidor de plasma directo. En la planta de gasificación por plasma de la biomasa, se ha estimado que se pueden generar 523,91 kg/h de hidrógeno durante las 8.000 horas de funcionamiento de la planta. Este hidrógeno es convertido a energía eléctrica a través de pilas de combustible, dotando a la microrred de gestionabilidad energética para cubrir los picos de demanda cuando sea necesario. Por otra parte, la planta de gasificación por plasma posee un sistema de aprovechamiento térmico a través de un ciclo de Rankine, que puede producir unos 3.150 MWh/año

Utilizando estos grupos de generación, se debe suplir la demanda de Almendralejo siempre que sea posible. En el caso de no disponibilidad de recursos de la microrred, se utilizará la potencia de la red eléctrica nacional, cuya conexión con la microrred se realiza a través de una subestación de 132kV. La demanda de Almendralejo es conocida gracias a la información proporcionada por *Endesa Distribución*. En 2016, el consumo total de Almendralejo fue de 115.740, 30 MWh/año con un pico de demanda de 27,39 MVA el 6 de junio. Según la compañía distribuidora, se ha comprobado que la demanda máxima en Almendralejo siempre se produce en septiembre debido al consumo de cooperativas y bodegas en épocas de vendimia.

Para realizar un estudio del comportamiento teórico de la microrred se han propuesto dos escenarios: un día típico de verano, en el que hay total disponibilidad de la tecnología solar fotovoltaica, y un día típico de invierno, en el que tenemos una disponibilidad mínima de la energía solar fotovoltaica.



En el primer caso de estudio, el hidrógeno procedente del procesado de los residuos permite aplanar considerablemente la curva de demanda y reducir así la dependencia de la red eléctrica general. En este caso tan favorable de disponibilidad de energía renovables, la microrred permite cubrir cerca de un 90% de la demanda de Almendralejo. Se almacena hidrógeno en los periodos de valle y en los que se cubre la demanda con energía solar fotovoltaica.

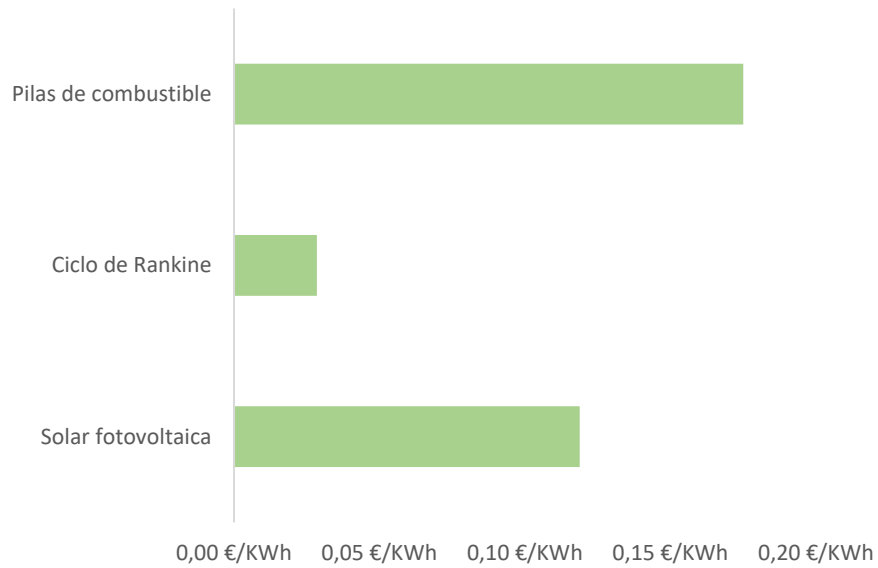


*Primer caso de estudio: Día de verano y solar fotovoltaica disponible*

Por otra parte, en el segundo caso de estudio existe una mayor dependencia de la red general, y menor se almacena menos hidrógeno, debido a la mayor necesidad de éste al no disponer de energía solar fotovoltaica de la misma manera que en el primer caso de estudio. La microrred cubre alrededor de un 59% de la demanda de Almendralejo.

La microrred ofrece un sistema de generación que dota de una mayor independencia energética de la red general. Complementa la incertidumbre causada por la no disponibilidad de las fuentes de generación no gestionables. Por otra parte, constituye una solución eficiente a la eliminación de residuos, obteniendo energía de unos recursos que no gozan de aprovechamiento óptimo en la actualidad.

Por último, se ha realizado un estudio económico del coste de la energía generada por el conjunto de la microrred. El coste de la electricidad se ve afectado por las tres fuentes de generación empleadas en la microrred.



*Comparación del coste de la energía entre las distintas fuentes de generación que conforman la microrred.*

Se ha comprobado que el coste de la energía procedente de la tecnología de plasma se encuentra dentro de un rango factible y que, aunque en la actualidad el precio de la energía procedente de la red general tiene un coste menor, el hidrógeno como fuente de generación eléctrica cuenta con un futuro prometedor con el desarrollo de nuevas tecnologías de menor coste. Así mismo, la microrred elimina un gran porcentaje de los costes añadidos a la factura de la electricidad, como las subvenciones o el transporte, los cuales no aplican a este caso por las características del sistema diseñado. Finalmente, existe la posibilidad de retribuciones económicas por las labores de recogida de residuos.





## *Project summary*

This project proposes the design of an intelligent microgrid that integrates the unmanageable renewable generation sources present at the project site with manageable energy sources, such as plasma gasification of biomass. Therefore, a mix of theoretical generation is proposed exclusively from clean and renewable energy and close to the points of consumption.

The layout of the Spanish electricity system is based on the connection of all generators to the national grid, and then be distributed to the consumption points. This means that up to 4% of the electricity generated on transmission lines is lost and the cost is charged to the consumer, according to the National Commission for Markets and Competition.

The generation sources under a compensation system, which produce around 40% of the national production, include the cogeneration, solar photovoltaic, solar thermal, wind, hydroelectric and biomass groups. With these high transmission losses, it does not seem logical to connect these groups to the national network. As a solution, microgrids or smart-grids are proposed, placing these sources of generation close to the small consumption points, so as to optimize the flow of energy by eliminating these losses in the lines of the national grid. These microgrids can include manageable generation systems, such as biomass, which give the microgrid's electrical system flexibility to smooth demand peaks and optimize the cost of the grid's energy.

The concept of the electric microgrid is real, and there are several in operation in different parts of the world, such as the microgrid in Hachinoche in Japan or Santa Rita Jail in the United States.

In this project, the chosen location is the city of Almendralejo (Badajoz, Extremadura). It is a town with about 35,000 inhabitants according to the last census of 2016 of the National Institute of Statistics. In the surrounding area, within a radius of about 50 kilometers, we find photovoltaic solar installations that will be considered for the microgrid. Specifically, the microgrid to be designed integrates the SPEX 30 MW photovoltaic solar park.

The region of Tierra de Barros, in which Almendralejo is located, has a great deal of agricultural activity, which generates a very significant amount of agricultural waste every year. On the other hand, the solid urban waste generated in the town is sent daily to Merida, where there is an Ecopark for waste treatment. MSW is treated and then disposed of in controlled landfills. This project proposes an energetic use of the same and, being daily the collection of these, they constitute an energetic resource of great value for the microgrid to design.



A study of the amount of available waste of each type has been carried out, obtaining the following results:

*Summary of the available waste resources in the surroundings of Almendralejo.*

<b>Waste type</b>	<b>Amount (Tn/year)</b>	<b>Period of collection</b>
MSW	7.894,31 Tn/year	Daily
Forest waste	25.470 Tn/year	Unknown
Olive "orujo"	4.000 Tn/year	November and December
Olive "alperujo"	16.000 Tn/year	November and December
Grape "orujo"	15.000 Tn/year	September and October

This waste is processed in the plasma gasification plant using a direct plasma converter system. At the biomass plasma gasification plant, it has been estimated that 523.91 kg/h of hydrogen can be generated during the plant's 8,000 operating hours. This hydrogen is converted to electrical energy through fuel cells, providing the microgrid with energy manageability to cover peak demand when necessary. On the other hand, the plasma gasification plant has a thermal use system through a Rankine cycle, which can produce around 3,150 MWh/year.

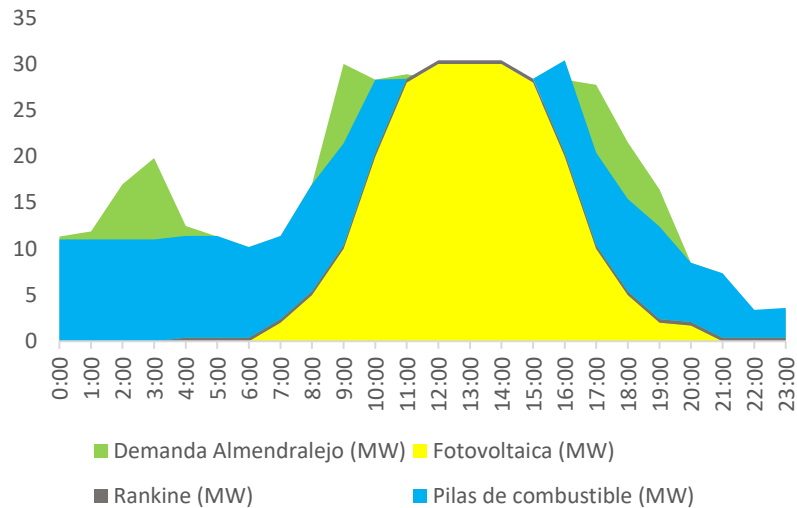
Using these generation groups, Almendralejo's demand should be met whenever possible. In the event of non-availability of resources from the microgrid, the power of the national electricity grid will be used, which is connected to the microgrid via a 132kV substation. The demand from Almendralejo is known thanks to the information provided by Endesa Distribución. In 2016, Almendralejo's total consumption was 115,740, 30 MWh/year with a peak demand of 27.39 MVA on June 6th. According to the distribution company, it has been proven that the maximum demand in Almendralejo always occurs in September due to the consumption of cooperatives and wineries during the harvest season.

Two scenarios have been proposed to study the theoretical behavior of the microgrid: a typical summer day, in which photovoltaic solar technology is fully available, and a typical winter day, in which we have a minimum availability of photovoltaic solar energy.

In the first case study, hydrogen from waste processing makes it possible to considerably flatten the demand curve and thus reduce dependence on the general electricity grid. In this case so favorable of availability of renewable energy, the microgrid allows to cover about 90% of the demand of Almendralejo. Hydrogen is



stored in the valley during periods when the demand is covered by photovoltaic solar energy.

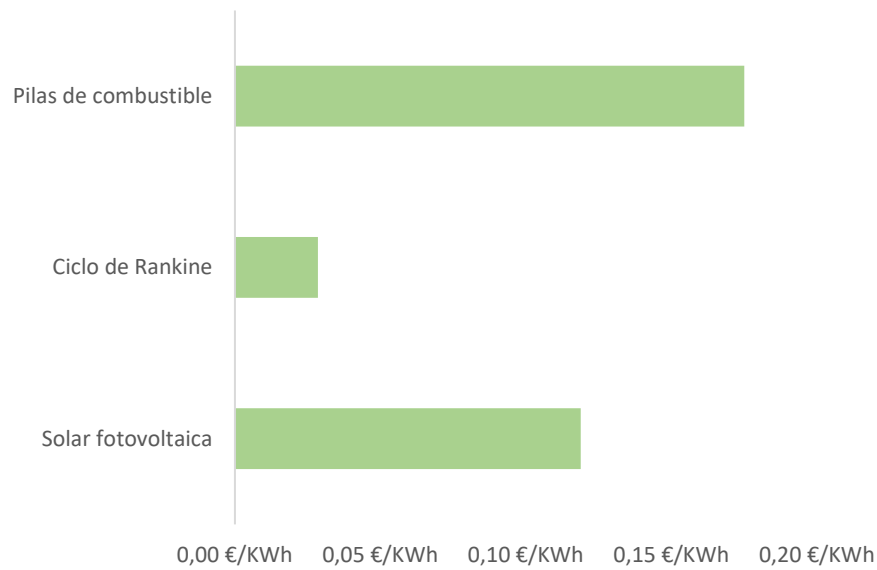


*First case of study: Summer day and solar PV available*

On the other hand, in the second case study there is a greater dependence on the general grid, and less hydrogen is stored, due to the greater need for it, as it does not have photovoltaic solar energy in the same way as in the first case study. The microgrid covers around 59% of Almendralejo's demand.

The microgrid offers a generation system that provides greater energy independence from the general grid. It complements the uncertainty caused by the unavailability of unmanageable generation sources. On the other hand, it is an efficient solution to waste disposal, obtaining energy from resources that are not currently being used optimally.

Finally, an economic study of the cost of the energy generated by the whole of the microgrid has been carried out. The cost of electricity is affected by the three sources of generation used in the microgrid.



It has been proven that the cost of energy from plasma technology is within a feasible range and that, although the price of energy from the general grid is currently lower, hydrogen as a source of electricity generation has a promising future with the development of new technologies at lower cost. Likewise, the microgrid eliminates a large percentage of the costs added to the electricity bill, such as subsidies or transport, which do not apply in this case due to the characteristics of the system designed. In addition, there is the possibility of financial remuneration for waste collection.



## *Agradecimientos*

Con este proyecto concluyo el Máster en Ingeniería Industrial en la Universidad Pontificia de Comillas ICAI y, a su vez, mis estudios de ingeniería después de seis años en la escuela. Se cierra una maravillosa etapa en la que me he formado como ingeniero y como persona, gracias a los valores que me han transmitido tanto mis compañeros como mis profesores.

Quiero agradecer a mis padres la oportunidad que me han dado de poder estudiar en ICAI y las ganas de superación que me han transmitido durante estos años. También me gustaría darles las gracias a mis compañeros del Colegio Mayor San Pablo, por los años como colegial durante el Grado. Por otra parte, también quiero agradecer a Empresarios Agrupados, Geoblink y Norte Ventures, por haberme dado la oportunidad de formarme como profesional a la vez que he cursado los estudios de Máster.

En cuanto a este proyecto, quiero agradecer a mi director, el Dr. Julio Montes Ponce de León, por su constante ayuda y disponibilidad para resolverme todas las dudas que me han ido surgiendo durante el desarrollo del proyecto. También me gustaría darle las gracias a mi tío Carlos Cárdenas, por su ayuda con varios datos necesarios para la realización del proyecto.



## *Índice de la memoria*

<i>Índice de tablas</i> .....	<i>XVI</i>
<i>Índice de figuras</i> .....	<i>XVIII</i>
<b>Parte I Memoria</b> .....	<b>21</b>
<b>Capítulo 1 Introducción</b> .....	<b>22</b>
<b>1.1 Motivación del proyecto</b> .....	<b>24</b>
<b>1.2 Estado de la cuestión</b> .....	<b>25</b>
<b>1.3 Objetivos</b> .....	<b>26</b>
<b>Capítulo 2 Estado del arte</b> .....	<b>28</b>
<b>2.1 Las microrredes</b> .....	<b>28</b>
2.1.1 Introducción a las microrredes.....	28
2.1.2 Normativa aplicable.....	28
2.1.3 Ejemplos de microrredes por el mundo.....	29
<b>Capítulo 3 Emplazamiento del proyecto. Almendralejo</b> .....	<b>32</b>
<b>Capítulo 4 Integración de los recursos instalados en la zona, demanda eléctrica y configuración de la microrred</b> .....	<b>34</b>
<b>4.1 Fuentes de generación de energía existentes</b> .....	<b>34</b>
4.1.1 Solar fotovoltaica.....	34
4.1.2 Energía Hidráulica.....	36
4.1.3 Energía Eólica.....	37
4.1.4 Energía Termosolar.....	38
<b>4.2 Demanda Eléctrica</b> .....	<b>39</b>
<b>4.3 Configuración de la microrred</b> .....	<b>41</b>
<b>Capítulo 5 Sistema de recuperación energética de residuos</b> .....	<b>43</b>
<b>5.1 Residuos aprovechables en las inmediaciones del emplazamiento</b> .....	<b>43</b>
5.1.1 Residuos sólidos urbanos.....	43
5.1.2 Residuos forestales.....	45





---

5.1.3 Residuos agrícolas.....	46
5.1.4 Resumen de residuos disponibles.....	49
<b>5.2 Distribución mensual de los residuos.....</b>	<b>50</b>
<b>5.3 La gasificación por plasma .....</b>	<b>54</b>
5.3.1 Sistema convertidor de plasma directo.....	54
5.3.2 Componentes del sistema convertidor de plasma directo.....	59
5.3.3 Características del gas de síntesis.....	62
5.3.4 Ventajas del sistema convertidor de plasma directo.....	62
5.3.5 Balance energético del proceso .....	63
5.3.6 Sistema de aprovechamiento térmico: Ciclo de Rankine .....	65
5.3.7 Energía térmica cedida para el secado de los residuos .....	70
5.3.8 Producción de hidrógeno.....	71
5.3.9 Operación de la planta de gasificación. Resumen .....	72
<b>Capítulo 6 Pilas de combustible .....</b>	<b>74</b>
6.1.1 Principio de funcionamiento .....	75
6.1.2 Tipos de pila de combustible.....	76
<b>77</b>	
6.1.3 Elección de la pila de combustible y dimensionamiento.....	78
6.1.4 Almacenamiento del hidrógeno .....	79
<b>Parte II Análisis energético.....</b>	<b>81</b>
<b>Capítulo 1 Configuración de la microrred .....</b>	<b>82</b>
1.1 Primer caso de estudio: Día de verano .....	83
1.2 Segundo caso de estudio: Día de invierno .....	85
1.3 Conclusiones energéticas.....	87
<b>Parte III Análisis económico.....</b>	<b>88</b>
<b>Capítulo 1 Evaluación económica de las fuentes de generación de energía</b>	<b>89</b>
<b>89</b>	
1.1 Costes de la planta solar fotovoltaica.....	89
1.2 Costes de la planta de recuperación de residuos .....	90
1.2.1 Costes del sistema convertidor de plasma directo .....	90



---

1.2.2 Costes del ciclo de Rankine .....	92
1.2.3 Costes de las pilas de combustible .....	92
<b>1.3 Comparación del coste de la electricidad entre las distintas tecnologías .</b>	<b>94</b>
<b>1.4 Evaluación económica del conjunto de la microrred .....</b>	<b>95</b>
<i>Parte IV Anejos.....</i>	<i>97</i>
<i>Catálogo Ballard ClearGen Fuel Cell IMW System.....</i>	<i>98</i>
<i>Parque solar SPEX – Grupo ECO.....</i>	<i>99</i>
<i>ARIEMA Tanques de hidrógeno .....</i>	<i>100</i>
<i>Datos energéticos primer caso de estudio: Día de verano .....</i>	<i>101</i>
<i>Datos energéticos segundo caso de estudio: Día de invierno .....</i>	<i>102</i>
<i>Costes solar fotovoltaica.....</i>	<i>103</i>
<i>Costes ciclo de Rankine.....</i>	<i>104</i>
<i>Costes pilas de combustible .....</i>	<i>105</i>
<i>Bibliografía</i>	<i>106</i>



## *Índice de tablas*

Tabla 2. Irradiación solar media diaria en Almendralejo en 2016. Fuente: ADRASE .....	35
Tabla 3. Horas equivalentes de sol según zona de irradiación y seguimiento. Fuente: [4] .....	36
Tabla 4. Datos demanda total, máxima y mínima en Almendralejo en 2016 .....	40
Tabla 5. Resumen de la cantidad diaria de residuos a procesar en la planta. Fuente: Elaboración propia .....	49
Tabla 6. Principales fases que sufre la materia a distintos niveles de temperatura dentro de la vasija. Fuente: [15], elaboración propia .....	56
Tabla 7. Composición del gas de síntesis a la salida de la vasija. Fuente: Aventurem .....	57
Tabla 8. Condiciones del agua a la entrada y salida de la caldera. Fuente: elaboración propia .....	66
Tabla 9. Condiciones del agua a la entrada y salida de la caldera. Fuente: elaboración propia .....	68
Tabla 10. Condiciones del agua a la entrada y salida de la caldera. Fuente: elaboración propia .....	68
Tabla 11. Condiciones del agua a la entrada y salida de la caldera. Fuente: elaboración propia. ....	69
Tabla 12. Composición del gas de síntesis limpio, antes de la reacción shift. Fuente: Aventurem y elaboración propia .....	71
Tabla 13. Caudal de entrada y salida a la planta y producción eléctrica del ciclo de Rankine. Fuente: Elaboración propia .....	73
Tabla 14. Poder calorífico de distintos combustibles. Fuente: idae .....	74
Tabla 15. Tipos de pilas de combustible. Fuente: elaboración propia .....	77



---

Tabla 16. Resumen de generación y demanda durante el 6 de septiembre. Fuente: Elaboración propia .....	84
Tabla 17. Resumen de producción, consumo y almacenamiento de hidrógeno. Fuente: Elaboración propia .....	84
Tabla 18. Resumen de generación y demanda durante el 1 de diciembre. Fuente: Elaboración propia .....	86
Tabla 19. Resumen de producción, consumo y almacenamiento de hidrógeno. Fuente: Elaboración propia .....	86
Tabla 20. Características del Parque Solar SPEX. Fuente: Grupo ECO .....	89
Tabla 21. Resumen costes de instalación fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia. ....	90
Tabla 22. Costes de operación, mantenimiento y personal de la planta de gasificación por plasma. Fuente: Aventum y elaboración propia. ....	91
Tabla 23. Costes de la planta de gasificación por plasma de biomasa. Fuente: Aventum .....	91
Tabla 24. Resumen costes del ciclo de Rankine. Fuente: Elaboración propia. ....	92
Tabla 25. Resumen costes de las pilas de combustible. Fuente: Elaboración propia .....	94
Tabla 26. Resumen de los costes de generación de cada tecnología. Fuente: Elaboración propia .....	96



## Índice de figuras

Figura 1. Evolución de la potencia renovable instalada en España. Fuente: Datos Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia y REE .....	22
Figura 2. Mapa de Extremadura. Fuente: viajarporextremadura.com.....	24
Figura 3. Esquema de la microrred de Hachinoche. Fuente: [1].....	30
Figura 4. Vista lateral de Santa Rita Jail. Fuente: [3].....	31
Figura 5. Tabla Climática Almendralejo. Fuente: climate-data.org.....	32
Figura 6. Registro histórico medio de la velocidad del viento en Almendralejo. Fuente: meteoblue.com .....	33
Figura 7. Mapa Irradiación Solar Media Diaria en España. Fuente: suelosolar.com .....	35
Figura 8. Situación de las Centrales Hidráulicas superiores a 10 MW en Extremadura. Fuente: Agenex.....	37
Figura 9. Extresol I, II y III. Fuente: www.energystorageexchange.org.....	38
Figura 10. Costo nivelado no subsidiado de las diferentes tecnologías renovables. Fuente: Lazard.....	39
Figura 11. Compañías distribuidoras en las diferentes provincias españolas. Fuente: holaluz.com .....	40
Figura 12. Estación de transferencia de residuos en Almendralejo .....	44
Figura 13. Estacionalidad de los residuos agroindustriales en Extremadura. Fuente: Agencia Extremeña de la Energía .....	47
Figura 14. Mapa comarcal de la distribución del orujo de uva. Fuente: Agencia Extremeña de la Energía.....	48
Figura 15. Producción anual de tomate por provincias españolas. Fuente: Ministerio de Agricultura.....	49



---

Figura 16. Distribución de residuos disponibles y mes de recogida. Fuente: Elaboración propia. ....	51
Figura 17. Toneladas diarias que se procesan a la planta por tipo de residuo. Fuente: Elaboración propia .....	52
Figura 18. Contribución diaria de cada tipo de residuo en %. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 19. Etapas del sistema de convertidor de plasma directo. Fuente: Materiales Renovados .....	54
Figura 20. Vasija de plasma. Fuente: Aventum .....	56
Figura 21. Vasija de plasma. Fuente: Materiales renovados.....	59
Figura 22. Antorcha de plasma no transferida y transferida. Fuente: Materiales Renovados .....	60
Figura 23. Porcentaje en volumen de los distintos componentes del gas de síntesis en función del tipo de residuo de entrada. Fuente: Materiales Renovados .....	62
Figura 24. Balance energético de la planta de gasificación por plasma. Fuente: elaboración propia .....	64
Figura 25. Esquema del ciclo de Rankine. Fuente: elaboración propia .....	65
Figura 26. Esquema de una pila de combustible de membrana polimérica. Fuente: [17] .....	75
Figura 27. Curva típica de generación fotovoltaica un día soleado de verano en España. Fuente: REE.....	82
Figura 28. Mix de generación para la demanda del caso de estudio del 6 de septiembre. Fuente: Elaboración propia y [19] .....	84
Figura 29. Mix de generación para la demanda del caso de estudio del 1 de Diciembre. Fuente: elaboración propia .....	86
Figura 30. Comparación del coste medio de la electricidad durante la vida útil de 25 años de las instalaciones de la microrred. Fuente: Elaboración propia.....	94





Figura 31. Desglose de los costes asociados a la factura eléctrica en España. Fuente:  
UNESA..... 95

# *Parte I MEMORIA*



## Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

Las energías renovables no gestionables eólica y solar son una parte importante del mix energético español. Una legislación no adecuada representó un aumento considerable de generadores de estas dos energías distorsionando el mix energético y aumentando el precio de la electricidad que fue encubierto por una deuda tarifaria que se acercaba a los 10.000 millones de euros anuales. Una modificación, desde 2014, de la legislación vigente más razonable ha cortado la deuda tarifaria, aunque ha producido un estancamiento temporal de la potencia no gestionable en todo el país.

