



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE UNA MICRORRED INTELIGENTE EN LA  
CIUDAD DE SALAMANCA Y DISEÑO DE UNA PLANTA  
DE GASIFICACIÓN POR PLASMA**

Autor: Carmen Gómez-Pablos Fernández del Campo

Director: Julio Montes Ponce de León

Madrid Julio 2022



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
**ESTUDIO DE UNA MICRORRED INTELIGENTE EN LA CIUDA DE SALAMANCA  
Y DISEÑO DE UNA PLANTA DE GASIFICACIÓN POR PLASMA**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2021/2022 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.: Carmen Gómez Pablos Fernández del Campo

Fecha: 05/ 07/ 2022



Autorizada la entrega del proyecto

**EL DIRECTOR DEL PROYECTO**

Fdo.: Julio Montes Ponce de León

Fecha: 01/ 07/ 2022







**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

## **ESTUDIO DE UNA MICRORRED INTELIGENTE EN LA CIUDAD DE SALAMANCA Y DISEÑO DE UNA PLANTA DE GASIFICACIÓN POR PLASMA**

Autor: Carmen Gómez-Pablos Fernández del Campo

Director: Julio Montes Ponce de León

Madrid Julio 2022



# Agradecimientos

A mi madre y a mi hermana, por acompañarme durante todos estos años y nunca dejar de creer en mí, por estar siempre a mi lado y apoyarme en todo momento.

A mis amigos de la universidad, porque sin ellos no hubiera conseguido llegar hasta aquí, por su esfuerzo y paciencia infinita.

A todos aquellos profesores con los que he pasado hora y horas y aun así te esperaban con los brazos abiertos, porque sin ellos y su motivación muchos de mis logros no se hubieran realizado.





# **ESTUDIO DE UNA MICRORRED INTELIGENTE EN LA CIUDAD DE SALAMANCA Y DISEÑO DE UNA PLANTA DE GASIFICACIÓN POR PLASMA**

**Autor: Gómez-Pablos Fernández del Campo, Carmen.**

Director: Montes Ponce de León, Julio.

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

España tiene una dependencia energética del 70% puesto que el país no llega a producir un tercio de la energía final que se consume. Esto sucede por varias razones, una de ellas es por ser una península y no tener muchos países vecinos con los que exportar e importar energía fácilmente, otra de las grandes razones es el fin de la explotación de las materias primas ya que hace poco más de un año la *Ley de Cambio Climático y Transición Energética [1]* prohibió la “exploración, permisos de investigación y concesiones de explotación de hidrocarburos en todo el territorio nacional”.

La energía de origen fósil es altamente contaminante, en lugares como Asturias se llega a porcentajes del 4% de azufre en el carbón extraído como materia prima, y en Aragón puede llegar hasta el 8%. Estos datos son preocupantes ya que en países como Estados Unidos el máximo porcentaje de azufre aceptado en el carbón es del 1%. La depuración de gases no existe en las centrales de carbón en España, por ello desde el año 2010 se decidió terminar con este tipo de centrales.

En consecuencia, las autoridades y gobiernos de todo el mundo están fomentando el despliegue de las energías renovables basado en sistemas de generación distribuida. Hay muchos desafíos presentes que deben ser superados para que, en un futuro, no muy lejano, este tipo de tecnología supere a los sistemas de distribución existentes y a parte se pueda obtener la misma rentabilidad, fiabilidad y seguridad con la que hoy en día se puede disfrutar. La principal razón es que los sistemas de distribución existentes no están diseñados para sistemas de generación distribuida ya que siguen un diseño de red pasiva, mientras que las microrredes se definen como distribuciones activas. Lo que marca la diferencia entre redes de distribución pasivas y activas, es que las activas añaden a su red generadores distribuidos locales, lo que implica flujos bidireccionales.

El segundo punto a destacar en este proyecto es el diseño de una planta de gasificación por plasma, planta con la que se podrá obtener hidrógeno gracias a la biomasa proporcionada por todo tipo de residuos orgánicos, destacando los residuos sólidos urbanos, los cuales llegan a unos valores de 22 toneladas anuales en España, cantidad que debe ser reducida.

Esta tecnología es novedosa e innovadora y permite la total eliminación de los residuos gracias al plasma, que separa molecularmente los residuos para descomponerlos en sus componentes fundamentales (hidrógeno y monóxido de carbono). Como resultado del proceso se obtiene un gas de síntesis que será aprovechado como energía de almacenamiento para la microrred que se desea diseñar.

Se ha elegido el municipio de Salamanca, capital de la provincia homónima como localidad para el diseño de la microrred inteligente. Salamanca es una provincia española situada al sudoeste de la comunidad autónoma de Castilla y León. Se ha tomado como radio para el estudio aproximadamente un valor de 50 Km alrededor de Salamanca.

Se ha hecho un estudio de la potencia instalada que las distintas tecnologías que se van a usar para alimentar la microrred en la ciudad de Salamanca podrían llegar a proporcionar:

Tecnología	Potencia instalada (MW)
Eólica	147,84
Fotovoltaica	52,76
Minihidráulica	14,76

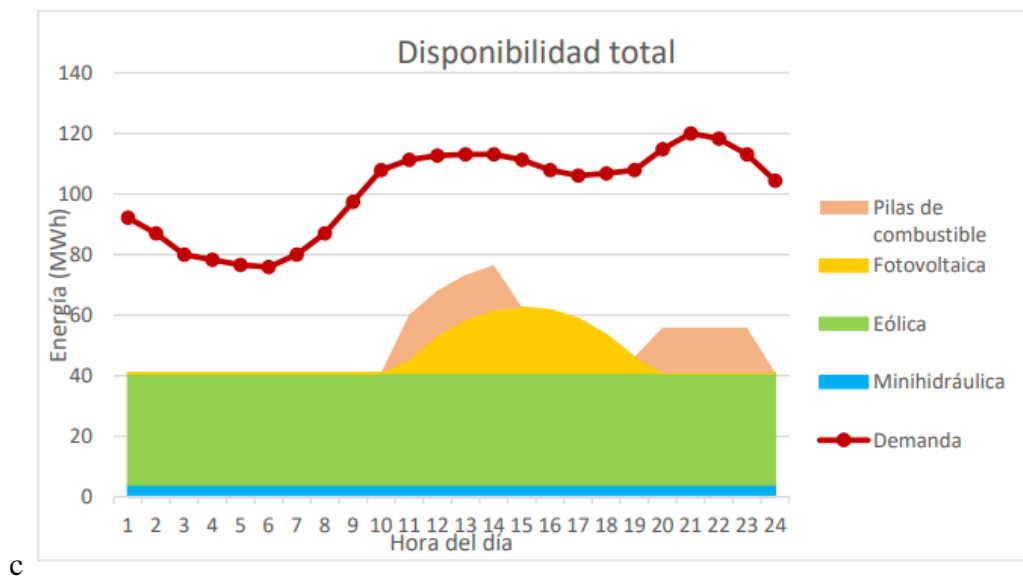
En cuanto a la cantidad de residuos biomásicos que se van a introducir en la planta de gasificación se ha llegado a la conclusión de que diariamente sumarán unas 250 toneladas entre residuos sólidos urbanos provenientes del centro de tratamiento de residuos de Gomecello junto con la producción agrícola estacionaria que proporciona Salamanca.

Como ya se ha comentado la tecnología de respaldo a la potencia generada por la energía eólica, fotovoltaica y minihidráulica serán las pilas de combustible.

En estas pilas se almacenará el hidrógeno creado por la planta de gasificación gracias al plasma. Se necesita una pila con altos rendimientos, que trabaje a bajas temperaturas y con una gran permisividad ante impurezas en el hidrógeno. No ha sido posible encontrar una pila con todas estas características, pero las PEMFC son las que más se ajustan.

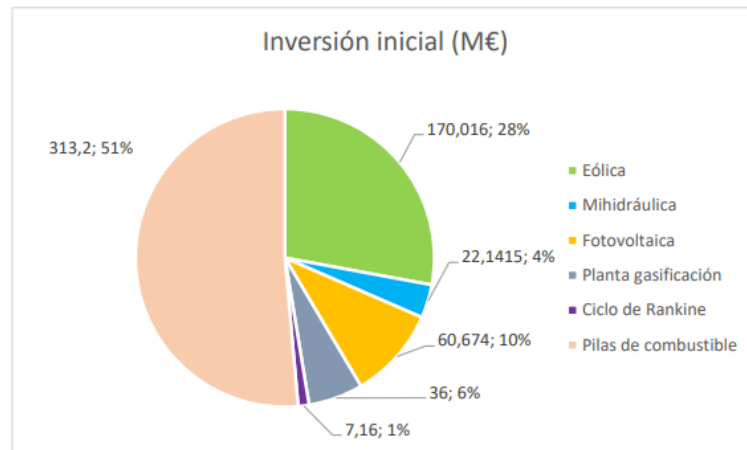
También se ha comprobado que la mejor manera de almacenamiento de hidrógeno es en estado sólido mediante hidruros metálicos ya que sus procesos de formación y composición eran muy rápidos.

Se ha decidido invertir en 120 pilas de combustible ya que la empresa contratada (Ballard) crea pilas de combustibles que pueden producir 1MW de potencia neta y como se han supuesto picos máximos de 120 MW se deben tener 120 pilas.



En cuanto al estudio económico hay varios factores que deben tenerse en cuenta:

1. El periodo de tiempo que se va a tomar como vida útil de las tecnologías integradas en la microrred va a ser de 25 años, periodo de amortización para la inversión inicial de las tecnologías.
2. Aunque muchas de las instalaciones de donde se genera la energía ya existen se va a realizar el estudio económico de la inversión inicial desde el año cero para simplificar los cálculos.
3. Para el estudio de los costes de explotación se estima un 2% del IPC para el largo de vida útil de las instalaciones.
4. A partir del cuarto año de explotación se va a considerar una curva de aprendizaje en las distintas tecnologías estudiadas, y se considerará del 1,6%.



Las inversiones iniciales serán lo que más coste produzca en el proyecto, viéndose este disminuido con los años ya que el precio de venta de electricidad con la microrred siempre será menor que al del mercado eléctrico por lo que tanto los inversores como los consumidores saldrán beneficiados.

# **STUDY OF A SMART MICROGRID IN THE CITY OF SALAMANCA** **AND DESIGN OF A PLASMA GASIFICATION PLANT**

**Autor: Gómez-Pablos Fernández del Campo, Carmen.**

Director: Montes Ponce de León, Julio.

Collaborating entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## **ABSTRACT**

Spain has an energy dependence of 70%, as the country does not produce a third of the final energy consumed. This happens for several reasons, one of them is because it is a peninsula and does not have many neighbouring countries with which to export and import energy easily, another major reason is the end of the exploitation of raw materials since just over a year ago the *Law on Climate Change and Energy Transition* [1] banned the "exploration, research permits and concessions for the exploitation of hydrocarbons throughout the national territory".

Fossil fuel energy is highly polluting; in places such as Asturias, the percentage of sulphur in coal extracted as raw material reaches 4%, and in Aragon it can reach up to 8%. These figures are worrying, as in countries such as the United States the maximum percentage of sulphur accepted in coal is 1%. The purification of gases does not exist in coal-fired power plants in Spain, which is why it was decided in 2010 to put an end to this type of power plant.

Consequently, authorities and governments around the world are encouraging the deployment of renewable energy based on distributed generation systems. There are many present challenges that need to be overcome in order for this type of technology to outperform existing distribution systems in the not too distant future and to achieve the same cost-effectiveness, reliability and security that can be enjoyed today. The main reason is that existing distribution systems are not designed for distributed generation systems as they follow a passive grid design, whereas microgrids are defined as active distributions. What makes the difference between passive and active distribution grids is that active grids add local distributed generators to their network, which implies bi-directional flows.

The second point to highlight in this project is the design of a plasma gasification plant, a plant with which it will be possible to obtain hydrogen thanks to the biomass provided by all

types of organic waste, especially solid urban waste, which amounts to 22 tonnes per year in Spain, an amount that must be reduced.

This technology is new and innovative and allows the total elimination of waste thanks to the plasma, which molecularly separates the waste to break it down into its fundamental components (hydrogen and carbon monoxide). As a result of the process, a synthesis gas is obtained that will be used as storage energy for the microgrid to be designed.

The municipality of Salamanca, capital of the province of the same name, has been chosen as the location for the design of the smart microgrid. Salamanca is a Spanish province located in the southwest of the autonomous community of Castilla y León. A radius of approximately 50 km around Salamanca has been taken as the radius for the study.

A study has been made of the installed power that the different technologies to be used to supply the microgrid in the city of Salamanca could provide:

Tecnología	Potencia instalada (MW)
Eólica	147,84
Fotovoltaica	52,76
Minihidráulica	14,76

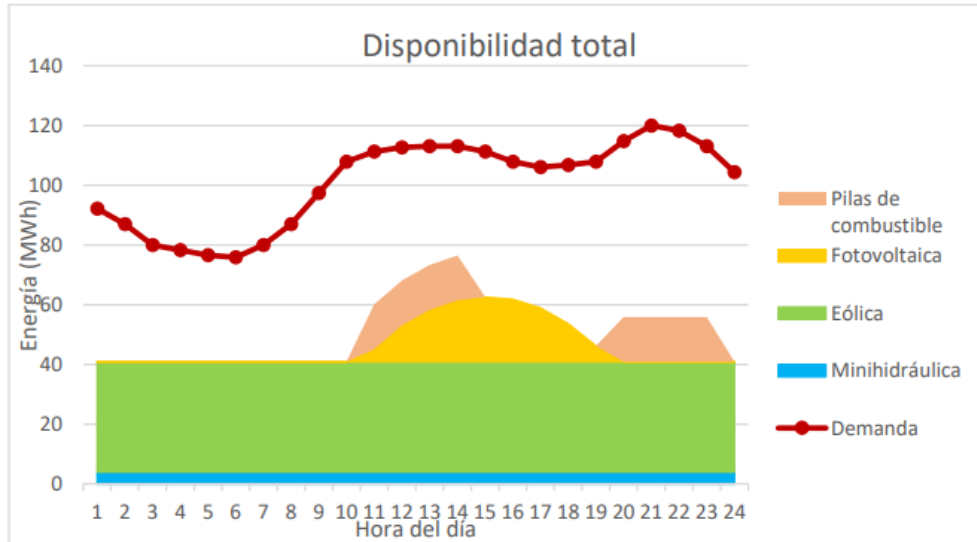
As for the amount of biomass waste to be fed into the gasification plant, it has been concluded that it will amount to some 250 tonnes per day, comprising solid urban waste from the Gomecello waste treatment centre together with stationary agricultural production provided by Salamanca.

As already mentioned, the back-up technology for the power generated by wind, photovoltaic and mini-hydro power will be fuel cells.

The hydrogen created by the plasma gasification plant will be stored in these cells. A battery with high efficiency, low temperatures and high tolerance to hydrogen impurities is needed. It has not been possible to find a cell with all these characteristics, but PEMFCs are the most suitable.

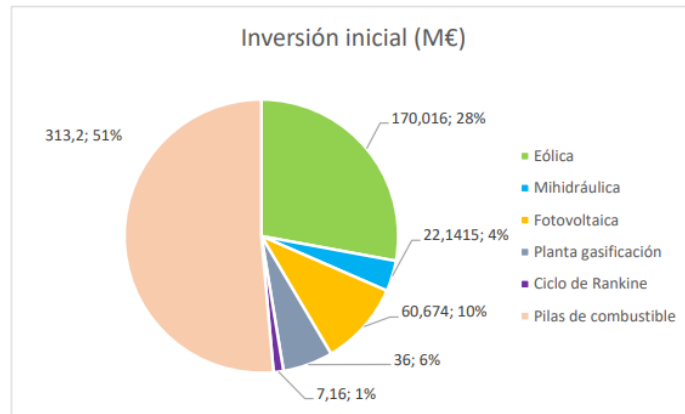
It has also been found that the best way to store hydrogen is in the solid state in the form of metal hydrides, as their formation and composition processes were very fast.

It has been decided to invest in 120 fuel cells as the contracted company (Ballard) creates fuel cells that can produce 1MW of net power and as a maximum peak of 120 MW has been assumed, 120 cells are required.



With regard to the economic study, there are several factors to be taken into account:

1. The period of time to be taken as the useful life of the technologies integrated in the microgrid will be 25 years, which is the amortisation period for the initial investment in the technologies.
2. Although many of the installations from which the energy is generated already exist, the economic study of the initial investment will be carried out from year zero in order to simplify the calculations.
3. For the study of the operating costs, 2% of the CPI is estimated for the useful life of the installations.
4. From the fourth year of operation, a learning curve will be considered for the different technologies studied, and it will be considered to be 1.6%.



The initial investments will be the most costly part of the project, which will decrease over the years, as the price of electricity sold through the microgrid will always be lower than the electricity market price, so both investors and consumers will benefit.



# Índice de la memoria

## PARTE I: MEMORIA

<i>Capítulo 1: INTRODUCCIÓN</i> .....	12
1. <i>MOTIVACIÓN</i> .....	12
2. <i>OBJETIVOS</i> .....	14
3. <i>OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE</i> .....	15
<i>Capítulo 2: ESTADO DEL ARTE</i> .....	18
1. <i>LAS MICRORREDES INTELIGENTES</i> .....	18
1.1 <i>EJEMPLOS DE MICRORREDES</i> .....	19
a) Santa Rita Jail Microgrid, Dublin, California.....	19
b) Sendau Microgrid, Japón .....	20
c) Microrred de Hautacondo, Chile .....	21
d) Universidad de Nueva York.....	22
2. <i>LA GASIFICACIÓN POR PLASMA</i> .....	22
3.1 <i>INSTALACIONES OPERATIVAS</i> .....	23
a) Mihama-Mikata, Japón .....	23
b) EcoValley – Utashinai, Hokkaido, Japón.....	24
c) California, USA (OMNI Conversion Technologies Inc.).....	24
3.2 <i>INSTALACIONES EN CONSTRUCCIÓN</i> .....	25
a) Morcenx, Francia (CHO-Power SAS) .....	25
b) Australia, Western Green Energy Hub (WGEH).....	25
<i>Capítulo 3: LA MICRORRED EN SALAMANCA</i> .....	28
1. <i>MICRORRED: DEFINICIÓN</i> .....	28
2. <i>LOCALIZACIÓN DE LA MICRORRED</i> .....	29
3. <i>DEMANDA ENERGÉTICA</i> .....	37
4. <i>ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN RENVABLE INSTALADA EN LAS PROXIMIDADES DE SALAMANCA</i> .....	38
4.1 <i>ENERGÍA MINIHIDRÁULICA</i> .....	40
4.2 <i>ENERGÍA EÓLICA</i> .....	42

4.3	<i>ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA</i> .....	44
4.4	<i>RESUMEN DE LAS TECNOLOGÍAS</i> .....	47
<i>Capítulo 4: SISTRMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA .. 49</i>		
1.	<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	49
2.	<i>OPCIONES DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RSISDUOS</i> .....	51
2.1	<i>VERTEDERO CONTROLADO</i> .....	51
2.2	<i>INCINERACIÓN</i> .....	52
2.3	<i>PIRÓLISIS</i> .....	53
2.4	<i>DIGESTIÓN ANAEROBIA</i> .....	54
2.5	<i>GASIFICACIÓN POR PLASMA</i> .....	55
3.	<i>RESIDUOS APROVECHABLES EN EL MUNICIPIO DE SALAMANCA</i> .....	57
3.1	<i>RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</i> .....	59
3.2	<i>RESIDUOS AGRÍCOLAS</i> .....	61
3.3	<i>RESUMEN RESIDUOS</i> .....	64
4.	<i>EL PLASMA</i> .....	65
5.	<i>CARACTERÍSTICAS DIFERENCIALES DEL PROCESO</i> .....	66
6.	<i>TECNOLOGÍA DEL PLASMA</i> .....	66
7.	<i>SISTEMA CONVERTIDOR DE PLASMA DIRECTO</i> .....	69
7.1	<i>ETAPAS DEL PROCESO DE GASIFIACACIÓN POR PLASMA</i> .....	69
7.2	<i>SISTEMAS Y COMPONENTES DE LA PLANTA DE GASIFICACIÓN POR PLASMA</i> 76	
	Vasija .....	76
	Antorcha de plasma .....	78
	Generador de corriente eléctrica .....	79
	Sistema de control del proceso .....	79
	Refrigeración de la antorcha.....	80
	Sistema de gas .....	80
	Sistema de descarga del material vitrificado .....	80
7.3	<i>CARACTERÍSTICAS DEL GAS DE SÍNTESIS</i> .....	81
7.4	<i>DIMENSIONADO DE LA PLANTA DE GASIFICACIÓN POR PLASMA</i> .....	82
7.5	<i>SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR: CICLO RANKINE</i> .....	82
	Caldera de recuperación de calor .....	84
	Turbina.....	85
	Condensador.....	85

Bomba.....	86
Potencia total del proceso.....	86
7.6 CALOR CEDIDO PARA EL SECADO DE RESIDUOS .....	87
7.7 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO .....	88
<b>Capítulo 5: PILAS DE COMBUSTIBLE Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO .....</b>	<b>91</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	91
2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE.....	91
3. TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE.....	93
3.1 PILAS DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA POLIMÉRICA (PEMFC) .....	94
3.2 PILAS ALCALINAS (AFC).....	96
3.3 PILAS DE COMBUSTIBLE DE ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFC).....	96
4. SELECCIÓN DE LA PILA DE COMBUSTIBLE .....	97
5. ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO .....	98
6. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE ALMACENAMIENTO .....	99
7. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA .....	99
<b>Capítulo 6: CONFIGURACIÓN DE LA MICRORRED .....</b>	<b>102</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	102
2. CONFIGURACIÓN ELEGIDA.....	103
2.1 TECNOLOGÍAS NO GESTIONABLES.....	103
2.2 INTERCAMBIOS CON LA RED.....	103
3. CASOS DE ESTUDIO .....	104
3.1 PRIMER CASO DE ESTUDIO: DISPONIBILIDAD TOTAL DE GENERACIÓN... 106	
3.2 SEGUNDO CASO DE ESTUDIO: AUSENCIA DE ENERGÍA EÓLICA.....	108
3.3 TERCER CASO DE ESTUDIO: AUSENCIA DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA.....	110
3.4 CUARTO CASO DE ESTUDIO: AUSENCIA DE ENERGÍA MINIHIDRÁULICA..	111
4. RESUMEN MICRORRED INTELIGENTE.....	112
<b>PARTE II: ESTUDIO ECONÓMICO</b>	
<b>Capítulo 7: ESTUDIO ECONÓMICO.....</b>	<b>115</b>
1. ESTUDIO ECONÓMICO .....	115
2. ESTUDIO ECONÓMICO DE LA ENERGÍA MINIHIDRÁULICA .....	116
2.1 INVERSIÓN INICIAL.....	117
2.2 COSTES DE EXPLOTACIÓN .....	119

2.3	<i>RESUMEN DE COSTES ENERGÍA MINHIDRÁULICA</i> .....	119
3.	ESTUDIO ECONÓMICO DE LA ENERGÍA EÓLICA.....	119
3.1	<i>INVERSIÓN INICIAL</i> .....	120
3.2	<i>COSTES DE GEERACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIETO</i> .....	122
3.3	<i>RESUMEN DE COSTES ENERGÍA EÓLICA</i> .....	122
4.	ESTUDIO ECONÓMICO DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA .....	123
4.1	<i>INVERSIÓN INICIAL</i> .....	123
4.2	<i>COSTES DE GEERACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIETO</i> .....	124
4.3	<i>RESUMEN DE COSTES ENERGÍA FOTOVOLTAICA</i> .....	124
5.	ESTUDIO ECONÓMICO DE LA PLANTA DE GASIFICACIÓN POR PLASMA .....	125
5.1	<i>GASIFICACIÓN POR PLASMA</i> .....	125
5.1.1	INVERSIÓN INICIAL.....	126
5.1.2	COSTES DE EXPLOTACIÓN.....	126
5.2	<i>CICLO DE RANKINE</i> .....	127
5.3	<i>PILAS DE COMBUSTIBLE</i> .....	128
5.3.1	INVERSIÓN INICIAL.....	128
5.3.2	COSTE DE EXPLOTACIÓN.....	128
5.3.3	RESUMEN PILAS DE COMBUSTIBLE.....	129
6.	ESTUDIO ECONÓMICO DE LA MICRORRED.....	129
7.	RENTABILIDAD DE LA MICORRED .....	132
<b>PARTE III: ANEJOS Y REFERENCIAS</b>		
1.	ANEJOS .....	140
	<i>ANEXO A. Catálogo BALLARD pilas de combustible</i> .....	140
	<i>ANEXO B. Costes de operación y mantenimiento (IPC y Curva de aprendizaje)</i> .....	141
	B.1 Energía minihidráulica.....	141
	B.2 Energía Eólica.....	142
	B.3 Energía Fotovoltaica.....	143
	B.4 Pilas de Combustible .....	144
2.	REFERENCIAS .....	145



## *Índice de figuras*

Figura 1. Microrred de Santa Rita .....	20
Figura 2. Microrred de Sendau .....	21
Figura 3. Microrred de Hautacondo.....	22
Figura 4. Planta gasificación Mihama-Mikata .....	23
Figura 5. Planta de gasificación OMNI Conversion Technologies Inc. ....	24
Figura 6. Planta de gasificación Morcenx.....	25
Figura 7. Planta de hidrógeno Western Green Energy Hub .....	26
Figura 8. Mapa Ciudad de Salamanca .....	29
Figura 9. Mapa redes eléctricas Salamanca [2] .....	30
Figura 10. Leyenda mapa redes eléctricas Salamanca [2] .....	30
Figura 11. Factor de carga típico de generación.....	39
Figura 12. Generación minihidráulica esperada [Elaboración Propia].....	42
Figura 13. Ejemplo variación eólica [8].....	43
Figura 14. Potencia solar fotovoltaica en España [8] .....	45
Figura 15. Irradiación solar en España [9] .....	45
Figura 16. Generación solar [Elaboración Propia] .....	47
Figura 17. Kilogramos de residuos por habitante en España [10].....	50
Figura 18. Planta de incineración Spittelau (Viena) .....	53
Figura 19. Esquema Pirolisis.....	54
Figura 20. Comparativas emisiones de metales de incineración y plasma. Fuente: Materiales Renovados .....	56
Figura 21. Comparativa emisiones de metales de contaminantes de incineración y plasma. Fuente: Materiales Renovados.....	56
Figura 22. Áreas de gestión de residuos urbanos [14] .....	58
Figura 23. Residuos en Europa 2005-2020 [15].....	59
Figura 24. Tipos de biomasa .....	61
Figura 25. Superficie cultivada (secano-regadío) [18] .....	63
Figura 26. Sistema de plasma tradicional (OMNI).....	67