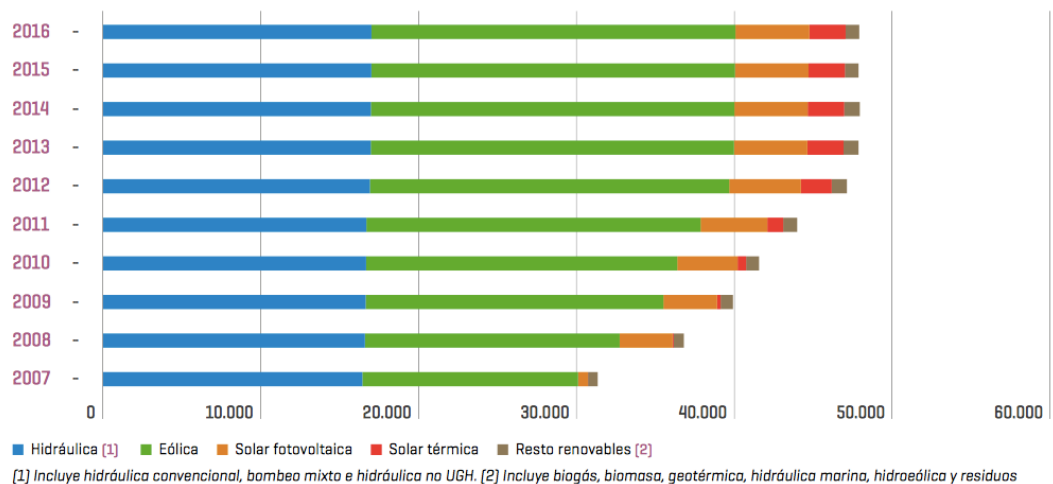


Figura 1. Evolución de la potencia renovable instalada en España. Fuente: Datos Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia y REE

Este proyecto se centra en el análisis y el diseño de una microrred, en la que se integren los recursos energéticos renovables gestionables y no gestionables existentes en una zona de la Comunidad Autónoma de Extremadura, concretamente en la zona de la ciudad de Almendralejo, en la que se incluya el aprovechamiento energético de los recursos biomásicos existentes sus proximidades. La comunidad extremeña se encuentra la quinta en el ranking de comunidades con más potencia renovable instalada y la séptima en cuanto a producción renovable, según Red Eléctrica Española.

El gran potencial energético renovable de Extremadura se debe la tecnología hidráulica y solar. Sin embargo, no se aprovechan adecuadamente los recursos biomásicos, concretamente los residuos sólidos urbanos, agrícolas y forestales, cuya recuperación energética, como se estudia en este proyecto, es muy prometedora. Se puede observar en la Figura 1, el peso de las tecnologías relacionadas con el aprovechamiento de los residuos en nuestro país es



insignificante respecto del total En este proyecto, se propondrá una instalación de gasificación por plasma de la biomasa para conversión en hidrógeno y su posterior conversión a energía eléctrica.

Almendralejo es una ciudad de unos 35.000 habitantes en la zona central de la provincia de Badajoz. Esta zona presenta elevados niveles de irradiación solar y residuos biomásicos que pueden aprovecharse para la generación de energía eléctrica.

La comarca de Tierra de Barros, donde se encuentra Almendralejo, al igual que el resto de Extremadura presenta una elevada actividad agrícola, en la que destacan las relacionadas con la aceituna y la uva, cuyos residuos poseen un gran potencial energético, como se verá en el desarrollo de este proyecto.

De la biomasa del olivar se extraen en los alrededores de Almendralejo cerca de 20.000 toneladas anuales de residuos, tanto de alperujo como de orujo de oliva. El período de extracción de estos tiene lugar en los meses de noviembre y diciembre de cada año. Por otra parte, los residuos procedentes de las industrias alcoholeras de la uva que se encuentran en Tierra de Barros suman un total de 15.000 toneladas anuales en forma de orujo de uva. En el Capítulo 5 se realiza un análisis detallado de la cantidad disponible de los mismos y cómo pueden aprovecharse para la producción de energía eléctrica.



Figura 2. Mapa de Extremadura. Fuente: [viajarporextremadura.com](http://viajarporextremadura.com)

## 1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La disposición del sistema eléctrico español se basa en la conexión de los todos generadores a la red nacional, para luego ser distribuidos a los puntos de consumos. Esto provoca que en las líneas de transporte se pierda hasta un 4% de la electricidad generada, cuyo importe se carga al consumidor, según la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia.

Los centros de generación de régimen retributivo, que producen alrededor de un 40% de la producción nacional, incluyen los grupos de cogeneración, solar fotovoltaica, solar térmica, eólica, hidráulica y biomasa. Con estas elevadas pérdidas en el transporte no parece lógico conectar estos grupos a la red nacional. Como solución, se proponen microrredes o *smart-grids*, situando estas fuentes de generación cerca de los pequeños puntos de consumo, de manera que se optimice el flujo de la energía eliminando estas pérdidas en las líneas de la red nacional. En estas microrredes pueden incluirse sistemas de generación gestionables, como la



biomasa, que dotan de flexibilidad a el sistema eléctrico de la microrred para suavizar los picos de demanda y optimizar el coste de la energía de la misma.

Por otra parte, la creciente preocupación por la sostenibilidad medioambiental, no solo España, sino también en Europa, hace que sea necesario desarrollar medidas viables para asegurar un tratamiento adecuado de la biomasa residual. La Comisión Europea ha adoptado, desde diciembre de 2015, un ambicioso Plan General de Crecimiento Sostenible. Entre las propuestas legislativas, con un horizonte del 2030, destacan:

- El reciclado del 65% de los residuos municipales.
- Un objetivo de reducción de la eliminación en vertedero a un máximo del 10% de todos los residuos.
- Medidas concretas para promover la reutilización y estimular la simbiosis industrial, siendo los subproductos de unas industrias las materias primas de otras.

En la línea de estas medidas, se propone en este proyecto la reutilización los residuos biomásicos a través de una planta de gasificación por plasma que produzca hidrógeno a partir de la biomasa residual, dotando así a la microrred a diseñar de gestionabilidad energética, así como un comportamiento sostenible del emplazamiento donde se encuentra.

Este proyecto se presenta como una oportunidad de estudiar el potencial energético de un emplazamiento real y las posibilidades que existen para la implantación de una microrred basada en energías renovables, así como el estudio y análisis de tecnologías innovadoras de recuperación de residuos.

Se pretende diseñar un sistema energético económicamente viable, que pueda dotar de energía gestionable a los consumidores de la zona y que aproveche las fuentes de generación de régimen especial instaladas en la zona.

La búsqueda de información de la demanda existente, los puntos de generación instalados, un análisis geográfico de la zona y el dimensionamiento eléctrico serán claves en el estudio de la red distribuida a diseñar.

## ***1.2 ESTADO DE LA CUESTIÓN***

---

La comarca de Tierra de Barros, en la que se encuentra Almendralejo, posee en la actualidad alrededor de 40 MW de solar fotovoltaica, siendo el único conjunto de energía renovable de la zona. A diferencia de otras comarcas de Extremadura, no





existe ninguna central hidráulica en ella. La energía eólica en la zona es inexistente debido a la situación geográfica que da lugar a bajas velocidades de viento.

Por otra parte, en cuanto a la producción de residuos agrícolas, la comarca es la primera en Extremadura en producción de residuos provenientes de la industria vitivinícola (120.000 toneladas anuales) y olivarera (15.000 toneladas anuales).

Extremadura es, después de Andalucía, la Comunidad Autónoma con mayor producción de tomate de España. Cuenta con 17.586 hectáreas en las que se producen 1.451.195 toneladas de tomate. Sin embargo, el 84% de la producción se sitúa en Badajoz y el 16% en Mérida, Don Benito y Trujillo, por lo que los residuos procedentes de esta industria no pueden utilizarse en este proyecto.

Actualmente cabe destacar que, a diferencia de otras zonas de Extremadura como Miajadas y Mérida, no encontramos en esta zona ninguna planta de producción de energía a partir de la biomasa en los alrededores de Almendralejo.

### **1.3 OBJETIVOS**

---

Los objetivos principales del proyecto son:

- Analizar la generación de residuos biomásicos de la zona de Almendralejo y proponer una recuperación eficiente de los mismos mediante su gasificación por plasma.
- Proponer un sistema eléctrico que mejore, en la medida de lo posible, el abastecimiento de energía en el emplazamiento escogido utilizando energías renovables gestionables y no gestionables. Dimensionamiento energético a partir de información real y actual.
- Realizar un estudio de las fuentes de energía renovables existentes en la zona y analizar la inclusión de las mismas en la microrred a diseñar.
- Diseñar una planta de gasificación por plasma de la biomasa que sea económica y técnicamente viable. Para ello se deberá analizar el proceso de obtención de hidrógeno a partir de los residuos orgánicos introducidos en el sistema.
- Estudiar el almacenamiento y utilización del hidrógeno mediante pilas de combustible.
- Realizar un análisis de generación-demanda teniendo en cuenta distintos escenarios, para evaluar el funcionamiento teórico de la microrred a diseñar.



-Por último, realizar un informe económico para evaluar el coste teórico de la electricidad en el emplazamiento una vez instalada la microrred. Se realizará un análisis de los costes fijos de instalación, así como de los variables debido al funcionamiento de las distintas tecnologías incluidas en la microrred, de cara a analizar un análisis del coste de la energía generada por el conjunto de la microrred.



## Capítulo 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 LAS MICRORREDES

---

#### 2.1.1 INTRODUCCIÓN A LAS MICRORREDES

---

Una microrred consiste en un sistema inteligente de generación distribuida autogestionado localmente, basado en fuentes de generación renovables, y que se encuentra instalado cerca de los puntos de consumo.

Resulta de especial importancia al hablar de una microrred el concepto de gestionabilidad de las fuentes de energía. El principal problema de las fuentes renovables como la solar fotovoltaica o la eólica, es que la generación de energía eléctrica depende de las condiciones meteorológicas del emplazamiento en el que se encuentren instaladas. Por este motivo, y por la inviabilidad del almacenamiento de energía eléctrica en la actualidad, se pueden calificar como fuentes de generación no gestionables. Sin embargo, la microrred que se propone en este proyecto ofrece tecnologías de almacenamiento de hidrógeno y su utilización posterior para suministrar energía mediante pilas de combustible, alternativas a las baterías convencionales.

Las microrredes permiten una mayor independencia de la red de distribución, mayor calidad de suministro y reducción del coste de la energía eléctrica. Constituye un sistema de generación descentralizada que, aún conectada a la red eléctrica, puede funcionar de forma independiente pudiendo incluso funcionar en modo isla.

#### 2.1.2 NORMATIVA APLICABLE

---

La legislación jurídica aplicable al territorio en el que se va desarrollar este proyecto se recoge en las leyes y decretos que se presentan a continuación [1]:

- Ley 54/1997 del Sector Eléctrico ha dado lugar a una serie de Reales Decretos, que define el Régimen Especial. Reemplazada por Ley 17/2007.



- Real Decreto 1663/2000 sobre conexionado de instalaciones de baja tensión a la red eléctrica.
- Real Decreto 1699/2011, de 18 de noviembre, por el que se regula la conexión a red de instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia
- 
- Real Decreto 2/2013, por el cual se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.
- Real Decreto-ley 9/2013 por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.
- 
- Real Decreto 163/2014, por el que se crea el registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono, dentro del horizonte 2020 europeo.
- Real Decreto 413/2014 por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.

### **2.1.3 EJEMPLOS DE MICRORREDES POR EL MUNDO**

---

Este sistema constituye una aplicación energética real y son varios los ejemplos que podemos encontrar en diversas geografías. A continuación, se muestran algunos de ellos.

#### ***2.1.3.1 Microrred de Hachinoche, Japón***

Instalación en funcionamiento desde el año 2005, muy eficiente y con un bajo nivel de emisiones de efecto invernadero. Es un proyecto de Mitsubishi Research Institute, Hachinohe City y Mitsubishi Electric Corporation [2].

La energía que produce es de origen totalmente renovable, concretamente energía solar (4 grupos fotovoltaicos de 80 kW), eólica (3 grupos eólicos con capacidad total de 20k W) y biomasa (tres turbinas de gas que suman una potencia total de 510 kW). Se encuentra conectada a la red eléctrica y sus características le permiten funcionar en modo isla. Dispone de baterías de 100kW para asegurar la rápida reacción ante picos inesperados de demanda.

Esta microrred constituye un ejemplo a seguir en cuanto a la gestión de la energía gestionando producción y almacenamiento conjuntamente. [1]

Dispone de un solo punto de conexión a la red principal y está preparada para suplir una demanda total de 610 kW.

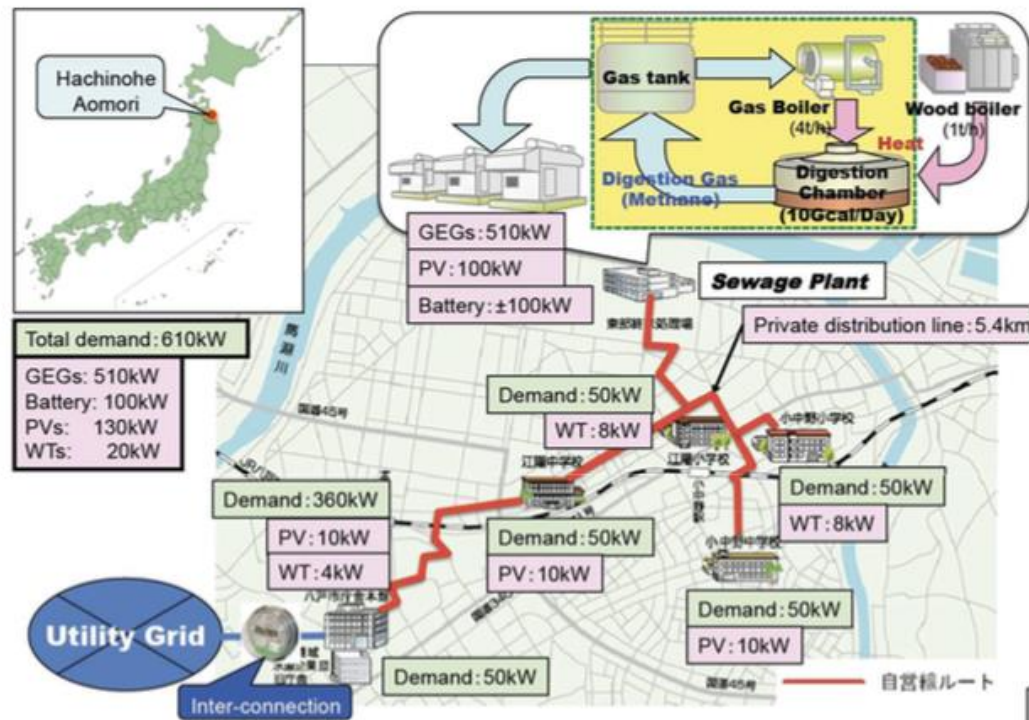


Figura 3. Esquema de la microrred de Hachinoche. Fuente: [1]

### 2.1.3.2 Microrred de Santa Rita Jail, Estados Unidos

*Santa Rita Jail* se trata de un proyecto fundado por el U.S. DOE bajo el programa *Smart Grid Program*. La cárcel se encuentra en Dublín (California, EEUU) y cuenta con alrededor de 4.000 presos, es considerada una de las más eficientes del mundo y tiene un pico de demanda de alrededor de 3 MW. La microrred de *Santa Rita Jail* está formada por:

- 1,5 MW de energía solar fotovoltaica, instalado en 2002.
- 1 MW de pilas de combustible de carbonato fundido con un sistema de recuperación de calor, el cual proporciona agua caliente. Fue añadido en 2006.
- Un sistema de almacenamiento constituido por baterías de 2 MW y 4 MWh. Este sistema permite a la cárcel desconectarse de la red y funcionar de manera aislada por largos períodos de tiempo. Un



conmutador estático en la subestación de la cárcel permite una conexión y desconexión rápida.



*Figura 4. Vista lateral de Santa Rita Jail. Fuente: [3]*





## Capítulo 3 EMPLAZAMIENTO DEL PROYECTO.

### ALMENDRALEJO

Este proyecto consiste en el planteamiento y diseño de un sistema de generación distribuida en el municipio de Almendralejo, capital de la comarca de Tierra de Barros, de la provincia de Badajoz, utilizando las energías renovables existentes en la zona y los recursos biomásicos como fuente de hidrógeno. El municipio cuenta con 34.543 habitantes, según el censo de 2016 del Instituto Nacional de Estadística.

La economía de Almendralejo está basada la agricultura, concretamente en los cultivos de la aceituna y de la uva, contando con importantes bodegas reconocidas a nivel internacional. También es conocida como “Ciudad del Cava”, por su producción de cavas de buena calidad.

El clima en Almendralejo es cálido, con una temperatura media anual de 16,2 °C y con escasas precipitaciones (máximo de 71 mm de agua), característica de la provincia de Badajoz. Esto conlleva una irradiación solar alta durante más de un 50% del año, por lo que el potencial energético a partir de la energía solar es importante.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	7.8	9.4	11.8	14.4	17.6	22.3	25.9	25.4	22.5	17.1	11.9	8.5
Temperatura mín. (°C)	3.7	4.6	6.8	8.6	11.5	15	17.6	17.6	15.7	11.6	7.4	4.5
Temperatura máx. (°C)	12	14.2	16.9	20.2	23.8	29.7	34.2	33.3	29.3	22.7	16.5	12.5
Temperatura media (°F)	46.0	48.9	53.2	57.9	63.7	72.1	78.6	77.7	72.5	62.8	53.4	47.3
Temperatura mín. (°F)	38.7	40.3	44.2	47.5	52.7	59.0	63.7	63.7	60.3	52.9	45.3	40.1
Temperatura máx. (°F)	53.6	57.6	62.4	68.4	74.8	85.5	93.6	91.9	84.7	72.9	61.7	54.5
Precipitación (mm)	64	59	63	52	40	23	4	5	25	60	71	71

Figura 5. Tabla Climática Almendralejo. Fuente: climate-data.org

Por su parte, la energía eólica no se contempla como una posibilidad en el diseño de la generación distribuida. La velocidad del viento anual se sitúa mayormente



Emplazamiento del proyecto. Almendralejo

entre 1 y 10 km/h durante la mayor parte del año como se puede observar en la Figura 6. Un aerogenerador necesita para su funcionamiento entre 10,8 y 14,4 km/h.

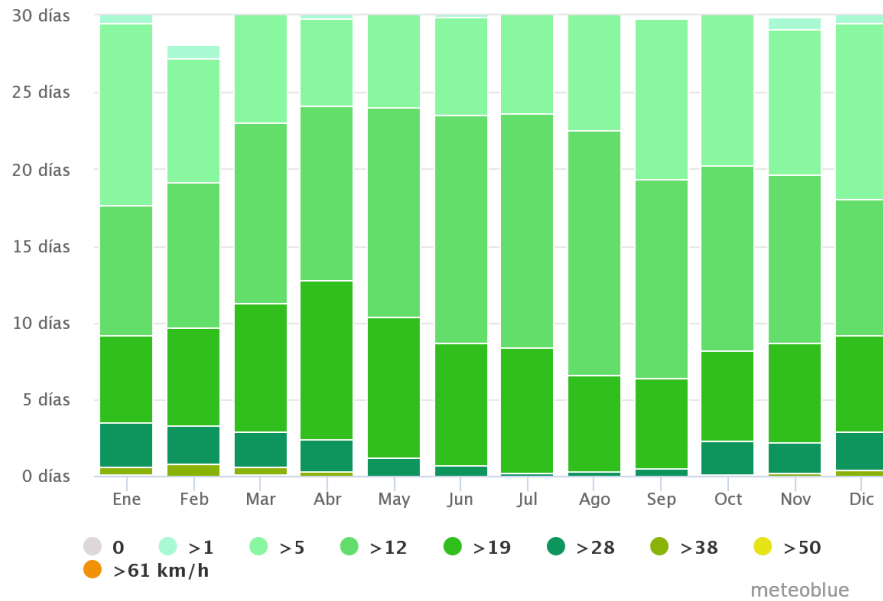


Figura 6. Registro histórico medio de la velocidad del viento en Almendralejo. Fuente: *meteoblue.com*



## Capítulo 4 INTEGRACIÓN DE LOS RECURSOS

### INSTALADOS EN LA ZONA, DEMANDA ELÉCTRICA Y CONFIGURACIÓN DE LA MICRORRED

#### 4.1 FUENTES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EXISTENTES

---

Extremadura es una Comunidad Autónoma en la que el porcentaje de producción de energía renovable es elevado. De los 21.003 GWh producidos en 2016 por la región, un 27,51 % fue de origen renovable.