Figura 27. Sistemas de plasma mixto (Alter NRG).....	68
Figura 28. Etapas del proceso de gasificación por plasma [19] .....	69
Figura 29. Rango de temperaturas a partir de las cuales se produce disociación [19] .....	71
Figura 30. Lavado Scrubber .....	74
Figura 31. Esquema del funcionamiento del sistema de neutralizado [19].....	74
Figura 32. Vasija sistema convertidor de plasma [19].....	77
Figura 33. Perfil de temperaturas en el interior de la vasija [19] .....	77
Figura 34. Comparativa tecnología antorcha de arco transferido y no transferido [19] .....	79
Figura 35. Composición del gas de síntesis en función de los residuos de entrada Fuente: Materiales Renovados .....	81
Figura 36. Esquema Ciclo Rankine .....	83
Figura 37. Esquema de una pila de combustible [19].....	92
Figura 38. Esquema pila de combustible PEMFC.....	95
Figura 39. Esquema pila de combustible AFC.....	96
Figura 40. Esquema pila de combustible PAFC.....	97
Figura 41. Curva de demanda estimada para la Ciudad de Salamanca [Elaboración Propia] .....	103
Figura 42. Curva generación solar fotovoltaica [Elaboración propia].....	105
Figura 43. Curva generación minihidráulica [Elaboración propia].....	105
Figura 44. Curva de demanda; disponibilidad total de generación [Elaboración propia]..	106
Figura 45. Curva de demanda con pilas de combustible; disponibilidad total de generación [Elaboración propia] .....	107
Figura 46. Disponibilidad total de generación eléctrica [Elaboración propia].....	108
Figura 47. Curva de demanda energética con ausencia de energía eólica [Elaboración propia] .....	109
Figura 48. Disponibilidad total de generación eléctrica con ausencia eólica [Elaboración propia] .....	110
Figura 49. Curva de demanda energética con ausencia de energía fotovoltaica [Elaboración propia] .....	110

---

Figura 50. Disponibilidad total de generación eléctrica con ausencia fotovoltaica [Elaboración propia] .....	111
Figura 51.. Curva de demanda energética con ausencia de energía minihidráulica [Elaboración propia] .....	111
Figura 52. Disponibilidad total de generación eléctrica con ausencia minihidráulica [Elaboración propia] .....	112
Figura 53. Costes inversión energía eólica.....	121
Figura 54. Coste medio de generación de las distintas tecnologías.....	130
Figura 55. Coste medio de generación de las distintas tecnologías.....	132
Figura 56. Tarifa eléctrica de España.....	133
Figura 57. Desglose tarifa eléctrica de España.....	133
Figura 58. Inversión inicial global del proyecto.....	136



## *Índice de tablas*

Tabla 1. Cultivos herbáceos provincia de Salamanca [3] .....	33
Tabla 2. Cultivos leñosos provincia de Salamanca [3] .....	34
Tabla 3. Distribución de tierras comarca de Salamanca [3].....	35
Tabla 4. Distribución temperaturas Salamanca [4].....	36
Tabla 5. Consumo energético 2018 [5].....	37
Tabla 6. Centrales minihidráulicas de interés [Elaboración Propia] .....	41
Tabla 7. Instalaciones eólicas de interés [Elaboración Propia] .....	44
Tabla 8. Instalaciones fotovoltaicas de interés [Elaboración Propia].....	46
Tabla 9. Resumen Tecnologías [Elaboración Propia].....	47
Tabla 10. Municipios y residuos de Salamanca [14] .....	57
Tabla 11. Cultivos principales de Salamanca [16] .....	61
Tabla 12. Cultivos frutales Salamanca [17] .....	62
Tabla 13. Composición gas síntesis limpio [Elaboración Propia].....	75
Tabla 14. Comportamiento de los puntos del Ciclo de Rankine .....	84
Tabla 15. Composición de gas de síntesis limpio [Elaboración Propia].....	88
Tabla 16. Tecnologías consideradas para las pilas de combustible.....	94
Tabla 17. Potencia instalada de las distintas tecnologías a usar [Elaboración propia] .....	104
Tabla 18. Instalaciones de energía minihidráulica Salamanca.....	117
Tabla 19. Costes inversión centrales minihidráulicas [24] .....	117
Tabla 20. Coste total energía minihidráulica.....	118
Tabla 21. Tabla resumen costes energía minihidráulica .....	119
Tabla 22. Instalaciones de energía eólica Salamanca .....	120
Tabla 23. Coste total inversión energía eólica.....	121
Tabla 24. Tabla resumen costes energía eólica .....	122
Tabla 25. Instalaciones energía fotovoltaica Salamanca .....	123
Tabla 26. Tabla resumen costes energía fotovoltaica .....	125
Tabla 27. Costes de operación y mantenimiento de la planta de gasificación por plasma	127
Tabla 28. Costes de personal de la planta de gasificación por plasma .....	127

---

Tabla 29. Tabla resumen costes pilas de combustible .....	129
Tabla 30. Tabla resumen costes y producción de las distintas tecnologías .....	130
Tabla 31. Precios del kWh en España del día 29/06/2022 [25].....	135
Tabla 32. Distribución costes año 2019 en España .....	136
Tabla 33. Flujo económico ciudad de Salamanca .....	137

# PARTE I: MEMORIA

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

### ***1. MOTIVACIÓN***

Existe un gran problema en España que le hace inferior energéticamente si se le compara con el resto de Europa, este problema es la gran dependencia energética que tiene el país.

España tiene una dependencia energética del 70% puesto que el país no llega a producir un tercio de la energía final que se consume. Esto sucede por varias razones, una de ellas es por ser una península y no tener muchos países vecinos con los que exportar e importar energía fácilmente, otra de las grandes razones es el fin de la explotación de las materias primas ya que hace poco más de un año la *Ley de Cambio Climático y Transición Energética* [1] prohibió la “exploración, permisos de investigación y concesiones de explotación de hidrocarburos en todo el territorio nacional”.

Actualmente la energía generada en el sistema eléctrico español puede dividirse en dos fuentes las denominadas régimen especial y régimen ordinario. Entre las de régimen ordinario se encuentran las centrales de carbón, los ciclos combinados o las centrales hidráulicas mientras que el régimen especial está constituido por aquellas tecnologías cuya energía procede de fuentes renovables como los parques eólicos o la energía solar fotovoltaica entre otras.

Una de las soluciones que se proponen para solventar el déficit de potencia instalada con el que sufre el país es el uso inmediato de las energías renovables como fuente de generación ya que en el año 2020 el 43% de la energía consumida en España provino de fuentes renovables, un repunte considerable respecto a los años previos cuando rondaba valores del 20%.

Se define energía renovable a aquel tipo de energía que proviene de fuentes inagotables. Las más destacadas en España son la energía eólica, la energía solar y la energía hidráulica, produciendo entre todas el 40% de la demanda energética del país.

Una desventaja de algunas energías renovables como la eólica o la solar es que son energías no gestionables, es decir, dependen de un recurso natural que no puede ser controlado por los hombres, como es el viento o el sol.

Para suplir la deficiencia energética se han construido plantas de ciclos combinados de gas, puede parecer una buena solución, pero estas centrales necesitan un funcionamiento constante a baja potencia, reservas de gas muy amplias y por lo tanto necesidad de personal de operación constante, no es una solución idónea ya que no se puede llenar el país con este tipo de centrales y además los combustibles utilizados son de origen fósil, por ello este proyecto se centra en un nuevo sistema de generación de energía, las microrredes inteligentes.

En consecuencia, las autoridades y gobiernos de todo el mundo están fomentando el despliegue de las energías renovables basado en sistemas de generación distribuida. Hay muchos desafíos presentes que deben ser superados para que, en un futuro, no muy lejano, este tipo de tecnología supere a los sistemas de distribución existentes y a parte se pueda obtener la misma rentabilidad, fiabilidad y seguridad con la que hoy en día se puede disfrutar. La principal razón es que los sistemas de distribución existentes no están diseñados para sistemas de generación distribuida ya que siguen un diseño de red pasiva, mientras que las microrredes se definen como distribuciones activas. Lo que marca la diferencia entre redes de distribución pasivas y activas, es que las activas añaden a su red generadores distribuidos locales, lo que implica flujos bidireccionales.

También cabe destacar como el sistema eléctrico español presenta el gran inconveniente de producir grandes cantidades de pérdidas de energía simplemente en el transporte de esta. El porcentaje de estas pérdidas ronda el 15%, porcentaje que se vería reducido por medio del uso de las microrredes.

Por lo tanto, la microrred que se desea diseñar estará alimentado por energías renovables no gestionables como la energía eólica o la energía fotovoltaica. Se necesita una tecnología alternativa a las ya mencionadas para cuando estas no puedan generar la energía suficiente para cubrir la curva de demanda, ya que al no ser gestionables en cualquier momento pueden

dejar de producir energía. La mejor opción de energía alternativa para este proyecto va a ser el hidrógeno. El hidrógeno se va a crear a través de la biomasa recogida de la ciudad de Salamanca y sus alrededores a través de una planta de gasificación por plasma, entre esos residuos biomásicos destacan los residuos sólidos urbanos y los residuos agrícolas de la ciudad, con esto también se desea terminar con el uso de los vertederos. Con todos estos residuos se producirá hidrógenos que será almacenado en pilas de combustible. Estas se conectarán a la microrred para satisfacer la demanda de la ciudad en caso de necesidad

La gasificación por plasma es una tecnología novedosa e innovadora y permite la total eliminación de los residuos gracias al plasma, que separa molecularmente los residuos para descomponerlos en sus componentes fundamentales (hidrógeno y monóxido de carbono). Como resultado del proceso se obtiene un gas de síntesis que será aprovechado como energía de almacenamiento para la microrred que se desea diseñar.

De esta forma, como se comentó anteriormente el funcionamiento de la microrred por medio de energías no gestionables no sería de los principales problemas, ya que en caso de necesidad habría baterías de hidrógeno que podrían alimentar a la microrred.

## **2. OBJETIVOS**

El proyecto se sitúa en el municipio de Salamanca (ciudad de Salamanca). El objetivo principal es la creación de una microrred que alimente a la ciudad con las energías renovables que esta misma ciudad ya aporta hoy en día. Las más destacables en la zona son la eólica y la fotovoltaica, aunque se quiere que estas pasen a segundo plano siendo la biomasa la principal energía renovable de la ciudad.

Con la implantación de la microrred se conseguiría una reducción de las pérdidas de transporte y una gran reducción de los gases tóxicos expuestos a la atmósfera que otro tipo de fuentes de energía generan. Todo esto de una manera económicamente viable y rentable para la ciudad de Salamanca.

Los principales objetivos que se quieren cumplir son:

- Recopilar y analizar los datos de generación y demanda de Salamanca, centrándose este estudio en el municipio de Salamanca. Se estudiará que factores afectan a la distribución de energía de esta ciudad y se plantearán distintas hipótesis teniendo en cuenta factores económicos, sociales y medioambientales de esta nueva forma de alimentación de la ciudad.
- Estudio del uso de las fuentes renovables de energía utilizadas actualmente en Salamanca y la contemplación de implementar la biomasa como fuente principal de energía renovable y por lo tanto contemplar la gasificación por plasma como recurso de eliminación de residuos, creando y almacenando energía en forma de hidrógeno.
- Estudio del diseño de la planta de gasificación por plasma.
- Estudio económico de todos los costes, tanto de inversión como de explotación de la microrred inteligente.

### **3. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE**

El desarrollo de este proyecto irá siempre ligado a cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible, entre todos ellos en este trabajo destacan:

- Energía asequible y no contaminante: El uso del hidrógeno como fuente de energía está empezando a tomar importancia en España, en un recurso muy nuevo e innovador que incluso en unos años puede llegar a adelantar a fuentes de energía que hoy en día tenemos muy presentes como el carbón y el gas natural, y así hacer uso de esta nueva energía en sectores como el de transporte y la generación eléctrica.

También cabe destacar que el proceso de gasificación por plasma se define como un proceso con balance energético positivo ya que no produce residuos ni componentes tóxicos.

- Ciudades y comunidades sostenibles: Como ya se ha comentado en otros apartados, en este proyecto se desea crear una nueva forma de vida tratando a la energía de una manera innovadora creando microrredes inteligentes. Este nuevo tipo de funcionamiento de la energía y la implantación de nuevos recursos como la biomasa como fuente de energía renovable mejorará la calidad de vida de las personas y reducirá la contaminación.
- Acción por el clima: Este punto podría definirse como el resumen de los dos anteriores ya que todas las ideas planteadas anteriormente siempre conllevan una actitud positiva con el clima.





## **CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE**

### ***1. LAS MICRORREDES INTELIGENTES***

Las Smart Grids o redes inteligentes permiten gestionar automáticamente flujos de energía y ajustarse a cambios en el suministro y la demanda de energía. Son capaces de reducir las pérdidas de transmisión y mejorar la eficiencia de transmisión de la electricidad y el calor, siendo estas redes bidireccionales, es decir, los consumidores pueden ser a la vez generadores.

Lo que se desea lograr con este proyecto es implantar una nueva forma de generación distribuida de energía, donde el aprovechamiento de la energía de la ciudad aumenta considerablemente y con la que además se pueda conseguir un parón del aumento exponencial de residuos urbanos generados en España, que hoy en día llega a valores de 22 millones de toneladas al año, cifra que debe reducirse considerablemente.

España es uno de los países cuyo precio energético es de los más elevados de la comunidad europea. Históricamente, España se ha caracterizado por su escasez de recursos energéticos, principalmente de combustible fósil, el cual llegó a su mayor pico en 2008 con un 81,3%.

La energía de origen fósil es altamente contaminante, en lugares como Asturias se llega a porcentajes del 4% de azufre en el carbón extraído como materia prima, y en Aragón puede llegar hasta el 8%. Estos datos son preocupantes ya que en países como Estados Unidos el máximo porcentaje de azufre aceptado en el carbón es del 1%. La depuración de gases no existe en las centrales de carbón en España, por ello desde el año 2010 se decidió terminar con este tipo de centrales.

Las energías renovables y las nuevas formas de generación no contaminante han conseguido una gran aceptación social en los últimos años. Se define energía renovable a aquel tipo de energía que proviene de fuentes inagotables. Las más destacadas en España son la energía

eólica, la energía solar y la energía hidráulica, produciendo entre todas el 40% de la demanda energética del país.

Una desventaja de algunas energías renovables como la eólica o la solar es que son energías no gestionables, es decir, dependen de un recurso natural que no puede ser controlado por los hombres, como es el viento o el sol. Por ello se quiere implementar en la microrred como fuente primaria de generación a biomasa, para poder obtener energía en forma de hidrógeno, almacenarlo y utilizarlo en aquellos momentos en los que las energías no gestionables ya mencionadas no cubran la curva de demanda.

Este tipo de microrredes distribuidas están conectadas a una red de baja tensión, compuestas por generadores distribuidos, equipos de almacenamiento y cargas controlables. Pueden funcionar en modo isla, resultando esto una gran ventaja ya que no todas las zonas de acceso del municipio de Salamanca son de fácil acceso y en ellas se debería implantar una nueva infraestructura eléctrica para su buen funcionamiento.

Como se ha comentado anteriormente también se puede conectar la microrred directamente a la red principal, permitiendo así un intercambio bidireccional de energía, vendiendo los excesos o comprando la energía necesaria en caso de déficit.

## ***1.1 EJEMPLOS DE MICRORREDES***

A continuación, se nombrarán algunas de las microrredes existentes en diferentes lugares del mundo.

### **a) Santa Rita Jail Microgrid, Dublin, California**

Fue inaugurada en 1989, reemplazando la cárcel original de Santa Rita que fue abierta en 1947. Hasta 4.000 personas pueden convivir en esta cárcel. Su pico de demanda es aproximadamente de 3MW y la carga obtenida de la microrred se utiliza principalmente para preparar más de 12.000 comidas al día, lavar unos 500kg de ropa diariamente y alimentar más de 10.000 lámparas.

En 2001 con la crisis energética de California se planteó el programa de la creación de esta microrred inteligente. Se instalaron 1,2MW de paneles fotovoltaicos en el techo de la cárcel para así alimentar la microrred.

Años más tarde se empezaron a instalar nuevos métodos de energías renovables para poder obtener más energía de la microrred, como cinco pequeñas turbinas de aire en el año 2005.

Como se puede observar, esta microrred no tiene por qué estar conectada a la red ya que cuenta con tecnologías de generación distribuida que le permite trabajar de forma autónoma.



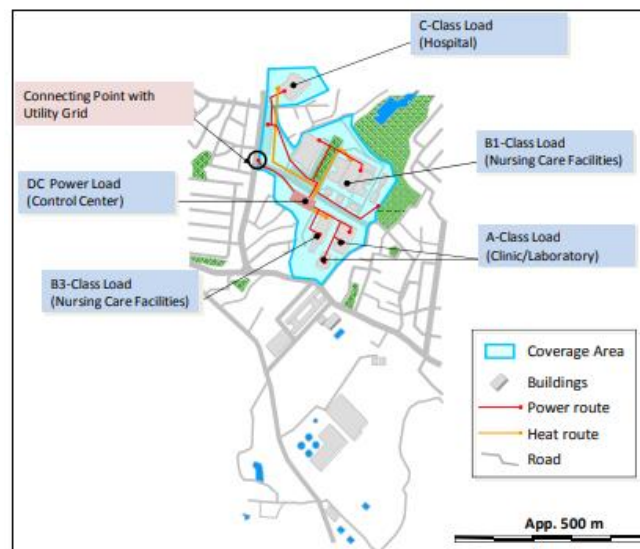
*Figura 1. Microrred de Santa Rita*

## **b) Sendau Microgrid, Japón**

Esta microrred se encuentra situada en el campus de la universidad Tohoku Fukushi. Fue diseñada en el año 2004 y tras unos años de estudio en el año 2008 se instaló en la universidad.

La microrred de Sendau tiene varias fuentes de alimentación: dos motores de gas, una pila de combustible de ácido fosfórico y un conjunto de paneles fotovoltaicos.

Se diseñó según un concepto de calidad de energía múltiple, con el que se quería poder suministrar energía a varias clases de la propia universidad.



*Figura 2. Microrred de Sendau*

### **c) Microrred de Hautacondo, Chile**

Esta microrred se encuentra en una pequeña aldea en la cadena montañosa de los Andes, ha sido el primero proyecto diseñado en Chile y es capaz de generar energía desconectada de la red principal durante un tiempo de 10 horas.

Esta microrred está compuesta por un generador diésel de 150 kW, paneles fotovoltaicos con los que se obtienen 22 kW de generación, una turbina de 3 kW, una batería de 170 kWh y un sistema de gestión de energía.



*Figura 3. Microrred de Hautacondo*

### **d) Universidad de Nueva York**

La universidad de Nueva York es una de las universidades más grandes de Estados Unidos, y desde 1960 produce su propia electricidad.

Está compuesta por dos turbinas de gas de 5,5 MW, dos generadores de vapor y una turbina de vapor de 2,4 MW.

## ***2. LA GASIFICACIÓN POR PLASMA***

Otra de las grandes tecnologías en este proyecto va a ser el uso del plasma, más en concreto la gasificación por plasma para poder almacenar energía en forma de hidrógeno a través de la biomasa.

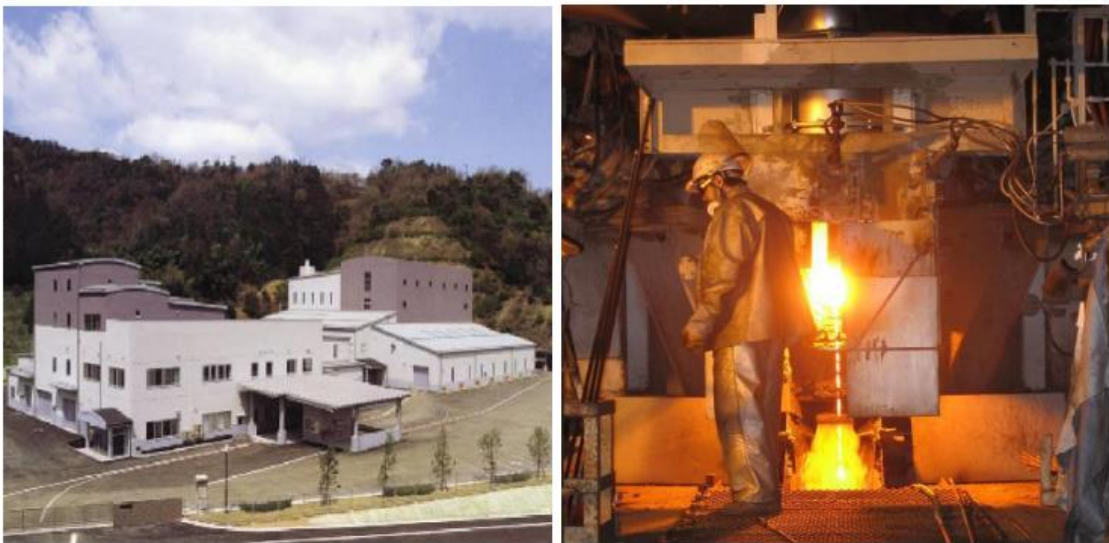
El aumento de la población y del consumo de bienes ha hecho que incrementen exponencialmente los residuos y la demanda energética. Existen muchos métodos de tratamiento de residuos, siendo los métodos más comunes los vertederos y la incineración, no obstante, el uso de estas tecnologías cada vez tiene un peor impacto sobre la población y sobre el medio ambiente.

El método de gasificación por plasma ha sido empleado en distintos países como Estados Unidos, Japón o India, todos ellos con resultados muy alentadores.

### **3.1 INSTALACIONES OPERATIVAS**

#### **a) Mihama-Mikata, Japón**

Esta planta comenzó a operar en 2002, puede procesar hasta 24 toneladas de residuos sólidos urbanos y cuatro toneladas al día de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales. Esta planta es relativamente pequeña, por ello no produce gas de síntesis como combustible. Sin embargo, produce vapor y agua caliente que se utiliza para generar energía y para generar calor en el parque industrial.



*Figura 4. Planta gasificación Mihama-Mikata*

## **b) EcoValley – Utashinai, Hokkaido, Japón**

En 2003 EcoValley se convirtió en una de las primeras instalaciones de conversión de residuos en energía del mundo utilizando la tecnología de gasificación por plasma a nivel comercial.

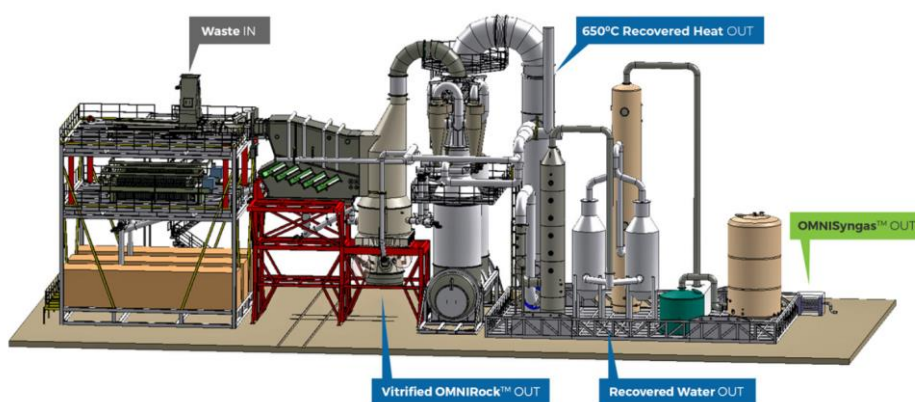
EcoValley se encuentra en Japón y lleva desde entonces procesando con éxito todo tipo de residuos sólidos urbanos.

La instalación procesa hasta 220 toneladas diarias o hasta 165 toneladas diarias de una mezcla 50/50 de chatarra (partes de automóviles y electrodomésticos triturados).

## **c) Californiaia, USA (OMNI Conversion Technologies Inc.)**

En 2021 comenzó un nuevo proyecto en California respaldado por los filántropos Chris Larsen y Lyna Lam. Una nueva planta de gasificación por plasma comercial, alimentada por residuos sólidos municipales no reciclables y así producir hidrógeno de carbono negativo para finales del año 2023.

Se desea producir alrededor de 5000 toneladas de hidrógeno de carbón negativo al año a partir de unas 200 toneladas de residuos no reciclables.



*Figura 5. Planta de gasificación OMNI Conversion Technologies Inc.*



## **3.2 INSTALACIONES EN CONSTRUCCIÓN**

### **a) Morcenx, Francia (CHO-Power SAS)**

Será la primera planta de gasificación por plasma que hace uso de los residuos sólidos urbanos y de la biomasa en Europa. Se estima una capacidad instalada de 11MW y un uso de 55.000 toneladas al año de residuos.



*Figura 6. Planta de gasificación Morcenx*

### **b) Australia, Western Green Energy Hub (WGEH)**

En Australia, concretamente al oeste de la isla se quiere crear la que hoy en día sería la mayor planta de hidrógeno verde del planeta. Empezaría a construirse en 2028 y pretende producir hasta 3,5 millones de toneladas de hidrógeno verde.

El proyecto generará hasta 50 GW de energía eólica y solar en más de 15.000  $km^2$ .

La empresa responsable es Western Green Energy Hub (WGEH), compuesto por InterContinental Energy, CWP Global y Miring Green Energy Limited. La inversión de esta planta llega al valor de los 100 millones de dólares.



*Figura 7. Planta de hidrógeno Western Green Energy Hub*



## ***CAPÍTULO 3: LA MICRORRED EN SALAMANCA***

### ***1. MICRORRED: DEFINICIÓN***

Una microrred inteligente se puede definir como un sistema de generación eléctrica bidireccional que permite la distribución de energía entre proveedores y consumidores. Pueden funcionar conectada a la red eléctrica general o de forma autónoma y favorecen a las fuentes de generación de energía renovable, así como a la reducción de emisiones contaminantes.

Uno de los principales beneficios de las microrredes inteligentes es el aumento aportado en cuanto seguridad y confiabilidad, ya que, si la red falla o hay un corte en el servicio, o cualquier tipo de avería en la red la microrred puede seguir generando energía de forma autónoma. Esto es esencial para aquellos consumidores que no pueden permitirse un parón en caso de fallo como en aeropuertos, hospitales, centros de datos...etc.

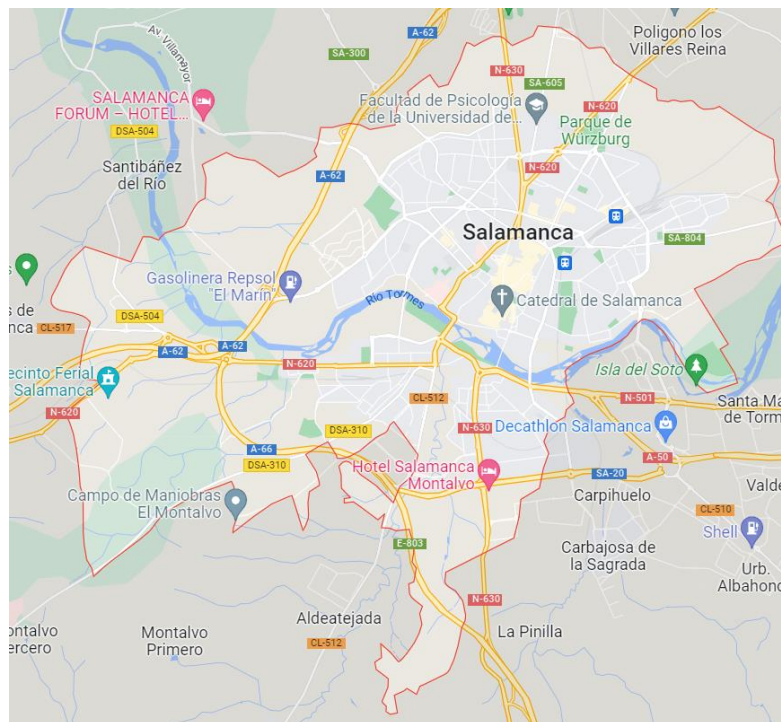
La principal función de la microrred que se quiere diseñar en Salamanca no va a ser el asegurar la reserva de energía a consumidores críticos, sino que lo que se pretende es unir el concepto de generación distribuida con la integración de las tecnologías renovables existentes en la zona.