##### 4.1.1 SOLAR FOTOVOLTAICA

---

Extremadura posee alrededor de 560 MW de potencia solar fotovoltaica instalada, valor prácticamente estable desde el 2012.

Dentro del radio de interés de este proyecto, unos 50 km alrededor de Almendralejo, encontramos dos plantas fotovoltaicas de una potencia importante:

Parque solar SPEX: Planta fotovoltaica de 30 MW de potencia nominal y se seguimiento a dos ejes. Ocupa 195 hectáreas y es propiedad de Solar Parks of Extremadura, un *joint venture* entre *ecoEnergías del Guadiana* y *Deutsche Bank*. La distancia a Almendralejo es de unos 30 kilómetros en línea recta. Se encuentra conectada a la subestación “El Judío.”

Planta Solar Alanzar: Situada en Alange, a 25 km de Almendralejo. Posee una potencia nominal de 10 MW y el promotor es *Sunpower Energy Systems*. Sin embargo, esta planta ha sido construida expresamente para suministrar energía limpia a la ciudad de Mérida, por lo que no vamos a considerarla en el proyecto.

A continuación, se expone un análisis de la irradiación solar en los alrededores de Almendralejo y la potencia eléctrica aprovechable para la microrred.



Integración de los recursos instalados en la zona, demanda eléctrica y configuración de la microrred

#### 4.1.1.1 Potencia solar en Almendralejo

Como se ha mencionado en el Capítulo 3, Almendralejo es una ciudad que recibe una irradiación solar elevada a lo largo de la mayor parte del año. Como es lógico, la irradiación es mayor en los meses de verano y menor en los de invierno.

La Tabla 1 muestra la irradiación solar media diaria durante los distintos meses del año sobre una superficie horizontal situada en Almendralejo, expresada en  $kWh/m^2$ .

Tabla 1. Irradiación solar media diaria en Almendralejo en 2016. Fuente: ADRASE

	kWh/m <sup>2</sup>
Ene	2,3
Feb	3,4
Mar	5,0
Abr	6,1
May	6,9
Jun	8,0
Jul	7,8
Aug	7,0
Sep	5,5
Oct	3,8
Nov	2,8
Dic	2,1

Se puede observar que la radiación media es  $5,05 kWh/m^2$ , por lo que se encuentra en la zona V de irradiación media diaria indicada en la Figura 7. El mes en el que se registra mayor irradiación es julio, con  $7,8 kWh/m^2$  al día, mientras que en diciembre se produce la menor irradiación diaria, con  $2,1 kWh/m^2$ .

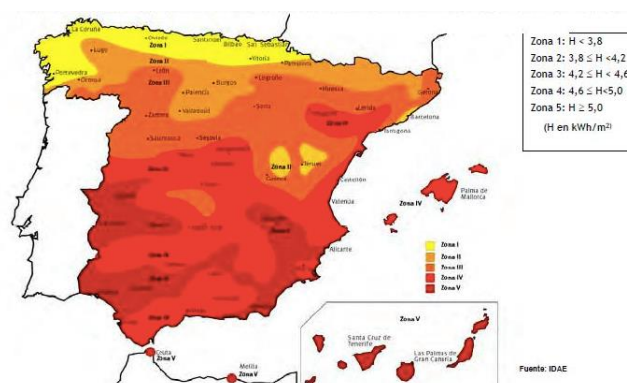


Figura 7. Mapa Irradiación Solar Media Diaria en España. Fuente: suelosolar.com



Integración de los recursos instalados en la zona, demanda eléctrica y configuración de la microrred

---

Por tanto, considerando únicamente los paneles solares del Parque solar SPEX, debido a la no disponibilidad del Parque Solar Alanzar, se pueden considerar que las horas equivalentes de operación a máxima potencia son 2.367 horas anuales, como muestra la Tabla 2 y teniendo en cuenta la zona de irradiación en la que se encuentra el emplazamiento del proyecto y el tipo de instalación de los paneles solares.

Tabla 2. Horas equivalentes de sol según zona de irradiación y seguimiento. Fuente: [4]

Tecnología	Horas equivalentes de referencia / año				
	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV	Zona V
Instalación fija	1.232	1.362	1.492	1.632	1.753
Instalación con seguimiento a 1 eje	1.602	1.770	1.940	2.122	2.279
Instalación con seguimiento a 2 ejes	1.664	1.838	2.015	2.204	2.367

En este proyecto únicamente necesitamos conocer una aproximación de la producción fotovoltaica de la que podemos disponer para el dimensionado de la microrred. Muchos fabricantes de módulos fotovoltaicos aseguran una producción eléctrica durante 10 años en el 90% de la potencia nominal y 25 años en un 80%, aproximadamente (escogemos 85% de cara a dimensionar a medio/largo plazo). [5]

Se puede estimar que el Parque solar SPEX produce anualmente:

$$30 \text{ MW} * 2.367 \text{ h} * 0,85 = 60.358,5 \text{ MWh/año}$$

Sin embargo, como se observa en la Tabla 2, la irradiación solar es irregular durante los distintos meses del año, por lo que es un recurso no gestionable, ya que depende de las condiciones meteorológicas y de las horas de insolación, por lo que es necesario para la configuración de la microrred el diseño de un sistema de generación de energía gestionable, como se verá en el Capítulo 5.

#### 4.1.2 ENERGÍA HIDRÁULICA

---

Extremadura posee 2.278 MW de potencia hidráulica, alrededor de un cuarto del total nacional. La Figura 8 muestra la distribución de las centrales hidráulicas de más de 10 MW en la comunidad extremeña, operados por Endesa e Iberdrola.



Integración de los recursos instalados en la zona, demanda eléctrica y configuración de la microrred

---

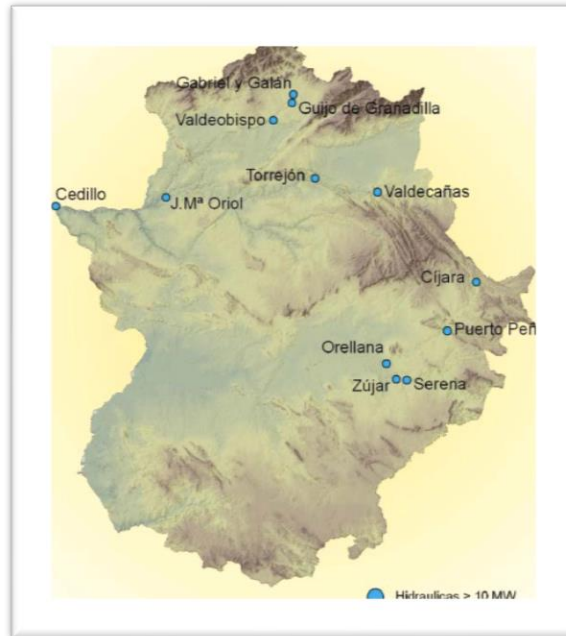


Figura 8. Situación de las Centrales Hidráulicas superiores a 10 MW en Extremadura. Fuente: Agenex.

Como se puede observar en la Figura 8, los centros de generación de energía hidráulica en Extremadura se encuentran muy alejados de Almendralejo (el más cercano, la central de Zújar, a unos 120 km), por lo que no van a considerarse para la realización del proyecto.

#### 4.1.3 ENERGÍA EÓLICA

---

Extremadura y Madrid siguen siendo las dos únicas Comunidades Autónomas sin un solo megavatio instalado de potencia eólica en toda la península.

Las redes de transporte que permitan un sistema de evacuación de la energía generada se encuentran todavía en una fase temprana de tramitación. Unido a las bajas velocidades de viento presentes en la región, parece que esta tecnología aun seguirá sin llegar a Extremadura.

Por tanto, no podemos disponer de energía eólica para la microrred a diseñar.



Integración de los recursos instalados en la zona, demanda eléctrica y configuración de la microrred

---

#### 4.1.4 ENERGÍA TERMOSOLAR

---

La energía solar termoeléctrica supone un 9,34 % de la producción total neta de energía en Extremadura y un 33,97 % con respecto al total de la producción renovable. Existen 17 centrales termoeléctricas en la región, y a 41,2 kilómetros de Almendralejo se encuentra la segunda planta de Europa con más potencia instalada, en Torre de Miguel Sesmero.

*Extresol I, II y III* son tres plantas termosolares construidas por ACS Cobra, de 50 MW cada una (potencia máxima según la legislación española). El conjunto total posee, por tanto, 150 MW. Su funcionamiento se basa en la concentración de la irradiación solar mediante espejos montados sobre estructuras de seguimiento solar. Cada central posee un total de 624 colectores.

La energía térmica se concentra en un fluido térmico, que posteriormente se conduce a unos intercambiadores de agua-aceite que convierten el agua en vapor para generar electricidad a través de un grupo turbina-generator.

Permiten almacenamiento energético a través del *Thermal Energy Storage*, tecnología que, a través de dos tanques de almacenamiento de sales, permiten utilizar la energía solar sobrante captada durante las horas de luz y mantener la producción durante varias horas tras la puesta de sol. [6]



Figura 9. *Extresol I, II y III*. Fuente: [www.energystorageexchange.org](http://www.energystorageexchange.org)

Según el informe *Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis 10.0* publicado en 2016, tras analizar las diferentes tecnologías renovables, el coste nivelado o





Integración de los recursos instalados en la zona, demanda eléctrica y configuración de la microrred

*levelized cost* del MWh de la termosolar es todavía muy elevado, como se puede observar en la Figura 10.

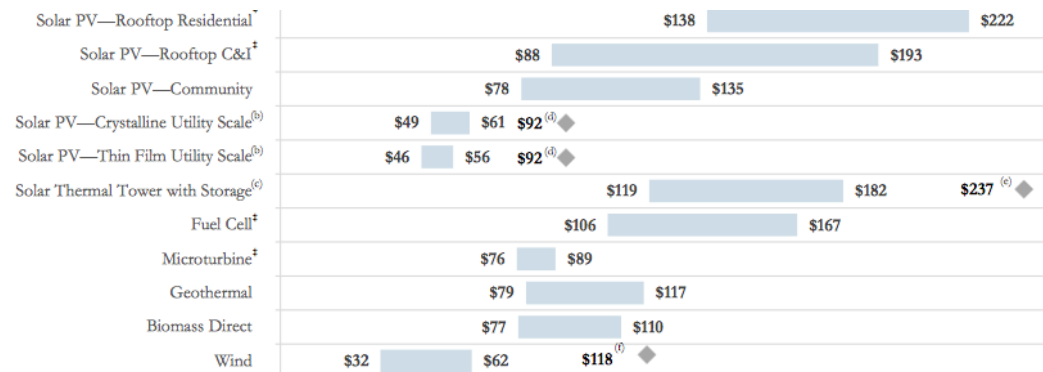


Figura 10. Costo nivelado no subsidiado de las diferentes tecnologías renovables. Fuente: Lazard

Esta novedosa tecnología, no solo tiene enormes costes de construcción, sino que su operación y mantenimiento son también costosos y complejos. La termosolar está lejos del punto de rentabilidad por sí sola, por lo que sigue dependiendo de subvenciones económicas del gobierno para su desarrollo. Sin embargo, su alto rendimiento y capacidad de almacenamiento energético les hacen atractivas de cara al futuro si bien se consigue una reducción de costes significativa.

Por tanto, en este proyecto va a optarse por no disponer de la energía termosolar, ya que incrementa de manera desmesurada el coste de la electricidad de la microrred a diseñar.

## 4.2 DEMANDA ELÉCTRICA

Para realizar un diseño lo más preciso posible de la microrred, es necesario conocer la demanda eléctrica existente en el municipio de Almendralejo. Para conocer esta información, es necesario remitirse a la compañía distribuidora de la zona y consultar el registro anual de 2016. La empresa encargada de la distribución de energía eléctrica en la provincia de Badajoz y, por tanto, en el municipio de Almendralejo es Endesa Distribución.



Integración de los recursos instalados en la zona, demanda eléctrica y configuración de la microrred

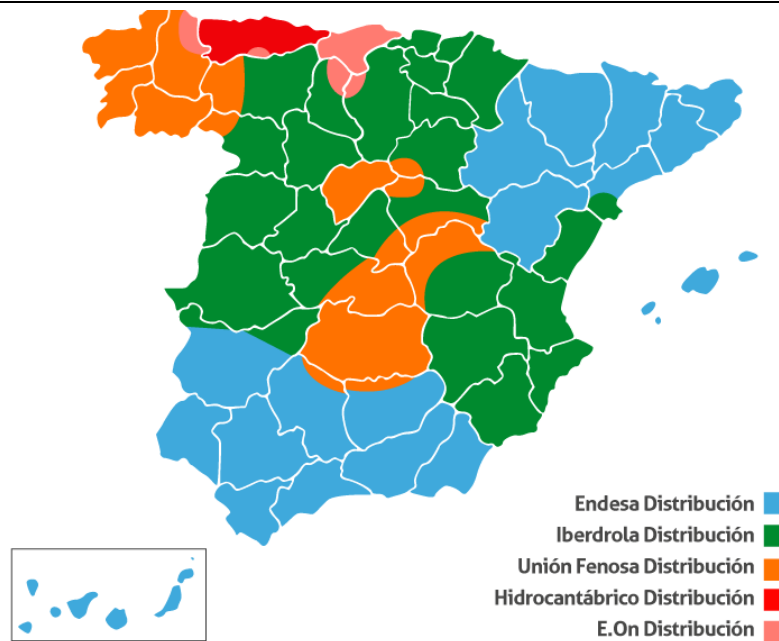


Figura 11. Compañías distribuidoras en las diferentes provincias españolas. Fuente: holaluz.com

Los datos proporcionados por Endesa Distribución sobre la demanda total, demanda mínima y demanda máxima del municipio de Almendralejo en 2016 son los que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos demanda total, máxima y mínima en Almendralejo en 2016

<b>Consumo total Almendralejo 2016 (MWh/año)</b>	<b>Carga máxima Almendralejo 2016 (MVA) (06/09/16)</b>	<b>Carga mínima Almendralejo 2016 (MVA) (06/06/16)</b>
115.740,30	27,39	3,76

Según Endesa Distribución, se ha comprobado a lo largo de los años que en Almendralejo la punta de demanda siempre se produce en septiembre debido al consumo de cooperativas y bodegas en época de vendimia.



Integración de los recursos instalados en la zona, demanda eléctrica y configuración de la microrred

---

### **4.3 CONFIGURACIÓN DE LA MICRORRED**

---

Una vez analizadas las fuentes de generación disponibles en los alrededores del emplazamiento, es necesario establecer una configuración energética de la microrred que garantice el suministro eléctrico en la ciudad de Almedralejo.

Como se ha comentado, es necesario dotar a la microrred a diseñar de un recurso gestionable, es decir, que no dependa de la incertidumbre de las condiciones meteorológicas. Es por ello, por lo que las fuentes de generación disponibles (plantas fotovoltaicas SPEX y Alanzar) van a complementarse con una planta de gasificación por plasma de la biomasa. En el Capítulo 5 se analizan los residuos disponibles en el emplazamiento para ser convertidos a energía en la planta de gasificación. En la planta, se obtendrá esta energía a partir de un gas de síntesis, introduciendo el hidrógeno presurizado en pilas de combustible. El calor generado en la vasija de plasma de la planta de gasificación para obtener el gas de síntesis será también aprovechado para obtener energía a partir de un ciclo de Rankine.

Las distintas fuentes de generación de la microrred (planta de gasificación y plantas fotovoltaicas) son conectadas a una subestación, unida a la Red Eléctrica de 132 kV, antes de ser conectadas a los consumos de Almedralejo. En la Figura 12 se muestra un esquema general de la microrred.



Integración de los recursos instalados en la zona, demanda eléctrica y configuración de la microrred

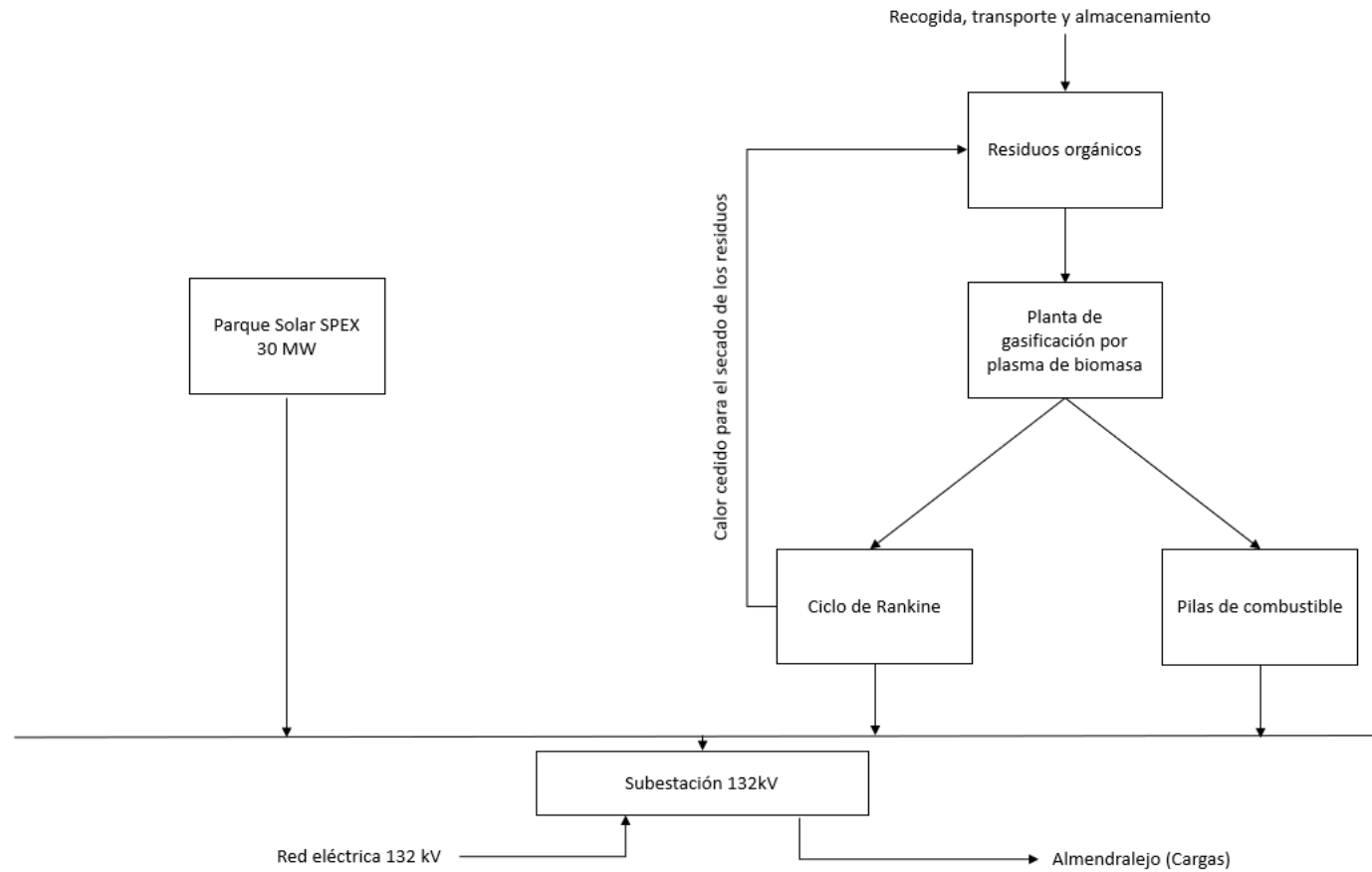


Figura 12. Esquema general de la microrred. Fuente: Elaboración propia



## Capítulo 5 SISTEMA DE RECUPERACIÓN

### ENERGÉTICA DE RESIDUOS

Para el correcto funcionamiento de la microrred, es necesario disponer de fuentes de energía gestionables para actuar en períodos en lo que las condiciones meteorológicas impiden la generación de energía a partir de fuentes no gestionables que, según el apartado anterior, en este proyecto corresponde a la energía fotovoltaica. Este proyecto se centra en la utilización de una planta de gasificación por plasma de residuos biomásicos y el empleo de hidrógeno producido para generar energía que compense la no gestionabilidad de la energía fotovoltaica de la que vamos a disponer para la microrred.

El diseño de una planta de gasificación por plasma de la biomasa proporciona energía gestionable a la microrred a partir de la recogida, almacenamiento y uso de los residuos biomásicos: residuos sólidos urbanos, residuos forestales y residuos agrícolas. El procesado de estos residuos en la planta a diseñar sirve para obtener el hidrógeno que se utiliza en las pilas de combustible para obtener electricidad.

En este apartado se va a realizar un estudio de los residuos presentes en los alrededores de Almendralejo. A partir de ahí se podrá dimensionar la cantidad de residuos convertidos en la planta de biomasa.

#### ***5.1 RESIDUOS APROVECHABLES EN LAS INMEDIACIONES DEL EMPLAZAMIENTO***

---

---

##### **5.1.1 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

---

La Ley 22/2011 de Residuos dicta que todos los municipios, no solo los mayores de 5.000 habitantes como dictaba la anterior Ley 10/1998 de residuos, están obligados a implantar sistemas de recogida selectiva de residuos sólidos urbanos que posibiliten su eliminación de forma sostenible.



En el término municipal de Almendralejo la empresa encargada de la recogida de RSU es, desde 2014, Cespa. En Almendralejo se encuentra situada una estación de transferencia. De ahí los residuos son trasladados a un Ecoparque situado en Mérida.



Figura 12. Estación de transferencia de residuos en Almendralejo

En Mérida, estos residuos se acumulan en un vertedero controlado, que recibe al día 200 toneladas de residuos no peligrosos y que se acumulan hasta que pasados los dos años se sellan. En este centro también se produce el reciclado de 4.000 toneladas anuales de cartón, *bricks* o aluminio. [9]

El biogás o gas de vertedero producido en el vertedero controlado durante la descomposición de los residuos orgánicos, se capta a través de pozos o chimeneas que están conectadas a una red de tubería en modo espina de pez. El biogás es conducido a una antorcha donde se quema, evitándose la liberación de los gases a la atmósfera.

Por otra parte, el compost se comercializa. Consiste en un producto que se extrae de los RSU y que se recicla en las mismas instalaciones del Ecoparque. Se convierte en abono para cultivos, jardines e invernaderos. Para su obtención primero se realiza un separador de Foucault y un electroimán, que separan el material férreo. La materia orgánica resultante fermenta mediante túneles de fermentación durante unos 15 días. Pasado ese periodo, la materia orgánica sufre un proceso de volteado y aireación durante dos meses. Después se procede al lavado y a la separación de impurezas. Al finalizar esta separación, el compost ya está listo para su comercialización y empleo en la industria agrícola.

Cabe mencionar que el Ecoparque de Mérida posee una planta de tratamiento de lixiviados, que son la fracción en fase líquida que se genera por la descomposición o fermentación de la materia orgánica. Es un líquido altamente contaminante y que, después de ser tratado e inertizado, se deposita en vertederos. [10]



En este proyecto se va a proyectar una planta de gasificación por plasma de los RSU recogidos en Almendralejo para su transformación en hidrógeno y su posterior conversión en energía.

Según el último registro anual del Instituto Nacional de Estadística, en España se produjo una media de 466,4 kg/habitante. Cada kilogramo de RSU se compone aproximadamente de 6% desechos que se pueden reciclar, 45% fracción resto y 49% materia orgánica aprovechable.

A continuación, podemos proceder a calcular la potencia total que podemos conseguir a partir de esta fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. El poder calorífico de estos residuos se sitúa alrededor de las 2700 kcal/kg

En primer lugar, la cantidad anual de materia orgánica procedente de residuos sólidos urbanos en Almendralejo es:

$$34.543 \text{ hab} * 466,4 \frac{\text{kg}}{\text{hab}} * 0,49 = 7.894,31 \frac{\text{Tn}}{\text{año}} = 21,62 \frac{\text{Tn}}{\text{día}}$$

En resumen, **disponemos de 21,62 Tn/día de RSU de carácter orgánico**. Esta cantidad de residuos puede verse complementada con una cantidad adicional de RSU que llegan al Ecoparque de Mérida. En el apartado 5.3 se realiza el dimensionamiento de la cantidad de residuos diaria que necesita la planta.

La recogida de estos residuos, como se ha mencionado, se produce de manera diaria, por lo que cada día se convertirán en hidrógeno los RSU que lleguen a la planta, ahorrando así costes los costes asociados de almacenamiento.

### 5.1.2 RESIDUOS FORESTALES

---

Los residuos forestales proceden de la actividad del ser humano en el campo, a través de podas, limpiezas o corte de troncos para hacer productos de maderas.

Abandonar este tipo de residuos provoca que, en épocas de altas temperaturas y clima seco, el riesgo de incendio sea elevado. El uso de estos residuos para producir energía contribuye a reducir este impacto medioambiental.

Según el informe de residuos forestales de la Agencia Extremeña de la Energía, en Extremadura se producen alrededor de 874.000 toneladas de residuos forestales procedentes de los principales árboles de la región: encina, alcornoque, pinos y eucaliptos.





De este total, un 3% proviene de Almendralejo, lo que supone una recogida anual de 25.470 toneladas de residuos forestales anualmente. Se estima que estos residuos poseen un poder calorífico en torno a 4.000 kcal/kg. [11]

La periodicidad de recogida de estos residuos no se conoce con exactitud, pudiendo realizarse anualmente, a diferencia de los RSU que se recogen diariamente. No obstante, los residuos forestales son de fácil almacenamiento, lo que no condiciona el dimensionamiento de la planta. En el capítulo 5.3 se presenta la distribución mensual de procesamiento de este tipo de residuo en la planta de gasificación por plasma.

### 5.1.3 RESIDUOS AGRÍCOLAS

---

Las cantidades de residuos agrícolas que se producen en Extremadura constituyen un volumen muy considerable, procedentes del olivar, industrial alcohólicas, transformación del tomate y de industrias arroceras.

Según la información proporcionada por la Agencia Extremeña de la Energía, se puede realizar un análisis detallado de la cantidad de estos residuos que se produce en Almendralejo según su origen [12].

.

#### 5.1.3.1 Biomasa del olivar

En la provincia de Badajoz se encuentran localizadas 185.200 hectáreas de olivar, las cuales suponen el 70% del total en Extremadura. La comarca de Tierra de Barros, donde se encuentra Almendralejo, es la más rica en olivares de toda la región.

Los residuos que proceden del tratamiento de la oliva dependen del proceso de separación final del aceite que se realice, después de la recogida, limpieza, molienda y batido. Podemos distinguir dos procesos de separación [13]:

-Sistema continuo de tres fases: Se introduce agua externa para aumentar la fase acuosa y facilitar la separación del aceite. Se centrifuga y se obtiene una fase oleosa, una fase acuosa y una fase sólida, el **orujo**, el cual una vez secado da lugar al orujillo, el cual tiene un poder calorífico de 4.200 kcal/kg en base seca. En los alrededores de Almendralejo se producen alrededor de 4.000 toneladas anuales de orujo.

-Sistema continuo de dos fases: No se introduce agua externa, por lo que la cantidad de fase acuosa producida es casi nula. Se centrifuga y se obtiene una fase oleosa y



una fase sólida con un 60-75% de humedad: el **alperujo**. El poder calorífico de este residuo se sitúa en torno a 4100 kcal/kg en base seca. En la comarca de Tierra de Barros se producen anualmente 16.000 toneladas de alperujo.

Debido a que la recogida de estos residuos se produce de forma estacional es necesario el almacenamiento de los mismos. Para el sistema de gasificación por plasma de la biomasa a diseñar, el orujo y el alperujo se almacenan en balsas y se irán tratando cuando sea necesario. Por tanto, se va a dimensionar la cantidad necesaria teniendo en cuenta la diferencia entre demanda diaria requerida y cantidad diaria de residuos sólidos urbanos disponibles, teniendo en cuenta también los residuos forestales almacenados. La Figura 13 muestra los periodos de recogida de los distintos residuos agrícolas en la provincia de Badajoz.

	Enero	Febr	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agos	Sept	Octub	Noviem	Diciem
Cáscara arroz												
Orujos uva												
Residuo tomate												
Orujo aceituna												
Alperujo												

*Figura 13. Estacionalidad de los residuos agroindustriales en Extremadura. Fuente: Agencia Extremeña de la Energía*

### 5.1.3.2 Biomasa de industrias alcohólicas

Según un estudio realizado por la Agencia Extremeña de la Energía, por cada kilogramo de uva empleada en la producción vinícola, se transforma el 72% en mosto, el 14% en lías, y el 14% restante en **orujo de uva**. La comarca de Tierra de Barros es la única en Extremadura en producción relevante de este subproducto. [12]

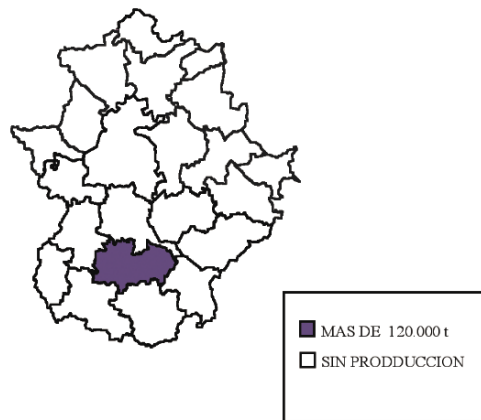


Figura 14. Mapa comarcal de la distribución del orujo de uva. Fuente: Agencia Extremeña de la Energía

La Figura 14 informa de que la producción anual de orujo de uva en la comarca de Tierra de Barros es de unas 120.000 toneladas. Sin embargo, el orujo de uva no podemos considerarlo como un residuo final, ya que es transformado para ser usado como materia prima para la producción de, entre otros fines, vinos de baja calidad.

La producción final de orujo agotado (el sobrante después de la reutilización del orujo de uva) se estima en 15.000 toneladas anuales. Este residuo posee un poder calorífico de alrededor de 4.500 kcal/kg y podemos almacenarlo para la producción de energía en la planta a diseñar.

Como muestra la tabla de la Figura 13, la recogida del orujo de uva es estacional, produciéndose en los meses de septiembre y octubre, por lo que también es necesario distribuir el procesado de este residuo en los distintos meses del año.

### ***5.1.3.3 Biomasa de la transformación del tomate***

Extremadura es la primera provincia española en cuanto a producción de tomate, con alrededor del 75% de la producción nacional, con 1.776.970 toneladas en 2016

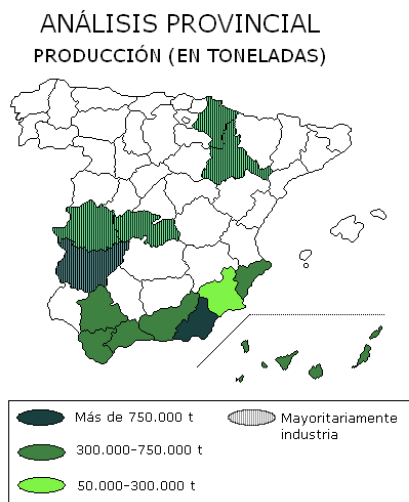


Figura 15. Producción anual de tomate por provincias españolas. Fuente: Ministerio de Agricultura

El residuo procedente del procesado del tomate corresponde a la piel y semillas. El 2,5% de cada tomate es piel y semillas. En total, se producen unas 65.000 toneladas de residuos del tomate en Extremadura. Sin embargo, la producción de este residuo se concentra en Badajoz y Don Benito, por lo que no podemos contar con él para la planta de biomasa a diseñar.

### 5.1.4 RESUMEN DE RESIDUOS DISPONIBLES

A continuación, se muestra un resumen de la cantidad disponible de cada tipo de residuo disponible en los alrededores del emplazamiento del proyecto.

Tabla 4. Resumen de la cantidad diaria de residuos a procesar en la planta. Fuente: Elaboración propia

Tipo de residuo	Cantidad (Tn/año)	Periodicidad de recogida
RSU	7.894,31 Tn/año	Diaria
Forestales	25.470 Tn/año	Desconocida
Orujo de oliva	4.000 Tn/año	Noviembre y Diciembre
Alperujo de oliva	16.000 Tn/año	Noviembre y Diciembre
Orujo de uva	15.000 Tn/año	Septiembre y Octubre



Debido a que la periodicidad de recogida de los residuos forestales presentes en los alrededores de la zona es desconocida, así como la distribución de los mismos en la zona, se ha optado por no disponer de los mismos para el dimensionamiento de la planta de gasificación por plasma de la biomasa.

## 5.2 *DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LOS RESIDUOS*

---

Una vez analizados los tipos de residuos disponibles en la zona y conocida la cantidad disponible de cada uno, como se muestra en la Tabla 5, es necesario realizar una distribución mensual para conocer la cantidad de toneladas diarias que se va a procesar en la planta.

Los RSU son los únicos cuya recogida es diaria, por lo que la cantidad a procesar son 21,62 Tn/día, como se ha calculado en el apartado 5.2.1. El procesado de los mismos en la planta debe ser diario, ya que, a diferencia del resto de residuos presentes en el estudio, los RSU no pueden ser almacenados durante un largo periodo de tiempo ya que contaminan y pierden propiedades necesarias para su conversión energética en la planta de gasificación por plasma.

Los residuos agrícolas deben comenzar a procesarse en la planta en la fecha en la que en la que comienza su recogida, de cara ahorrar costes de almacenamiento. En septiembre, debido al pico de demanda existente comentado en el Capítulo 4, se procesa un 40% del total del orujo de uva, lo cual corresponde a un procesado diario de 100 toneladas del mismo. Los siguientes nueve meses se procesan de manera uniforme, gracias al almacenado en balsas.

La recogida de la oliva en Tierra de Barros se produce en los meses de noviembre y diciembre. En el dimensionamiento se ha considerado que tanto el orujo como el alperujo de oliva se procesan de manera equitativa durante los diez meses siguientes.

Como se puede observar en la Figura 17, durante el mes de agosto es cuando se produce un menor procesado de toneladas de residuo en la planta, debido a que es el mes más alejado temporalmente a las fechas de recogida de residuos agrícolas. Es también el mes con menor consumo, como se mostrará en el estudio energético del proyecto.

Los módulos de las máquinas ofrecidas por *Aventum* son de los siguientes tamaños: 5, 10, 25, 50, 125 y 250 Tn/día. Observando la tabla de la Figura 17, podemos concluir que el tamaño necesario de los módulos de procesado para la planta de gasificación por plasma de este proyecto debe ser de **125 Tn/día**.



	Ene	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
RSU	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia
Orujo-oliva											4.000T	
Alperujo-oliva											16.000T	
Orujo-uva									15.000T			

Figura 16. Distribución de residuos disponibles y mes de recogida. Fuente: Elaboración propia.



	Ene	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
RSU	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia	21.62T/dia
Orujo-oliva	13.33T/dia	13.33T/dia	13.33T/dia	13.33T/dia	13.33T/dia	13.33T/dia	13.33T/dia	13.33T/dia			13.33T/dia	13.33T/dia
Alperujo-oliva	53.33T/dia	53.33T/dia	53.33T/dia	53.33T/dia	53.33T/dia	53.33T/dia	53.33T/dia	53.33T/dia			53.33T/dia	53.33T/dia
Orujo-uva	33.33T/dia	33.33T/dia	33.33T/dia	33.33T/dia	33.33T/dia	33.33T/dia	33.33T/dia		100.00T/dia	100.00T/dia	33.33T/dia	33.33T/dia
<b>TOTAL</b>	<b>121.61T/dia</b>	<b>121.61T/dia</b>	<b>121.61T/dia</b>	<b>121.61T/dia</b>	<b>121.61T/dia</b>	<b>121.61T/dia</b>	<b>121.61T/dia</b>	<b>88.28T/dia</b>	<b>121.62T/dia</b>	<b>121.62T/dia</b>	<b>121.61T/dia</b>	<b>121.61T/dia</b>

*Figura 17. Toneladas diarias que se procesan a la planta por tipo de residuo. Fuente: Elaboración propia*





	Ene	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
RSU	17.78%	17.78%	17.78%	17.78%	17.78%	17.78%	17.78%	24.49%	17.78%	17.78%	17.78%	17.78%
Orujo-oliva	10.96%	10.96%	10.96%	10.96%	10.96%	10.96%	10.96%	15.10%	0.00%	0.00%	10.96%	10.96%
Alperujo-oliva	43.85%	43.85%	43.85%	43.85%	43.85%	43.85%	43.85%	60.41%	0.00%	0.00%	43.85%	43.85%
Orujo-uva	27.41%	27.41%	27.41%	27.41%	27.41%	27.41%	27.41%	0.00%	82.22%	82.22%	27.41%	27.41%

Figura 18. Contribución diaria de cada tipo de residuo en %. Fuente: Elaboración propia

### 5.3 LA GASIFICACIÓN POR PLASMA

En este proyecto se utiliza la gasificación por plasma para la eliminación de residuos biomásicos y producción de hidrógeno para la generación de energía.

El plasma gas ionizado a alta temperatura, comúnmente conocido como el cuarto estado de la materia, debido a sus diferencias características con los estados líquido, sólido y gas. Consiste en un gas ionizado que se forma a una temperatura de unos 5000°C cuando se encuentra en un campo eléctrico.

La elevada temperatura y el campo eléctrico del plasma disocia las moléculas de la materia en hidrógeno y en otros compuestos simples como agua o monóxido de carbono, obteniendo así un gas denominado gas de síntesis o syngas. [14]

Debido a que los residuos introducidos en el recipiente contienen un parte de materia inorgánica, el sistema está diseñado para que estos componentes inorgánicos se fundan y fluyan hacia fuera de la parte inferior. Estos compuestos inorgánicos fundidos reciben el nombre de *slag* y tienen aplicaciones en la construcción.

#### 5.3.1 SISTEMA CONVERTIDOR DE PLASMA DIRECTO

El sistema de gasificación por plasma a utilizar consta de cinco etapas diferenciadas, las cuales se muestran en la Figura 19. [15]

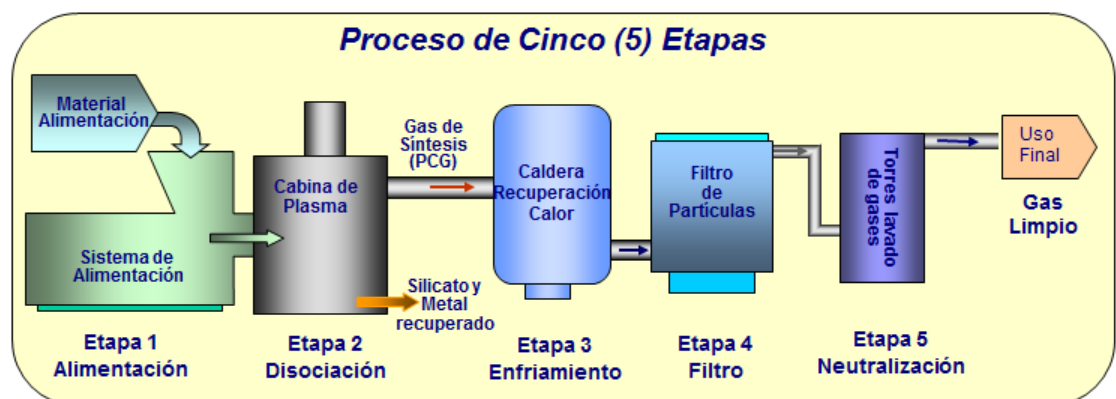


Figura 19. Etapas del sistema de convertidor de plasma directo. Fuente: Materiales Renovados



### **5.3.1.1 Etapa 1: Alimentación**

Etapa en la cual se insertan los residuos en la vasija de plasma, para su posterior disociación en la siguiente etapa. Es necesario realizar una planificación de la introducción diaria de la cantidad y tipo de residuos, la cual se muestra en el apartado 5.2.

La eficiencia del resto del proceso puede mejorarse si se implementan las siguientes medidas antes de la introducción de los residuos al sistema de alimentación:

-Disminución: Proceso que permite disminuir el volumen de los residuos. Esto permite un manejo más sencillo de los mismos, tanto para transportarlos en la planta como para introducirlos en el reactor. Se consigue a través de máquinas trituradoras.

-Separación: Medida que mejora la calidad de los residuos, que dé lugar a una composición más estable del gas de síntesis o syngas. Debido a que llegan a la planta residuos de distinto tipo, para la separación se utilizan separadores magnéticos, separadores ópticos y separadores balísticos.

-Compactación: Proceso que tiene como finalidad aumentar la densidad de los residuos, lo cual optimiza los procesos de transporte, almacenamiento y introducción al reactor. Se convierten en pellets o cubos de volumen reducido que mantienen sus propiedades durante varios meses.

-Reducción de humedad: Proceso que se realiza antes de introducir los residuos al reactor de cara a incrementar el rendimiento del proceso que tiene lugar en la vasija de plasma. El calor utilizado para reducir la humedad de los residuos proviene del gas de síntesis que sale de la vasija. Aproximadamente, se produce una reducción de un 15% de la humedad de los residuos.

-Alimentación: Proceso en el cual se produce la entrada de los residuos a la vasija de plasma. Se realiza a través de una línea automatizada cuyo ritmo de trabajo está regulado por un sistema de control situado en el reactor que calcula la cantidad óptima necesaria de residuos que debe proporcionar la línea en cada momento en el que esté operando el sistema.

### **5.3.1.2 Etapa 2: Disociación**

En esta segunda etapa del proceso se produce la disociación de los residuos introducidos en la vasija de plasma. Los productos de salida en esta etapa son el gas de síntesis o syngas y la materia inerte vitrificada.

Dentro de la vasija de plasma se encuentran dos electrodos a distinto potencial. La diferencia de potencial proviene de la antorcha de plasma, alimentada por un generador de corriente continua. Esto produce el cebado de un arco eléctrico, el cual

eleva la temperatura hasta lograr la necesaria para la disociación de la materia orgánica que se introduce en la vasija.

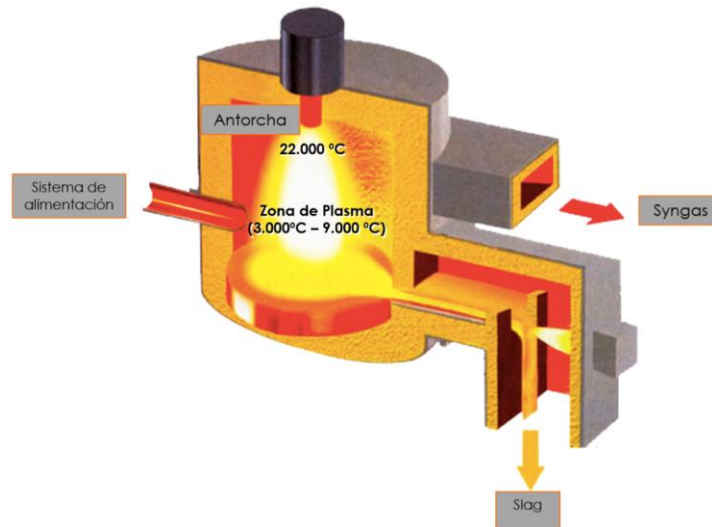


Figura 20. Vasija de plasma. Fuente: Aventum

En el interior de la vasija se constituye un medio oxidante, mediante la inyección de un gas con alto contenido de oxígeno, lo que facilita la ionización del plasma.

En la Tabla 6 aparecen representadas las distintas fases de la materia en función de la temperatura a la que se somete a la misma. La disociación se produce en un rango de temperaturas de entre 2700

Tabla 5. Principales fases que sufre la materia a distintos niveles de temperatura dentro de la vasija. Fuente: [15], elaboración propia

Temperatura	Efecto
538 °C - 727°C	Transición
727°C – 1.727 °C	Rotación
1.727°C – 2.760 °C	Vibración
2.760 °C – 5.260 °C	Disociación
>5.260 °C	Ionización

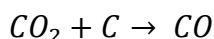
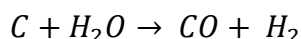
El proceso de disociación tiene lugar en una atmósfera reductora, lo cual hace que dentro del rango de temperaturas que se muestran en la Tabla 5, tengan lugar los siguientes procesos dentro del reactor o vasija de plasma [15]:



-Cracking térmico: Las moléculas más complejas son disociadas en otras más simples dando lugar a hidrógeno y gases de hidrocarburos.

-Oxidación parcial: Es el segundo proceso térmico que tiene lugar dentro de la vasija de plasma debido a las condiciones existentes, las cuales favorecen la formación de CO y adicionalmente cantidades inferiores de CO<sub>2</sub> y agua. Estos dos últimos productos de la reacción de oxidación afectan negativamente al poder calorífico del gas de síntesis, por lo que hay que controlar la cantidad de oxígeno que se introduce en el reactor.