El principal problema que se plantea es la no gestionabilidad de generación renovable disponible, por lo que se quiere implementar en un primer plano la biomasa como forma de energía renovable y, como se explicará más adelante, crear gracias a la biomasa un sistema de reserva capaz de satisfacer la curva de demanda en caso de déficit de generación renovable no gestionable.

## **2. LOCALIZACIÓN DE LA MICRORRED**

Se ha elegido el municipio de Salamanca, capital de la provincia homónima como localidad para el diseño de la microrred inteligente. Salamanca es una provincia española situada al sudoeste de la comunidad autónoma de Castilla y León.

El municipio de Salamanca se encuentra en la comarca de Campo Charro que presenta una topografía plana, donde predomina un ecosistema de encinares y pastizales dedicados a la ganadería. La ciudad se encuentra a 800 metros sobre el nivel del mar y la altitud del municipio varía dependiendo de la zona, desde los 911 metros en la zona de Los Montalvos (suroeste) o unos 763 metros en el último tramo del municipio del río Tormes, río que atraviesa el municipio. Se encuentra a unos 64 kilómetros de Zamora y a unos 250 kilómetros de Madrid.



*Figura 8. Mapa Ciudad de Salamanca*

El distribuidor eléctrico en la ciudad de Salamanca es Iberdrola y Red Eléctrica de España el transportista, siendo este el transportista único del sistema eléctrico español (TSO).

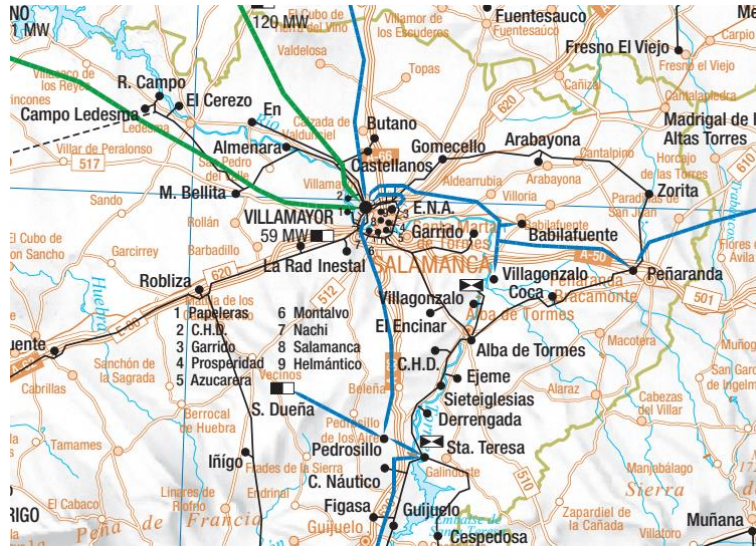


Figura 9. Mapa redes eléctricas Salamanca [2]

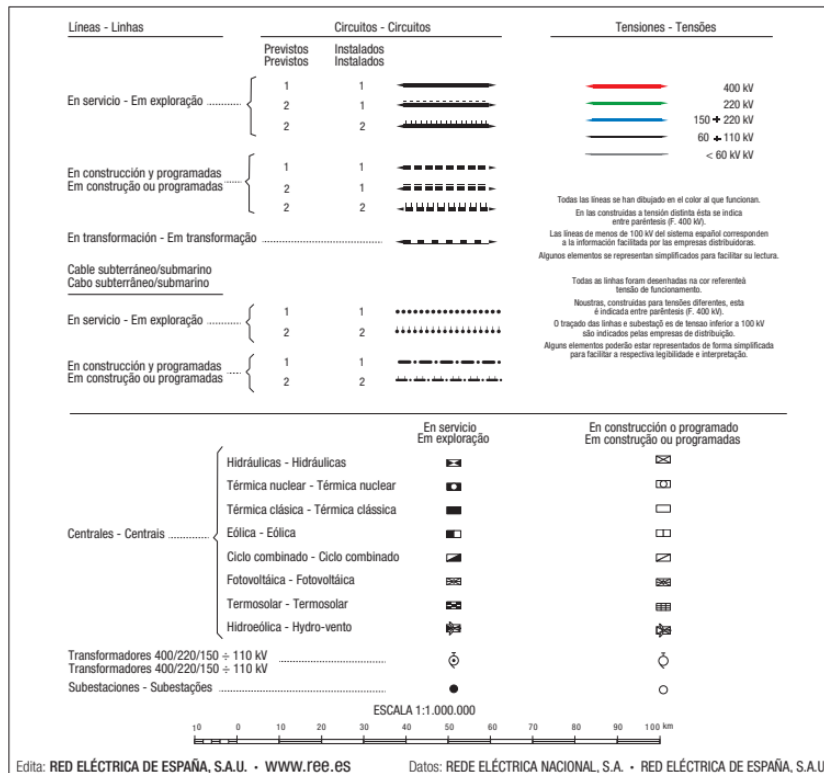


Figura 10. Leyenda mapa redes eléctricas Salamanca [2]

El municipio de Salamanca tiene una población de unos 143.978 habitantes, registrados en 2018 según el Instituto Nacional de Estadística, menos del doble de la población total de la provincia de Salamanca, estimada en unos 333.649 habitantes.

De todas las comarcas pertenecientes a la provincia de Salamanca, la comarca de Salamanca destaca en cuanto a número de habitantes siendo estos unos 214.654 y entre las siete comarcas restantes se obtendrían 118.995 habitantes.

Dentro de la comarca de Salamanca se encuentra el municipio de Salamanca (Ciudad de Salamanca), con una superficie de 39,34  $km^2$  donde se centrará el diseño de la microrred.

Según los últimos datos revisados por el INE en 2019 el sector económico más destacable de la provincia de Salamanca es el sector servicio con un valor de 4,97 millones de euros, un 78,04% del total de los sectores, seguido del sector industria con 604.550 miles de euros y un porcentaje del 9,48%. La agricultura es el servicio que menos dinero otorga a la provincia de Salamanca con un valor de 373.049 mil euros, un 5,85% del total.

El PIB registrado en 2018 en la provincia de Salamanca es de 7,05 millones de euros y de 21.187 mil euros per cápita, tomando Salamanca el puesto número 40 de las provincias de España.

La economía salmantina depende principalmente de la Universidad de Salamanca y del turismo, aunque siguen siendo de gran importancia el sector de la agricultura y la ganadería, seguidos del sector industrial.

El municipio de Salamanca consta de una superficie agrícola de unas 50 mil hectáreas, durante el ciclo de primavera-verano los cultivos más destacables son los de maíz y sorgo mientras que durante el ciclo de otoño-invierno destaca el trigo y la cebada.

En las siguientes tablas se muestra la distribución de los principales cultivos en la provincia de Salamanca, aunque para este trabajo solo recalcaremos los valores provenientes del

*CAPÍTULO 3: LA MICRORRED EN SALAMANCA*

---

municipio de Salamanca ya que nos servirán más adelante para estimar la biomasa necesaria para el proceso de gasificación por plasma [3]. Cabe destacar que este tipo de biomasa que podemos obtener de los cultivos es estacionario y su porcentaje en comparación con la cantidad de residuos sólidos urbanos que se pretenden obtener será muy pequeño.



**Tabla 1-VI: Distribución de los principales cultivos herbáceos (ha) en las Comarcas Agrarias de la provincia de Salamanca**

Comarca Agraria	Trigo		Cebada		Avena		Cereales de invierno*		Otros		Total							
	Sec.	Reg.	Sec.	Reg.	Sec.	Reg.	Sec.	Reg.	Sec.	Reg.	Sec.	Reg.						
Alba de Tormes	6.647	284	6.931	11.195	661	11.856	2.541	82	2.623	-	-	4.681	4.577	9.258	25.064	5.604	30.668	
Ciudad Rodrigo	2.619	31	2.650	391	174	565	1.832	195	2.027	5.942	5	5.947	2.238	451	2.689	13.022	856	13.878
Fuente de San Esteban	4.097	24	4.121	2.521	107	2.628	2.065	135	2.200	5.549	12	5.561	1.762	190	1.952	15.994	468	16.462
La Sierra	22	0	22	13	0	13	174	2	176	-	-	234	230	464	443	232	675	
Ledesma	1.645	22	1.667	1.927	125	2.052	3.132	136	3.268	3.303	12	3.315	2.449	553	3.002	12.456	848	13.304
Peñaranda de Bracamonte	14.552	515	15.067	29.158	2.445	31.603	3.994	90	4.084	-	-	5.861	7.088	12.949	53.565	10.138	63.703	
Salamanca	20.409	1.078	21.487	22.503	1.189	23.692	5.969	422	6.391	-	-	17.210	16.088	33.298	66.091	18.777	84.868	
Vitigudino	680	0	680	-	-	-	1.388	1	1.389	5.114	0	5.114	2.340	68	2.408	9.522	69	9.591
<b>TOTAL</b>	<b>50.671</b>	<b>1.954</b>	<b>52.625</b>	<b>69.096</b>	<b>4.702</b>	<b>73.798</b>	<b>21.028</b>	<b>1.062</b>	<b>22.090</b>	<b>19.908</b>	<b>29</b>	<b>19.937</b>	<b>35.454</b>	<b>29.245</b>	<b>64.699</b>	<b>196.157</b>	<b>36.992</b>	<b>233.149</b>

Fuente: Subdirección General de Estadística Agroalimentaria MAGRAMA 2004.

\* Cereales de invierno para forrajes.

Tabla 1. Cultivos herbáceos provincia de Salamanca [3]

**Tabla 1-VII: Distribución de los cultivos leñosos (ha) en las Comarcas Agrarias de la provincia de Salamanca**

Comarca Agraria	Viñedo		Olivar		Frutales			Cítricos			Otros			Total		
	Secano	-	Secano	-	Secano	Regadío	Total	Secano	Regadío	Total	Secano	Regadío	Total	Secano	Regadío	Total
Alba de Tormes	-	-	-	-	1	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1	2
Ciudad Rodrigo	99	-	-	-	21	0	23	0	0	0	0	0	0	120	2	122
Fuente de San Esteban	-	-	-	-	2	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	2
La Sierra	1.031	1.566	830	69	899	0	899	0	0	0	0	0	0	3.427	69	3.496
Ledesma	158	-	-	-	-	0	-	0	0	0	0	0	0	158	0	158
Peñaranda de Bracamonte	30	-	-	-	-	0	-	0	0	0	0	0	2	30	2	32
Salamanca	105	-	9	3	12	0	12	0	0	0	2	11	13	116	14	130
Vitigudino	1.196	1.479	946	0	946	1	946	1	2	3	0	0	0	3.622	2	3.624
<b>TOTAL</b>	<b>2.619</b>	<b>3.045</b>	<b>1.809</b>	<b>75</b>	<b>1.884</b>	<b>1</b>	<b>1.884</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>13</b>	<b>15</b>	<b>7.476</b>	<b>90</b>	<b>7.566</b>

Fuente: Subdirección General de Estadística Agroalimentaria MAGRAMA 2004.

Tabla 2. Cultivos leñosos provincia de Salamanca [3]

Distribución de tierras	Superficie (ha)		
	Secano	Regadío	Total
<b>Cultivos herbáceos</b>			
Trigo	20.409	1.078	21.487
Cebada	22.503	1.189	23.692
Avena	5.969	422	6.391
Maíz	0	10.031	10.031
Girasol	11.357	469	11.826
Patata media estación y tardía	0	2.725	2.725
Remolacha azucarera	0	1.914	1.914
Otros	5.853	949	6.802
<b>Tierras ocupadas por cultivos herbáceos</b>	<b>66.091</b>	<b>18.777</b>	<b>84.868</b>
<b>Cultivos leñosos</b>			
Viñedo no asociado	105	0	105
Frutales	9	3	12
Otros	2	11	13
<b>Tierras ocupadas por cultivos leñosos</b>	<b>116</b>	<b>14</b>	<b>130</b>
<b>Barbecho y otras tierras no ocupadas</b>	<b>11.850</b>	<b>857</b>	<b>12.707</b>
<b>TIERRAS DE CULTIVO</b>	<b>78.057</b>	<b>19.648</b>	<b>97.705</b>
Prados naturales	5.664	153	5.817
Pastizales	16.962	0	16.962
<b>PRADOS Y PASTOS</b>	<b>22.626</b>	<b>153</b>	<b>22.779</b>
Monte maderable	360	147	507
Monte abierto	14.853	-	14.853
Monte leñoso	14	-	14
<b>TERRENO FORESTAL</b>	<b>15.227</b>	<b>147</b>	<b>15.374</b>
Erial a pastos	673	-	673
Terreno improductivo	1.126	-	1.126
Superficie no agrícola	7.984	-	7.984
Ríos y lagos	722	-	722
<b>OTRAS SUPERFICIES</b>	<b>10.505</b>	<b>-</b>	<b>10.505</b>
<b>SUPERFICIE TOTAL</b>	<b>126.415</b>	<b>19.948</b>	<b>146.363</b>

Fuente: Subdirección General de Estadística Agroalimentaria MAGRAMA 2004

*Tabla 3. Distribución de tierras comarca de Salamanca [3]*

*CAPÍTULO 3: LA MICRORRED EN SALAMANCA*

En conclusión, se puede estimar una superficie total cultivada en la comarca de Salamanca de 84.868 ha de cultivos herbáceos y 130 ha de cultivos leñosos, haciendo así una totalidad de 84.998 ha cultivadas. Para este proyecto se despreciarán los cultivos leñosos ya que sus hectáreas de cultivo son mucho menores que las de cultivos herbáceos. Datos relevantes para el estudio de los que se hablará más adelante.

El clima en la comarca de Salamanca es frío con temperaturas mínimas de  $-7^{\circ}\text{C}$ , incluso menores, y tiene una duración de unos ocho meses, mientras que el periodo cálido y seco dura unos cuatro meses. Durante estos cuatro meses áridos suele haber un déficit hídrico en la comarca de Salamanca. En conclusión, el tipo de clima se podría clasificar como mediterráneo templado.

Anualmente las precipitaciones suelen tener un valor de los 400 mm anuales y la temperatura media anual ronda los  $12^{\circ}\text{C}$ . La ciudad disfruta alrededor de unas 2.981 horas de sol anuales y unos 65 días de lluvias.

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Temp. máx. abs. ( $^{\circ}\text{C}$ )	17.2	23.0	27.0	29.6	34.4	37.0	39.4	39.0	37.2	29.8	22.4	18.6	39.4
Temp. máx. media ( $^{\circ}\text{C}$ )	8.6	11.2	14.9	16.5	20.6	26.6	30.0	29.5	25.1	18.9	12.8	9.4	18.7
Temp. media ( $^{\circ}\text{C}$ )	4.0	5.5	8.3	10.1	14.0	18.8	21.5	21.1	17.6	12.6	7.6	4.9	12.2
Temp. mín. media ( $^{\circ}\text{C}$ )	-0.7	-0.2	1.7	3.8	7.3	11.0	12.9	12.6	10.0	6.4	2.4	0.4	5.6
Temp. mín. abs. ( $^{\circ}\text{C}$ )	-11.2	-12.6	-9.0	-4.8	-2.3	3.0	5.4	4.8	1.0	-3.2	-10.6	-12.0	-12.6
Precipitación total (mm)	29.5	25.3	20.7	37.6	46.8	29.1	11.3	12.5	32.4	45.6	40.4	41.5	372.5
Días de precipitaciones ( $\geq 1$ mm)	5.8	5.4	4.7	7.4	7.9	3.8	1.8	1.9	4.2	7.1	6.9	6.9	63.8
Días de nevadas ( $\geq$ )	1.6	1.9	0.8	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.2	6.8
Horas de sol	118	154	211	224	265	317	358	330	251	183	130	104	2667
Humedad relativa (%)	82	73	63	62	59	52	47	51	59	71	79	83	65

*Tabla 4. Distribución temperaturas Salamanca [4]*

### **3. DEMANDA ENERGÉTICA**

En cuanto al sector energético, la provincia de Salamanca cuenta con algunas de las mayores instalaciones hidroeléctricas de España, entre las que cabe destacar las presas de Aldeadávila, Villarino y Saucelle. Solo con estas tres presas se producen unos 5000 GWh, más del 12% de la producción hidroeléctrica nacional [4]

La central hidroeléctrica de Aldeadávila es la más importante de España, consta de una potencia instalada de 1275 MW y pertenece a la empresa de energías Iberdrola, empresa distribuidora de la ciudad de Salamanca.

Como se ha destacado antes Iberdrola es la empresa distribuidora en la ciudad de Salamanca. Según datos aportados por el Ente Regional de la Energía de Castilla y León (EREN), y confirmados por la empresa Iberdrola, la provincia de Salamanca representa el 11,34% de la demanda eléctrica de la comunidad autónoma, con un consumo total de 1.426.263 MWh en el año 2018, distribuidos de la siguiente manera:

<b>Consumo energía eléctrica 2018 (MWh)</b>					
<b>USO DOMÉSTICO</b>	<b>USO INDUSTRIAL Y SERVICIOS</b>	<b>OTROS USOS</b>	<b>TOTAL (MWh)</b>	<b>% RESPECTO DEL TOTAL REGIONAL</b>	<b>% RESPECTO AÑO ANTERIOR</b>
457.839	967.121	1.304	1.426.263	11,34%	+ 2,89%

*Tabla 5. Consumo energético 2018 [5]*

Pero como se ha comentado, la microrred que se desea construir se centrará en el municipio de Salamanca, por lo que habrá que estimar estos valores según diferentes criterios.

El municipio de Salamanca (Ciudad de Salamanca) tiene una población de unos 143.978 habitantes, mientras que la provincia tiene un total de 333.649 habitantes. El número de habitantes de la ciudad representa al 43% de la población de la provincia y si se tiene en cuenta el sector servicios e industria, que se localizan mayoritariamente en esta ciudad, el porcentaje de 43% puede aumentar al 60%.

Por lo tanto, la energía en el municipio de Salamanca se estimará de la siguiente manera:

$$1.426.263 \frac{MWh}{año} \cdot \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \cdot 60\% = 97,68 \text{ MWh}$$

Por lo que se espera un consumo medio aproximado de 98 MWh en el municipio de Salamanca durante un año. En toda curva de consumo se encuentran máximos y mínimos y la ciudad de Salamanca no será una excepción. Ha sido muy complicado encontrar datos de la ciudad por lo que se van a asemejar en este proyecto a los de la ciudad de Toledo, ciudad donde la industria está mucho más desarrollada por lo que sus picos de máximos y mínimos pueden tener valores un poco menores a los reales en la ciudad de Salamanca.

Los siguientes datos aportados por el TFG de L. Tapiador Ferrero [6] indican como en 2015 se llegó a un máximo de consumo de 76 MWh. Para este proyecto se aumentará este pico en un 20% de la media anual de energía de Salamanca, por lo que se supondrá que se ha llegado un pico en la ciudad de estudio de 120 MWh.

Este dato es muy importante en el estudio de la planta de gasificación y el almacenamiento del hidrógeno, ya que se deberá poder satisfacer la demanda si por algún casual llegara a ese valor de pico.

#### ***4. ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN RENOVABLE INSTALADA EN LAS PROXIMIDADES DE SALAMANCA***

Se desea gestionar la microrred inteligente con aquellas tecnologías renovables que se puedan optar como válidas y suficientes para cubrir la curva de demanda que la ciudad de Salamanca proponga.

De entre todas estas tecnologías las más problemáticas son las energías no gestionables. Son aquellas que dependen de un recurso natural que no puede ser controlado por los hombres,

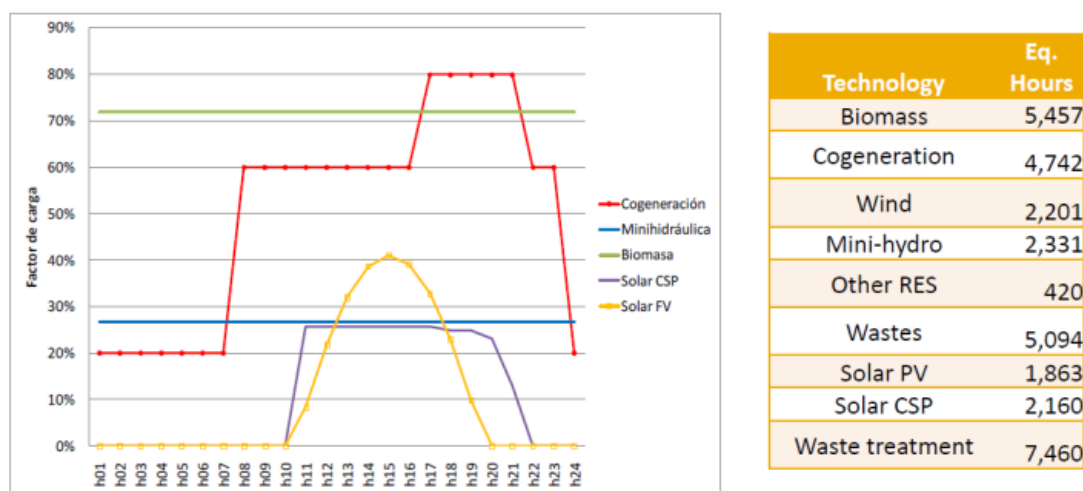
como es el viento o el sol. Para suplir la deficiencia energética se han construido plantas de ciclos combinados de gas que puede parecer una buena solución, pero estas centrales necesitan un funcionamiento constante a baja potencia, reservas de gas muy amplias y por lo tanto necesidad de personal de operación constante, en conclusión, no es una solución más idónea para el proyecto que se desea realizar.

Se quiere destacar como energía gestionable para la microrred la biomasa, ya que solo en España se obtienen 22 millones de toneladas de residuos al año y se vierten en vertederos sin ningún uso.

Se van por tanto a analizar en los siguientes apartados las diferentes fuentes de energías locales de Salamanca con las que poder alimentar la microrred que se desea construir.

Es imprescindible tener en cuenta el factor de carga típico de las tecnologías de generación ya que este influirá notablemente. También es importante conocer los horarios de funcionamiento anuales que suelen representar cada tipo de tecnología.

En la siguiente figura se presenta una gráfica típica del factor de carga de generación:



*Figura 11. Factor de carga típico de generación*

Se recalcarán en los siguientes apartados los siguientes tipos de energías: minihidráulica, eólica y solar fotovoltaica. La información aportada a continuación se ha obtenido de diversas fuentes verídicas, así como del TFM de Antonio Rubi Rodríguez [7].

## **4.1 ENERGÍA MINIHIDRÁULICA**

Se denomina energía minihidráulica a aquella energía hidráulica cuya potencia instalada no supere los 10 MW. Este tipo de centrales se dividen en tres tipos:

1. Central de fuga fluyente:

El cauce del río es desviado a través de diversos canales y conductos por los que se dirige el agua a la central donde se encuentra la turbina generadora de energía. Tras el paso por la turbina el agua se vuelve a redirigir a su cauce.

2. Central de pie de presa:

Es aquella central que almacena el agua procedente de las lluvias o el deshielo para cuando estén completamente llenas hacer pasar esa agua por una turbina, que como en el caso anterior de las centrales de fuga fluyente, generará electricidad. No suelen ser de un tamaño muy amplio ya que para considerarlas minihidráulicas no deben superar los 10 MW y por ello suelen aprovecharse para producir energía solo durante cortos periodos de horas.

3. Centrales de canal de riego o de abastecimiento:

Dependen del desnivel del suelo. En caso de que el desnivel se encuentre en el canal por donde circula el agua se utiliza este mismo para llevarlo hasta la turbina. Si el desnivel es entre el canal y algún río próximo a él se instalará la central cerca de este río y se utilizarán para generar energía las aguas sobrantes del canal.



Se ha tomado como radio para el estudio aproximadamente un valor de 50 Km alrededor de Salamanca, donde se han recogido los siguientes datos en cuanto a centrales minihidráulicas:

Instalación	Municipio	Distancia a Salamanca (km)	Potencia instalada (MW)
C.H. de Ledesma	Ledesma	34,6	1,471
Central de Almenara	Almenara de Tormes	16,9	0,396
Zorita de Valverdón	Valverdón	12,29	1
La Flecha	Cabrerizos	4,41	0,984
Villagonzalo I y II	Villagonzalo de Tormes	16,43	3,86
C.H. Santa Eolina	Villagonzalo de Tormes	16,43	0,42
San Fernando	Cespedosa de Tormes	47	5
Puente Congosto I	Puente del Congosto	54,79	0,88
C.H. El Tejado	El Tejado	58,5	0,75
<b>Total</b>			<b>14,761</b>

*Tabla 6. Centrales minihidráulicas de interés [Elaboración Propia]*

Todas estas centrales se abastecen del río Duero, que tiene un cauce medio de  $21 \text{ m}^3/\text{s}$  en las centrales mencionadas. Todas las centrales son del tipo de fuga fluyente por lo que su caudal dependerá de la época del año según las precipitaciones que se den.

El total que se puede obtener de las distintas centrales minihidráulicas es de unos 15 MW, y considerando el factor de carga típico de este tipo de centrales representado en la *Figura 11* se obtiene la siguiente curva de potencia generada:



*Figura 12. Generación minihidráulica esperada [Elaboración Propia]*

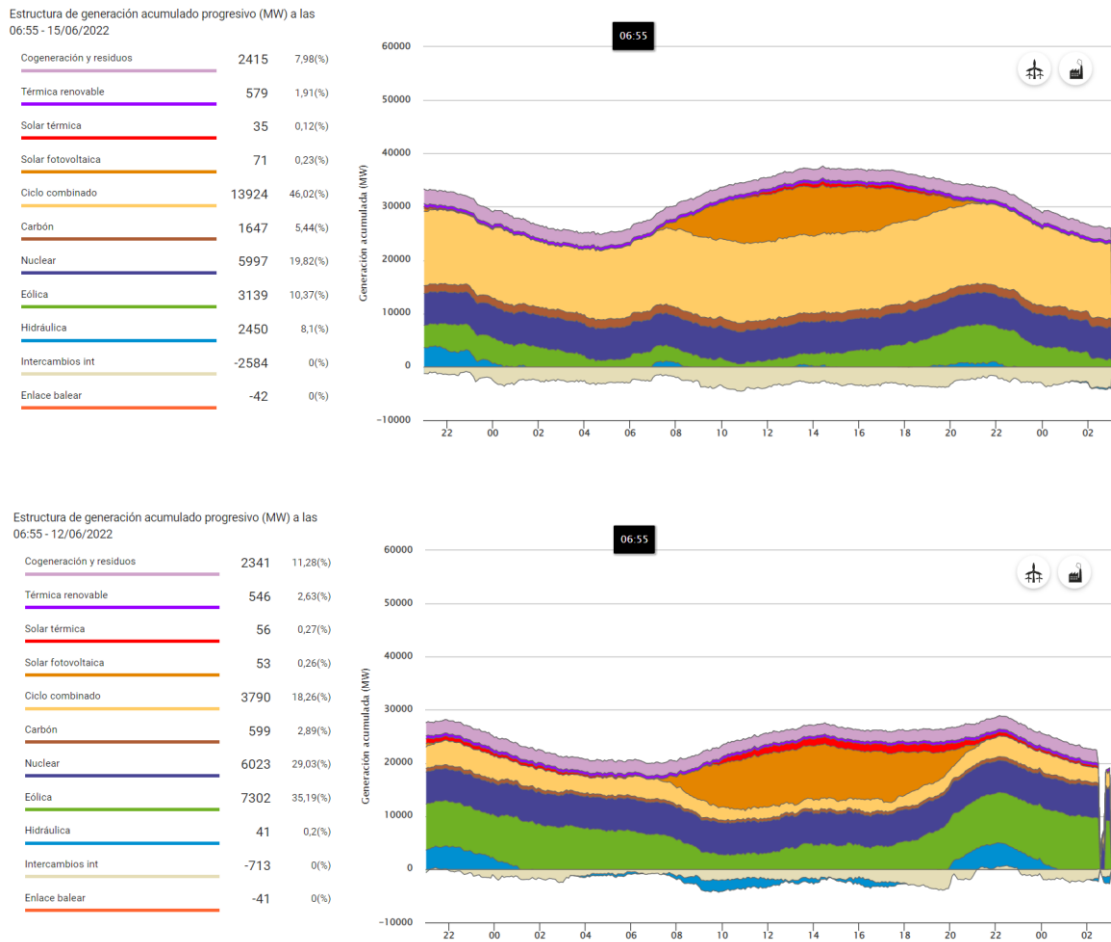
Será una aportación mínima, pero su gran ventaja es que será constante ya que este tipo de centrales trabajan gracias al flujo del río Duero, de manera que esos 4 MWh permanecerán activos las 24 horas del día.

## **4.2 ENERGÍA EÓLICA**

La energía eólica tiene la desventaja de ser una energía no gestionable, aunque no produce contaminación, no emite gases de efecto invernadero ni ninguna otra sustancia perjudicial a la atmósfera.

En momentos de falta de viento la capacidad de producción de los molinos eólicos se vería afectada y por ello se podría no llegar a los límites de potencia estudiados en los anteriores apartados. Esto corrobora la necesidad de un sistema de respaldo que cubra las variaciones de este tipo de defectos.

En las siguientes imágenes se puede apreciar como varía el porcentaje de energía eólica en apenas unos días de diferencia.



*Figura 13. Ejemplo variación eólica [8]*

Los porcentajes de generación pueden variar a grandes escalas dependiendo no solo de la estación del año en la que se estudie, el mes o incluso se pueden llegar a percibir grandes cambios en apenas unas horas.

Alrededor de Salamanca se encuentran los siguientes parques eólicos:

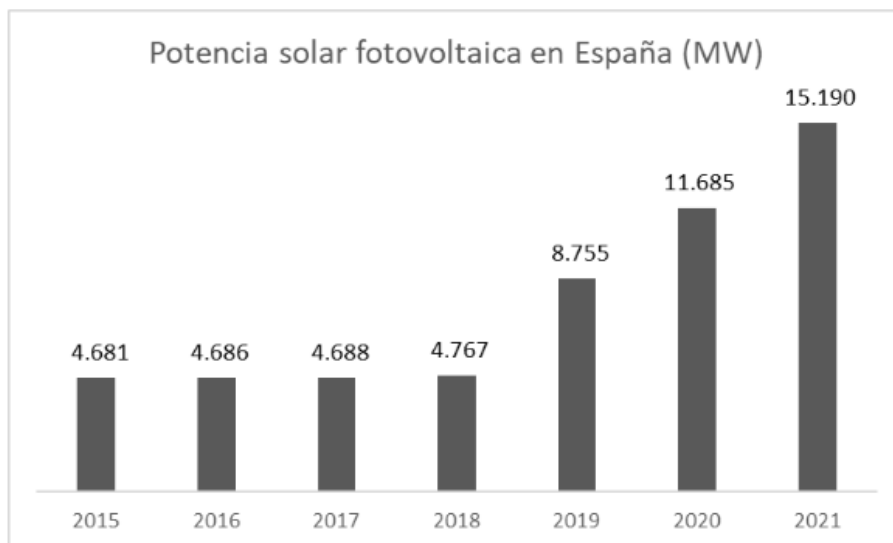
Parque eólico	Municipio	Distancia a Salamanca (km)	Potencia instalada (MW)
Sierra de Dueña	Frades de la Sierra	36,36	31,45
Matabuey	Garcihernández	22,73	16,2
Alba de Tormes	Alba de Tormes	20,58	4,5
Bandeleras	Zamayón	24	34
Teso Santo	Santiz y Palacios del Arzobispo	32,8	50
Los Concejiles	Sorihuela	58,9	11,69
<b>Total</b>			<b>147,84</b>

*Tabla 7. Instalaciones eólicas de interés [Elaboración Propia]*

Aunque no salga en la lista por estar a mayor distancia de los 50 km estimados para el estudio, el parque eólico de Sorihuela podría aumentar la eficiencia de la microrred que se desea diseñar.

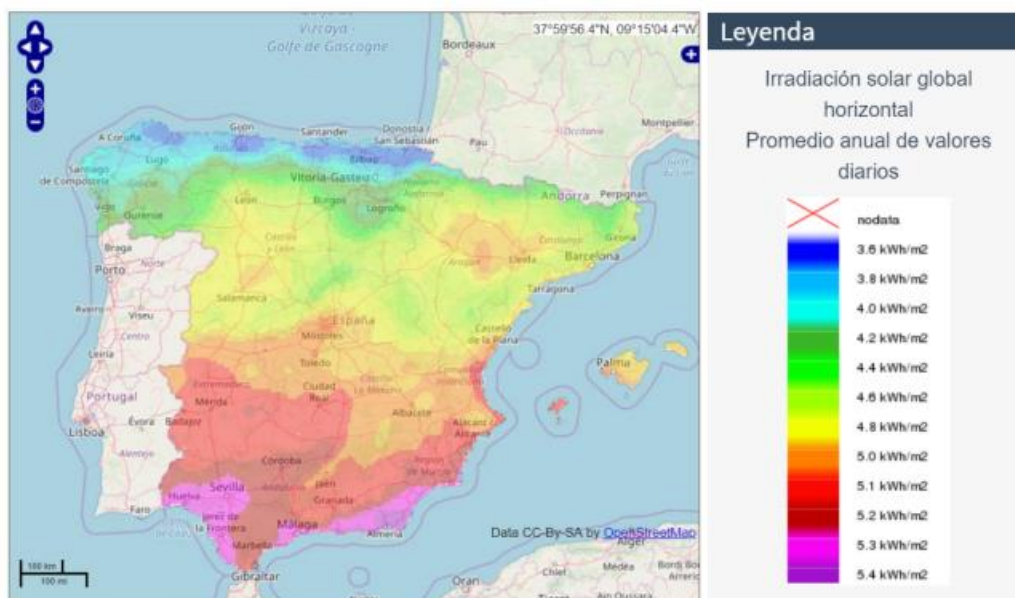
### **4.3 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA**

En los últimos tres años la potencia solar fotovoltaica instalada en el territorio español se ha triplicado, pasando de 4.767 MW a inicios de 2019, a un total de 15.190 MW a finales de 2021. Esto ha implicado un aumento en solo dos años del mix energético en cuanto a energía solar fotovoltaica de un 3,55% en 2019 a un 8,05% en 2021.



*Figura 14. Potencia solar fotovoltaica en España [8]*

En cuanto a Salamanca, es necesario saber cuáles son las características solares de la zona. En la siguiente imagen se muestra la cantidad de irradiación en la península, estando Salamanca en unos valores de entre 4,6 y 4,8 KWh/m<sup>2</sup>.



*Figura 15. Irradiación solar en España [9]*

*CAPÍTULO 3: LA MICRORRED EN SALAMANCA*

Se han estudiado las diferentes instalaciones que se encuentran en los alrededores de Salamanca, siendo estas un total de 806. En total se obtendría de todas ellas una potencia instalada de 338 MW, pero no todas entran dentro de las características del proyecto ya que, o son instalaciones pequeñas y poco eficientes o se encuentran demasiado lejos del lugar donde se desea crear la microrred.

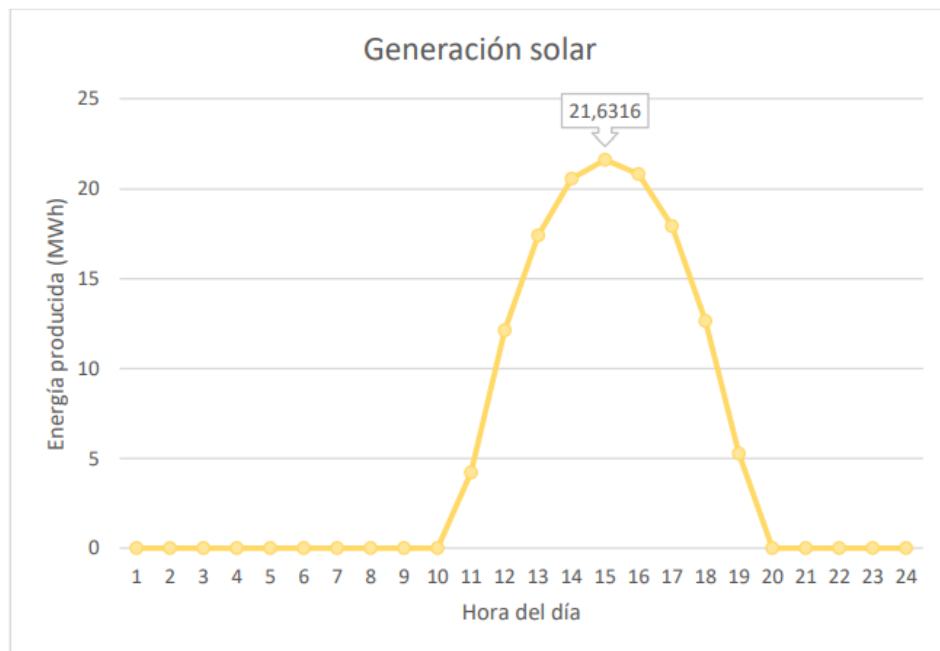
En la siguiente tabla dividida por municipios se muestran los valores de potencia instalada y las instalaciones que cada municipio podría aportar a la microrred, también se muestran los kilómetros con respecto al municipio de Salamanca, siendo este el de kilómetro cero.

Municipio	Distancia (km)	Potencia instalada (MW)	Nº instalaciones
Valverdón	12,29	5	1
Zarapicos	20	11,69	118
San Pedro del valle	19	1,4	14
Zorita de la frontera	40	2	1
Mozárbez	14,09	4,44	45
Pitiegua	19,49	4,3	44
Narros de Matalayegua	41	1,13	28
Ledesma	31,21	0,84	9
Pedrosillo el Ralo	14,07	0,9	1
Topas	20,94	0,5	9
Galindo y Perahuy	15,63	0,55	6
Morille	18,41	3,3	33
Negrilla de Palencia	14,8	0,64	5
Salamanca	0	1,6	16
Carbajosa de la Sagrada	4,31	3,3	33
Abusejo	49,58	11,17	11
<b>Total</b>		<b>52,76</b>	<b>374</b>

*Tabla 8. Instalaciones fotovoltaicas de interés [Elaboración Propia]*

Son un total de 374 instalaciones que aportarán un valor de 52,76 MW de potencia a la microrred.

Basado en la *Figura 11*, así sería aproximadamente la curva de generación solar de la microrred:



*Figura 16. Generación solar [Elaboración Propia]*

#### **4.4 RESUMEN DE LAS TECNOLOGÍAS**

En la siguiente tabla se muestra todo lo mencionado en los apartados anteriores, se mostrará el tipo de energía y la potencia instalada que esta puede ofrecer a la microrred.

Tecnología	Potencia instalada (MW)
Eólica	147,84
Fotovoltaica	52,76
Minihidráulica	14,76

*Tabla 9. Resumen Tecnologías [Elaboración Propia]*





## ***CAPÍTULO 4: SISTRMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA***

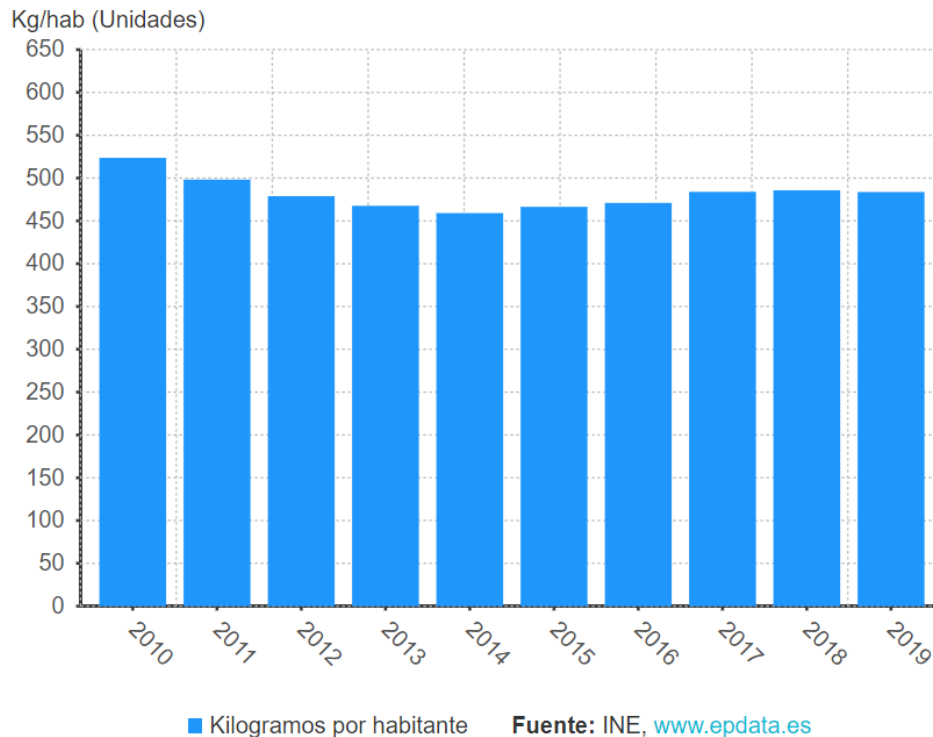
### ***1. INTRODUCCIÓN***

La microrred inteligente que se desea diseñar y su buen flujo de suministro a los ciudadanos del municipio dependerá de las energías no gestionables de la ciudad, por lo tanto, es predecible que pueda haber algún tipo de fallo de suministro, por lo que se quiere crear un sistema de reserva que pueda seguir la curva de demanda y tener respuesta rápida tras un fallo de flujo de energía entre la microrred y los consumidores.

Por otro lado, hoy en día, aunque se intente involucrar y concienciar a la población del cambio climático existe un gran problema con la gestión y almacenamiento de residuos. Los más destacables son los residuos sólidos urbanos (RSU) y cuyos tratamientos son dañinos para el planeta en donde se crean gases (biogás) muy difíciles de capturar y a la par sustancias tóxicas que dañan el suelo.

En España se recogieron un total de 483,7 kilogramos de residuos urbanos por habitante en 2019, según la ‘Estadística sobre Recogida de Residuos Urbanos’ de Instituto Nacional de Estadística (INE) [10].

*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*



*Figura 17. Kilogramos de residuos por habitante en España [10]*

Lo que se quiere lograr con este proyecto es implantar una nueva forma de generación distribuida de energía, donde el aprovechamiento de la energía de la ciudad aumente considerablemente y con la que además se pueda conseguir un parón del aumento exponencial de residuos urbanos generados en España, que hoy en día llega a valores de 22 millones de toneladas al año, cifra que debe disminuir considerablemente.

La técnica de los vertederos controlados es la más popular en España, pero no la más recomendable, lo que se propone en este proyecto es el uso de todos esos residuos sólidos urbanos para poder usarlos en la planta de gasificación por plasma y poder crear hidrógeno y así almacenarlo para poder usarlo como fuente de reserva de energía de la microrred inteligente que se desea diseñar.

## **2. OPCIONES DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RSISDUOS**

Se va a incluir por tanto una planta de tratamiento de residuos para proporcionar energía en forma de hidrógeno. Hay diferentes formas de tratar los residuos, a continuación, se nombran las técnicas más comunes.

- Vertedero controlado
- Incineración
- Pirolisis
- Digestión anaerobia
- Gasificación por plasma

### **2.1 VERTEDERO CONTROLADO**

Un vertedero controlado es un espacio subterráneo donde se desprenden todo tipo de residuos, produciéndose la fermentación de los residuos orgánicos liberándose gases y líquidos contaminantes lixiviados. Se supone que existe una impermeabilidad total del suelo y un sistema de canalización que captura el biogás formado por los vertidos, pero hoy en día en España de los 147 vertederos controlados existentes, solo el vertedero controlado en la comunidad de Asturias ‘COGERSA’ [11] es el único que realmente capta y aprovecha el biogás creado por los residuos para así transformarlo en energía.

La durabilidad media de los vertederos es de unos 25 años, tras ese periodo de tiempo los vertederos deben ser sellados. Tras ser sellados las emisiones producidas deben ser controladas durante un tiempo estimado de entre 30-50 años.

El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC) [12] define una serie de objetivos con los que se quiere lograr una reducción de gases efecto invernadero, lo que en un futuro próximo conllevará al cierre de los vertederos controlados del país, así como el aumento del uso de las energías renovables.

---

*CAPÍTULO 4: SISTRMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

---

Uno de los principales problemas en Salamanca es el gran aumento que ha habido estos últimos años de los vertederos ilegales, es decir, vertederos no controlados. España quedó sancionada en 2017 por el Tribunal Europeo de Justicia por los 61 vertederos incontrolados activos y no sellados en España, de los cuales 9 de ellos se encontraban en la provincia de Salamanca [13], hoy en día ya sellados y cumpliendo la normativa.

En conclusión, para el proyecto que se desea realizar el uso de vertederos controlados como opción de tratamiento de residuos no cumple con los requisitos establecidos.

## **2.2 INCINERACIÓN**

La incineración como opción de tratamiento de residuos puede parecer una forma muy atractiva para este proyecto ya que en otros países como Austria se encuentra una de las mayores y más conocidas plantas de incineración existentes, esta planta localizada en Spittelau (Viena) es una planta incineradora de basura situada en el distrito 9 de la ciudad, es decir está situada en el casco urbano de la ciudad.

Esta planta de incineración produce energía para 150.000 viviendas y más de 3.000 edificios públicos y su impacto ambiental es prácticamente nulo.



*Figura 18. Planta de incineración Spittelau (Viena)*

En España, sin embargo, el método de incineración de residuos no se plantea como el más eficiente y en vista a la población es el sistema que más crítica obtiene ya que su impacto es muy dañino produciendo contaminantes tóxicos como dioxinas, furanos, metales pesados como el plomo, cadmio o mercurio y una gran cantidad de gases efecto invernadero, así como gases ácidos y partículas ultrafinas.

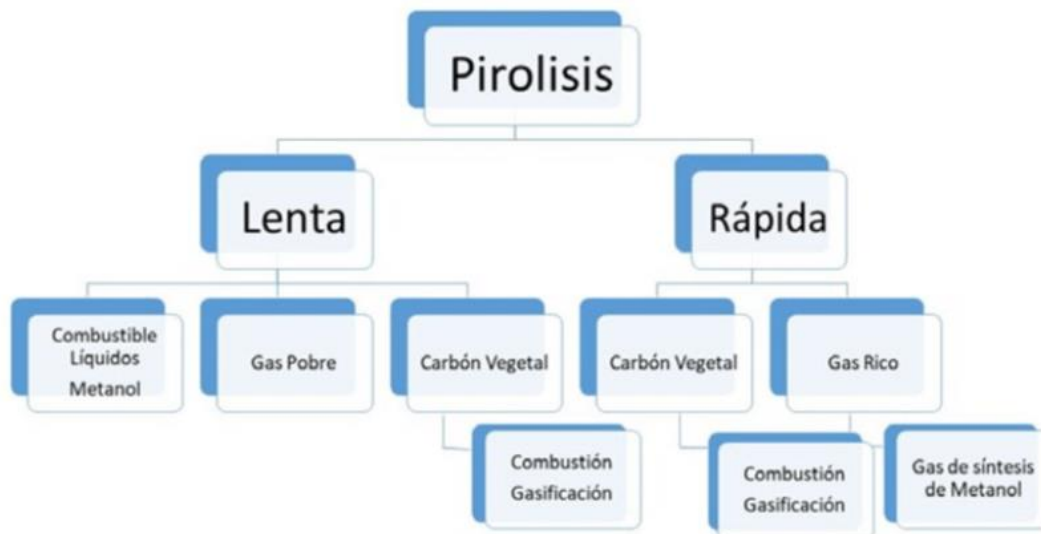
También cabe destacar que para el proceso de incineración es necesario el uso de grandes turbinas o motores de combustión de arranque con rendimientos no muy elevados y tiempos de arranque no favorables, por lo que este método de tratamiento de residuos tampoco será el adecuado para realizar el proyecto.

### **2.3 PIRÓLISIS**

La pirólisis es un tipo de degradación térmica que se caracteriza por el no uso del oxígeno, por lo tanto, no se produce la reacción de combustión en el proceso de descomposición de residuos.

*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

Una de las ventajas de este método de tratamiento de residuos es que la producción de gases es pequeña y los metales pesados quedan atrapados en sólidos muy estables, aunque una de las grandes desventajas aparte de que el proceso es muy lento, es que se obtienen compuestos clorados, nitrogenados y azufre.



*Figura 19. Esquema Pirolisis*

Aunque esta tecnología no difiera mucho con la gasificación por plasma ya que como se puede observar en el esquema los subproductos obtenidos tras la pirólisis pueden ser aprovechados para la producción de energía, pero el hecho de necesitar un proceso previo elevaría el coste de la planta frente al de una planta de gasificación por plasma, por lo que de nuevo se descarta este tipo de tecnología.

## **2.4 DIGESTIÓN ANAEROBIA**

Se trata de un proceso complejo en el que intervienen diferentes grupos de microorganismos, en el cual con ausencia de oxígeno los residuos se transforman en una mezcla de gases (biogás), constituido principalmente por metano y dióxido de carbono.

---

*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

---

Como se explicó en el proceso de incineración, también serán necesarios para la digestión anaeróbica el uso de motores o turbinas de combustión interna, por lo que por este inconveniente y por la composición del biogás obtenido que debe ser tratado por su gran contenido en gases contaminantes esta no es la mejor opción de tratamiento de residuos para el proyecto.

## **2.5 GASIFICACIÓN POR PLASMA**

La gasificación por plasma es un proceso térmico mediante el cual a unas temperaturas entre los 3.000°C y 5.000°C se consigue la disociación completa de la materia orgánica que se introduce para la futura creación de hidrógeno.

El proceso de gasificación por plasma ya ha sido utilizado tanto en Europa como en EE.UU y cumple con todo tipo de reglamentos exigidos tanto por la Comisión de la Unión Europea en Medio ambiente como con la Environment Protection Agency (EPA) en los Estados Unidos.

Es un proceso limpio y libre de cenizas ya que a tan altas temperaturas de trabajo se reducen considerablemente las grandes cantidades de  $CO_2$  que se producían en otro tipo de tecnologías de eliminación de residuos como la incineración.

En la vasija inicial se insertarían los residuos obtenidos del municipio de Salamanca y alrededores, los cuales se descomponen en sus componentes fundamentales (hidrógeno y monóxido de carbono) y tras varios procesos que se explicarán de forma más detallada más adelante se podrá obtener hidrógeno.

La razón más importante por la que se quiere encaminar el proyecto al uso de la gasificación por plasma como método de eliminación de residuos es por la gran cantidad de residuos que se obtienen diariamente, para ser más concretos 483,7 kilogramos de residuos urbanos por habitante en los últimos estudios realizados en el año 2019.

*CAPÍTULO 4: SISTRMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

De lo planteado de concluye que el método de gasificación por plasma es la tecnología que mejor se amolda al diseño del proyecto a realizar, siendo innecesaria además la separación de los diferentes tipos de residuos sólidos urbanos con los que se van a trabajar.

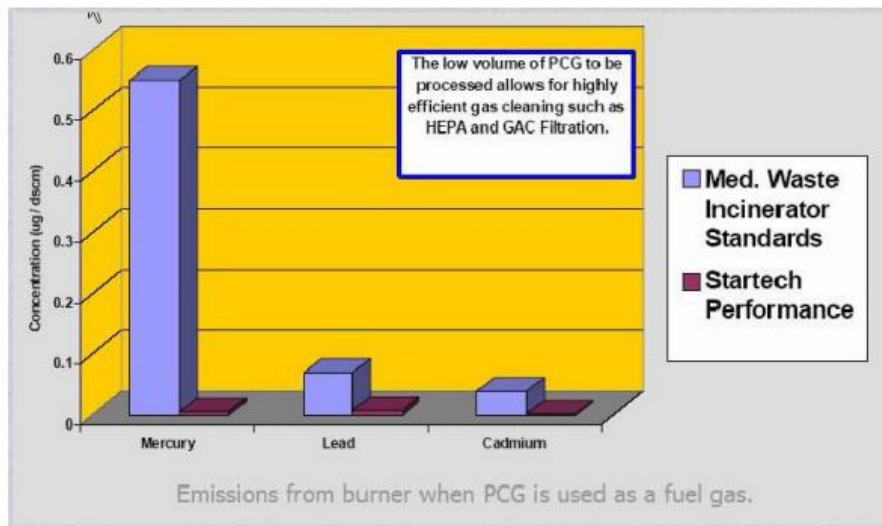


Figura 20. Comparativas emisiones de metales de incineración y plasma. Fuente: Materiales Renovados

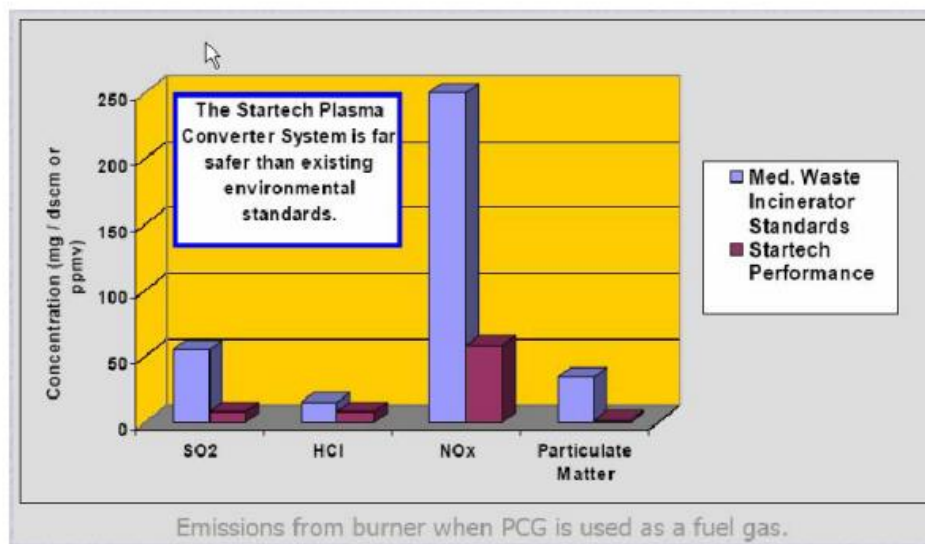


Figura 21. Comparativa emisiones de metales de contaminantes de incineración y plasma. Fuente: Materiales Renovados



*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

### **3. RESIDUOS APROVECHABLES EN EL MUNICIPIO DE SALAMANCA**

Tras años de procesos y cierres de vertederos en la ciudad de Salamanca el *Plan Regional de Ámbito Sectorial de Residuos Urbanos y Residuos de Envases de Castilla y León 2004-2010* [14] apoya un modelo uniprovincial de gestión de residuos en la ciudad, creando un único Centro de Tratamiento de Residuos (CTR) en el Municipio de Gomecello, muy cerca del Municipio de Salamanca donde se desea diseñar la microrred.