-Reformación: Las moléculas y elementos primarios obtenidos dan lugar a nuevas moléculas, según las siguientes reacciones:



Cabe destacar que la presencia de estos elementos en la salida del reactor disminuye el poder calorífico del gas de síntesis. Por otra parte, el volumen de los RSU se ve reducido en unas 300 veces en la etapa de disociación, en la que los elementos inorgánicos sobrantes se apilan en el fondo de la vasija de plasma, los cuales reaccionan con un baño de arena fundida rica en silicio. El material que se extrae por la parte inferior de la vasija se denomina *slag*. El *slag* es un vidrio basáltico inerte, compuesto, en un 97%, por SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, MgO y no contiene compuestos o elementos tóxicos. [16]

A la salida de la vasija de plasma, el gas de síntesis presenta la composición que se muestra en la Tabla 7.

Tabla 6. Composición del gas de síntesis a la salida de la vasija. Fuente: Aventurem

Componente	% en masa
CO	77,01
CO <sub>2</sub>	6,62
H <sub>2</sub>	4,43
N <sub>2</sub>	7,05
H <sub>2</sub> S	0,07
Ar	1,21
H <sub>2</sub> O	3,59
CH <sub>4</sub>	0,001



### 5.3.1.3 Etapa 3: Enfriamiento

A la salida de la vasija de plasma, tras el proceso de disociación, el gas de síntesis o syngas sale a unos 1.000°C. En la etapa de enfriamiento se reduce su alta temperatura de salida de la vasija. El calor obtenido en esta etapa se aprovecha para generar energía eléctrica a partir de la turbina de un ciclo de Rankine.

### 5.3.1.4 Etapas 4: Filtrado

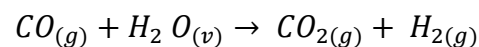
En el gas de síntesis obtenido, compuesto mayoritariamente por  $CO$ ,  $CO_2$  y  $H_2$ , se filtra para eliminar algunos de los componentes que disminuyen la calidad del gas, como el  $Ar$ ,  $H_2S$  o  $N_2$ , por lo que es filtrado a través de un colector cilíndrico o ciclón, mediante centrifugación. De esta manera, las partículas sólidas golpean las paredes del ciclón para ser depositadas finalmente en la parte inferior cónica, eliminadas mediante una tolva. El gas de síntesis limpiado sale por la parte superior del ciclón.

### 5.3.1.5 Etapas 5: Neutralización

El gas de síntesis, a la salida del proceso de filtrado, presenta aún halogenados que deben reducirse para aumentar la calidad del gas. Las etapas de neutralización son:

-Torre de lavado de *Scrubber*: Sistema de lavado en el cual se neutralizan los halogenuros, obteniendo a la salida un gas de síntesis, que posteriormente es filtrado para eliminar los sulfuros, y agua salada en el fondo de la torre.

-Reacción shift: El objetivo de esta etapa es la purificación del hidrógeno presente en el gas de síntesis, a partir de la reducción de la fracción de monóxido de carbono. Para ello, se usa un catalizador férrico en la siguiente reacción:



-Captura del  $CO_2$ : Eliminación del  $CO_2$  presente en el gas de síntesis a partir del paso de gas a través de un baño solvente de ácidos. El  $CO_2$  capturado puede ser de aplicación en otros usos industriales.

### 5.3.2 COMPONENTES DEL SISTEMA CONVERTIDOR DE PLASMA DIRECTO

#### 5.3.2.1 Vasija de plasma

La vasija de plasma o reactor de plasma es donde se disocia la materia orgánica introducida en el sistema debido a las condiciones de presión y temperatura a la que se somete su interior.

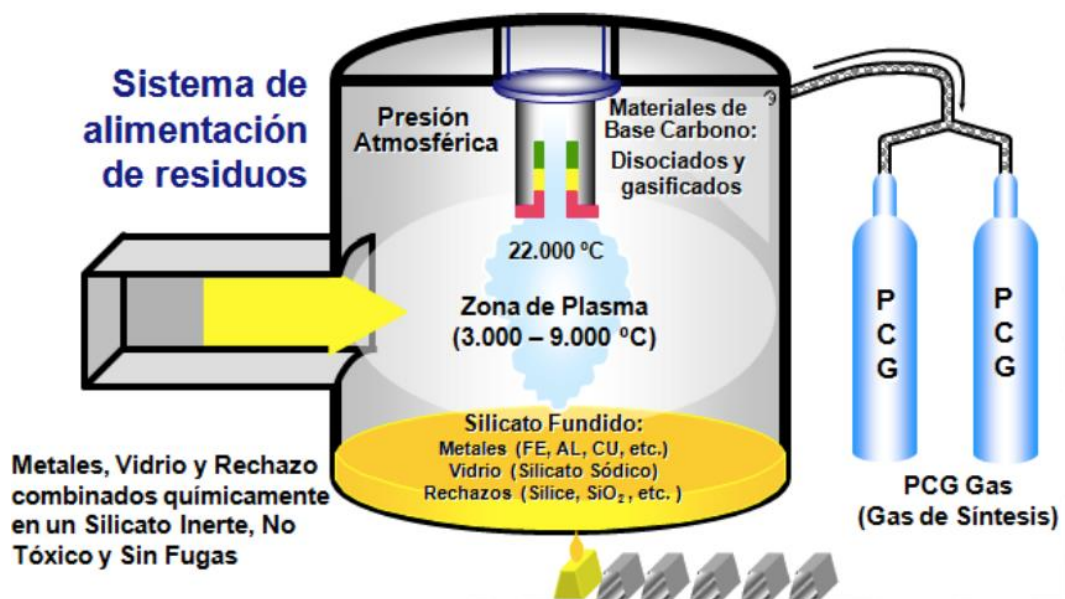


Figura 21. Vasija de plasma. Fuente: Materiales renovados

La vasija se compone de una tapa de acero inoxidable y el cuerpo cilíndrico, ambas partes selladas, con presiones negativas para evitar fugas al introducir nuevos residuos dentro del reactor. Por el diseño en sí de la vasija, el residuo no puede salir sin atravesar la zona del plasma.

El cuerpo cilíndrico de la vasija debe protegerse de las condiciones térmicas tan extremas que se dan en la zona del plasma, por lo que las paredes interiores se revisten de material refractario. [17]

En cuanto al *slag* o silicato fundido, se extrae por la parte inferior de la vasija. Este subproducto puede comercializarse, como se ha mencionado anteriormente, para la industria de la construcción.



### 5.3.2.2 Antorcha de plasma: Antorcha y refrigeración

Genera el arco eléctrico necesario para alcanzar las altas temperaturas que disocian la materia introducida. Dicho arco eléctrico se forma entre un ánodo y un cátodo. Se distinguen dos clases principales de antorchas de plasma:

-Antorcha transferida: Posee una entrada superior de gas y una salida superior de agua. El arco eléctrico se forma entre un ánodo situado en la punta de la antorcha y un cátodo situado en la parte inferior de la vasija de plasma. El haz pasa a través de la materia y es conveniente cuando se necesita fundir materiales sólidos.

-Antorcha no transferida: En este caso, tanto el ánodo y el cátodo se encuentran en la antorcha. La energía se trasfiere por radiación del haz a la materia y es conveniente cuando se necesita elevar la temperatura y vaporizar sólidos, líquidos o gases.

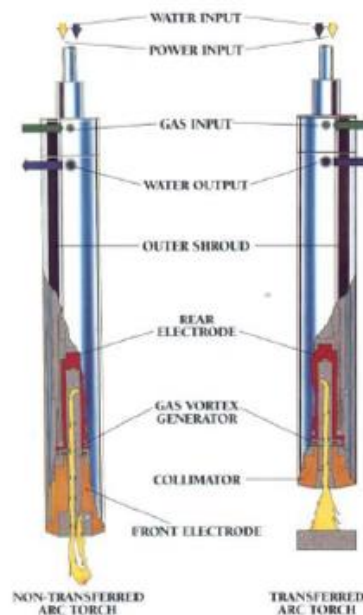


Figura 22. Antorcha de plasma no transferida y transferida. Fuente: Materiales Renovados

Como medida de protección de la misma, se usa un **sistema de refrigeración** con agua desionizada circulando por un circuito cerrado perteneciente a un intercambiador agua-agua unido a otro agua-aire

Finalmente, es necesario un generador eléctrico de corriente continua para alimentar a la antorcha de plasma.



### **5.3.2.3 Sistema de gas de la antorcha**

Sistema encargado de la generación del gas que se introduce en la antorcha y que da lugar al cebado del arco eléctrico. El gas es comúnmente llamado plasmógeno, y entra en un rango de presiones de 6 y 7 bar. Son varias las opciones en cuanto al gas a emplear, destacando el aire por tener un coste reducido.

### **5.3.2.4 Sistema de control**

Sistema de control basado en un Programador Lógico Controlable (PLC), el cual presenta paneles de control remoto tanto de entradas como de salidas. En la planta de gasificación debe existir un puesto de control centralizado y un sistema informático basado en la Interfaz Humana. Durante el funcionamiento de la planta, tiene lugar una monitorización del proceso y se graba en tiempo real.

Así mismo, se produce un análisis continuo del gas de síntesis, de manera que los operadores de la planta se aseguran de que el gas presenta una composición constante y acorde a lo esperado en su salida. Mediante el sistema de control se regula el caudal del sistema de gas de la antorcha.

### **5.3.2.5 Sistema de extracción de los silicatos fundidos**

Como se ha mencionado en el apartado 5.3.2.1, el *slag* se extrae de la parte inferior de la vasija de plasma de dos formas:

- Sistema de extracción continua a través de un sistema mecánico o tornillo sin fin.
- Sistema de extracción lateral por inclinación de cargas. La salida de los silicatos fundidos no se produce de manera continua.

En este proyecto, se opta por un sistema de extracción continua de los silicatos fundidos, para evitar detener el proceso y ganar así eficiencia.

Una vez extraído, se vitrifica con agua, formándose fragmentos lisos de tamaño reducido, facilitando su posterior manipulación. Como se ha mencionado con anterioridad, tiene especial interés su aplicación en la industria de la construcción.

### 5.3.3 CARACTERÍSTICAS DEL GAS DE SÍNTESIS

La composición en volumen del gas de síntesis extraído es de cerca de un 80% de monóxido de carbono ( $CO$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ). Cabe destacar que independientemente del tipo de residuo introducido en el sistema convertidor de plasma directo, la composición del gas de síntesis permanece prácticamente constante, como se observa en la Figura 23.

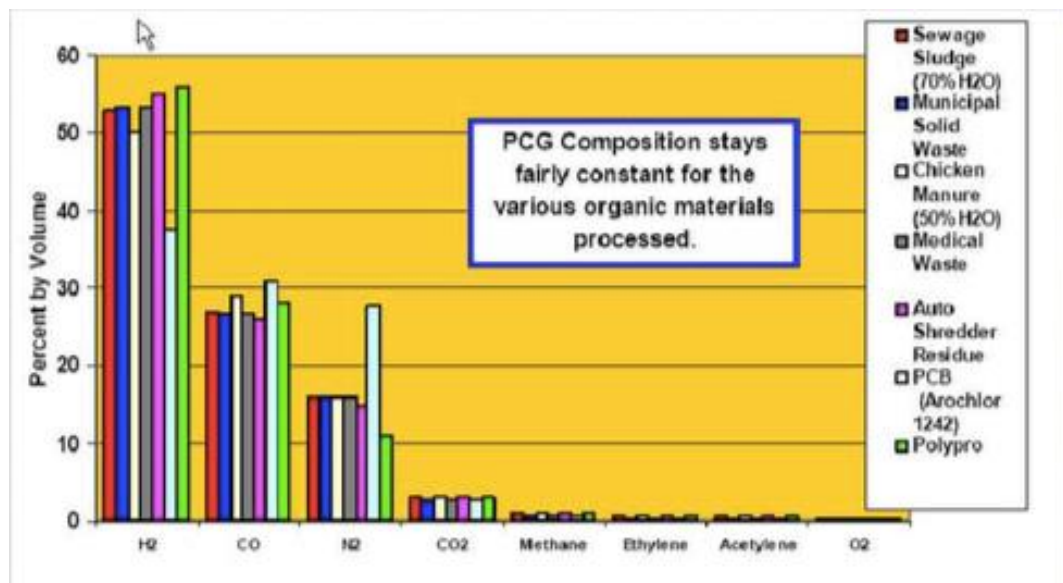


Figura 23. Porcentaje en volumen de los distintos componentes del gas de síntesis en función del tipo de residuo de entrada. Fuente: Materiales Renovados

Esto hace al proceso de gasificación del plasma por sistema de convertidor de plasma directo especialmente interesante, ya que no es necesario reajustar las distintas etapas del proceso en función del residuo que se introduzca, ya que en el diseño de esta planta se introduce residuos sólidos urbanos y residuos agrícolas de distinta naturaleza.

### 5.3.4 VENTAJAS DEL SISTEMA CONVERTIDOR DE PLASMA DIRECTO

Esta tecnología presenta las siguientes ventajas:

- Permite un tratamiento sostenible de los residuos, obteniendo energía eléctrica y productos utilizables o comercializables, como el *slag* y el gas de síntesis, a partir de fuentes residuales renovables.
- Este proceso ocasiona un mínimo impacto ambiental, sin emisiones de elementos nocivos a la atmósfera o almacenamiento en vertedero.



- Proceso altamente eficiente, con entre 1.400 y 2.400 kWh/ton, lo cual supone alrededor de un 75% de generación bruta. [15]
- Recurso gestionable y de alta disponibilidad, pudiendo operarse cerca de 8.000 horas anuales.
- Flexibilidad en cuanto a los tipos de residuos introducidos en la planta, tanto residuos sólidos urbanos como industriales.
- Tecnología compatible con otras fuentes de generación, como un ciclo combinado aprovechando la energía térmica residual a la salida del reactor.
- Reducción del coste por emisiones atmosféricas, vertidos o producción de residuos potencialmente peligrosos.

### **5.3.5 BALANCE ENERGÉTICO DEL PROCESO**

---

Una vez explicado el proceso, y habiendo elegido el módulo de 125 toneladas diarias para un factor de utilización de la planta de 8.000 horas al año, se muestra el balance energético del proceso en la Figura 24, según las consideraciones del apartado 5.2.

En primer lugar, se produce la entrada de residuos en la planta, a los cuales se les aplica un proceso de secado. Una vez secos, se introducen en la vasija de plasma, la cual gracias a la antorcha da lugar a el gas de síntesis sin purificar y a silicatos fundidos. A continuación, se procede al enfriamiento del gas de síntesis, en el que el calor perdido se aprovecha en un ciclo de Rankine. El gas de síntesis enfriado es finalmente limpiado a través de los procesos de filtración y neutralización.

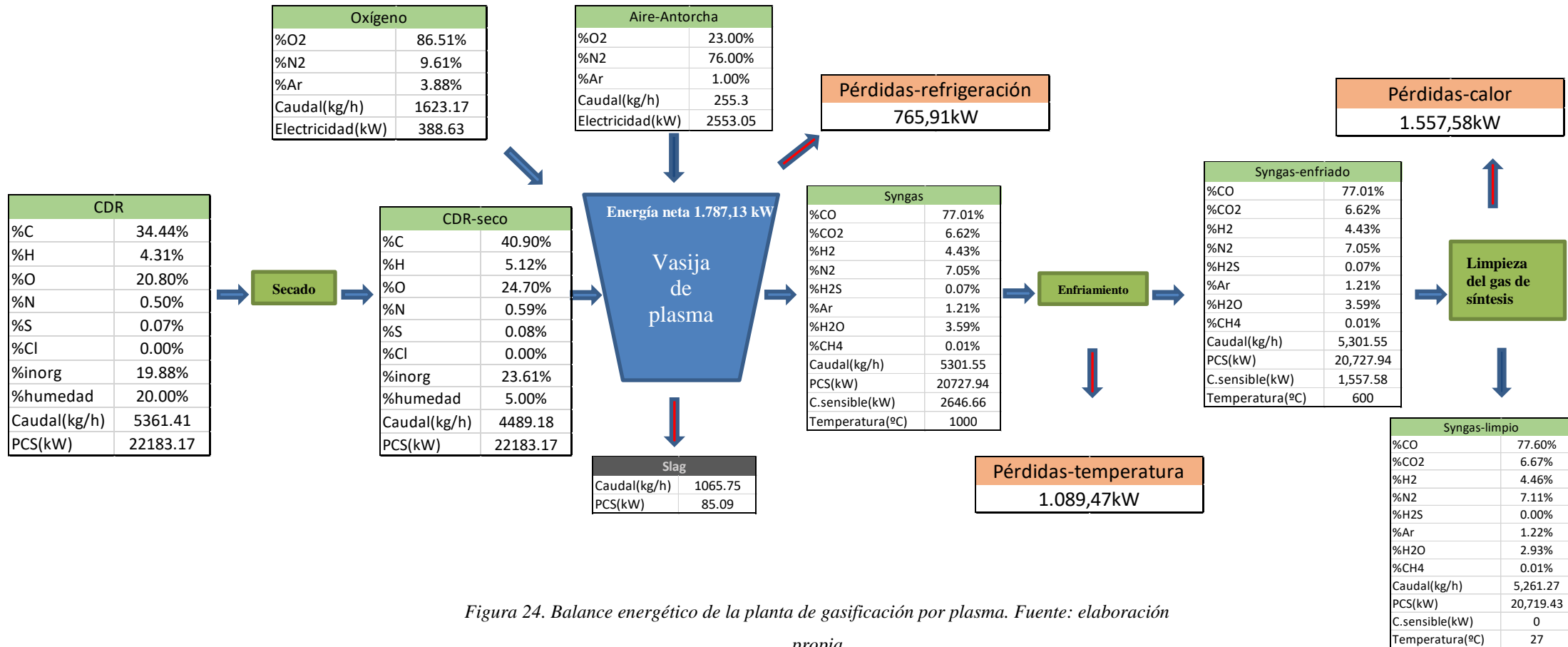


Figura 24. Balance energético de la planta de gasificación por plasma. Fuente: elaboración propia



La vasija de plasma se alimenta con una energía total de 3707,59 kW en la entrada de oxígeno y aire de la antorcha, incluyendo la refrigeración de esta. El gas de síntesis obtenido a la salida de la vasija de plasma posee un gran valor energético, concretamente de 5,6 veces la energía consumida en el proceso.

$$\frac{\text{Valor de energético del gas de síntesis}}{\text{Energía consumida en el proceso}} = \frac{20.727,94 \text{ kW}}{3.707,59 \text{ kW}} = 5,6$$

Por tanto, el calor sensible del gas de síntesis es aprovechado para la generación de energía eléctrica a partir de un ciclo de Rankine básico y, a su vez, el calor residual del ciclo puede ser empleado para el secado de los residuos que entran en el sistema convertidor de plasma y disminuir así la proporción de humedad un 5%.

### 5.3.6 SISTEMA DE APROVECHAMIENTO TÉRMICO: CICLO DE RANKINE

El enfriamiento del gas de síntesis a la salida del gas de síntesis es necesario para su posterior filtrado y limpieza. Como se ha mencionado en el apartado 5.3.5, el sistema aprovecha el calor sensible del gas de síntesis para la generación de energía eléctrica a partir de un ciclo de Rankine básico. La Figura 25 muestra un esquema del ciclo empleado.

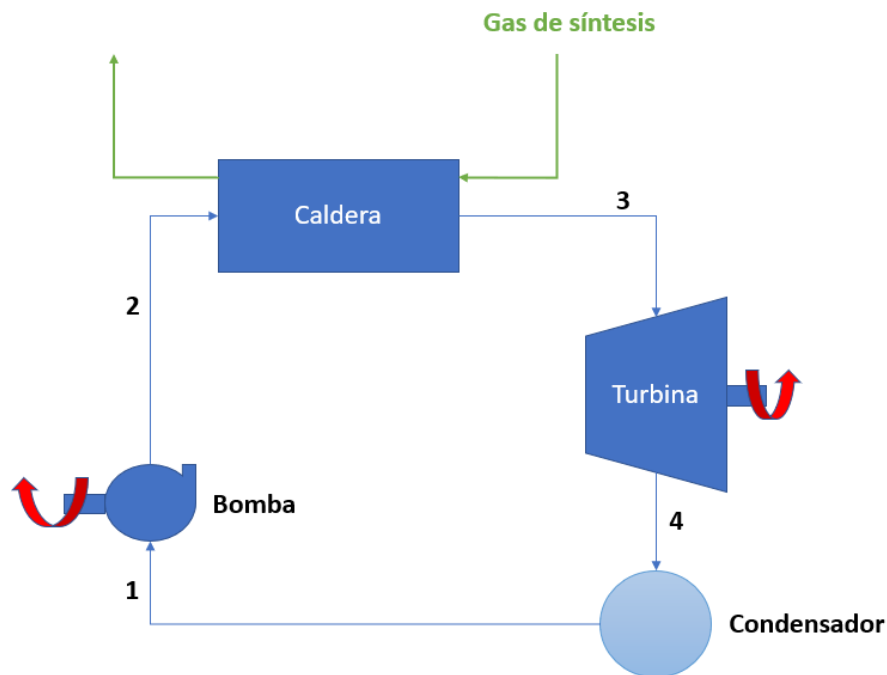


Figura 25. Esquema del ciclo de Rankine. Fuente: elaboración propia



Los siguientes apartados describen el funcionamiento de los distintos elementos y las condiciones en cada punto del ciclo, resolviendo el ciclo termodinámico.

### 5.3.6.1 Caldera de recuperación e intercambio de calor.

En la caldera de recuperación de calor se ponen en contacto dos fluidos pertenecientes a dos circuitos diferentes: el circuito del gas de síntesis perteneciente a el sistema convertidor de plasma directo y un circuito de agua. La dirección del caudal es opuesta en ambos circuitos, para lograr así una mejor transferencia térmica. La presión de trabajo en la caldera de recuperación es de 50 bar. Por otra parte, el rendimiento en el intercambio de calor en la caldera se ha supuesto del 90%, debido a las ineficiencias presentes.

El gas de síntesis procedente de la vasija de plasma entra en la caldera de recuperación a 1000°C enfriándose hasta 600°C, para su posterior filtrado y limpieza. Durante el enfriamiento se liberan 1089,47 kW, aprovechados por el circuito de agua. El agua a la salida de la caldera se encuentra a 600°C como vapor sobrecalentado.

El calor cedido por el gas de síntesis al circuito de agua se calcula como:

$$\dot{Q} = 0,9 * 1089,47 = 980,52 \text{ kW}$$

Por tanto, las condiciones del agua a la salida de la caldera (3) son las que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 7. Condiciones del agua a la entrada y salida de la caldera. Fuente: elaboración propia

	Estado	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
3	Vapor sobrecalentado	50	600	3666,8

Después de su paso por la caldera, el agua se dirige a la turbina para la producción de electricidad a través de un generador.

Se calculará la potencia generada en la turbina resolviendo el ciclo de Rankine a partir de los estados de cada punto para, finalmente, hallar el flujo del circuito de agua gracias a el dato proporcionado por *Aventum* de pérdidas de temperatura, y obtener así la potencia eléctrica generada en la misma.





### 5.3.6.2 Turbina para la producción de electricidad

El vapor sobrecalentado entra en la turbina, expansionándose para la producción de energía eléctrica. En este proceso el fluido de trabajo pasa de vapor sobrecalentado a vapor húmedo.

Sabiendo que la presión a la salida de la turbina es de 0,08 bar, podemos conocer la temperatura y entalpía en el punto 4.

Punto 3: Tablas de vapor sobrecalentado

$$h_3 = 3666,02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$
$$s_3 = 7,2605 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

Punto 4 (en zona de mezcla a 0,08 bar): Tablas de vapor húmedo

$$s_3 = s_4$$
$$h_4 = h_{f4} + x_4 * h_{fg}$$

Calculamos el título en el punto 4:

$$s_{f4} = 0,5925 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$
$$s_{fg4} = 8,2273 - 0,5925 = 7,63 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$
$$s_3 = s_{f4} + x_4 * s_{fg} \rightarrow x_4 = \frac{7,2605 - 0,5925}{8,2273 - 0,5925} = 0,87$$
$$x_4 = 87,33 \%$$

Por tanto, la entalpía en el punto 4 es:

$$h_4 = h_{f4} + x_4 * h_{fg} = 2.263,92 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Con lo que el trabajo en la turbina es:

$$w_T = h_3 - h_4 = 3.666,02 - 2.263,92 = 1.402,28 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$



Tabla 8. Condiciones del agua a la entrada y salida de la caldera. Fuente: elaboración propia

	Estado	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
3	Vapor sobrecalentado	50	600	3.666,8
4	Vapor húmedo	0,08	41,51	2.263,92

### 5.3.6.3 Condensador

En el condensador situado entre los puntos 4 y 1, se desprende el calor usado para reducir la humedad presente en los residuos que se introducen en el sistema convertidor de plasma. En este paso del ciclo de Rankine, el agua en vapor húmedo pasa a estado de líquido saturado.

Tabla 9. Condiciones del agua a la entrada y salida de la caldera. Fuente: elaboración propia

	Estado	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
4	Vapor húmedo	0,08	41,51	2.263,92
1	Líquido saturado	0,08	41,51	173,84

El calor extraído en el condensador que se emplea para el secado de los residuos, por unidad de masa, y considerando un rendimiento del 90% viene dado por la siguiente ecuación:

$$q_{cond} = h_4 - h_1 = 2.263,92 - 173,84 = 2.090,08 \frac{kJ}{kg}$$

### 5.3.6.4 Bomba

Cuando el flujo de líquido saturado llega a la bomba, sufre una compresión isentrópica, obteniendo a la salida líquido comprimido.

Para conocer la entalpía del punto 2, que se encuentra a la presión de 50 bar de trabajo de la caldera, en primer lugar, calculamos el trabajo de la bomba a partir de la diferencia de presión:



$$w_{bomba} = v_{f1} * (P_2 - P_1) = 1,0085 * 10^{-3} \frac{m^3}{kg} * (50 - 0,08) bar * \frac{1 * 10^2 kJ}{bar * m^3}$$

$$= 5,03 \frac{kJ}{kg}$$

Por tanto, como  $w_{bomba} = h_2 - h_1$  :

$$h_2 = 178,87 \frac{kJ}{kg}$$

Tabla 10. Condiciones del agua a la entrada y salida de la caldera. Fuente: elaboración propia.

	Estado	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
1	Líquido saturado	0,08	41,51	173,84
2	Líquido comprimido	50	41,66	178,87

### 5.3.6.5 Flujo másico

Conociendo el estado de todos los puntos del ciclo de agua podemos calcular el caudal de agua que circula por el mismo.

En primer lugar, se obtiene el calor suministrado en la caldera por unidad de masa:

$$q_{caldera} = h_3 - h_2 = 3.487,15 \frac{kJ}{kg}$$

Por tanto, el caudal de agua viene dado por:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{h_3 - h_2} = \frac{980,52 \frac{kJ}{ks}}{3.487,15 \frac{kJ}{kg}} = 0,2811 \frac{kg}{s} = 1.011,96 \frac{kg}{h}$$

### 5.3.6.6 Trabajos netos del proceso

Una vez conocido el caudal del circuito de agua podemos hallar el trabajo neto de todos procesos que tienen lugar en el ciclo de Rankine, así como el rendimiento total del proceso

#### Trabajo neto de la turbina

$$W_{turbina} = \dot{m} * w_T = 0,2811 \frac{kg}{s} * 1402,28 \frac{kJ}{kg} = 394,18 kW$$



Trabajo neto de la bomba

$$W_{turbina} = \dot{m} * w_{bomba} = 0,2811 \frac{kg}{s} * 5,03 \frac{kJ}{kg} = 1,41 kW$$

Potencia neta intercambiada en el condensador

$$Q = \dot{m} * q_{cond} = 0,2811 \frac{kg}{s} * 2.090,08 \frac{kJ}{kg} = 587,52 kW$$

Trabajo neto del proceso

$$W_{neto} = W_{turbina} - W_{bomba} = 394,18 - 1,41 = 392,77 kW$$

Rendimiento total del ciclo de Rankine

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_{neto}}{\dot{Q}_{caldera-circuito\ de\ agua}} = 40\%$$

Obtenemos un rendimiento del 40%, normal en un ciclo simple de Rankine, lo cual es aceptable considerando que la finalidad de este subsistema es aprovechar el calor cedido por el gas de síntesis a la salida de la vasija de plasma. La energía generada por la turbina va a inyectarse en la microrred, por tanto, cuando la planta de gasificación por plasma se encuentre operativa se estará produciendo energía eléctrica de manera constante gracias a la solución de aprovechamiento energético implantada con el ciclo de Rankine. Sabiendo que la planta opera 8.000h anuales, la energía eléctrica producida anualmente por el sistema de aprovechamiento térmico es:

$$E_{ciclo} = W_{turbina} * 8.000h = 394,18 kW * 8.000 h = \mathbf{3.153,44 MWh}$$

Un porcentaje de la energía eléctrica generada es empleada para la operación de la planta de gasificación por plasma, como se expone a continuación.

### **5.3.7 ENERGÍA TÉRMICA CEDIDA PARA EL SECADO DE LOS RESIDUOS**

---

En el capítulo 5.3.1 se han expuestos las distintas etapas del sistema convertidor de plasma de la planta a diseñar. En este apartado, se calcula la energía térmica o calor aportado a los residuos de entrada a la vasija de plasma. Como se muestra en el balance energético del apartado 5.3.5, los residuos de entrada se someten a un secado que reduce su humedad de un 20% hasta un 5%.



La energía térmica suministrada para el secado de los residuos de entrada viene dada por el caudal de entrada de los residuos y el calor latente del agua, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{secado}} = \dot{m}_{\text{humedad}} * L_{\text{agua}}$$

Sabiendo que:

$$\dot{m}_{\text{humedad}} = 5.361,41 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * (0,2 - 0,05) = 804,21 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$L_{\text{agua}} = 2.255 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{\text{secado}} = 804,21 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 2.255 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1.813.496,93 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 503.74 \text{ kW}$$

La energía térmica de secado suministrada a el flujo de residuos de entrada procede del intercambiador de calor situado en el condensador del ciclo de aprovechamiento térmico diseñado en el capítulo 5.3.6. El condensador del ciclo intercambia una potencia de 587,52 kW, superior a la energía de secado necesaria, por lo que no es necesario instalar sistemas adicionales para reducir la humedad de los residuos introducidos a la planta.

### 5.3.8 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

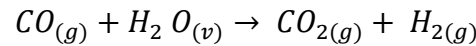
Una vez neutralizado el gas de síntesis en el *Scrubber*, se procede a el aumento de la proporción de hidrogeno presente en el mismo, gracias a una reacción shift, como se ha explicado en el apartado 5.3.1.5. Se obtiene así el gas de síntesis limpio, cuya composición se muestra en la Tabla 12.

Tabla 11. Composición del gas de síntesis limpio, antes de la reacción shift. Fuente: Aventure y elaboración propia

Gas de síntesis limpio	
% CO	77,60%
% CO2	6,67%
% H2	4,46%
% N2	7,11%
% H2S	0,00%
% Ar	1,22%
% H2O	2,93%
% CH4	0,01%



En la reacción, se convierte en hidrógeno y dióxido de carbono, tal como se muestra en la siguiente reacción:



El hidrogeno obtenido en la reacción shift viene dado por:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{hidrogeno-shift} &= \frac{\dot{m}_{CO}}{MM_{CO}} * MM_{H_2} = \frac{77,6}{100} * 5.261,27 \frac{kg}{h} * 2 \frac{kg}{kmol} \\ &= 289,26 \frac{kg}{h}\end{aligned}$$

Añadiendo el hidrógeno presente en el gas de síntesis antes de la reacción Shift:

$$\dot{m}_{hidrogeno-previo} = \frac{4,46}{100} * 5.261,27 \frac{kg}{h} = 236,65 \frac{kg}{h}$$

Obteniendo así un flujo total de hidrógeno de:

$$\dot{m}_{H_2} = \dot{m}_{hidrogeno-shift} + \dot{m}_{hidrogeno-previo} = 289,26 + 236,65 = 523,91 \frac{kg}{h}$$

Por tanto, con un caudal de entrada de residuos a la planta de gasificación de 5.361,41 kg/h se obtiene un caudal de 523,91 kg/h de hidrógeno.

### 5.3.9 OPERACIÓN DE LA PLANTA DE GASIFICACIÓN. RESUMEN

---

Los residuos sólidos urbanos y residuos agrícolas introducidos en la planta de gasificación por plasma dotan a la microrred de gestionabilidad, pudiendo convertirse en hidrógeno, el cual se almacena y se utiliza para la producción de energía eléctrica según los requerimientos energéticos de la microrred en cada momento. Dichos residuos también pueden ser almacenados previamente, procesándose de manera óptima en la planta, como se ha mostrado en el apartado 5.2. El sistema convertidor de plasma permite obtener un caudal de hidrogeno a partir de un caudal de entrada de residuos. La Tabla 13 muestra los caudales de entrada y salida, así como la energía eléctrica generada a partir del ciclo de aprovechamiento térmico.



Sistema de recuperación energética de residuos

---

*Tabla 12. Caudal de entrada y salida a la planta y producción eléctrica del ciclo de Rankine.*

*Fuente: Elaboración propia*

<b>Caudal de entrada de residuos (kg/h)</b>	<b>Caudal de salida de hidrógeno (kg/h)</b>	<b>Producción energética ciclo de Rankine (MWh)</b>
5.361,41	523,91	3.153,44





## Capítulo 6 PILAS DE COMBUSTIBLE

En el capítulo 5 se ha presentado un sistema eficiente de tratamiento de los residuos, a partir del cual se evita el almacenamiento de estos en vertederos, convirtiendo estos residuos en un gas de síntesis con utilidad para diferentes industrias. En este proyecto se va a emplear el hidrógeno presente en el gas de síntesis obtenido en la planta de gasificación por plasma de la biomasa para la producción de energía eléctrica a partir de pilas de combustible. Esta aplicación dota de gestionabilidad energética a la microrred, debido a que la generación de energía a partir de las pilas de combustible no depende de las condiciones meteorológicas u otros factores externos, como es el caso de otras fuentes de generación no renovables, como la energía fotovoltaica o la eólica, las cuales están condicionadas a las condiciones medioambientales.

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que transforman la energía química del combustible en energía eléctrica, sin necesidad de ningún tipo de combustión. Es, por tanto, un proceso de generación de energía limpio y sin emisiones propias de otras fuentes de generación.

El concepto de hidrógeno como vector energético se refiere a que no es posible su extracción directa del medio ambiente, sino que es necesario un sistema que posibilite su extracción. Usar hidrógeno como combustible ofrece la posibilidad de almacenamiento energético, lo que convierte a las pilas de combustible en una fuente de energía gestionable. En la actualidad, cuentan con un gran potencial de desarrollo y aplicación en diferentes usos, tanto aplicaciones estacionarias como aplicaciones portátiles o de transporte. El gran poder calorífico del hidrógeno con respecto a otros combustibles es su principal atractivo, unido a que es un combustible de emisión cero.

Tabla 13. Poder calorífico de distintos combustibles. Fuente: *idae*

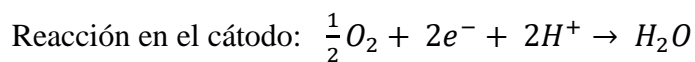
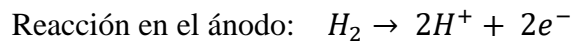
Combustible	Poder calorífico superior
Hidrógeno	142 MJ/kg
Gasolina	47 MJ/kg
Diésel	46 MJ/kg
Metanol	23 MJ/kg
Butano	49 MJ/kg

### 6.1.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Las pilas de combustible se configuran a partir de un apilamiento de células individuales, en las cuales hay un cátodo y un ánodo, donde se oxida y reduce el hidrógeno; y un electrolito, el cual permite el intercambio de iones que se generan a partir de las reacciones de oxidación y reducción.

El combustible, que puede ser hidrógeno o metanol, alimenta al ánodo, mientras que el cátodo se alimenta del aire. Un catalizador, el electrolito, disocia el hidrógeno en electrones y protones, que son dirigidos al cátodo, donde generan agua y calor al reaccionar con el oxígeno procedente del aire.

En los dos electrodos ocurren distintas reacciones:



Ambas reacciones dan lugar a la reacción general del proceso:

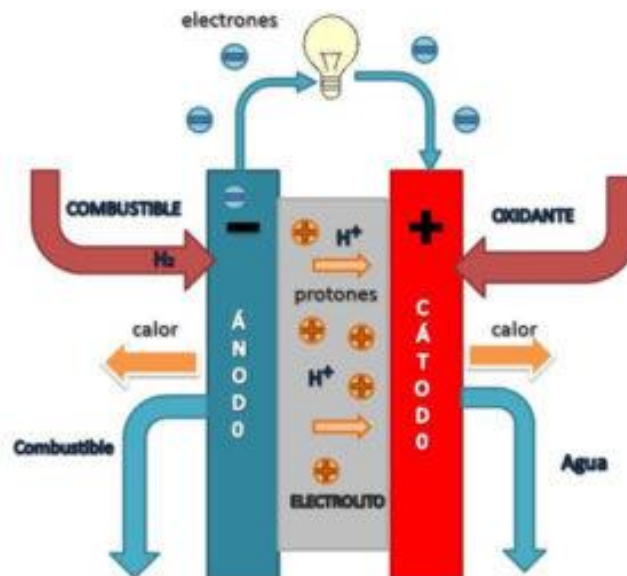
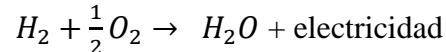


Figura 26. Esquema de una pila de combustible de membrana polimérica. Fuente: [17]



Como se observa en la Figura 17, el electrolito conecta el ánodo con el cátodo. Una función muy relevante de este catalizador es permitir el flujo de los iones apropiados entre el ánodo y el cátodo, pero evitar el paso de otro tipo de sustancias desfavorables para el correcto desarrollo de la reacción

## 6.1.2 TIPOS DE PILA DE COMBUSTIBLE

---

La clasificación de los distintos tipos de pilas de combustible atiende al tipo de catalizador o electrolito utilizado por la pila. El tipo de electrolito es el que da el nombre a cada tipo de pila, así como dar lugar a distintos tipos de características.

Para escoger las pilas de combustible más adecuadas para la microrred en Almendralejo, se analizan las ventajas y desventajas de cada tipo, así como sus aplicaciones frecuentes

La Tabla 15 muestra los tipos de pilas de combustible más extendidos en su estado de desarrollo actual. En cada fila de la tabla se describe el tipo de electrolito, el rango de temperatura en que opera, sus usos más frecuentes en la industria y, finalmente, ventajas y desventajas.



*Tabla 14. Tipos de pilas de combustible. Fuente: elaboración propia*

Tipo	Electrolito	Rango térmico de operación (°C)	Aplicaciones frecuentes	Ventajas	Desventajas
<b>Membrana de intercambio de protones (PEMFC)</b>	Polímero sólido	<100	Aplicaciones estacionaria y no estacionaria  Uso residencial	Poco peso, tamaño y coste  Arranque rápido  Opera a baja temperatura	Alto coste de catalizadores Eficacia menor que otro tipo de pilas Sensible a impurezas en el hidrógeno
<b>Alcalina (AFC)</b>	Hidróxido potásico	90-100	Misiones espaciales  Industria militar	Rendimiento elevado  Alta velocidad de reacción catódica	Posible reacción del electrolito con CO2 dando lugar a impurezas
<b>Ácido fosfórico (PAFC)</b>	Ácido fosfórico líquido	150-220	Se emplean para una generación mayor de 400kW y se emplean en estaciones fijas: hoteles, hospitales, cámaras frigoríficas u oficinas	Alta eficiencia en cogeneración  Acepta H2 con impurezas	Gran tamaño  Alto coste de inversión
<b>Carbonatos fundidos (MFCF)</b>	Solución líquida de litio, sodio y potasio	650	Cogeneración y generación de electricidad estacionarias. Para potencias superiores a 1MW	Bajo nivel de ruido	Gran tamaño  Alto coste de inversión
<b>Óxidos sólidos (SOFC)</b>	Óxido de circonio con ytrio	850-1.000	Cogeneración y generación de electricidad estacionarias. Para potencias superiores a 1MW  Uso residencial	Alta eficiencia	Gran tamaño  Temperatura muy elevada



---

### 6.1.3 ELECCIÓN DE LA PILA DE COMBUSTIBLE Y DIMENSIONAMIENTO

---

Después de presentar las características de los distintos tipos de pilas de combustible, es necesario escoger el más adecuado para la microrred. Entre las características necesarias, destaca la necesidad de que sea para uso estacionario y que este caracterizada por un arranque rápido, de manera que sea capaz de proporcionar la demanda necesaria de Almendralejo cuando los recursos no gestionables presentes en la zona no se encuentran disponibles. Por otra parte, la duración y eficacia de las pilas de combustible es un factor relevante que considerar.

Por tanto, según los tipos de pilas presentados en el apartado 6.1.2, escogemos pilas tipo PEMFC, las cuales cuentan con gran penetración en el mercado, son robustas y presentan un rendimiento mayor del 40%. Concretamente, se han escogido las pilas de combustible del fabricante *Ballard*, de 1MW de potencia nominal por pila y una eficiencia del 40%. Este modelo de pila presenta un consumo de hidrógeno de 63kg/h a potencia nominal y operan a una temperatura de menos de 100°C. En los Anejos de la Parte IV del proyecto se muestra el catálogo de la pila escogida.

En el apartado 4.2 se ha mostrado que la demanda máxima registrada en 2016 en Almendralejo es de 27,39 MVA. Por tanto, se dimensiona el conjunto de pilas de combustible para tener capacidad de suplir el pico de demanda cuando no existen otras tecnologías de generación disponibles, es decir, 30 MW.

Por tanto, se necesitan:

$$\frac{\text{Potencia nominal del conjunto (MW)}}{\text{Potencia nominal de la pila (MW)}} = \frac{30 \text{ MW}}{1 \text{ MW}} = 30 \text{ unidades}$$

Sabiendo, por el catálogo de *Ballard*, que cada pila consume 63kg/h con una eficacia del 40%, para suministrar un 1MW de potencia cada pila consume:

$$\frac{63 \text{ kg/h}}{0,40} = 157,5 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ para suministrar } 1 \text{ MW de potencia}$$

Por tanto, para operar el centro de generación de la planta de gasificación por plasma a máxima potencia, será necesario el siguiente caudal de hidrógeno:

$$30 \text{ MW} * 157,5 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 4275 \text{ kg/h}$$



---

## 6.1.4 ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO

---

La gran ventaja que permite el hidrógeno como fuente de energía es la posibilidad de almacenamiento, lo que convierte a este recurso en gestionable. Esto hace que durante las horas en las que la generación es cubierta por otras fuentes de energía, el hidrógeno se almacena para utilizarlo cuando sea necesario en las pilas PEMFC seleccionadas. Existen distintas tecnologías de almacenamiento, las cuales se exponen a continuación.

### 6.1.4.1 Almacenamiento de hidrógeno licuado

El hidrógeno sale del sistema convertidor de plasma en estado gaseoso, por lo que para realizar el cambio a estado líquido es necesario disminuir su temperatura hasta cerca de  $-250^{\circ}\text{C}$ . Una gran desventaja de este método son las pérdidas por evaporación de hidrógeno. Se usan tanques criogénicos de alto coste para mantener el hidrógeno licuado a la temperatura adecuada.

### 6.1.4.2 Almacenamiento de hidrógeno como gas presurizado

Se consigue almacenando el hidrógeno a altas presiones, entre los 300 y 600 bares. Presenta baja densidad energética, de 0,5 a 2 MWh/m<sup>3</sup>. Resulta ineficiente en aplicaciones a gran escala y es más frecuente en sistemas no estacionarios, como vehículos. Las densidades energéticas obtenidas oscilan los 6 MWh/m<sup>3</sup>

### 6.1.4.3 Almacenamiento en estado sólido con hidruros metálicos

Se usan hidruros metálicos con alta capacidad de enlace a través de Fuerzas de Van der Waals al reaccionar con el hidrógeno. Los metales, bajo altas presiones de hidrógeno, absorben los átomos de este en su estructura cristalina. La liberación del hidrógeno para la posterior generación de energía se consigue con una disminución de la presión exterior. Consiste en un método seguro, pero de alto coste. No requiere un alto volumen para almacenar gran cantidad de hidrógeno.

De los tres tipos de almacenamiento presentados, se opta por esta opción al parecer la tecnología más segura. Se escoge el fabricante *Ariema* y su tanque de 7000L capaces de almacenar 54kg de hidrógeno. [19]

Por tanto, serán necesarios:

$$n^{\circ} \text{ tanques} = \frac{\text{Caudal máximo de hidrógeno}}{\text{Capacidad de un tanque}} = \frac{4.275 \text{ kg/h}}{54 \text{ kg}} = 80 \text{ tanques}$$



Este número de tanques permite suplir toda la demanda en caso de la no disponibilidad del resto de tecnologías de la microrred.





# *Parte II ANÁLISIS*

## *ENERGÉTICO*



## Capítulo 1 CONFIGURACIÓN DE LA MICRORRED

Para realizar un estudio teórico del funcionamiento de la microrred se ha optado analizar dos escenarios: un día de invierno y un día de verano. Se ha estimado una curva de demanda típica para cada día, al no disponer de los datos exactos de una curva de demanda real en Almendralejo.