En la provincia de Salamanca se estima una generación de 142.470 toneladas/año de residuos urbanos, lo que supone una producción de 1,12kg/hab al día.

En la siguiente tabla se recogen los datos obtenidos del tratamiento de residuos separados por las ocho áreas de gestión que trasladarán sus residuos al CTR, de las cuales todas tienen prevista una estación de transferencia hasta el CTR menos Ledesma que es la única que transporta directamente los residuos al CTR sin necesidad de una estación de transferencia.

	<b>Nº DE MUNICIPIOS</b>	<b>HABITANTES</b>	<b>RESIDUOS (Tm/año)</b>
<b>ÁREAS CON ESTACION DE TRANSFERENCIA</b>			
BÉJAR	23	21.419	8.612,04
CIUDAD RODRIGO	44	28.157	10.618,52
LEDESMA	41	10.700	3.365,21
PEÑARANDA	52	28.812	9.999,12
GUIJUELO	42	14.667	5.144,11
TAMAMES	58	17.969	5.747,37
VITIGUDINO	53	20.720	6.854,93
<b>ÁREA DE GESTIÓN DIRECTA AL CENTRO DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS</b>			
GOMECELLO	49	205.827	86.788,59
<b>TOTAL</b>	<b>362</b>	<b>348.271</b>	<b>137.129,89</b>

Fuente: Plan Regional de Ámbito Sectorial de Residuos Urbanos 2004-2010  
Elaboración propia

*Tabla 10. Municipios y residuos de Salamanca [14]*

*CAPÍTULO 4: SISTRMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

El Centro de Tratamiento de Residuos está dotado para un valor de 170.000 toneladas/año de residuos urbanos. Cuenta con dos líneas de clasificación y triaje, con biometanización de la fracción orgánica (35.000 toneladas/año), compostaje y depósito de rechazos.



*Figura 22. Áreas de gestión de residuos urbanos [14]*

El vertedero de Gomecello está lleno apenas 10 años después de su puesta en marcha y el CTR no ha cumplido con todas las funciones requeridas.

El fin de este proyecto es la eliminación del uso de vertederos controlados, como el construido en Gomecello, para el tratamiento de residuos, y usar todas estas grandes cantidades de residuos sólidos urbanos hoy en día almacenados en estos grandes espacios para poder usarlos como fuente de energía renovable (biomasa) en la futura planta de gasificación por plasma que se desea construir.

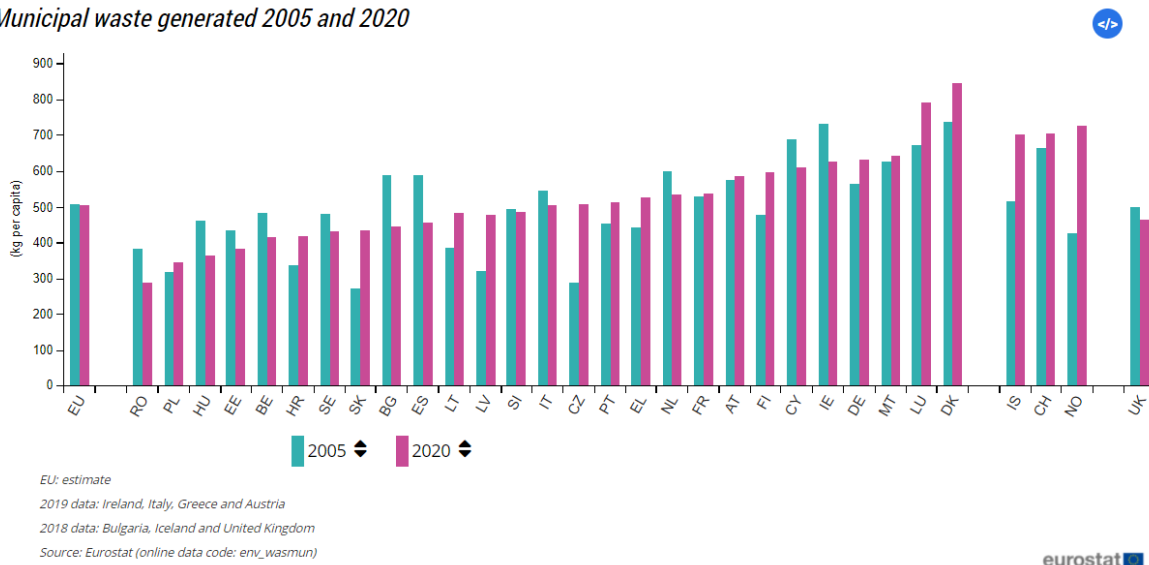
*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

En los siguientes capítulos se discutirá que diferentes tipos de residuos se pueden encontrar en el municipio de Salamanca y en sus alrededores para poder alimentar a la planta de gasificación por plasma.

### 3.1 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Según los últimos datos obtenidos por Eurostat [15], en España ha habido una reducción de la generación de residuos sólidos urbanos siendo en 2005 una cantidad de 588 kg per capita y en 2020 se reduce esa cantidad a 455 kg per capita, siendo este valor inferior a la media de la Unión Europea (505 kg per capita).

*Municipal waste generated 2005 and 2020*



*Figura 23. Residuos en Europa 2005-2020 [15]*

En caso de Salamanca, la gestión de residuos corre a cargo de la empresa GIRSA ‘Gestión Integral de Residuos Sólidos en la Provincia de Salamanca’, responsable de la explotación de las ocho instalaciones comentadas anteriormente desde 2008.

*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

El poder calorífico de los residuos sólidos urbanos se estima entre las 3000 kcal/kg y las 5000 kcal/kg, para el proyecto se supondrá un poder calorífico y sabiendo que en el vertedero de Gomecello, muy próximo al municipio de Salamanca, por lo que se podrán trasladar de una manera sencilla a la planta de gasificación que se desea diseñar, una cantidad de 142.470 toneladas/año de residuos sólidos urbanos.

De estas 142.470 toneladas anuales solo el 49% representa materia orgánica, mientras que el otro 51% son plásticos, vidrios, papel-cartón, etc. Por lo que se deberá aplicar este porcentaje para el cálculo de la potencia.

Biomasa disponible:

$$142.470 \frac{Tn}{año} \cdot 49\% = 69.810,3 \frac{Tn}{año}$$

La energía que se podría obtener sería:

$$69.810,3 \frac{Tn}{año} \cdot 1.000 \frac{Kg}{Tm} \cdot 3.000 \frac{Kcal}{kg} = 209.430,9 \frac{Gcal}{año}$$

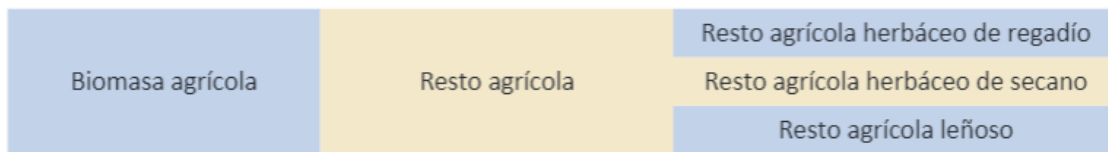
Lo que supone una energía de 243,46 GWh. Este valor de energía también puede representarse como potencia:

$$243,56 \text{ GWh} \cdot \frac{1 \text{ año}}{8760 \text{ horas}} = 27,8 \text{ MW}$$

Por lo que la planta de gasificación por plasma, si se utilizara la totalidad de residuos que se llevan al vertedero controlado, podría producir **27,8 MW** cada hora, sin considerar rendimientos del proceso.

### 3.2 RESIDUOS AGRÍCOLAS

La biomasa residual agrícola es un recurso procedente exclusivamente de la gestión de los terrenos del sector agrícola. El “Plan Regional de Ámbito Sectorial de la Bioenergía de Castilla y León 2008-2020” clasifica la biomasa de la siguiente forma:



*Figura 24. Tipos de biomasa*

Los más relevantes en Salamanca son los cultivos herbáceos del cereal, que crean residuos de naturaleza fibrosa como pajas o cañotes, y también cabe destacar los cultivos leñosos (olivar, leñosos, cítricos y frutales).

En la siguiente tabla se recogen los valores obtenidos por la Junta de Castilla y León [16] en el año 2010, año en el estudio de los residuos agrícolas se va a basar ya que resulta muy complicado encontrar datos verídicos de este tipo de residuos al ser un tipo de residuos estacionarios y con menor importancia que los residuos sólidos urbanos.

Cultivo	Residuo (t)	Paja Recogida (t)	% Pérdidas	% Cosechado
Trigo	176.352	73.897	58,10	41,90
Cebada	97.608	70.156	28,13	71,87
Avena	58.414	18.872	67,69	32,31
Centeno	26.033	3.905	85,00	15,00
Triticale	1.993	230	88,46	11,54
Maíz	211.810	-	40,00	60,00
Girasol	13.308	-	40,00	60,00

*Tabla 11. Cultivos principales de Salamanca [16]*

*CAPÍTULO 4: SISTRMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

---

En cuanto a la biomasa leñosa a través del Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE) [17] se han estimado lo siguientes valores de residuos obtenidos en Salamanca. Estos datos serán simplemente informativos ya que se despreciarán los cultivos leñosos frente a los herbáceos por su menor capacidad.

Cultivo	Kg residuo/año y árbol
Frutales de hueso	2,5
Frutales de pepita	2,5
Cítricos	2,0
Frutales secos	3,0

*Tabla 12. Cultivos frutales Salamanca [17]*

Para finalizar, en las siguientes gráficas se representa de forma más detallada la producción total de cultivos en la provincia de Salamanca diferenciando la producción de secano y de regadío, y también las hectáreas de cultivo.

Información obtenida por el Servicio de Estadística, Estudios y Planificación Agraria de la Consejería de Agricultura y Ganadería, Junta de Castilla y León. [18]

*CAPÍTULO 4: SISTRMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

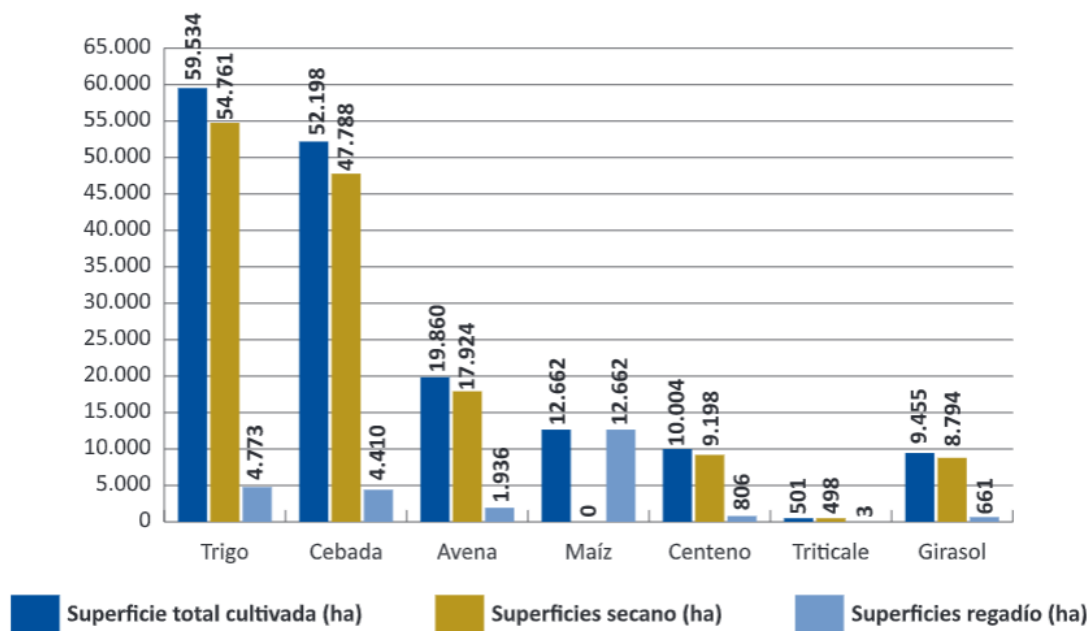


Figura 25. Superficie cultivada (secano-regadío) [18]

En conclusión, en el Capítulo 1, punto 2: Localización de la Microrred, se mostraban unas tablas con las hectáreas disponibles en la comarca de salamanca, de esas tablas se concluía el espacio total cultivable en la comarca, siendo este de 84.998 ha. Los residuos que se utilizarán para la planta de gasificación de plasma no van a provenir de toda la provincia de salamanca ya que no sería eficiente y habría grandes gastos en transporte, así que se ha supuesto una recogida de residuos próximo al municipio de Salamanca donde se creará la microrred y donde se plantea crear la planta de gasificación para así sustituir al vertedero de Gomecello.

En la *Figura 25*, si se suman todas las hectáreas de cultivo se obtiene un total de 164.214 hectáreas de cultivo, si se toman los valores denominados pérdidas de la tabla... para el estudio, ya que se supone que lo que se denomina como cosechado es cultivado y no servirá como residuo se obtiene un total de 278.596 toneladas de cultivo en la provincia de Salamanca.

*CAPÍTULO 4: SISTRMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

---

Por lo que sabiendo las hectáreas de la comarca de Salamanca y las de la provincia de Salamanca se estima una cantidad de 144.202 toneladas en la comarca de salamanca.

Como se ha comentado anteriormente, no se podrá trasladar toda esta cantidad de residuos a la planta de gasificación si no que se aprovecharán los cultivos más próximos a la planta, de total de 144.202 toneladas se estimas que unas 30.000 toneladas irán destinadas a la planta de gasificación.

Este tipo de cultivos tienen casi toda su recogida en verano, por lo que se la planta de gasificación incrementará su producción entre los meses de junio-septiembre.

Para estimar el potencial productivo de energía de este tipo de biomasa se ha fijado un PCI medio de 4.500 kcal/kg.

$$30.000 \frac{Tn}{año} \cdot 1.000 \frac{Kg}{Tn} \cdot 4.500 \frac{Kcal}{kg} = 135.000 \frac{Gcal}{año}$$

Lo que supone una energía de 157 GWh. Este valor de energía también puede representarse como potencia:

$$157 \text{ GWh} \cdot \frac{1 \text{ año}}{8760 \text{ horas}} = 17,92 \text{ MW}$$

Por lo que gracias a este tipo de cultivos estacionarios se podrá aumentar **17,92 MW** más cada hora la planta de gasificación por plasma, sin considerar rendimientos del proceso.

### **3.3 RESUMEN RESIDUOS**

En definitiva, se obtendrán una totalidad de 142.470 toneladas al año de residuos sólidos urbanos de los cuales se usarán como biomasa para la planta 69.810,3 toneladas anuales capaces de generar 27,8 MW cada hora en la planta de gasificación y 30.000 toneladas al año de residuos agrícolas, residuos estacionarios que tendrán relevancia en el estudio entre los meses de junio y septiembre, estos residuos ofrecen 17,92 MW cada hora.



---

*CAPÍTULO 4: SISTRMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

---

Por lo tanto, se dimensionará la planta de gasificación de la siguiente manera:

$$\text{RSU} \rightarrow 69.810,3 \frac{Tn}{\text{año}} / 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 191,26 \frac{Tn}{\text{día}}$$

$$\text{RSU} + \text{RA} \rightarrow 99.810,3 \frac{Tn}{\text{año}} / 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 273,45 \frac{Tn}{\text{día}}$$

Para el proyecto se utilizarán los datos obtenidos solo con RSU ya que la unión de residuos agrícolas solo será durante los meses de verano, por lo que se dimensionará la planta para una cantidad de **250 toneladas/día**.

#### **4. EL PLASMA**

El término plasma lo acuñó el físico Irving Langmuir en 1928, lo definía como un gas ionizado dotado de una alta conductividad eléctrica tan abundante en el medio interplanetario, interestelar e intergaláctico, así como en las estrellas y los vientos solares.

También se define como el cuarto estado de la materia, en la Tierra el plasma está presente en algunas capas de la atmósfera, como en la magnetosfera e ionosfera, también se encuentra en las auroras voleares, vientos polares, los rayos y el denominado fuego de San Telmo.

El plasma es un gas ionizado a alta temperatura, su estado es parecido al del gas, pero compuesto por átomos ionizados e iones positivos y negativos, donde los electrones circulan libremente. Cuando este gas se calienta a muy altas temperaturas (superiores a 5000°C) se crea el plasma. En conclusión, el plasma puede estar compuesto por cualquier partícula cargada, puede generar campo eléctrico y es fuertemente influido por los campos magnéticos.

En cuanto a la industria, el sector que más se caracteriza por el uso del plasma es el de la metalurgia, por ejemplo, en procesos de soldadura o de corte por plasma.

## **5. CARACTERÍSTICAS DIFERENCIALES DEL PROCESO**

Lo que se quiere conseguir en este proyecto es la disociación completa de los residuos introducidos en la vasija de la planta de gasificación por plasma.

A temperaturas mayores de 5000°C, que son con las que se desea trabajar, las moléculas orgánicas se desintegran, resultando lo que se conoce como gas de síntesis. Este gas está compuesto principalmente por hidrógeno y monóxido de carbono. Más adelante se explicará con más detalle cómo se puede obtener el mayor porcentaje de hidrógeno de este proceso.

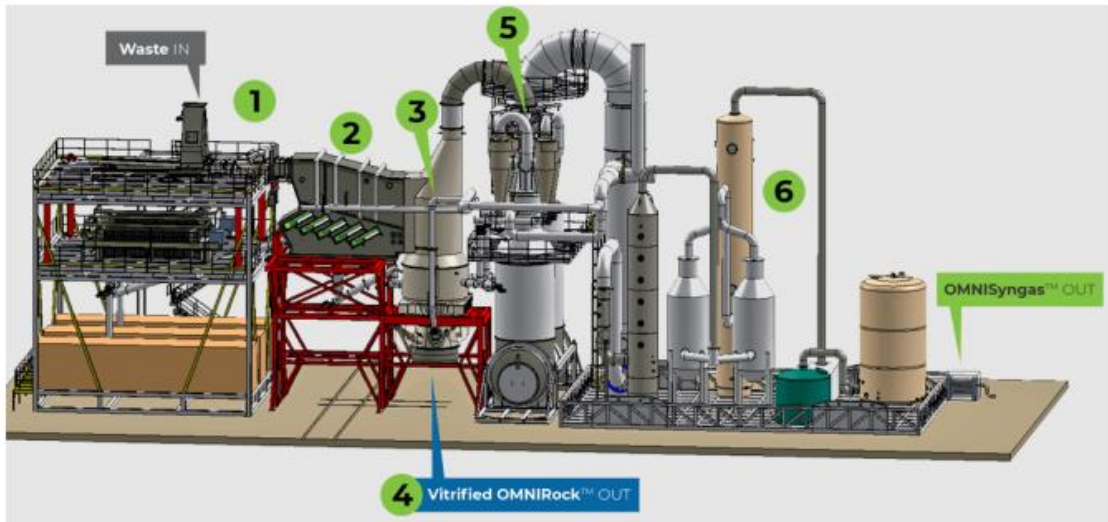
Por otra parte, no todo el porcentaje de residuos que se introduzca en la vasija se transformará en el gas de síntesis, sino que una parte se transformará en cristal de silicato o en materia inerte vitrificada. Puede obtenerse masa fundida de los metales introducidos que podrá ser separada de los cristales y reutilizarla en el proceso.

## **6. TECNOLOGÍA DEL PLASMA**

Existen tres tecnologías posibles para un convertidor de plasma:

### **a) Sistema de plasma tradicional (OMNI CT)**

Omni Conversion Technologies (OMNI CT) es lo anteriormente conocido como Plasco Conversion Technologies, compañía que inventó, desarrolló y patentó procesos que utilizan la tecnología de arco de plasma de una manera ecológica para así producir energía y calor a través de residuos. Son precursores en la producción de hidrógeno y biocombustibles. Su sistema de gasificación por plasma recibe y convierte unas 200 toneladas diarias (67.000 toneladas al año) en un gas de síntesis limpio y consistente. Como los residuos sólidos urbanos que se introducen en la vajilla contiene un contenido biogénico mayor al 50% se producirán combustibles ecológicos y se evitará el envío de metano a los vertederos.



*Figura 26. Sistema de plasma tradicional (OMNI)*

**b) Sistemas de plasma mixto (Alter NRG)**

El sistema de gasificación por plasma Alter NRG utiliza la tecnología de Westinghouse Plasma Corp (WPC), está diseñado para proporcionar a los usuarios un gas de síntesis adaptado a las necesidades del proceso que el cliente requiera.

Algunas de las ventajas de Westinghouse Plasma Corp (WPC) son:

- Arco auto estabilizado y no transferido.
- Funcionamiento con muchos gases: aire, oxígeno, nitrógeno, etc.
- Alto rendimiento térmico y larga vida útil de los electrodos.
- Las antorchas de plasma no tienen piezas móviles, lo que permite una alta disponibilidad. Además, los combustibles de estas antorchas pueden sustituirse rápidamente sin necesidad de apagar el gasificador de plasma.

Este gasificador por plasma ofrece una flexibilidad inigualable para procesar una gran variedad de materias primas incluyendo residuos sólidos urbanos (RSU), residuos industriales, biomasa, carbón, coque de petróleo y neumáticos, un gran número de materias primas en comparación con otros tipos de procesos de gasificación por plasma.

*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

El syngas obtenido es enfriado y tras ello depurado para eliminar partículas como cadmio, azufre, cloro o mercurio que puedan permanecer.

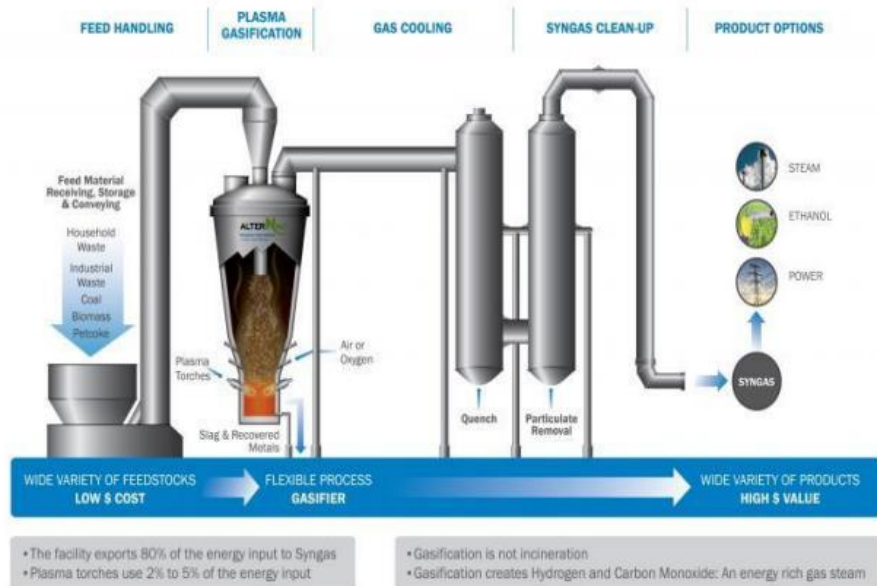


Figura 27. Sistemas de plasma mixto (Alter NRG)

**c) Sistema de plasma directo**

El sistema de plasma directo ha sido el seleccionado para realizar el proyecto de la microrred inteligente en el municipio de Salamanca. Toda la información empleada ha sido facilitada por la empresa Materiales Renovados y por el proyecto de fin de carrera de Almudena Valenciano López, estudio de una microrred inteligente en la ciudad de Huesca (Valenciano López, 2015) [19]. En los siguientes apartados se recogerá toda la información necesaria para la realización del proyecto.

## **7. SISTEMA CONVERTIDOR DE PLASMA DIRECTO**

### **7.1 ETAPAS DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN POR PLASMA**

La siguiente figura muestra las etapas a seguir para la obtención de hidrógeno que se desea obtener de la planta de gasificación por plasma:



*Figura 28. Etapas del proceso de gasificación por plasma [19]*

#### **Etapa 1: Alimentación**

La etapa de alimentación es aquella en la que los residuos son introducidos en la planta para su disociación.

Para lograr un trabajo más eficiente se siguen los siguientes procesos:

- **Reducción de tamaño:** Gracias a trituradores y demás herramientas se puede lograr una reducción significativa del volumen de los residuos y por ello una disminución de su peso específico.
- **Separación:** Por un canal de separadores balísticos, magnéticos u óptimos se procede a la separación de los residuos, separándolos por tamaño, forma o densidades.

---

*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

---

- **Compactación:** La compactación proporciona un aumento de la densidad del material, se suelen formar pequeños cubos que faciliten el transporte y almacenamiento de los residuos.
- **Reducción de humedad:** Paso previo a la alimentación de la planta. Aprovechando las altas temperaturas del gas de síntesis que se obtiene a la salida de la vasija se puede conseguir disminuir la humedad de los residuos hasta un 15% de su valor de humedad inicial, esto aumentará el rendimiento de la planta.
- **Alimentación:** Introducción final de los residuos tras los pasos previamente comentados.

Se deben introducir una serie de gases además de los residuos para poder alcanzar el estado de plasma:

- **Oxígeno:** Gracias al oxígeno se crea un medio oxidante imprescindible para la etapa de disociación.
- **Gas plasmógeno (aire):** Gas que alimenta a las antorchas.

### **Etapa 2: Disociación**

En esta etapa se produce la disociación de los materiales introducidos en la vasija, se provoca la ionización de los átomos y, por consiguiente, la liberación de iones positivos y electrones negativos.

Por la gran diferencia de potencial entre los electrodos se crea un arco eléctrico, generándose este en la antorcha de plasma que a su vez está conectada a un generador de corriente continua. Gracias al arco eléctrico obtenemos el aumento necesario de la temperatura para obtener el gas de síntesis necesario para la producción del hidrógeno, también se obtendrá en este proceso parte de materia inerte vitrificada, por consecuencia de una mala separación molecular de la materia orgánica.

*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

Para poder formar el plasma es necesario un medio oxidante, por ello se introduce oxígeno en la vasija para poder completar el proceso descrito anteriormente.

El proceso sigue las siguientes características; Se comienza con temperaturas bajas, entorno a los 500°C – 1.000°C, un proceso de traslación y rotación de partículas hace que la temperatura suba a los 2.000°C y tras ello y gracias al continuo aumento de temperatura se produce la disociación de las partículas aproximadamente al llegar a los 2.750°C. Estas partículas se ionizan a temperaturas aún más elevadas, entorno a los 5.000°C – 5.250°C, obteniéndose como resultado partículas e iones excitados, que conforman el estado de plasma necesario para el proceso.

En la siguiente figura se recogen los datos de temperatura asociados a cada parte del proceso de disociación.