Para estimar la generación fotovoltaica se utiliza la curva típica de un día de verano de una instalación fotovoltaica en España, la cual se muestra en la Figura 27.

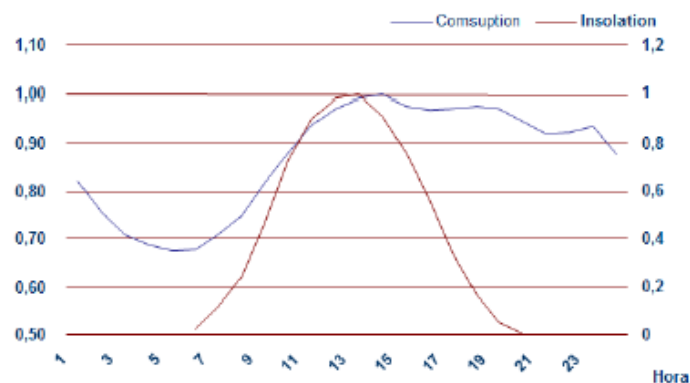


Figura 27. Curva típica de generación fotovoltaica un día soleado de verano en España. Fuente:

REE

En un día soleado de verano se va a suponer que la franja de horas de sol es de 7:00 a 21:00 y que en invierno es de 9:00 a 19:00. La tecnología solar fotovoltaica es un recurso inmediato y no gestionable.

Por otra parte, el sistema de aprovechamiento térmico o ciclo de Rankine dimensionado en el apartado 5.3.6 de la Parte I, junto con las pilas de combustible, son las fuentes de generación bases de la microrred. Proporcionan un suministro gestionable y continuo siempre que sea necesario.

Cuando no es necesaria la generación a partir de las pilas de combustibles para cubrir la demanda, el hidrógeno se almacena para ser aprovechado en otro momento. En el supuesto de no poder cubrir la demanda con las tecnologías disponibles, se suplirá la demanda a partir de la red eléctrica nacional, conectada a la microrred a partir de la subestación de 132 kV, como se ha mostrado en el esquema de configuración de la microrred del apartado 4.3 de la Parte I.



Finalmente, es importante mencionar que en el análisis energético del proyecto se ha considerado que el parque solar fotovoltaico SPEX esta teóricamente al completo servicio de la microrred, sin tener en cuenta la demanda de Mérida y alrededores. Esto se ha considerado para simplificar el caso de estudio y tener en cuenta este parque solar como uno teórico de potencia similar que podría ser instalado para uso exclusivo de la microrred.

## ***1.1 PRIMER CASO DE ESTUDIO: DÍA DE VERANO***

---

Para este primer caso de estudio, se ha seleccionado el día 6 de septiembre, ya que como se expuso en el apartado 4.2 de la Parte I del proyecto, en 2016 según Endesa Distribución el día en el que se registró el pico de demanda en Almendralejo fue el 6 de septiembre con una potencia máxima de 27,39 MVA, por lo que en este caso se aproxima la demanda máxima a 30 MW. Cabe recordar que en Almendralejo la punta de demanda siempre es en septiembre debido al consumo de cooperativas y bodegas en la época de vendimia. Para este día, se considera que los niveles de irradiación solar se encuentran aún en los niveles propios de julio y agosto, cerca de  $7 \text{ kWh/m}^2$ , por lo que la energía fotovoltaica puede alcanzar su producción nominal en las horas pico.

La planta de gasificación por plasma de biomasa funciona 21 horas al día (alrededor de 8.000 horas anuales), por lo que considerando que, en este caso de estudio de demanda máxima, las pilas de combustible pueden suplir la capacidad máxima de almacenamiento más la producción de hidrógeno durante las 21 horas del día en cuestión, es decir:

$$4.275 \text{ kg} + 523,9 \text{ kg/h} * 21\text{h} = 15.276 \text{ kg}$$

Sin embargo, debido a la disponibilidad del resto de tecnologías, no se gasta todo el hidrógeno disponible, si no que se almacena para tener disponibilidad en días posteriores, ante la incertidumbre de disponer o no de energía solar fotovoltaica, debido a la variabilidad las condiciones climáticas. Es, por tanto, conveniente utilizar el hidrógeno para aplanar la curva de demanda y cubrir parte de ella con la energía procedente de la red, almacenando así hidrógeno para asegurar su disponibilidad en caso de falta de otras tecnologías. La Figura 28 muestra el mix de generación para el caso de estudio propuesto en este apartado, en el cual disponemos de energía del parque fotovoltaico SPEX, del ciclo de Rankine de la planta de gasificación por plasma de biomasa, de las pilas de combustible y de la red eléctrica española.

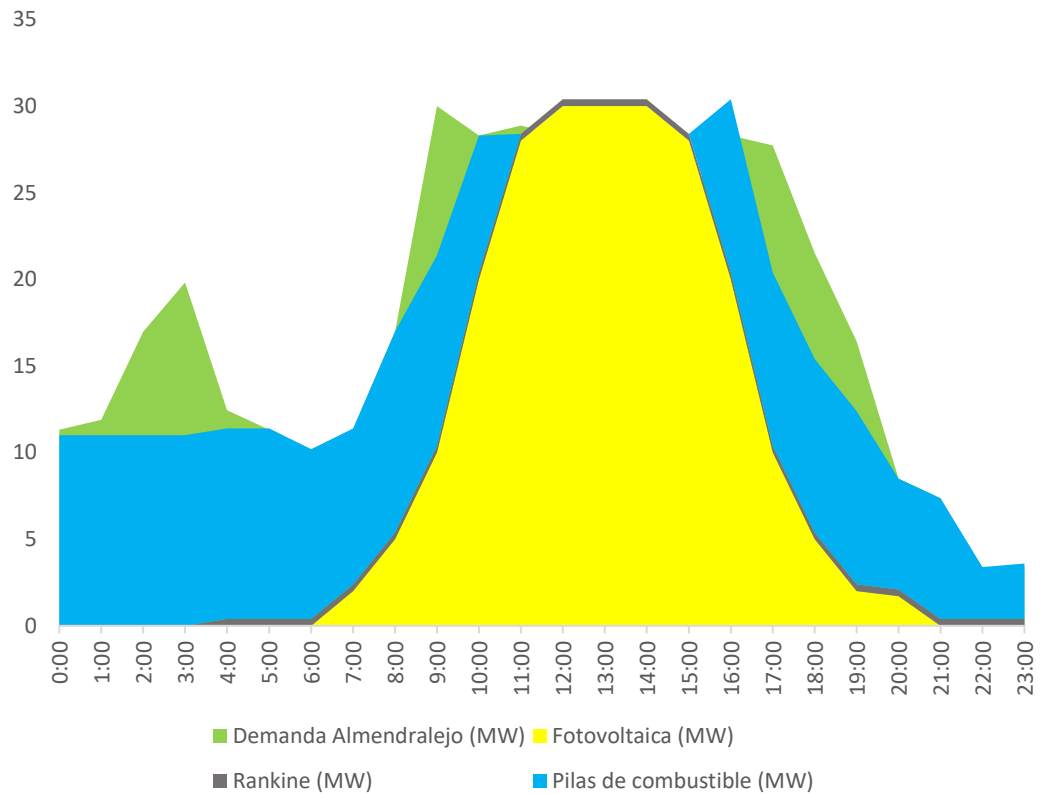


Figura 28. Mix de generación para la demanda del caso de estudio del 6 de septiembre. Fuente: Elaboración propia y [19]

Las Tablas 16 y 17 muestran un resumen de la generación y demanda eléctrica, y de la producción, consumo y almacenamiento de hidrógeno, respectivamente.

Tabla 15. Resumen de generación y demanda durante el 6 de septiembre. Fuente: Elaboración propia

Demanda Total (MWh)	430,75
Generación total (MWh)	404,43
Energía aportada por la red (MWh)	26,32

Tabla 16. Resumen de producción, consumo y almacenamiento de hidrógeno. Fuente: Elaboración propia

Reserva previa de hidrógeno (kg/h)	4.275,00
Hidrógeno generado (kg/h)	11.001,90
Hidrógeno consumido (kg/h)	11.015,55
Hidrógeno almacenado (kg/h)	4.261,35



Como se puede observar, el hidrógeno procedente del aprovechamiento energético de los residuos permite aplanar considerablemente la curva de demanda y reducir así la dependencia de la red eléctrica. Según la información que se muestra en la tabla 15, la microrred permite cubrir alrededor de un 93% de la energía necesaria en Almendralejo durante el día del caso de estudio considerado, en el que existe total disponibilidad de energía solar fotovoltaica.

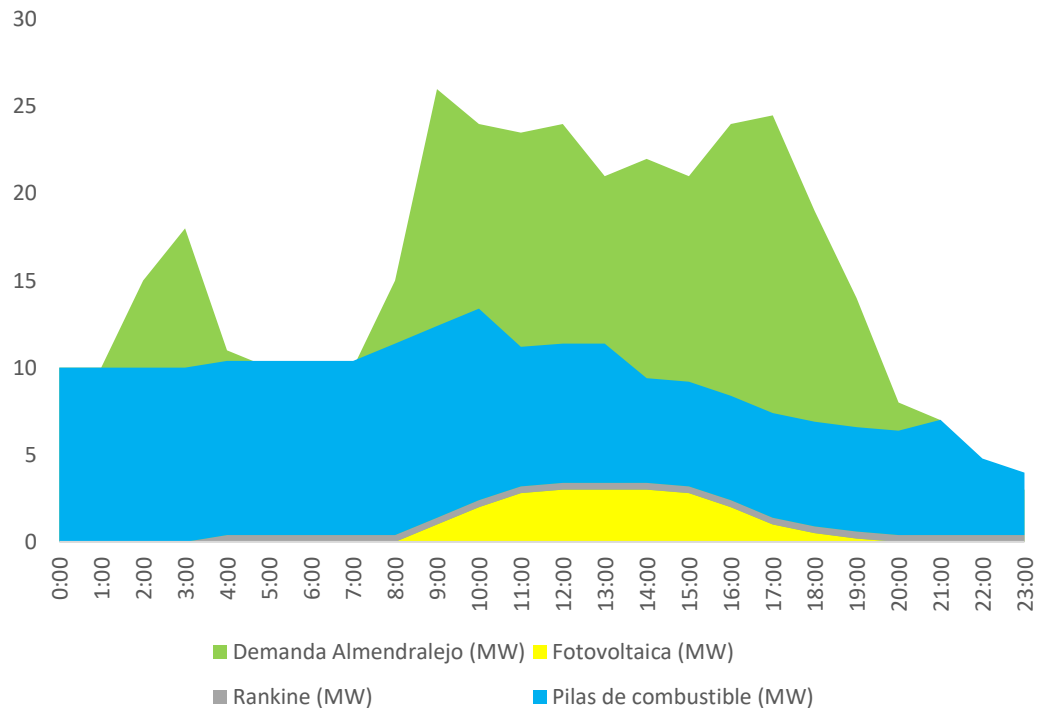
La producción de hidrógeno se ha diseñado teniendo en cuenta las restricciones de almacenamiento de hidrógeno calculadas en el apartado 6.1.4 de la Parte I del proyecto. Se puede observar que se almacena hidrógeno en los períodos de valle de demanda y en los que la planta fotovoltaica permite cubrir la demanda.

## ***1.2 SEGUNDO CASO DE ESTUDIO: DÍA DE INVIERNO***

---

En este segundo caso de estudio, se presenta un caso en el que la demanda presenta unos niveles similares a los del caso de estudio 1.1, pero por ser invierno y no darse unas condiciones meteorológicas que favorezcan la irradiación solar, la microrred no dispone de generación fotovoltaica significativa. Por tanto, en este caso existirá una mayor dependencia de la red eléctrica y la microrred cubrirá una parte inferior de la potencia demandada por el consumo de Almendralejo. Al no disponer de un ejemplo real por parte de Endesa Distribución para un día de invierno en cuanto a demanda en Almendralejo, se ha estimado una curva de demanda correspondiente al 1 de diciembre.

En cuanto al hidrógeno, se ha considerado que, debido a que la situación de generación-demanda de este caso de estudio es similar a los días anteriores y posteriores del día a analizar, los tanques de almacenamiento se encuentran al 70% de capacidad, debido que esta situación requiere una producción energética superior a partir de las pilas de combustible y, por tanto, se consigue un menor almacenamiento de hidrógeno al final del día. La Figura 29 muestra una representación visual del mix de generación-demanda propuesto para el caso de estudio del 1 de diciembre.



*Figura 29. Mix de generación para la demanda del caso de estudio del 1 de diciembre. Fuente: elaboración propia*

Las Tablas 18 y 19 muestran un resumen de la generación y demanda eléctrica, y de la producción, consumo y almacenamiento de hidrógeno, respectivamente.

*Tabla 17. Resumen de generación y demanda durante el 1 de diciembre. Fuente: Elaboración propia*

Demanda Total (MWh)	372,00
Generación total (MWh)	222,77
Energía aportada por la red (MWh)	149,23

*Tabla 18. Resumen de producción, consumo y almacenamiento de hidrógeno. Fuente: Elaboración propia*

Reserva previa de hidrógeno (kg/h)	3.080,00
Hidrógeno generado (kg/h)	11.001,90
Hidrógeno consumido (kg/h)	12.196,17
Hidrógeno almacenado (kg/h)	1.885,73

En este caso, al ser la producción de energía fotovoltaica muy reducida por las condiciones meteorológicas desfavorables, existe una mayor dependencia de la red



eléctrica. Aun así, la microrred aporta cerca del 59% de la generación gracias al aprovechamiento de residuos sólidos urbanos y agrícolas. Por otra parte, al final del día se han almacenado 1.885,73 kg de hidrógeno, disponibles para la generación del día posterior, en el que se supone que las condiciones meteorológicas y los niveles de demanda serán similares.

### ***1.3 CONCLUSIONES ENERGÉTICAS***

---

La microrred diseñada en este proyecto ofrece a la ciudad de Almendralejo un sistema de generación que dota de una mayor independencia de la red eléctrica nacional y ofrece una solución renovable a los residuos orgánicos que se recogen en la zona sin contaminación, gracias a una fuente de generación limpia como lo son las pilas de combustible. Además, complementa de manera óptima la incertidumbre causada por las fuentes renovables no gestionables, las cuales dependen altamente de las condiciones meteorológicas.

Dependiendo de la demanda y del clima, los dos casos de estudio anteriores muestran como la microrred puede cubrir un porcentaje importante de la demanda total diaria. Todo esto es posible gracias al aprovechamiento de unos recursos que, en gran parte, acaban en vertederos controlados en la actualidad.

La gestionabilidad de la microrred, permite actuar de manera óptima para adaptarse a los picos y valles de la curva de demanda, y obtener así el mix de generación más favorable en todo momento.

El sistema diseñado consiste en un conjunto de alta eficiencia, en el que los consumidores de energía participan activamente en la generación de la microrred, ya que sus residuos diarios son recogidos y procesados en la planta de gasificación por plasma. Por otra parte, se aprovecha la energía térmica desprendida del procesamiento de estos residuos a través ciclo de Rankine que suplente tanto a la planta de gasificación por plasma como a la demanda de la microrred.

Por último, cabe destacar que este proyecto presenta ciertas limitaciones, ya que se ha considerado que la planta fotovoltaica SPEX de 30 MW se encuentra teóricamente en total disponibilidad para cubrir la demanda de Almendralejo, lo cual no se corresponde con la realidad. Por otra parte, en este proyecto no se ha considerado que los residuos agrícolas sean utilizados para fines de alimento ganadero u otros, y se ha optado por un uso exclusivo para la microrred.

Las pilas de combustible constituyen solución energética prometedora y que, sin duda, contarán con gran importancia en el futuro del sector energético.



***Parte III ANÁLISIS***

***ECONÓMICO***



# Capítulo 1 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS FUENTES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

## 1.1 COSTES DE LA PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA

Como se ha expuesto en el Capítulo 4 de la Parte I del proyecto, la microrred a diseñar integra el parque solar fotovoltaico SPEX. La Tabla 20 muestra un resumen de la potencia instalada y la producción anual estimada. Se supone una vida útil de 25 años.

Tabla 19. Características del Parque Solar SPEX. Fuente: Grupo ECO

	Potencia instalada (MW)	Producción anual (MWh)
Parque Solar SPEX	30	60.358,50

En primer lugar, se calcula el coste de la inversión inicial, teniendo en cuenta un coste de 4,1€ /MW instalado [20]. Por tanto, el coste de inversión viene dado por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Inversión inicial} &= \text{Coste por MW} * \text{Potencia instalada} \\ &= 4,1 \frac{\text{€}}{\text{MW}} * 30 \text{ MW} = 123 \text{ M€} \end{aligned}$$

El coste de amortización anual se calcula dividiendo la inversión inicial entre la vida útil de la planta:

$$\text{Amortización anual} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Vida útil}} = \frac{123 \text{ M€}}{25 \text{ años}} = 5,28 \text{ M€}$$

El coste de explotación de la planta viene dado por la información de IDAE, el cual estima que se sitúan en torno a un 0,03€ /kW producido. Por tanto, el coste de explotación anual viene dado por la siguiente ecuación:



**Evaluación económica de las fuentes de generación de energía**

---

$$\begin{aligned}
 & \textit{Coste de explotación anual} \\
 & = \textit{Coste por kW producido} * \textit{Producción anual} \\
 & = 0,03 \frac{\text{€}}{\text{kW}} * 60.358 * 10^3 \text{ kWh} = 1,8 \text{ M€}
 \end{aligned}$$

Se ha supuesto que el coste de explotación anual aumentará anualmente un 2%, teniendo en cuenta un deterioro de la planta a medida que pasen los años. La Tabla 21 muestra la evolución de los costes, generación y coste por kWh durante la vida útil de la planta.

*Tabla 20. Resumen costes de instalación fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia.*

	<b>Año 1</b>	<b>Año 5</b>	<b>Año 10</b>	<b>Año 15</b>	<b>Año 20</b>	<b>Año 25</b>
Coste de amortización (M€)	5,28	5,28	5,28	5,28	5,28	5,28
Coste de explotación (M€)	1,80	1,94	2,15	2,37	2,62	2,89
Generación (MWh/año)	60.358,5	60.358,5	60.358,5	60.358,5	60.358,5	60.358,5
Coste por kWh (€/kWh)	0,117	0,120	0,123	0,127	0,131	0,135

## **1.2 COSTES DE LA PLANTA DE RECUPERACIÓN DE RESIDUOS**

---

Para analizar los costes de la planta de gasificación por plasma de la biomasa, se va a estudiar por separado el sistema convertidor de plasma directo, el ciclo de Rankine o sistema de recuperación de calor y las pilas de combustibles. Según la información proporcionada por *Aventum*, los costes de la inversión del sistema de secado previo, plasma, sistema de recuperación de calor, limpieza, extractor y la antorcha de seguridad son de 17 M€. Se va a suponer que un 10% del coste de la inversión corresponde a el sistema de recuperación de calor.

### **1.2.1 COSTES DEL SISTEMA CONVERTIDOR DE PLASMA DIRECTO**

---

Como se muestra en el apartado 5.3.9 de la Parte I del proyecto, la planta de gasificación por plasma opera 8.000 horas anuales y procesa un caudal de entrada de residuos de 5.239,41 kg/h, lo cual supone un total de 42.891,28 toneladas de residuos anuales. Gracias a la información proporcionada por *Aventum*, podemos



### Evaluación económica de las fuentes de generación de energía

conocer los costes de explotación de la planta de gasificación a diseñar, los cuales se muestran en la Tabla 22.

Tabla 21. Costes de operación, mantenimiento y personal de la planta de gasificación por plasma.

Fuente: Aventum y elaboración propia.

Costes de O&M	€/Tn	Tn	Total (M€)
Consumibles químicos	9,00	42.891,28	0,39
Electrodos	5,00	42.891,28	0,21
Mantenimiento refractario y antorchas	6,00	42.891,28	0,26
Mantenimiento general	7,00	42.891,28	0,30
<b>TOTAL</b>			<b>1,16</b>

Personal	€/pers	Total (M€)
Personal de operación (4)	20.000	0,08
Jefe de planta (1)	40.000	0,04
<b>TOTAL</b>		<b>0,12</b>

Tabla 22. Costes de la planta de gasificación por plasma de biomasa. Fuente: Aventum

	Coste (M€)
Inversión inicial	14,45
Amortización anual	0,57
Coste de personal	0,12
Coste de O&M	1,16

Una vez estimados los costes anuales, se procede a estimar el coste del gas de síntesis generado en la planta, sabiendo que se generan 4.191,2 toneladas de gas de síntesis al existir un caudal de salida de 523,91 kg/h y 8.000 horas de funcionamiento, como se muestra en el apartado 5.3.9 de la Parte I del proyecto. Para los costes variables de operación y mantenimiento, se va a suponer un incremento del 2% anual debido el deterioro de los sistemas de la planta y la variación del IPC.



## Evaluación económica de las fuentes de generación de energía

### 1.2.2 COSTES DEL CICLO DE RANKINE

Tras el dimensionamiento y cálculo del ciclo de Rankine para el aprovechamiento energético del calor generado en la vasija de plasma que se ha expuesto en el apartado 5.3.6 de la Parte I del proyecto, sabemos que la producción anual de energía en este sistema es de 3.153,44 MWh. La inversión inicial, como se ha mencionado, es de del 10% de los 17M€ totales de inversión de la planta de gasificación por plasma, es decir, 1.7 M€.

En cuanto a los costes de operación y mantenimiento, según la información proporcionada por *Aventum*, se corresponden al 1% del coste de inversión. Para los costes variables de operación y mantenimiento, se va a suponer un incremento del 2% anual debido el deterioro de los sistemas de la planta y la variación del IPC, al igual que en el caso de la planta de gasificación del apartado 1.2.1.

Tabla 23. Resumen costes del ciclo de Rankine. Fuente: Elaboración propia.

	Año 1	Año 5	Año 10	Año 15	Año 25
Generación eléctrica (MWh)	3.153,44	3.153,44	3.153,44	3.153,44	3.153,44
Coste de explotación (M€)	0.017	0.018	0.020	0.022	0,027
Coste de amortización (M€)	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068
Coste de la electricidad (€/kWh)	0,027	0,027	0,028	0,029	0,030

Por tanto, durante el periodo de vida útil de la planta, el coste de la energía procedente del ciclo de Rankine tiene un precio medio de 0,028 €/kWh.

### 1.2.3 COSTES DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE

Por último, es necesario tener en cuenta el coste de instalación y explotación de las pilas de combustibles instaladas en la planta de gasificación por plasma de la biomasa. Como se ha explicado en el apartado 6.1.3 de la Parte I del proyecto, se han escogido 30 pilas de combustible de 1 MW del fabricante *Ballard*, cuya hoja de características se encuentra en los Anejos de la Parte IV del proyecto.

Los costes asociados a las pilas de combustible *Ballard CleanGen Fuel Cell 1MW* son:

- Coste fijos: 3,5 millones de dólares por MW instalado más 15 millones de dólares por las instalaciones de almacenamiento. [20]
- Costes variables: 20 dólares por MWh. [20]

Como se especifica en el apartado 6.1.3 de la Parte I del proyecto, cada MW producido por las pilas seleccionadas consume 157,5 kg de hidrógeno.



### Evaluación económica de las fuentes de generación de energía

---

Los costes fijos totales vienen dados por la siguiente ecuación:

$$\text{Costes de instalación} = \text{MW instalados} * \text{Coste por MW} + 15M€$$

$$\text{Costes de instalación} = 30 * 1 \text{ MW} * \$3,5M + \$15M = \$120M$$

Y, aplicando el cambio de dólar a euro a fecha de junio de 2018 (1 dólar americano= 0,85 euros), el coste total de instalación es:

$$\text{Costes de instalación} = \$120M * 0,85 = 102M€$$

Por otra parte, los costes de explotación se calculan a partir de la producción anual de energía eléctrica a partir del hidrógeno, y teniendo en cuenta el rendimiento del 40% de las pilas de combustible:

$$\begin{aligned} \text{Producción anual (MWh)} &= 523,91 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ MW}}{157,5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}} * 8.000h \\ &= 26.611,30 \text{ MWh} \end{aligned}$$

Por tanto, los costes de explotación anuales son:

$$\begin{aligned} \text{Costes de explotación} \\ &= \text{Generación (MWh)} * \text{Coste de explotación (\$/MWh)} \end{aligned}$$

$$\text{Costes de explotación} = 26.611 \text{ MWh} * \frac{\$20}{\text{MWh}} = \$0.53M$$

Con lo que, aplicando el cambio de divisas como en el caso de los costes de instalación, los costes de explotación anuales son:

$$\text{Costes de explotación} = \$0.53 \text{ M} * 0,85 \frac{€}{\$} = 0.45 \text{ M€}$$

Para los costes variables de operación y mantenimiento, se va a suponer un incremento del 2% anual, al igual que en el caso de la planta de gasificación del apartado 1.2.1. La vida útil de la instalación es 25 años.

La Tabla 25 muestra una estimación del coste de la electricidad producida a partir de las pilas de combustible. Como se puede observar, constituye el coste más elevado por kWh de las distintas tecnologías que componen la microrred.



### Evaluación económica de las fuentes de generación de energía

Tabla 24. Resumen costes de las pilas de combustible. Fuente: Elaboración propia

	Año 1	Año 5	Año 10	Año 15	Año 25
Generación eléctrica (MWh)	26.611,3	26.611,3	26.611,3	26.611,3	26.611,3
Coste de explotación (M€)	0,450	0.487	0.538	0.594	0.724
Coste de amortización (M€)	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08
Coste de la electricidad (€/kWh)	0,170	0,172	0,174	0,176	0,181

El coste medio de la electricidad generada por las pilas de combustible durante los 25 años de vida útil supuestos es de 0,174 €/MWh.

### 1.3 COMPARACIÓN DEL COSTE DE LA ELECTRICIDAD ENTRE LAS DISTINTAS TECNOLOGÍAS

La Figura 30 muestra la comparativa entre el coste medio de la electricidad generada por la planta solar fotovoltaica, el ciclo de Rankine y las pilas de combustible.

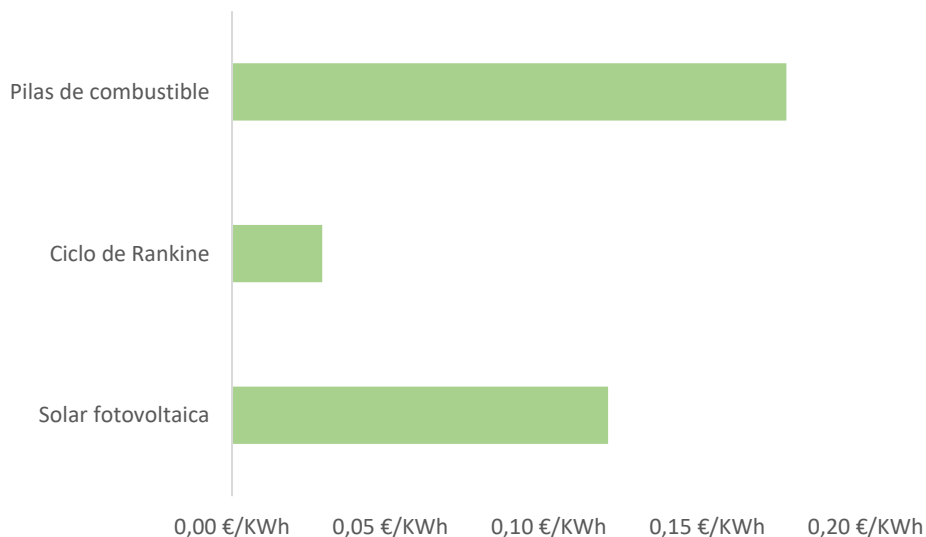


Figura 30. Comparación del coste medio de la electricidad durante la vida útil de 25 años de las instalaciones de la microrred. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 30, el coste por kWh de la electricidad producida es más alto que la solar fotovoltaica. Sin embargo, este precio se podrá ver reducido por retribuciones del ayuntamiento de Almendralejo debido a las labores de eliminación de residuos que realiza la planta de gasificación por plasma de la



## Evaluación económica de las fuentes de generación de energía

biomasa. El coste por kWh de la generación del ciclo de Rankine es muy reducido, al igual que su aportación al mix de generación del conjunto de la microrred.

### 1.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL CONJUNTO DE LA MICRORRED

En este apartado se pretende comparar el coste de producción del conjunto de la microrred con los costes actuales de la electricidad procedente de la red eléctrica española. Se espera que la energía generada por el conjunto de la microrred no tenga que asumir las tasas que elevan el precio de la factura española, como se indicaba en la introducción de la Parte I del proyecto. En la actualidad, la factura eléctrica española puede desglosarse como se muestra en la Figura 31, según UNESA.

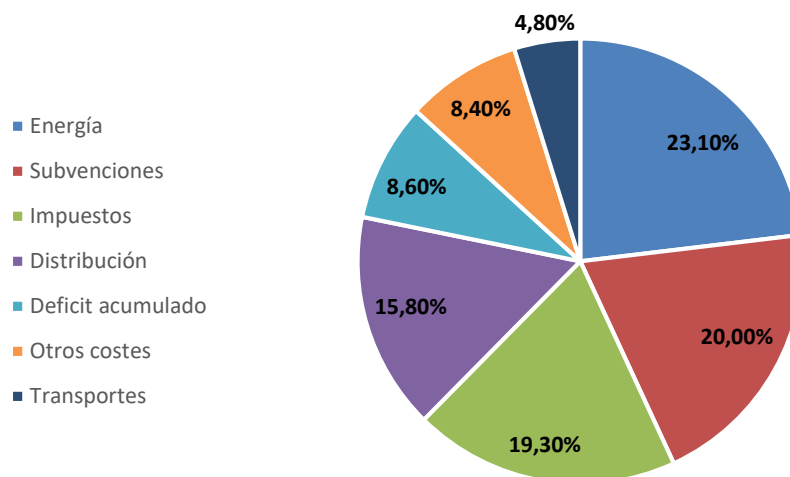


Figura 31. Desglose de los costes asociados a la factura eléctrica en España. Fuente: UNESA

De este desglose, en el caso de la factura de la microrred habría que eliminar los costes asociados a las subvenciones, ya que no se van a considerar primas para la instalación fotovoltaica SPEX. Por otra parte, los costes de transporte tampoco se incluyen en el caso de la microrred, ya que los puntos de generación se encuentran cerca de los puntos de consumo sin pasar por la red general. En total, con validez para cuando la microrred es capaz de suplir la totalidad de la demanda de Almendralejo de manera aislada, la factura de la microrred ahorraría cerca de un 30%, ya que en “otros costes” se incluye la compensación extra peninsular, que no se incluiría en el funcionamiento aislado de la microrred.





### Evaluación económica de las fuentes de generación de energía

De cara a realizar una comparación de los costes de la microrred, es necesario en primer lugar calcular el coste ponderado de la electricidad de las distintas tecnologías. La Tabla 26 muestra un resumen de la producción media y el coste medio de las distintas tecnologías integradas en la microrred.

Tabla 25. Resumen de los costes de generación de cada tecnología. Fuente: Elaboración propia

	Producción anual (MWh/año)	Coste de la electricidad (€/kWh)
Solar fotovoltaica	60.358,50	0,13
Ciclo de Rankine	3.153,44	0,03
Pilas de combustible	26.611,30	0,17
<b>Coste ponderado</b>	-	<b>0,131</b>

Estos 0,131 €/kWh de coste medio de la electricidad procedente de la microrred son, en la actualidad, algo superiores a el coste de la factura eléctrica presente en Almendralejo. El precio actual de la electricidad para clientes de Endesa con una potencia contratada menor de 10 kW, como es el caso de la mayoría de los habitantes de Almendralejo, se sitúa en torno a 0,117 €/kWh [23]. Por tanto, en la actualidad el coste de la energía generada en el proyecto diseñado es superior a la tarifa de la red eléctrica española con el Precio Voluntario al Pequeño Consumidor, que puede incrementarse en los 25 años de vida útil para los que se ha diseñado la planta.

Aunque el coste de generación medio obtenido es superior al precio actual de la electricidad, se encuentra dentro de un rango factible. Una mejora en la tecnología de plasma y pilas de combustible con menores costes podrían reducir el coste de generación significativamente. Por otra parte, en la actualidad los consumidores pagamos por la recogida de residuos y, en el caso de incorporar una planta de gasificación por plasma de la biomasa en Almendralejo, se podrían obtener ingresos procedentes de la colaboración en la eliminación sostenible de residuos, lo que también podría reducir el coste de la electricidad destacada. Así mismo, es interesante mencionar que la energía solar fotovoltaica integrada en la microrred, de alto coste y pocas horas de funcionamiento, aumenta el coste de la electricidad generada.

En conclusión, la microrred basada en el procesado de recursos biomásicos es una solución factible, necesaria de mayor desarrollo para una reducción de costes pero que, sin duda, cuenta con un futuro prometedor en el panorama energético nacional e internacional.

# *Parte IV ANEJOS*



# CATÁLOGO BALLARD CLEARGEN FUEL CELL 1MW SYSTEM

**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 (100 m <sup>3</sup> /hour)
Available heat:	Output heat load	>950 kW <sup>3</sup>
	Available water temperature	60 - 65°C
Emissions:	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



## PARQUE SOLAR SPEX – GRUPO ECO



**SPEX**

Solar Parks Of Extremadura, S.L.

Parque Solar  
Mérida 30 MW

### ► Descripción

El Parque Solar SPEX ocupa una extensión de 195 Ha. entre los términos municipales de Mérida y Don Álvaro. Situado en un terreno de pasto con unas condiciones muy favorables para la producción de energía solar, debido a la orografía y accesibilidad a la red eléctrica.

Por tecnología aplicada, con su sistema de seguimiento solar a dos ejes, es la mayor planta proyectada a nivel mundial, con una potencia de 30 MW y una inversión total cercana a los 250 millones de euros.

Solar Parks of Extremadura, S.L es una joint venture al 50% con sede social en Badajoz, formada por la empresa extremeña ecoEnergías del Guadiana, S.A. y la financiera alemana Deutsche Bank AG. El parque se ha conectado en su totalidad dentro de la tarifa regulada por R.D. 661/2007, lo cual ha significado un importante hito y una referencia de ejecución a nivel mundial.

El parque cuenta con una potencia total de 30 MW, con sistema de seguimiento a dos ejes y evacúa la energía generada en una línea de alta tensión de 132 Kv a través de la nueva subestación "El Judío", construida al efecto.

El material fotovoltaico se ha seleccionado siguiendo los más rigurosos estándares de calidad y fiabilidad. Nuestros colaboradores son líderes del sector a nivel mundial.

Estructura portante: El seguidor solar de dos ejes ha sido desarrollado íntegramente en Alemania, y ha sido optimizado y fabricado por el Grupo Eco específicamente para este proyecto, para lo cual se han habilitado instalaciones de montaje en Extremadura. Cada uno de los seguidores está formado por una estructura de acero de alta resistencia que soporta un panel de 130 m<sup>2</sup> de área.

Para la evacuación de la energía generada por las tres plantas ha sido necesaria la construcción de la nueva subestación 132/15 kV 'El Judío', con una potencia de 80 MVA, que conecta con la línea "Mérida-Orellana" de 132 kV.

### ► Galería





## ARIEMA TANQUES DE HIDRÓGENO

### Almacenamiento de hidrógeno

ARIEMA trabaja con varios fabricantes de hidruros metálicos para ofrecer soluciones a medida del cliente.

El tamaño de los depósitos va desde decenas de litros hasta depósitos de varios miles de litros, además de soluciones a medida de gran capacidad de almacenamiento.

Si representa a un laboratorio, centro o universidad y quiere desarrollar el sistema de gestión del calor de estos equipos para asegurar un caudal de descarga continuo, nuestros equipos están preparados para que el cliente pueda implementar el sistema de gestión térmica a su elección.





Datos energéticos primer caso de estudio: Día de verano

## DATOS ENERGÉTICOS PRIMER CASO DE ESTUDIO: DÍA DE VERANO

Hora	Demanda Almendralejo (MW)	Fotovoltaica (MW)	Rankine (MW)	Pilas de combustible (MW)
0:00	11.32	0	0.000	11
1:00	11.89	0	0.000	11
2:00	16.98	0	0.000	11
3:00	19.81	0	0.000	11
4:00	12.45	0	0.394	11
5:00	11.32	0	0.394	11
6:00	10.19	0	0.394	9.79
7:00	11.32	2	0.394	9
8:00	16.98	5	0.394	11.59
9:00	30.00	10	0.394	11
10:00	28.30	20	0.394	7.91
11:00	28.87	28	0.394	0
12:00	28.30	30	0.394	0
13:00	26.60	30	0.394	0
14:00	25.47	30	0.394	0
15:00	24.91	28	0.394	0
16:00	28.30	20	0.394	10
17:00	27.74	10	0.394	10
18:00	21.51	5	0.394	10
19:00	16.42	2	0.394	10
20:00	8.49	1.7	0.394	6.4
21:00	7.36	0	0.394	6.96
22:00	2.83	0	0.394	3
23:00	3.40	0	0.394	3.2
<b>TOTAL</b>	<b>430.754717</b>	<b>221.7</b>	<b>7.8836</b>	<b>174.85</b>





Datos energéticos segundo caso de estudio: Día de invierno

## DATOS ENERGÉTICOS SEGUNDO CASO DE ESTUDIO: DÍA DE INVIERNO

Hora	Demanda Almendralejo (MW)	Fotovoltaica (MW)	Rankine (MW)	Pilas de combustible (MW)
0:00	10.00	0	0.000	10
1:00	10.00	0	0.000	10
2:00	15.00	0	0.000	10
3:00	18.00	0	0.000	10
4:00	11.00	0	0.394	10
5:00	10.00	0	0.394	10
6:00	10.00	0	0.394	10
7:00	10.00	0	0.394	10
8:00	15.00	0	0.394	11
9:00	26.00	1	0.394	11
10:00	24.00	2	0.394	11
11:00	23.50	2.8	0.394	8
12:00	24.00	3	0.394	8
13:00	21.00	3	0.394	8
14:00	22.00	3	0.394	6
15:00	21.00	2.8	0.394	6
16:00	24.00	2	0.394	6
17:00	24.50	1	0.394	6
18:00	19.00	0.5	0.394	6
19:00	14.00	0.2	0.394	6
20:00	8.00	0	0.394	6
21:00	7.00	0	0.394	6.61
22:00	2.00	0	0.394	4.39
23:00	3.00	0	0.394	3.59
<b>TOTAL</b>	<b>372</b>	<b>21.3</b>	<b>7.8836</b>	<b>193.59</b>



## COSTES SOLAR FOTOVOLTAICA

	Coste de amortización (M€)	Coste de explotación (M€)	Generación (MWh/año)	Coste por kWh (€/kWh)
Año 1	5.28	1.800	60358.5	0.117
Año 2	5.28	1.836	60358.5	0.118
Año 3	5.28	1.873	60358.5	0.119
Año 4	5.28	1.910	60358.5	0.119
Año 5	5.28	1.948	60358.5	0.120
Año 6	5.28	1.987	60358.5	0.120
Año 7	5.28	2.027	60358.5	0.121
Año 8	5.28	2.068	60358.5	0.122
Año 9	5.28	2.109	60358.5	0.122
Año 10	5.28	2.151	60358.5	0.123
Año 11	5.28	2.194	60358.5	0.124
Año 12	5.28	2.238	60358.5	0.125
Año 13	5.28	2.283	60358.5	0.125
Año 14	5.28	2.328	60358.5	0.126
Año 15	5.28	2.375	60358.5	0.127
Año 16	5.28	2.423	60358.5	0.128
Año 17	5.28	2.471	60358.5	0.128
Año 18	5.28	2.520	60358.5	0.129
Año 19	5.28	2.571	60358.5	0.130
Año 20	5.28	2.622	60358.5	0.131
Año 21	5.28	2.675	60358.5	0.132
Año 22	5.28	2.728	60358.5	0.133
Año 23	5.28	2.783	60358.5	0.134
Año 24	5.28	2.838	60358.5	0.135
Año 25	5.28	2.895	60358.5	0.135





## COSTES CICLO DE RANKINE

	Generación eléctrica (MWh)	Coste de explotación (M€)	Coste de amortización (M€)	Coste de la electricidad (€/kWh)
Año 1	3153.44	0.017	0.068	0.027
Año 2	3153.44	0.017	0.068	0.027
Año 3	3153.44	0.018	0.068	0.027
Año 4	3153.44	0.018	0.068	0.027
Año 5	3153.44	0.018	0.068	0.027
Año 6	3153.44	0.019	0.068	0.028
Año 7	3153.44	0.019	0.068	0.028
Año 8	3153.44	0.020	0.068	0.028
Año 9	3153.44	0.020	0.068	0.028
Año 10	3153.44	0.020	0.068	0.028
Año 11	3153.44	0.021	0.068	0.028
Año 12	3153.44	0.021	0.068	0.028
Año 13	3153.44	0.022	0.068	0.028
Año 14	3153.44	0.022	0.068	0.029
Año 15	3153.44	0.022	0.068	0.029
Año 16	3153.44	0.023	0.068	0.029
Año 17	3153.44	0.023	0.068	0.029
Año 18	3153.44	0.024	0.068	0.029
Año 19	3153.44	0.024	0.068	0.029
Año 20	3153.44	0.025	0.068	0.029
Año 21	3153.44	0.025	0.068	0.030
Año 22	3153.44	0.026	0.068	0.030
Año 23	3153.44	0.026	0.068	0.030
Año 24	3153.44	0.027	0.068	0.030
Año 25	3153.44	0.027	0.068	0.030



## COSTES PILAS DE COMBUSTIBLE

	Generación eléctrica (MWh)	Coste de explotación (M€)	Coste de amortización (M€)	Coste de la electricidad (€/kWh)
Año 1	26611.3	0.450	4.08	0.170
Año 2	26611.3	0.459	4.08	0.171
Año 3	26611.3	0.468	4.08	0.171
Año 4	26611.3	0.478	4.08	0.171
Año 5	26611.3	0.487	4.08	0.172
Año 6	26611.3	0.497	4.08	0.172
Año 7	26611.3	0.507	4.08	0.172
Año 8	26611.3	0.517	4.08	0.173
Año 9	26611.3	0.527	4.08	0.173
Año 10	26611.3	0.538	4.08	0.174
Año 11	26611.3	0.549	4.08	0.174
Año 12	26611.3	0.560	4.08	0.174
Año 13	26611.3	0.571	4.08	0.175
Año 14	26611.3	0.582	4.08	0.175
Año 15	26611.3	0.594	4.08	0.176
Año 16	26611.3	0.606	4.08	0.176
Año 17	26611.3	0.618	4.08	0.177
Año 18	26611.3	0.630	4.08	0.177
Año 19	26611.3	0.643	4.08	0.177
Año 20	26611.3	0.656	4.08	0.178
Año 21	26611.3	0.669	4.08	0.178
Año 22	26611.3	0.682	4.08	0.179
Año 23	26611.3	0.696	4.08	0.179
Año 24	26611.3	0.710	4.08	0.180
Año 25	26611.3	0.724	4.08	0.181



## BIBLIOGRAFÍA

1. Piernavieja Izquierdo, Gonzalo (2010). *“Microrredes con elevada penetración de Energías Renovables y Almacenamiento Energético. Instituto Tecnológico de Canarias.”*
2. System of Systems Engineering, 2007. SoSE '07. IEEE International Conference on 16-18 April 2007 Page(s):1 – 6
3. Berkeley Lab, *“Santa Rita Jail.”*
4. Suelo solar. *“Zonas de correspondencia de instalaciones fotovoltaicas.”*
5. APS Valencia energías renovables. *“Panel fotovoltaico: Eficiencia y Rendimiento.”*
6. [\*Centrales Solares Termoeléctricas Extresol 1-2-3.\*](#) Diseprosa Engineering & Consulting.
7. *Balance Eléctrico de Extremadura 2016.* Agencia Extremeña de la Energía.
8. *Estimación de la Energía Generada por un Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red.* Universidad de Jaén.
9. *Ecoparque de Mérida.* Gespesa
10. [\*“Gespesa gestiona 450.000 toneladas de residuos al año”\*](#) (2017). HOY
11. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo.” *Poder calorífico de diversas sustancia”s.*
12. Agencia Extremeña de la energía., *“Los residuos de industrias agrícolas”.*
13. Cerespain, *“Aceite de Olive Virgen Extra: el Origen, el Producto, la Historia y los Métodos de Producción”.*
14. Tecnología de gasificación por plasma de Westinghouse. (2013)



15. Proyecto de Fin de Grado. Almudena Valenciano López
16. Acciona (2004): *“El proceso de gasificación y vitrificación de residuos por plasma con optimización de la producción eléctrica”*.
17. Byun, Chun; Cho, Moohyun; Hwang, Soon-Mo; Chung, Jaewoo (2012): *“Thermal Plasma Gasification of Municipal Solid Waste (MSW)”*
18. Rodríguez, Manuel (2017), Revista digital INESEM: *“¿Qué son las pilas de combustible?”*
19. Ariema: *“Contenedores de almacenamiento de hidrógeno basados en hidruros metálicos de tipo LaNi5.”*
20. Proyecto final de carrera de Pablo Pasero
21. Red Eléctrica Española. <http://www.ree.es/es/>
22. IDAE. <http://www.idae.es/>
23. Selectra: *“Precio del kWh en España en 2017.”*