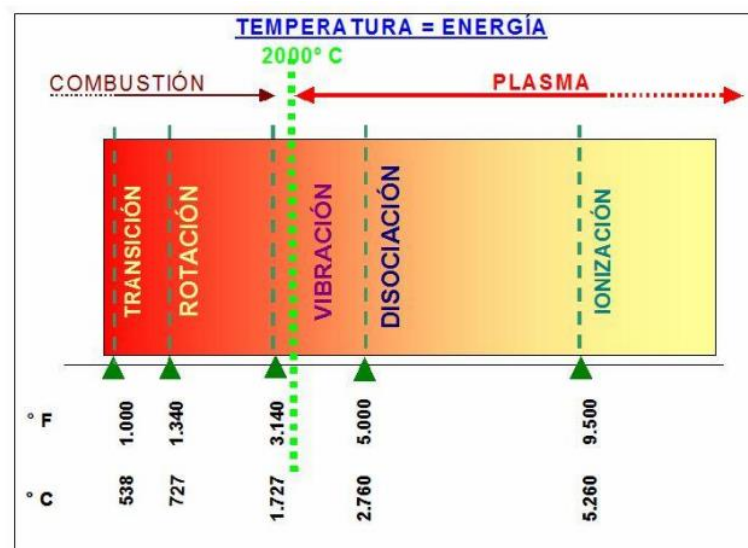


Figura 29. Rango de temperaturas a partir de las cuales se produce disociación [19]

Los procesos térmicos que cabe destacar del proceso de disociación son los siguientes:

- 1. Cracking térmico:** Proceso por el cual los enlaces carbono-carbono son rotos por la acción del calor.

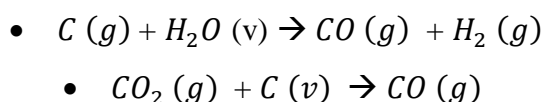
---

*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

---

**2. Oxidación parcial:** Se podría definir como una combustión incompleta de metano en presencia de oxígeno. Algunos de los subproductos producidos en este tipo de reacciones térmicas son el dióxido de carbono y el agua, que dañan al poder calorífico del gas de síntesis. Se debe tener especial cuidado en este tipo de reacciones controlando de forma muy precisa la cantidad de oxígeno introducido en el reactor.

**3. Reformación:** Es el proceso en el cual se forman las partículas de hidrógeno y monóxido de carbono:



En este momento se consigue la destrucción total de los residuos introducidos en la planta de gasificación, siendo este un proceso irreversible.

El fondo de la vasija está recubierto por una capa de arena rica en silicio. Cuando se produce la disociación los elementos inorgánicos se depositan en el fondo de la vasija reaccionando de esta manera con el silicio. Lo mismo sucede con cualquier tipo de metal que haya podido ser introducido, quedará retenido por la arena en el fondo de la vasija.

Como resultado, se forma un material inocuo, no tóxico y no lixiviable, y se consigue reducir el volumen de los residuos sólidos urbanos un total de 300:1.

### **Etapa 3: Enfriamiento**

Es una de las etapas más importantes de todo el proceso de gasificación por plasma ya que el calor obtenido al reducirse la temperatura de los 5.000°C a los 1.000°C, que es la temperatura a la que estará el gas de síntesis a la salida de la vasija, podrá utilizarse en un ciclo de Rankine para producir electricidad.



#### **Etapa 4: Filtrado de gases**

El filtrado de gases es necesario ya que, aunque mayoritariamente el gas de síntesis obtenido esté compuesto por hidrógeno y monóxido de carbono también se encuentran otras sustancias que disminuyen la calidad del gas obtenido.

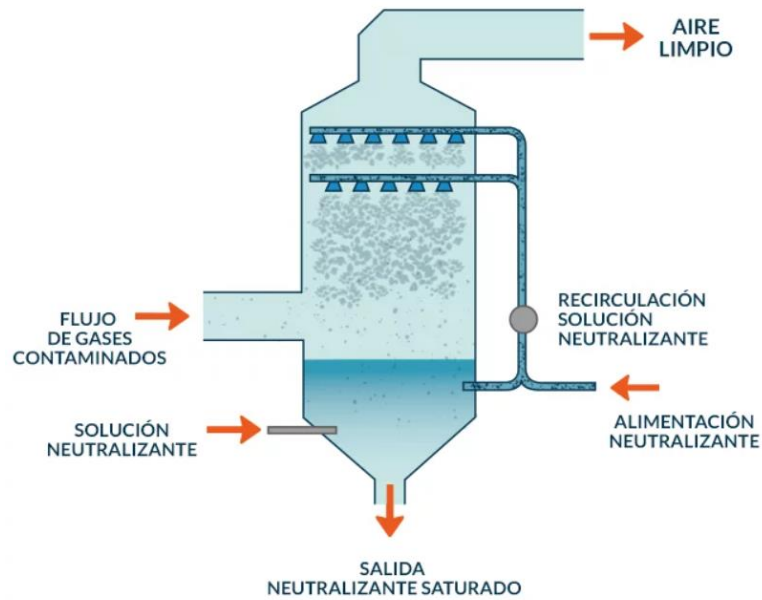
Para ello se utilizará un ciclón, tecnología que se basa en la separación de partículas por el valor de su densidad. Esta tecnología consigue separar las partículas sólidas de las corrientes de gas que se forman en el ciclón. Estas partículas sólidas chocan con las paredes del ciclón y caen por la acción de la gravedad hasta el fondo de este.

El rendimiento varía entre el 65% y el 99%, dependiendo esto de las características del gas introducido en la primera etapa. Al ser el ciclón un sistema fijo tendrá bajos costes de mantenimiento y operación, lo que es una gran ventaja, aunque su efectividad siempre dependerá del tamaño de las partículas que se introduzcan en él, deben rondar el tamaño de unos 10 $\mu$ m de diámetro.

#### **Etapa 5: Neutralización**

El gas obtenido tras el ciclón en gran parte ha sido filtrado, pero aún quedan componentes que deben ser reducidos. Se utilizará un sistema de neutralización formado por dos procesos combinados, Scrubber y Quench.

El lavado Scrubber captura los gases mediante un líquido, que puede ser agua, un reactivo químico o una mezcla de los dos, y neutraliza sus componentes fundamentales. Neutraliza los halógenos y permite reducir la contaminación de compuestos orgánicos volátiles (COV) y el polvo presente en una corriente gaseosa.



*Figura 30. Lavado Scrubber*

El gas de síntesis, aún con componentes sulfurados es posteriormente filtrado de nuevo a través de un filtro HEPA, el cual consigue eliminar la presencia de estos componentes.

En el siguiente esquema se muestra la etapa al completo:



*Figura 31. Esquema del funcionamiento del sistema de neutralizado [19]*

*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

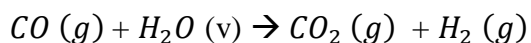
Finalmente, el gas de síntesis a una temperatura próxima de 30°C y ya libre de sulfuros y halógenos presentará la siguiente composición:

COMPOSICIÓN GAS DE SÍNTESIS LIMPIO	
%CO	77,6
%CO <sub>2</sub>	6,67
%H <sub>2</sub>	4,46
%N <sub>2</sub>	7,11
%H <sub>2</sub> S	0,00
%Ar	1,22
%H <sub>2</sub> O	2,93
%CH <sub>4</sub>	0,01

Tabla 13. Composición gas síntesis limpio [Elaboración Propia]

El monóxido de carbono obtenido supera de forma elevada al hidrógeno que se consigue tras el proceso por lo que serán necesarios los siguientes procesos para neutralizar y capturar aquellos gases innecesarios:

- **Reacción Shift:** Con esta reacción se pretende transformar el monóxido de carbono en hidrógeno y dióxido de carbono. Sigue la siguiente reacción:



- **Captura y secuestro del CO<sub>2</sub>:** El CO<sub>2</sub> obtenido tras la neutralización aumente con la reacción Shift, y aunque gracias a ella se ha podido eliminar gran parte del

---

*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

---

monóxido de carbono se sigue teniendo elevados porcentajes de  $CO_2$  que hacen que el gas de síntesis no sea idóneo. Esta captura y secuestro del  $CO_2$  se consigue pasando el gas por un baño solvente de ácidos.

Tras estos procesos el porcentaje del hidrógeno puede aumentar entre un 40% y un 50%.

## **7.2 SISTEMAS Y COMPONENTES DE LA PLANTA DE GASIFICACIÓN POR PLASMA**

### **Vasija**

La vasija o también llamado reactor es uno de los principales componentes de la planta de gasificación por plasma, ya que es ahí donde se dan las reacciones que provocan la disociación de la materia, consta de dos elementos: la tapa de acero inoxidable y el cuerpo. Es muy importante que estos dos elementos de la vasija estén totalmente sellados, por ello se trabajará a presiones negativas para evitar escapes del gas de síntesis al introducir nuevos residuos al reactor.

En la siguiente figura se muestran las principales funciones de la vasija:

## La Cámara del Sistema Convertidor de Plasma

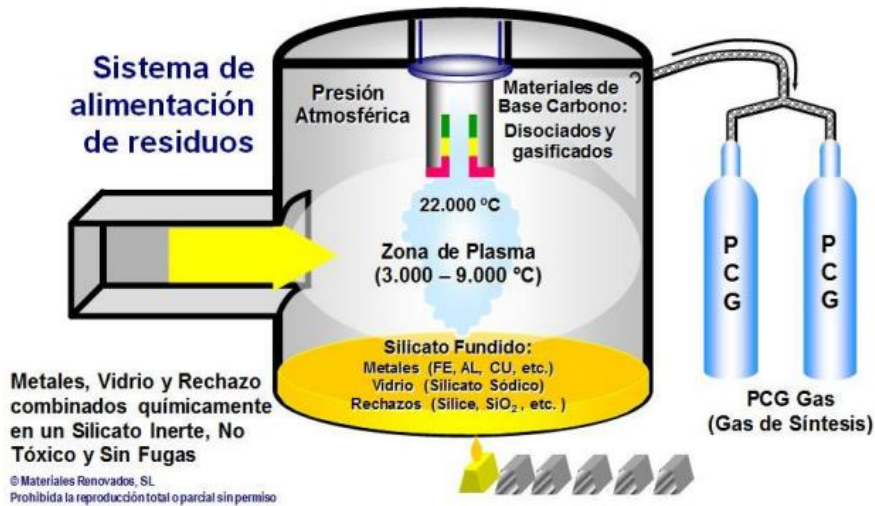


Figura 32. Vasija sistema convertidor de plasma [19]

Las paredes de la vasija están cubiertas por una capa aislante de material refractario, ya que como se comentó en los anteriores apartados, en la vasija se van a llegar a contemplar temperaturas mayores de 5.000°C.

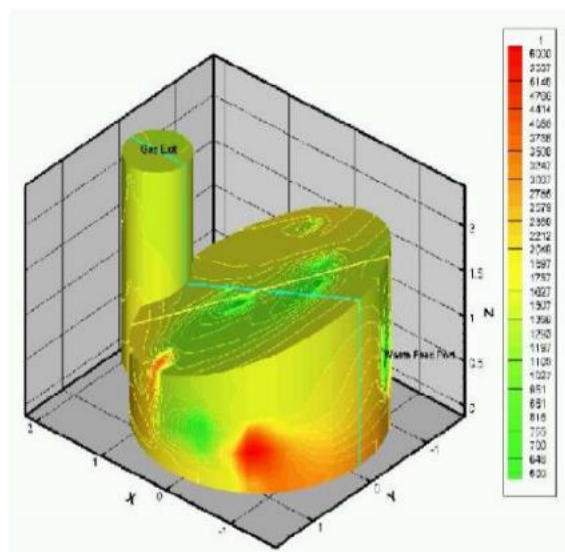


Figura 33. Perfil de temperaturas en el interior de la vasija [19]

---

*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

---

En la punta de la antorcha (la zona roja de la figura) será la zona con mayor temperatura, llegando a valores de hasta 6.000°C.

**Antorcha de plasma**

Está formada por dos electrodos, ánodo y cátodo, los cuales generan el arco eléctrico. La zona de la antorcha es la que más temperatura va a tener por lo que será necesario un sistema de refrigeración. Se pueden diferenciar dos tipos de antorchas:

- Antorcha transferida: El arco eléctrico se forma a través de un ánodo situado en la antorcha y un cátodo situada al fondo del reactor. Se produce transmisión de calor por radiación, convección y conducción. Este tipo de antorchas se utilizan para fundir materiales.
- Antorcha no transferida: Su utilidad es la de calentar y vaporizar la materia en cualquiera de sus estados. En este tipo de antorcha el ánodo y el cátodo se encuentran dentro de la misma antorcha. La energía es transferida por radiación del haz. Esta tecnología será la que se usará en el proyecto.

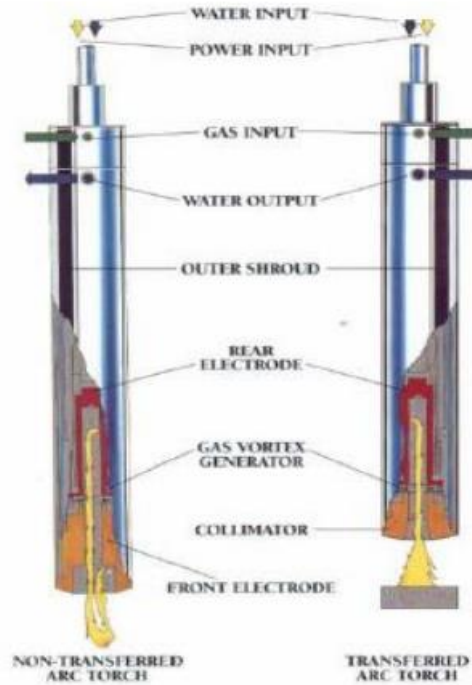


Figura 34. Comparativa tecnología antorcha de arco transferido y no transferido [19]

### **Generador de corriente eléctrica**

La antorcha es alimentada por un generador de corriente, este generador será de corriente continua.

### **Sistema de control del proceso**

El sistema de control de la planta de gasificación será un control PLC (Controladores Lógicos Programables), estos supervisan las operaciones industriales de una manera sostenible, flexible, eficiente y segura. Su función principal es regular la alimentación de la planta y asegurarse de una buena inserción del gas plasmógeno en el reactor, también debe controlar la generación de corriente para un buen funcionamiento de la antorcha de plasma. Todos estos controles siempre se realizarán desde un puesto con personal humano.

### **Refrigeración de la antorcha**

Como se ha comentado anteriormente, el lugar donde se produce la llama de la antorcha es la zona con mayor temperatura de toda la vasija, llegando a temperaturas de hasta los 6.000°C. Se utiliza para el sistema de refrigeración agua desionizada, que circula bajo presión por un circuito cerrado.

Para este sistema son necesarios dos circuitos, el primero de ellos será un circuito agua-agua por el cual se transfiere el calor de un conducto de agua al otro y por ello disminuye la temperatura, y el segundo circuito será agua-aire creando así vapor de agua.

### **Sistema de gas**

Este sistema genera la corriente de gas que hará que el arco eléctrico se forme a través de la antorcha de plasma. Este gas se denomina plasmógeno y su entrada se produce a una presión de entre 6 y 7 bares. Pueden ser oxidante, reductor o inerte, y es controlado por el sistema de control ya mencionado. Existen diferentes gases que pueden hacer la función de gas plasmógeno, estos son: Oxígeno, Nitrógeno, Hidrógeno, Argón o Aire, siendo este el más utilizado.

### **Sistema de descarga del material vitrificado**

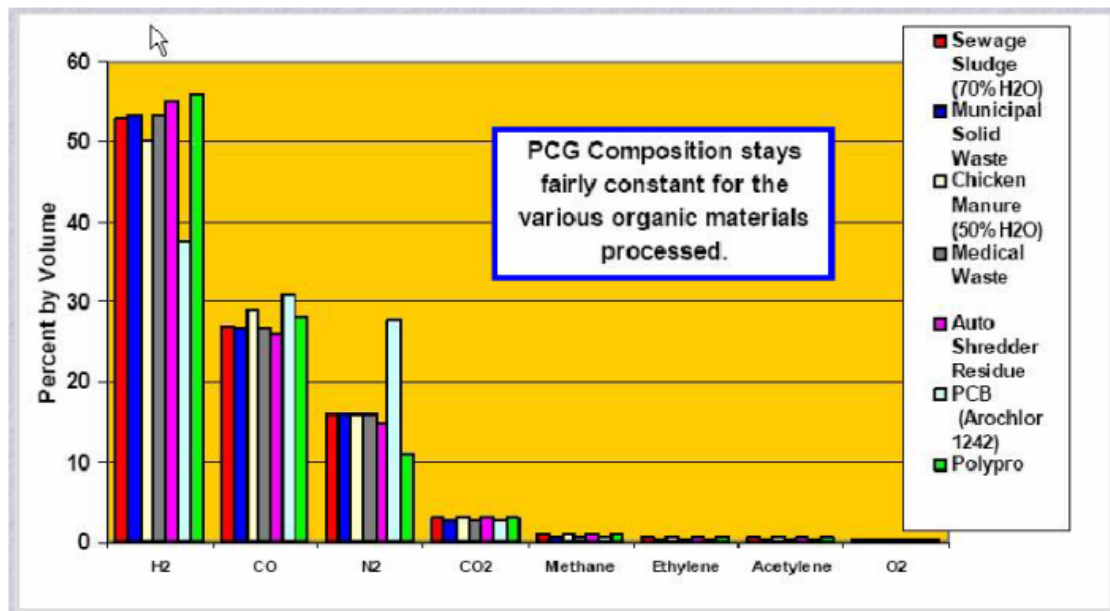
Existen varios métodos de extracción de materiales vitrificados, el que se usará en este proyecto será por un método de extracción continuo, usando un tornillo sinfín, con este método se evitará obstruir los canales con materia vitrificada. Una vez extraído este material se enfriará con agua en un carro donde se transformará en pequeños fragmentos lisos fácilmente manipulables.



### 7.3 CARACTERÍSTICAS DEL GAS DE SÍNTESIS

Como se ha comentado anteriormente el gas obtenido tras todos estos procesos y etapas es un gas formado mayoritariamente por hidrógeno y monóxido de carbono, suponiendo estos un 80% del total, aunque el 20% restante estará formado por dióxido de carbono o nitrógeno entre otros.

En la siguiente tabla recuperada de Materiales Renovados se encuentra la composición de los gases que forman el syngas y su porcentaje de volumen:



*Figura 35. Composición del gas de síntesis en función de los residuos de entrada Fuente: Materiales Renovados*

Como se puede observar en la leyenda de la figura no se aprecia un gran cambio en la obtención de hidrógeno y demás gases si teniendo en cuenta los diferentes tipos de residuos. Es decir, el gas de síntesis permanece relativamente constante, variando ligeramente la cantidad total del gas dependiendo del tipo de residuo que se utilice.

---

*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

---

Esto será algo ventajoso ya que no habrá que emplear tiempo ni recursos económicos en la separación de los residuos que se introducirán en la vasija.

#### ***7.4 DIMENSIONADO DE LA PLANTA DE GASIFICACIÓN POR PLASMA***

Se ha calculado en el capítulo 4, apartado 3 la cantidad de residuos sólidos urbanos y residuos agrícolas que se van a usar para la alimentación de la planta de gasificación por plasma y así producir hidrógeno para almacenarlo y poder usarlo en un futuro en la microrred inteligente que se desea diseñar en la ciudad de Salamanca.

Se han calculado unos valores de 191,29 toneladas diarias de residuos si solo se tienen en cuenta los provenientes de la biomasa del vertedero de Gomecello, y una cantidad de 273,45 toneladas diarias si se tuvieran en cuenta los residuos agrarios procedentes de los alrededores de Salamanca. Se había decidió que para el estudio solo se deberían tener en cuenta los residuos provenientes del vertedero de Gomecello ya que al ser estacionarios los residuos agrícolas no siempre se tendría la cantidad de 273,47 toneladas, pero al final se supondrá un pequeño porcentaje de esos residuos agrícolas, por lo que se estiman unas 250 toneladas diarias finales para el estudio.

Los módulos de máquinas ofrecidos por la empresa Materiales Renovados son de 5, 10, 35, 50, 125 y 250 Tm/día. Por lo que se usará una máquina con una capacidad de 250 Tm/día por todo lo explicado anteriormente.

225 toneladas diarias son equivalentes a 10.416,66 kg/h, dato muy importante para poder estimar el calor y potencia de las diferentes partes de del ciclo de Rankine. Se ha supuesto una actividad de 8.760 horas de producción, es decir el año entero.

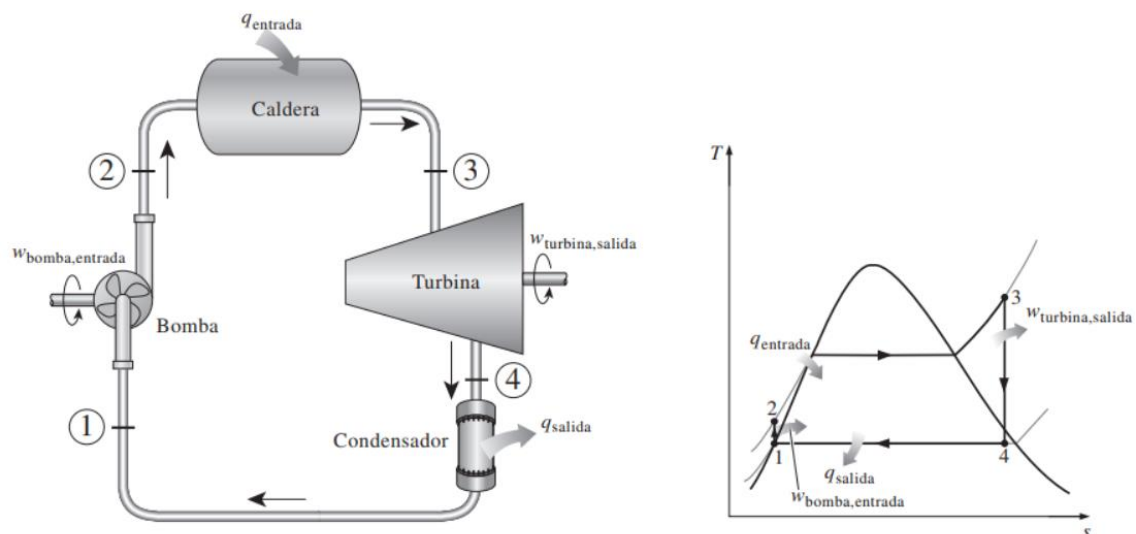
#### ***7.5 SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR: CICLO RANKINE***

*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

En el apartado 7.1 se comentó como la etapa de enfriamiento del ciclo de gasificación por plasma era una de las más importantes del proceso, ya que el calor obtenido al bajarse las temperaturas de 5.000°C a los 1.000°C podrá utilizarse para producir electricidad.

Se quiere que el ciclo de Rankine cumpla dos objetivos:

1. Aprovechamiento del calor cedido por el gas de síntesis mediante una turbina para la generación de electricidad. Este calor puede cumplir funciones internas como alimentar a la antorcha de plasma.
2. Los residuos se introducen con una mayor humedad de la necesaria. Dicha humedad puede disminuir la eficiencia del proceso, por lo cual el calor obtenido en el ciclo de Rankine también tendrá una gran utilidad en el momento de secado de los residuos introducidos en la planta, todo ello mediante un condensador.



*Figura 36. Esquema Ciclo Rankine*

En la siguiente tabla se van a recoger los datos más significativos para calcular el calor cedido tanto de la caldera como de los residuos, y el trabajo de la turbina y de la bomba. Se supondrá un valor en el punto 3 de 50 bar y 600°C con los que se sacarán los demás datos de los distintos puntos del ciclo de Rankine.

*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

Puntos	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (KJ/kg)
1	0,08	41,51	173,84
2	50	41,66	178,87
3	50	600	3.666,80
4	0,08	41,51	2.576,20

*Tabla 14. Comportamiento de los puntos del Ciclo de Rankine*

A continuación, se describirán los distintos procesos de un ciclo de Rankine:

**Caldera de recuperación de calor**

Aunque no se indique en la imagen superior la caldera tendrá dos circuitos paralelos, uno caliente y otro frío. Ambos circuitos situados a contracorriente para así lograr la máxima transferencia de calor.

El primero de ellos (el caliente) será para el gas de síntesis que se enfría tras su paso por la caldera reduciéndose su temperatura de 1.000°C a unos 600°C aproximadamente. Estará compuesto por un aislamiento interior de fibra cerámica de alta densidad y recubierto con placas de acero inoxidable para protegerlo de tan elevadas temperaturas.

Teniendo en cuenta que 250 toneladas al día equivalen a 10.416,66 kg/h y aplicando el sistema de tablas y ecuaciones para este tipo de ciclos y tomando una presión de 50 bar se calcula una potencia en forma de calor cedido de 4.280,06 KW.

Para los siguientes cálculos se supondrá que existe sobrecalentamiento a una presión de 50 bar y una temperatura de 600°C, también debe tenerse en cuenta el rendimiento de la caldera que no llegará a ser del cien por cien, por lo que se optará por un rendimiento de 90%.

$$Q_{cedido} = 4.280,06 \cdot 0,9 = \mathbf{3.852,06 \text{ KW}}$$

### **Turbina**

Es a la salida de la turbina donde se logra la producción de electricidad. Por la diferencia de entalpías que hay antes y después de la turbina, y tomando como en la caldera un rendimiento del 90%, se obtiene el siguiente trabajo:

$$W_{Turbina} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_4) = 4.280,06 \cdot (3.666,8 - 2.576,2) = 4.667.833,436 \text{ KW}\cdot\text{s}$$

$$W_{Turbina} = \frac{4.667.833,436 \text{ KW}\cdot\text{s}}{3.600 \text{ s}} = 1.296,62 \text{ KW}$$

$$W_{Turbina} = 1.296,62 \cdot 0,9 = \mathbf{1.166,95 \text{ KW}}$$

### **Condensador**

En el condensador se disminuye la entalpía manteniendo la misma temperatura del agua que recorre el ciclo de Rankine. En esta parte del ciclo será donde el calor será aprovechado para la reducción de humedad de los residuos con los que se alimentará la vasija.

Tras el condensador se encuentra la bomba, por lo que cabe destacar que es aquí, en el condensador, donde ocurre el cambio de vapor a agua, que es con lo que funcionará la bomba ya que si no puede haber graves problemas de cavitación.

El calor cedido por el condensador será el siguiente:

$$Q_{Residuos} = \dot{m} \cdot (h_4 - h_1) = 4.280,06 \cdot (2.576,2 - 173,84) = 10.282.244,94 \text{ KW}\cdot\text{s}$$

$$Q_{Residuos} = \frac{10.282.244,94 \text{ KW}\cdot\text{s}}{3.600 \text{ s}} = 2.856,18 \text{ KW}$$

$$Q_{Residuos} = 2.856,18 \cdot 0,9 = \mathbf{2.570,56 \text{ KW}}$$

*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

**Bomba**

En la bomba se produce la compresión isentrópica del agua, obteniéndose a la salida agua en estado líquido comprimido. Parte del trabajo obtenido en la turbina se utilizará para accionar la bomba. Este trabajo se calcula de la siguiente manera:

$$W_{Bomba} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) = 4.280,06 \cdot (178,87 - 173,84) = 21.528,7 \text{ KW}\cdot\text{s}$$

$$W_{Bomba} = \frac{21.528,7 \text{ KW}\cdot\text{s}}{3.600 \text{ s}} = 5,98 \text{ KW}$$

$$W_{Bomba} = \frac{5,98}{0,9} = \mathbf{6,64 \text{ KW}}$$

**Potencia total del proceso**

Tras el cálculo del trabajo y calor cedido de cada componente que forma el ciclo de Rankine se puede obtener el trabajo neto obtenido y el rendimiento del ciclo, con los cuales se podrá obtener la energía producida anualmente por el ciclo:

$$W_{Neto} = W_{Turbina} - W_{Bomba} = 1.166,95 - 6,64 = \mathbf{1.160,31 \text{ KW}}$$

$$\eta_{Ciclo} = \frac{W_{Neto}}{Q_{Aportado}} = \frac{1.160,31}{3.852,06} = 0,301$$

Es decir, el rendimiento será de un **30,1%**. Puede parecer un rendimiento bajo, pero es idóneo teniendo en cuenta que el fin del ciclo es el aprovechamiento del calor cedido por el gas de síntesis.

La energía que se produce anualmente puede calcularse con el trabajo neto obtenido y las horas totales que tiene un año:

$$E_{Ciclo} = 1.160,31 \text{ KW} \cdot 8760 \text{ h} = \mathbf{10.164,3 \text{ MWh} = 10,164 \text{ GWh}}$$

---

*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

---

Esta energía se usará tanto para el consumo de la planta de gasificación por plasma como para la microrred inteligente que se desea diseñar.

## **7.6 CALOR CEDIDO PARA EL SECADO DE RESIDUOS**

Como se ha comentado en otros apartados la humedad de los residuos que se introducen en la planta de gasificación puede hacer que no se obtenga la máxima eficiencia en el proceso de la obtención del hidrógeno, por ello se deben secar estos residuos para así poder disminuir su humedad.

El calor que se requiere para secar los residuos se obtiene a través de esta operación:

$$Q = \dot{m}_{vapor} \cdot L_{agua}$$

Siendo  $\dot{m}_{vapor}$  el gasto másico de la humedad que se desea eliminar y  $L_{agua}$  el calor latente del agua, cuyo valor es de  $2.255 \text{ KJ/kg}$ .

El caudal de residuos de entrada se supone de  $250 \frac{Tn}{día}$ , que equivalen a  $10.416,66 \frac{kg}{hora}$ . Por lo tanto, el gasto másico de la humedad a eliminar (si se quiere reducir de un 20% a un 5%) sería el siguiente:

$$\dot{m}_{vapor} = (0,2-0,05) \cdot 10.416,66 = 1.562,5 \frac{kg}{hora}$$

Por lo que, el calor necesario para el secado será:

$$Q = 1.562,5 \cdot 2.255 = 3.523.437,5 \frac{KJ}{hora} = \mathbf{978,75 \text{ KW}}$$

Este calor vendría dado por el calor evacuado del condensador, ya que como se calculó en el apartado 7.5 del proyecto, el calor máximo obtenido por el condensador es de  $2.570.56 \text{ KW}$ . No será necesario disminuir las toneladas de residuos con las que se quiere alimentar a

*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

la planta de gasificación ni tampoco un sistema adicional de secado que requeriría un mayor coste.

## 7.7 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Como ya se pudo comprobar en apartados anteriores tras algunas etapas del proceso de gasificación se obtenía el hidrógeno deseado, pero siempre acompañado de otros gases que hacían insuficiente el proceso:

COMPOSICIÓN GAS DE SÍNTESIS LIMPIO	
%CO	77,6
%CO <sub>2</sub>	6,67
%H <sub>2</sub>	4,46
%N <sub>2</sub>	7,11
%H <sub>2</sub> S	0,00
%Ar	1,22
%H <sub>2</sub> O	2,93
%CH <sub>4</sub>	0,01

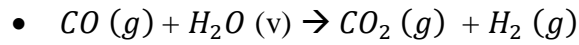
*Tabla 15. Composición de gas de síntesis limpio [Elaboración Propia]*

Con la reacción Shift se pretende hacer reaccionar el agua con el monóxido de carbono y así poder conseguir más cantidad de hidrógeno, aunque este proceso hará que también se obtenga una mayor cantidad de CO<sub>2</sub>:



*CAPÍTULO 4: SISTEMA DE RESERVA DE LA RED; LA GASIFICACIÓN POR PLASMA*

---



El hidrógeno obtenido tras esta reacción se calcula de la siguiente manera, teniendo en cuenta que se usa la totalidad de los residuos calculados anteriormente, es decir

$$10.416,66 \frac{kg}{hora}$$

$$\dot{m}_{H_2, Shift} = \frac{\dot{m}_{CO}}{MM_{CO}} \cdot MM_{H_2} = \frac{77,6}{100} \cdot \frac{10.416,66}{28,01} \cdot 2 = 577,17 \frac{kg}{hora}$$

Y si además se le añade el hidrógeno previo a esta reacción:

$$\dot{m}_{H_2, Shift} = \frac{4,46}{100} \cdot 10.416,66 = 464,58 \frac{kg}{hora}$$

Se obtendrá un valor total de hidrógeno de **1.041,75  $\frac{kg}{hora}$** .



## ***CAPÍTULO 5: PILAS DE COMBUSTIBLE Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO***

### ***1. INTRODUCCIÓN***

De entre muchas alternativas la gasificación por plasma es la más adecuada para la realización de este proyecto. Tras todas sus etapas se conseguirá un gas de síntesis con un gran contenido en hidrógeno con el que se podrá alimentar la microrred inteligente en el municipio de Salamanca que se desea construir, cuando las energías renovables no gestionables no puedan cubrir por completo la curva de demanda.

Para lograr este objetivo es necesario transformar el hidrógeno en energía eléctrica. El procedimiento que se ha decidido utilizar es el almacenamiento en pilas de combustible, presentando este proceso mejores rendimientos que otras opciones como la combustión interna o turbinado del gas de síntesis obtenido.

Las pilas de combustible tienen grandes beneficios como por ejemplo emisiones nulas de partículas sólidas y gaseosas a la atmósfera, su rápida incorporación al sistema en puntos de baja generación o sus grandes capacidades para moldearse a un amplio rango de flujos de potencia. También cabe destacar la facilidad en cuanto al transporte ya que las pilas no son sistemas fijos, sino que pueden transportarse hasta lugares que requieran de su necesidad.

### ***2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE***

El Centro Nacional de Hidrógeno [20] define las pilas de combustible como “aquel dispositivo electroquímico que transforma de forma directa la energía química en eléctrica”. Parde de un combustible (generalmente hidrógeno) y de un carburante (en muchos casos oxígeno) para producir agua, electricidad en forma de corriente y calor.

*CAPÍTULO 5: PILAS DE COMBUSTIBLE Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO*

Se divide en tres partes diferentes:

- Electrodos: De los cuales uno es un ánodo donde el hidrógeno se reduce en dos protones  $H^+$ , y un cátodo donde reaccionan los protones  $H^+$  y  $O_2$ .
- Electrolito: Su función es la separación de los gases. Permite el paso de los iones  $H^+$  al cátodo y separa los electrodos. El electrolito es la parte más esencial de la pila de combustible ya que es donde se produce la unión entre ánodo y cátodo.
- Placas bipolares: Placas conductoras por donde se evacúa el  $H_2O$ .

Se producen las siguientes reacciones en cada uno de los electrodos:

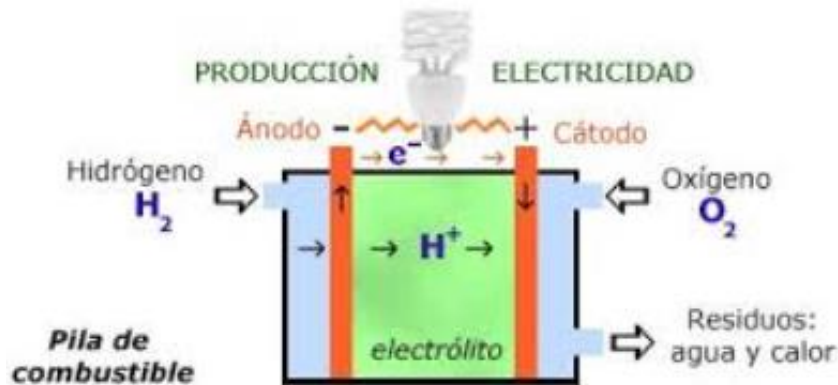
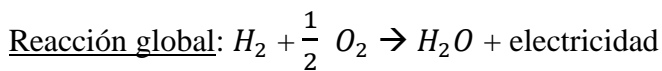
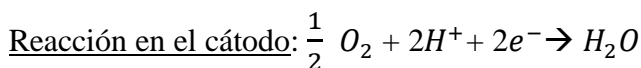
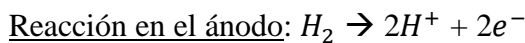


Figura 37. Esquema de una pila de combustible [19]

Tras la reacción en el ánodo, los átomos de hidrógeno quedan ionizados, transportando una carga eléctrica positiva. El oxígeno a su vez, como se demuestra en la reacción en el cátodo

---

*CAPÍTULO 5: PILAS DE COMBUSTIBLE Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO*

---

entra en la pila de combustible donde se combinan con los electrones que vuelven del circuito eléctrico y los del hidrógeno que han viajado a través del electrolito.

El rendimiento de la pila de combustible se puede medir a través de esta ecuación, denominada la ecuación de Nernst:

$$E = E_0 + R \cdot T \cdot \ln \left[ \frac{MM(H_2) + MM(O_2)}{MM(H_2O)} \right]$$

Los parámetros que definen la ecuación son los siguientes:

- $E_0$ : potencia estándar y tiene un valor de 1,229 V.
- $R$ : cte de los gases (8,31 J/mol · K).
- $T$ : temperatura absoluta (K).
- $F$ : cte de Faraday (96,480 J/mol · V).

Todos los términos son constantes en la ecuación de Nernst menos la temperatura que tendrá un papel fundamental.

### **3. TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE**

Existen diferentes tipos de pilas de combustibles con distintas características de operación, su clasificación suele darse por los diferentes tipos de electrolito que se emplean, en la siguiente tabla se muestran las tecnologías que se van a estudiar:

*CAPÍTULO 5: PILAS DE COMBUSTIBLE Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO*

Tipo	Electrolito	Temperatura de operación °C	Usos	Ventajas	Desventajas
<b>Membrana polimérica (PEMFC)</b>	Polímero sólido	60-100	Generación estacionaria. Portátiles. Vehículos.	Electrolito sólido reduce corrosión y mantenimiento. Baja temperatura. Arranque rápido.	Catalizadores costosos. Sensible a impurezas en H <sub>2</sub> u otro combustible.
<b>Alcalina (AFC)</b>	Solución acuosa de hidróxido de potasio	90-100	Espacio. Militar.	Reacción catódica más rápida en electrolito alcalino. Mayor eficiencia.	Sensible a impurezas.
<b>Ácido fosfórico (PAFC)</b>	Ácido fosfórico líquido	175-200	Generación estacionaria. Portátiles.	85 % eficiencia en cogeneración de electricidad y calor. Acepta H <sub>2</sub> impuro.	Catalizador de Pt. Baja corriente y potencia. Gran peso y volumen.
<b>Carbonatos fundidos (MFCF)</b>	Solución líquida de litio, sodio y potasio	600-1000	Generación estacionaria.	Ventajas por alta temperatura: mayor eficiencia, catalizadores más baratos.	Corrosión debido a altas temperaturas. Baja vida útil.
<b>Óxidos sólidos (SOFC)</b>	Oxido de Zr sólido con adiciones de Itrio	600-1000	Generación estacionaria.	Ventajas por alta temperatura. Ventajas electrolito sólido.	Corrosión debido a altas temperaturas. Baja vida útil.

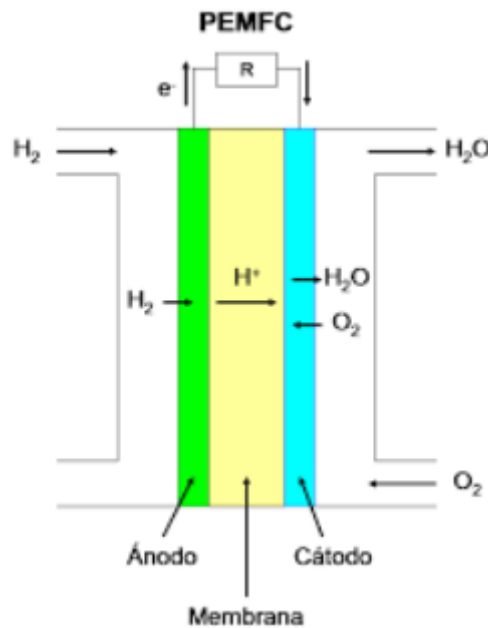
*Tabla 16. Tecnologías consideradas para las pilas de combustible*

Esta nueva tecnología sigue en vías de desarrollo y aunque las enseñadas en la tabla son los principales tipos de pilas de combustible también existen otras muchas como las de metanol directo (DMFD), que por ejemplo se usan para vehículos autónomos submarinos.

Este proyecto se centrará en aquellas pilas de combustible que requieran bajas temperaturas, por lo tanto, en los siguientes apartados se describirán con más detalle las pilas PEMFC, AFC y PAFC.

### **3.1 PILAS DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA POLIMÉRICA (PEMFC)**

Este tipo de pilas de combustible también suelen ser denominadas pilas de combustible con membrana de intercambio de protones (Polymer Electrolyte Membrane o Proton Exchange Membrane).



*Figura 38. Esquema pila de combustible PEMFC*

Su electrolito es una membrana polimérica conductora de protones, la carga en movimiento por esa membrana es el  $H^+$ , es decir, permite el paso de los protones, pero no de los electrones y su temperatura de funcionamiento es racionalmente baja, entre los  $60^{\circ}\text{C}$  -  $80^{\circ}\text{C}$ , algo ventajoso sobre otras pilas de combustible.

Proporcionan una densidad energética elevada y comparadas con otras pilas de combustible son bastante más ligeras y de menor tamaño.

Una de sus desventajas es su catalizador de platino que es extremadamente sensible a la contaminación por CO, y por ello sería necesario utilizar un reactor adicional para reducir los niveles de CO del gas combustible.

Otro de los factores que se tendrá en cuenta a la hora de elegir una de estas tecnologías será el coste y la duración de esta. Se irán examinando más a fondo estas características según se vayan describiendo los demás tipos de pilas.

### 3.2 PILAS ALCALINAS (AFC)

El electrolito de estas pilas es de una base fuerte, habitualmente KOH, que es retenida en una matriz tradicionalmente de asbesto. Sus cargas en movimiento son  $\text{OH}^-$ , y sus catalizadores son muy diversos, entre los más comunes son compuestos por níquel, plata, platino, oro, óxidos metálicos, etc. Pueden funcionar tanto a bajas como a altas temperaturas, pero como se ha comentado antes lo idóneo para este proyecto es el funcionamiento a bajas temperaturas ( $<120^\circ\text{C}$ ).

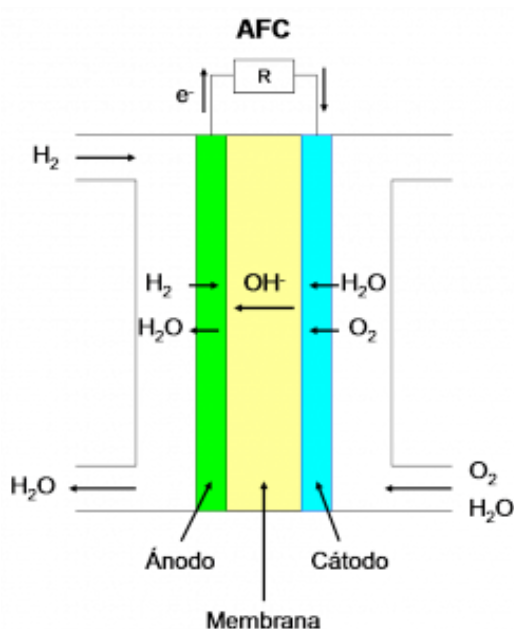


Figura 39. Esquema pila de combustible AFC

Su sensibilidad a la contaminación de  $\text{CO}_2$  plantea un inconveniente, igual que las pilas PEMFC con el CO. Sería necesaria la purificación del hidrógeno y el oxígeno al introducirlos en la pila, lo que requiere un gran aumento del coste y además reduce la vida útil de la pila.

### 3.3 PILAS DE COMBUSTIBLE DE ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFC)



*CAPÍTULO 5: PILAS DE COMBUSTIBLE Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO*

Como bien dice su nombre en este tipo de pilas de combustible el electrolito está compuesto por ácido fosfórico muy concentrado, en torno al 100%. Igual que las pilas AFC se utiliza una matriz para retener al electrolito, esta matriz suele ser de SiC.

Las cargas en movimiento en este tipo de pilas son el  $H^+$  y los catalizadores típicos son de platino. Funcionan a temperaturas de entre los 200°C. Son de gran tamaño y el uso de electrodos de platino incrementa considerablemente el coste de estas pilas.

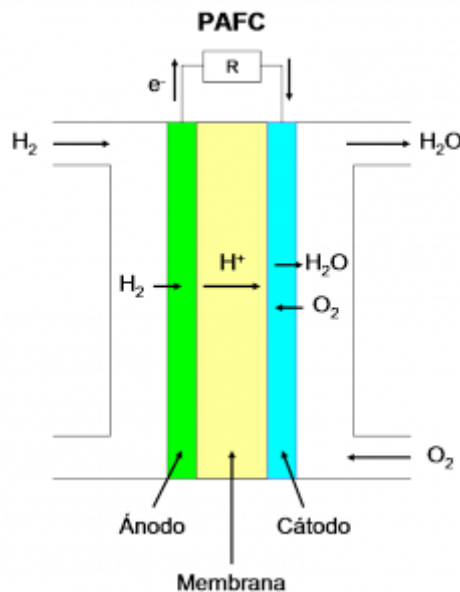


Figura 40. Esquema pila de combustible PAFC

#### 4. SELECCIÓN DE LA PILA DE COMBUSTIBLE

Den entre las tres opciones descritas anteriormente la que más se ajusta a este proyecto es la pila de combustible de membrana polimérica (PEMFC).

Se necesita una pila con altos rendimientos, que trabaje a bajas temperaturas y con una gran permisividad ante impurezas en el hidrógeno. No ha sido posible encontrar una pila con todas estas características, pero las PEMFC son las que más se ajustan.

---

*CAPÍTULO 5: PILAS DE COMBUSTIBLE Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO*

---

Hoy en día este tipo de pilas son las más desarrolladas en la industria y grandes empresas la emplean para el almacenamiento de sus combustibles (hidrógeno o gas natural). Entre estas empresas destacan Ballard, Hydrogenics, Fuel Cell Energy y SFC Energy entre otras.

De los catálogos disponibles de todas estas empresas se ha decidido optar por la del fabricante Ballard, cuyo catálogo se incluirá en el anexo. Los datos ofrecidos por el anexo describen las capacidades de la pila de combustible, como se puede observar se puede producir 1MW de potencia neta para una entrada de 63 kg/h de hidrógeno con una eficiencia del 40%. Por lo que serán necesarios 157,5 kg/h de hidrógeno para obtener el 100%.

## **5. ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO**

La gran ventaja del almacenamiento del hidrógeno es que hasta que no se dé el caso de baja capacidad de las energías no gestionables, éste puede estar almacenado durante un gran periodo de tiempo sin perder sus capacidades.

En este apartado se estudiarán las diferentes formas y maneras en las que el hidrógeno puede ser almacenado. Se distinguirán tres formas de almacenamiento: sólido, líquido y gaseoso y se estudiará cuál de estas tres maneras es la más idónea para el proyecto.

- **Estado gaseoso:** Son necesarias muy elevadas presiones para poder comprimir el gas y así almacenar el hidrógeno en forma gaseosa. Las presiones toman valores de entre 200 y 700 bar. La densidad energética que presenta el gas en este estado es baja y además almacenarlo en este estado presenta costes muy elevados.
- **Estado líquido:** A temperatura ambiente el hidrógeno se encuentra en estado gaseoso, por lo que para que este se encuentre en estado líquido se necesitan unas temperaturas de entre 14 y 20 K, ya que su temperatura de ebullición es de 20,39 K. Esto supone mantener unas temperaturas muy bajas para que no se realice la ebullición. Aquí radica el mayor de los inconvenientes de este estado, el manipular el hidrógeno en estas condiciones.

---

*CAPÍTULO 5: PILAS DE COMBUSTIBLE Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO*

---

- **Estado sólido:** Cuando se habla del estado sólido del hidrógeno se hace referencia al almacenamiento en hidruros metálicos. Ya desde los años 60 se investigaba en la combinación del hidrógeno con compuestos metálicos creando diferentes reacciones más o menos reversibles.

Se comprobó que era la mejor manera de almacenamiento de hidrógeno ya que sus procesos de formación y composición eran muy rápidos.

Son necesarios un conjunto de requisitos para que un hidruro metálico sea considerado como un buen sistema de almacenamiento del hidrógeno, pero los que favorecen estos requisitos consiguen ser de gran utilidad, ya no solo en cuanto a almacenamiento sino también en otras tecnologías como la de las bombas de calor, compresores de hidrógeno o equipos de purificación.

## ***6. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE ALMACENAMIENTO***

De las tres opciones estudiadas en el apartado anterior se ha decidido que la técnica que mejor se ajusta al proyecto es la del almacenamiento del hidrógeno en estado sólido, es decir mediante hidruros metálicos.

Para este tipo de sistemas se requieren volúmenes más pequeños de sistemas de almacenamiento y además en la forma en la que las condiciones son más favorables y seguras para el ser humano.

La empresa que se ha elegido para la compra de estos hidruros metálicos es ARIEMA [21], en particular se elegirá el modelo HBond 7000L, con una capacidad de 7000 litros de hidrógeno.

## ***7. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA***

En este apartado se resumirá todo lo estudiado en este capítulo.

*CAPÍTULO 5: PILAS DE COMBUSTIBLE Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO*

---

Como ya se comentó anteriormente la pila de combustible de la empresa Ballard puede producir 1MW de potencia neta, y el pico de potencia estimado que se calculó en los primeros capítulos era de 120 MWh por lo que serán necesarias al menos 120 pilas para cubrir la demanda en el caso excepcional de ese pico de potencia.

La cantidad necesaria de hidrógeno para que las pilas estén en funcionamiento se calcula con los datos obtenidos del catálogo proporcionado por el fabricante Ballard, y se expresa en la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{63 \text{ kg/h}}{0,4} \cdot 120 \text{ pilas} = 18.900 \frac{\text{kg}}{\text{hora}}$$

Estos 18.900 kg/h son los necesarios para cubrir la punta de demanda de 120 MWh, ahora es necesario saber la cantidad de tanques que se necesitan para almacenar las pilas de combustible. Sabiendo que cada tanque puede almacenar una cantidad de 54 kg de hidrógeno, el número de tanques será el siguiente:

$$\text{N}^\circ \text{ Tanques} = \frac{18.900}{54} = 350 \text{ tanques}$$

Por lo tanto, la planta de gasificación será capaz de almacenar 18.900 kg/h de hidrógeno en las 120 pilas, para ello será necesario la obtención de 350 tanques para poder almacenar las pilas.

Dado a que la producción de hidrógeno es superior a la calculada en este apartado (1.041,75 kg/h es la cantidad de hidrógeno que se obtendrá a la salida de la planta de gasificación), serán necesarias más pilas de combustible para almacenar el hidrógeno restante. Por ello, resultará interesante la compra de unos 50 depósitos más para su almacenamiento.



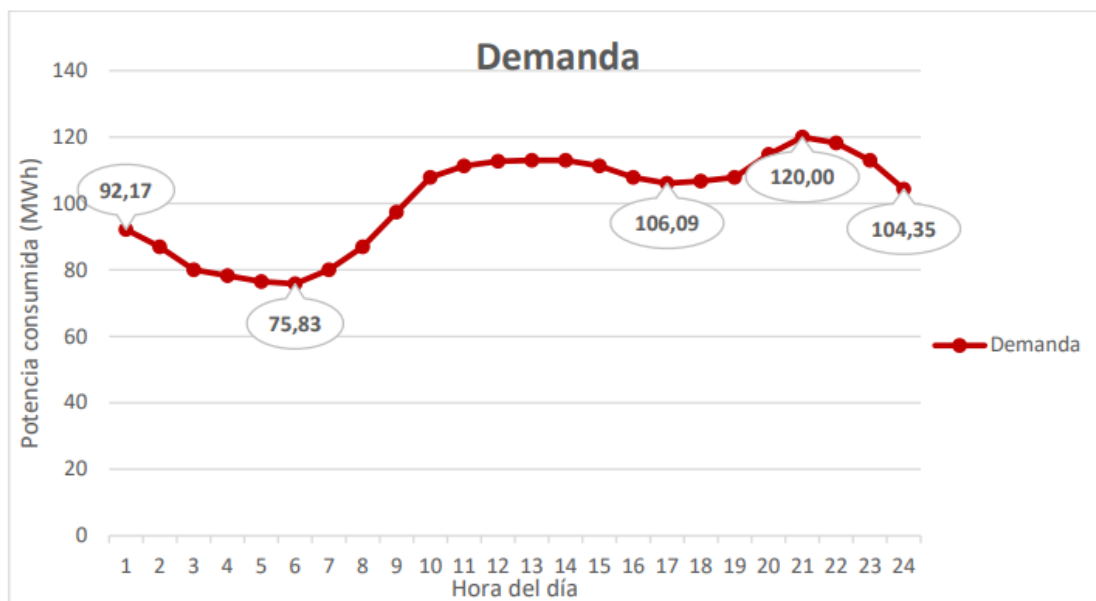
## **CAPÍTULO 6: CONFIGURACIÓN DE LA MICRORRED**

### ***1. INTRODUCCIÓN***

En el siguiente capítulo se estudiarán diversas situaciones en caso de error o de no poder suministrar a la microrred toda la potencia calculada que se ha estudiado para las diferentes formas de energía no gestionable, es decir, puede ocurrir que en algún periodo del día haya ausencia de alguna de las energías estudiadas, como la eólica o la fotovoltaica por condiciones climáticas o externas.

Este capítulo se basará en el estudio de estas diferentes situaciones y en como la curva de demanda y generación de la microrred que se desea construir variará dependiendo de la situación.

Las curvas de demanda de la ciudad de Salamanca que se mostrarán en este capítulo tomarán como referencia las curvas del perfil de demanda de Red Eléctrica de España, ya que no se han podido obtener datos de la fluctuación de esta ciudad.



*Figura 41. Curva de demanda estimada para la Ciudad de Salamanca [Elaboración Propia]*

Se aprecia la similitud con la curva característica de España teniendo dos picos máximos durante el día, donde se ha decidido que sobre las 21:00 podría llegar a el máximo calculado de 120 MWh y luego un pico mínimo durante la madrugada.

## **2. CONFIGURACIÓN ELEGIDA**

### **2.1 TECNOLOGÍAS NO GESTIONABLES**

Las tecnologías no gestionables con las que se quiere trabajar en este proyecto son la eólica y la fotovoltaica, y al tratarse de centrales de agua fluyente la energía proveniente de las centrales minihidráulicas también pertenecerá al grupo de no gestionables.

Estas energías siempre tendrán prioridad frente al hidrógeno obtenido por la planta de gasificación, ya que este solo se utilizará en caso de no poder cubrir la curva de demanda por cualquier factor que altere a las energías no gestionables ya mencionadas.

### **2.2 INTERCAMBIOS CON LA RED**

Se pueden considerar dos casos a estudiar. El primero de ellos sería el no poder cubrir la curva de demanda ni con la generación renovable de las energías no gestionables ni con el hidrógeno almacenado. En este caso se debería disponer de una interconexión con la red nacional de transporte para poder garantizar la seguridad de suministro a la ciudad de Salamanca.

Por otro lado, puede suceder totalmente lo contrario, es decir, puede haber momentos del día en los que se genere el máximo de las energías no gestionables y la energía demandada necesaria en ese momento sea menor que la generada. En este caso el exceso de energía se venderá a la red principal para evitar paradas de los grupos de generación.

Será necesario por tanto tener siempre una interconexión con la red para no alterar el flujo energético y garantizar su seguridad.

### **3. CASOS DE ESTUDIO**

Se va a estudiar la ausencia de las tres energías no gestionables que van a suministrar energía a la microrred de la ciudad de Salamanca, estas son la energía eólica, energía fotovoltaica y energía minihidráulica.

En la siguiente tabla se resume la potencia que cada una de ellas podría suministrar a la microrred:

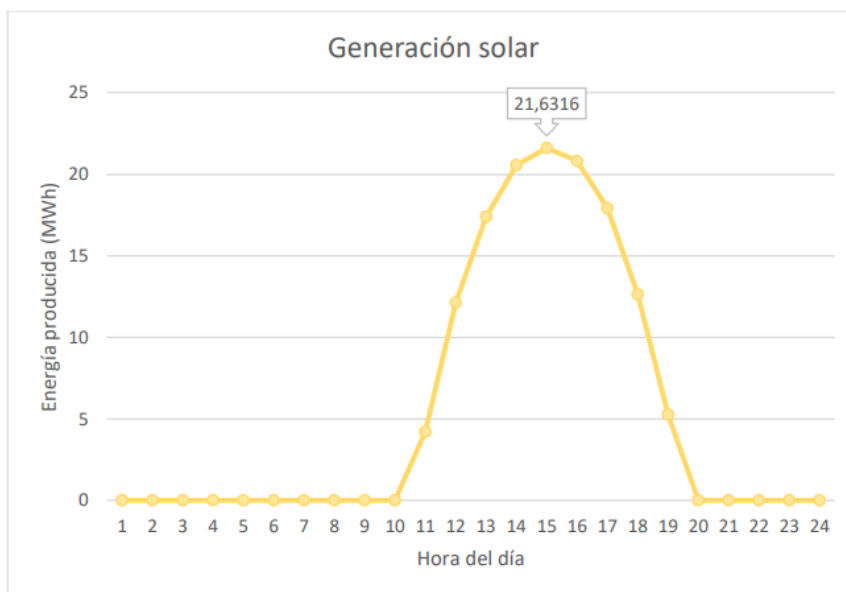
Tecnología	Potencia instalada (MW)
Eólica	147,84
Fotovoltaica	52,76
Minihidráulica	14,76

*Tabla 17. Potencia instalada de las distintas tecnologías a usar [Elaboración propia]*

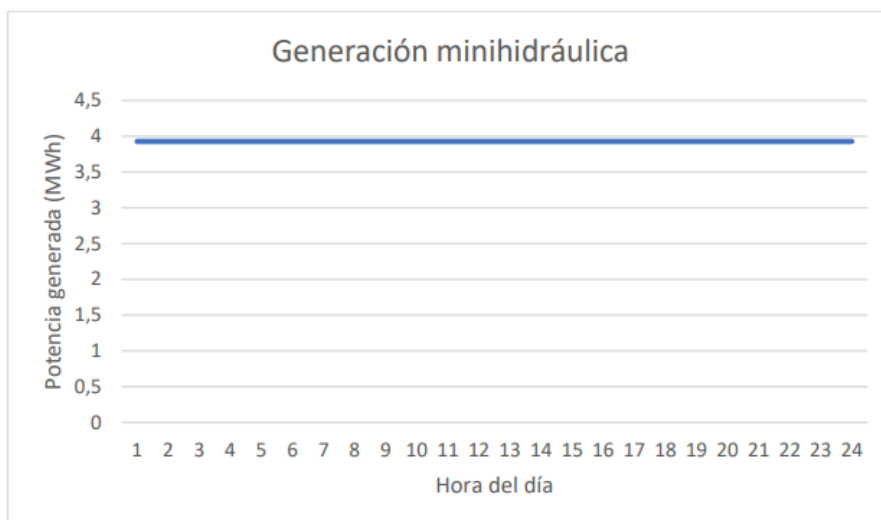


*CAPÍTULO 6: CONFIGURACIÓN DE LA MICRORRED*

Y para recordar lo estudiado en los primeros capítulos se adjuntan también las gráficas que representan las curvas de generación de los distintos tipos de energías (en coherencia con la potencia instalada que cada una dispone y sus factores de carga):



*Figura 42. Curva generación solar fotovoltaica [Elaboración propia]*



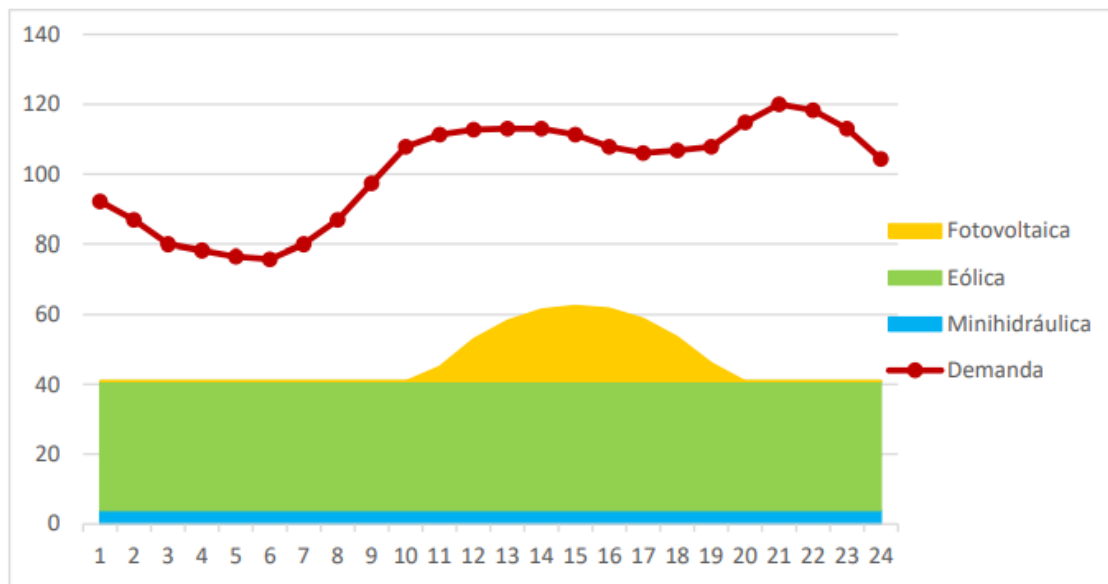
*Figura 43. Curva generación minihidráulica [Elaboración propia]*

De la energía eólica no se ha podido obtener una curva clara de generación ya que es una tecnología totalmente aleatoria, pero se estiman unos 148 MW provenientes de los parques eólicos. Esta energía tiene un factor de carga del 25%, por lo que se tomará como una energía base de 37 MWh.

Catilla y León pose cerca de 260 parques eólicos y Salamanca, junto a Segovia es de las provincias con menos parques para producir energía a partir del viento de la región.

### **3.1 PRIMER CASO DE ESTUDIO: DISPONIBILIDAD TOTAL DE GENERACIÓN**

En la siguiente gráfica se muestra cómo se relacionan las curvas de las diferentes energías no gestionables con la curva de demanda de la ciudad de Salamanca estimada:

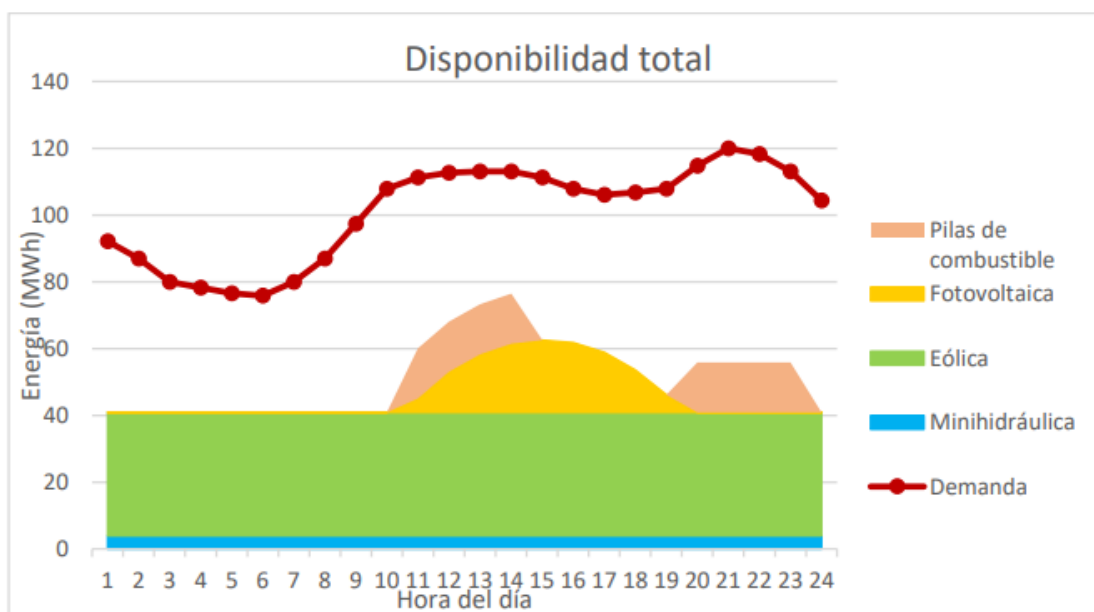


*Figura 44. Curva de demanda; disponibilidad total de generación [Elaboración propia]*

*CAPÍTULO 6: CONFIGURACIÓN DE LA MICRORRED*

Como se puede observar en la gráfica la generación que proporcionan las energías no gestionables, aun siendo eficientes al cien por cien, no llegan en ningún periodo del día a poder satisfacer la demanda de la microrred por ellas mismas, por lo que será necesario en cualquier caso la ayuda de las pilas de combustible para poder rellenar la curva con ayuda del hidrógeno almacenado.

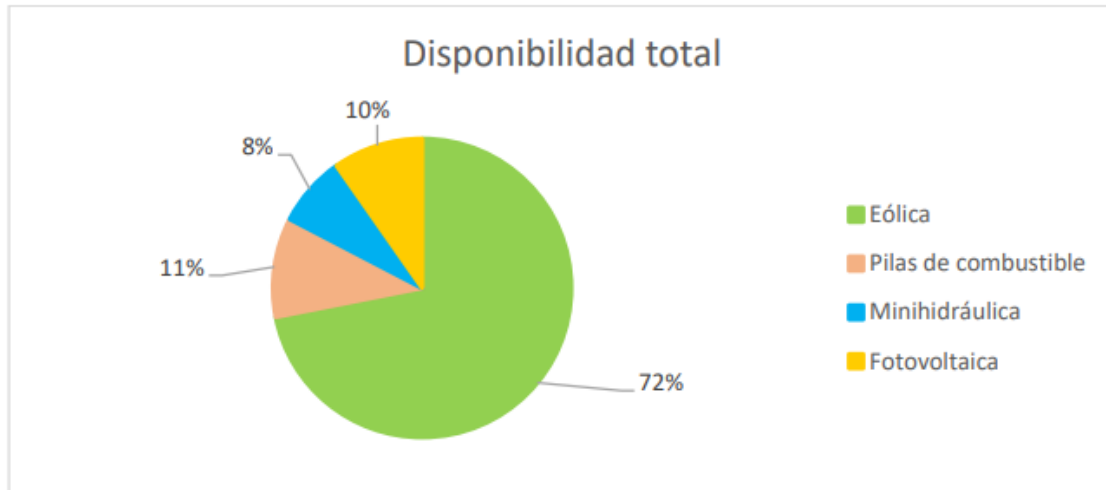
Si las pilas de combustible se usaran conectaran a la microrred en sus horas punta se obtendrían los siguientes resultados:



*Figura 45. Curva de demanda con pilas de combustible; disponibilidad total de generación [Elaboración propia]*

El hidrógeno no serviría para cubrir completamente la curva, pero ayudaría en aquellos momentos de máxima demanda. Se puede apreciar en la gráfica superior como los resultados no son idóneos, pero se debe recordar que para el estudio de la curva que podría producirse en la ciudad de Salamanca se han tomado datos estimados de la curva de demanda de la península española y también en sus picos máximos se han tomado valores que raramente se darán en la vida real, como los 120 MWh ya mencionados.

En cuanto a la disponibilidad de la generación eléctrica en la siguiente gráfica se clasifican las diferentes tecnologías de forma porcentual, donde puede apreciarse como la energía eólica es la más importante en este primer estudio:



*Figura 46. Disponibilidad total de generación eléctrica [Elaboración propia]*

### **3.2 SEGUNDO CASO DE ESTUDIO: AUSENCIA DE ENERGÍA EÓLICA**

La energía eólica proporciona a la microrred un 72% de la energía total que esta obtiene. Con ausencia de esta tecnología la microrred se vería en uno de los casos en los que es necesario pedir ayuda a la red principal. Esto se muestra de una forma más visual en la siguiente gráfica:

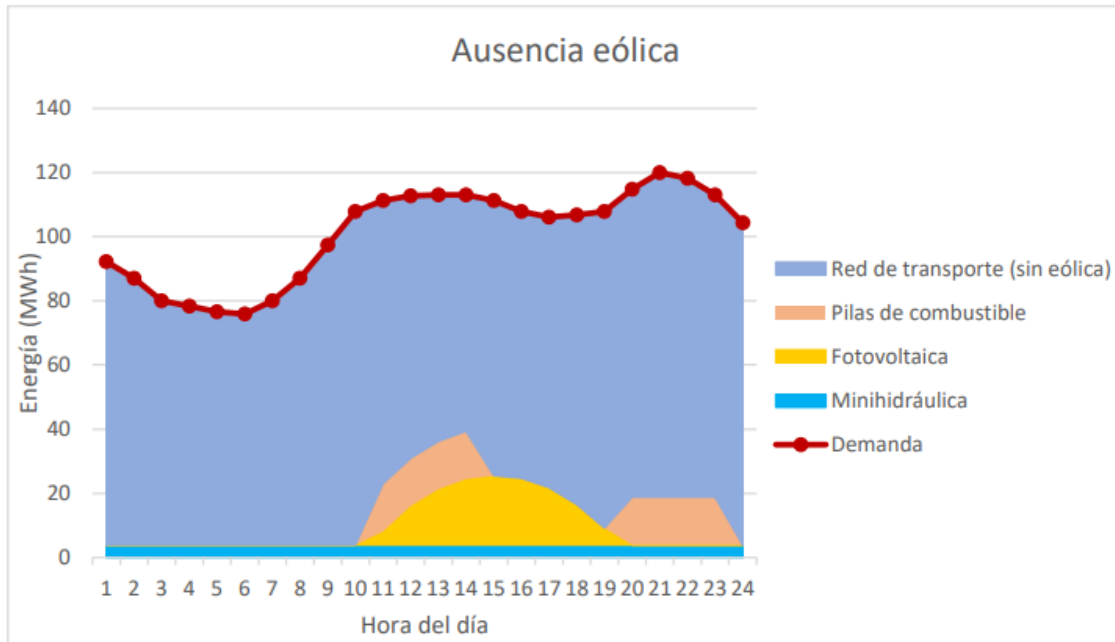


Figura 47. Curva de demanda energética con ausencia de energía eólica [Elaboración propia]

Para esta hipótesis, igual que en el estudio en general de la microrred y de la planta de gasificación por plasma se han escogido las peores situaciones, es decir, ausencia total de energía eólica. Este sería el peor de los casos ya que con excepción de las horas de sol la microrred no produciría apenas energía.

Se ha vuelto a plantear en esta hipótesis la conexión de las pilas de combustible en las horas punta para así mejorar la viabilidad económica de la microrred, pero no resultan de gran ayuda.

La única conclusión que se puede obtener de este caso de estudio es la importancia de la generación eólica para la microrred en la ciudad de Salamanca.

En el siguiente gráfico se aprecia porcentualmente los diferentes tipos de tecnologías:

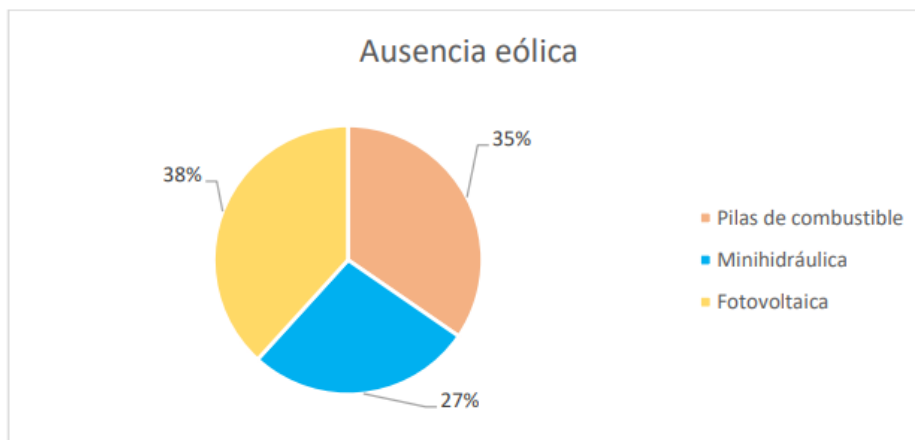


Figura 48. Disponibilidad total de generación eléctrica con ausencia eólica [Elaboración propia]

### 3.3 TERCER CASO DE ESTUDIO: AUSENCIA DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA

La ausencia de esta tecnología influye en menor medida que la ausencia de energía eólica del segundo caso de estudio. Las pilas de combustible seguirán conectadas a la microrred en las horas punta y gracias a ello se producirá una reducción del precio por depender menos en esas horas de la red de transporte.

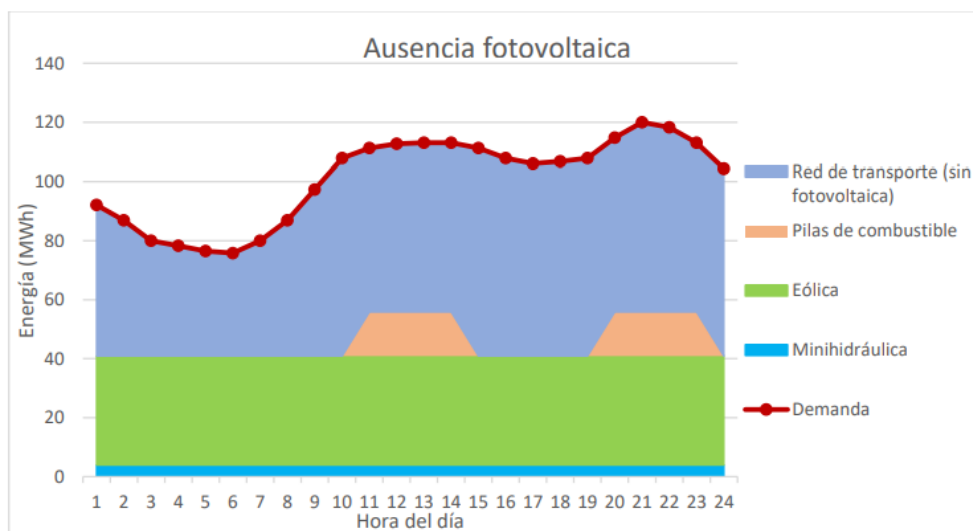


Figura 49. Curva de demanda energética con ausencia de energía fotovoltaica [Elaboración propia]

La generación eólica en este caso de estudio vuelve a ser la protagonista:

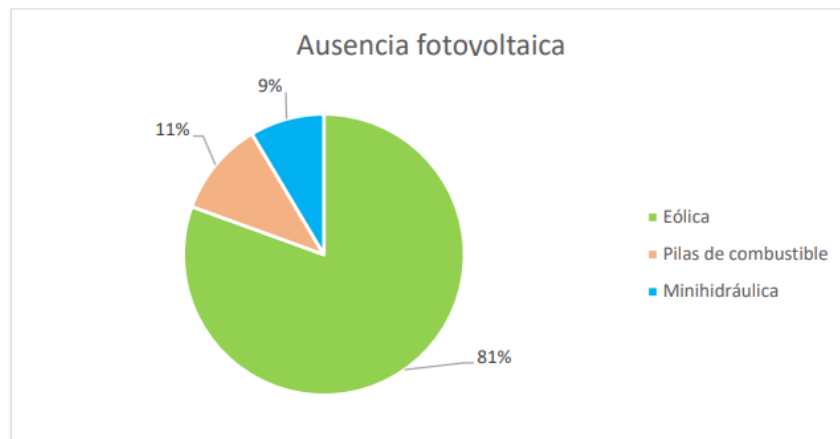


Figura 50. Disponibilidad total de generación eléctrica con ausencia fotovoltaica [Elaboración propia]

### 3.4 CUARTO CASO DE ESTUDIO: AUSENCIA DE ENERGÍA MINIHIDRÁULICA

La ausencia de esta tecnología apenas provoca cambios en la curva de generación ya que se trata de una energía base que apenas llega a los 4 MWh:

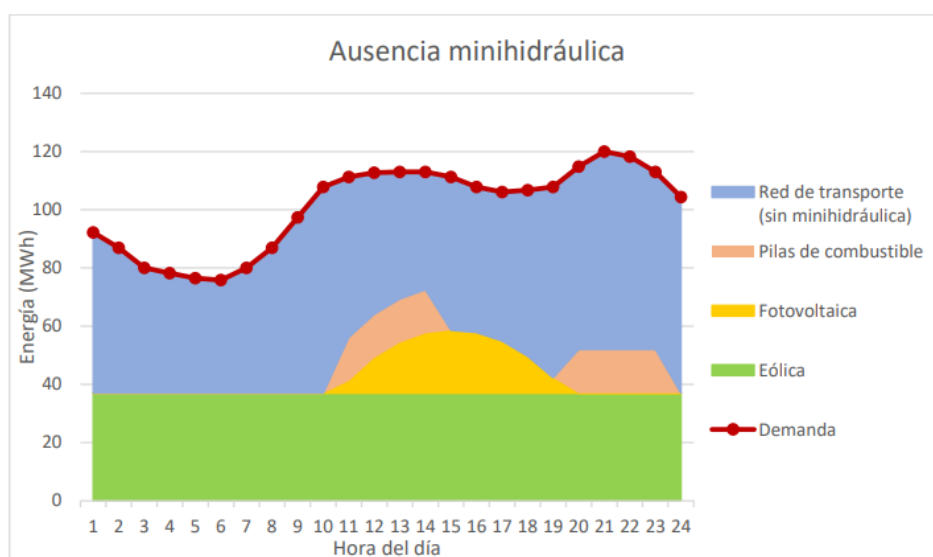


Figura 51.. Curva de demanda energética con ausencia de energía minihidráulica [Elaboración propia]

La energía eólica sigue manteniéndose la principal:

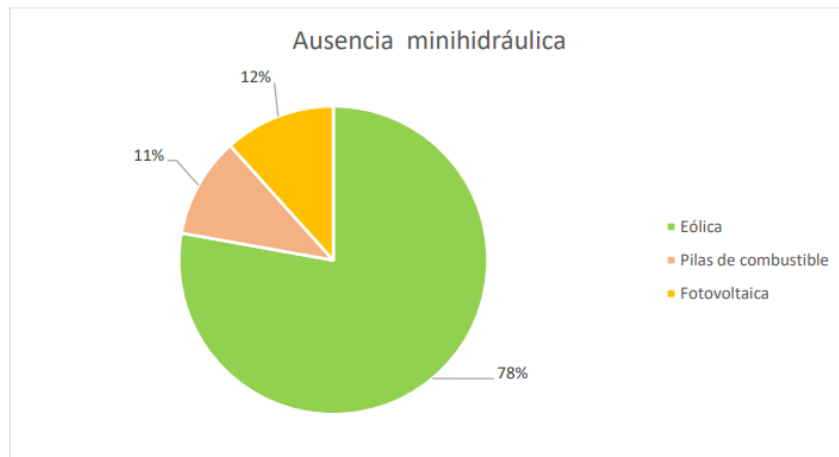


Figura 52. Disponibilidad total de generación eléctrica con ausencia minihidráulica [Elaboración propia]

#### **4. RESUMEN MICRORRED INTELIGENTE**

Se ha podido comprobar gracias a los diferentes estudios que la energía eólica va a ser la más significativa en la microrred que se desea diseñar y aunque la unión de todas las tecnologías no gestionables no consiga llegar a cubrir por completo la curva de demanda, se estima que se cubrirá aproximadamente un 39% de la demanda mientras que el otro 61% lo cubrirá la red de transporte. Las pilas de combustible siempre se conectarán a la microrred en horas de alta demanda, es decir en las puntas de las curvas (de 12:00 a 14:00 y de 30:00 a 23:00).





# PARTE II: ESTUDIO ECONÓMICO

## **CAPÍTULO 7: ESTUDIO ECONÓMICO**

### **1. ESTUDIO ECONÓMICO**

En esta segunda parte del proyecto se van a estudiar los diferentes costes que aporta cada una de las tecnologías estudiadas: eólica, minihidráulica y solar fotovoltaica. Se analizará también la eficiencia en cuanto a costes de la planta de gasificación con plasma y con todo ello se analizará finalmente la rentabilidad de la construcción de la microrred inteligente en la ciudad de Salamanca.

Un dato importante a destacar es la variación de precios en los últimos años de la energía en España, empezando desde el año 2020 con el inicio de la pandemia de Covid-19 y también las alteraciones vividas por la guerra de Ucrania en el 2022. Se va a intentar en este capítulo obtener los datos más recientes posibles para dar así el mayor realismo posible para la futura realización del proyecto, pero en muchos casos los datos no están actualizados y se completará el estudio con datos económicos adaptados al año 2019, antes del inicio de la pandemia.

Para la realización del estudio económico se van a tomar las siguientes hipótesis:

5. El periodo de tiempo que se va a tomar como vida útil de las tecnologías integradas en la microrred va a ser de 25 años, periodo de amortización para la inversión inicial de las tecnologías.
6. Aunque muchas de las instalaciones de donde se genera la energía ya existen se va a realizar el estudio económico de la inversión inicial desde el año cero para simplificar los cálculos.
7. Para el estudio de los costes de explotación se estima un 2% del IPC para el largo de vida útil de las instalaciones.
8. A partir del cuarto año de explotación se va a considerar una curva de aprendizaje en las distintas tecnologías estudiadas, y se considerará del 1,6%.

La fuente de información principal de esta segunda parte de proyecto proviene del IDAE:

“Evolución tecnológica y prospectiva de costes por tecnologías de energías renovables a 2020-2030” [22].

“Evolución tecnológica y prospectiva de costes de las energías renovables, Estudio técnico 2011-2020” [23].

Será necesario amortizar el coste de la inversión a lo largo de los 25 años de vida útil que se estima que van a tener las tecnologías. Se supondrá un interés efectivo del 5% sobre el capital y a través de la siguiente fórmula se calculará el coste anual:

$$P = C_o \cdot \frac{r \cdot (1 + r)^N}{(1 + r)^N - 1}$$

Siendo:

- P: amortización anual
- Co: coste de inversión total
- N: años de vida útil de la instalación

## **2. ESTUDIO ECONÓMICO DE LA ENERGÍA MINIHIDRÁULICA**

El estudio económico de esta tecnología viene determinado por los siguientes factores:

- Inversión inicial y puesta en marcha. Será un gasto del año cero que deberá ser amortizado durante la vida útil de la central, por lo que se deberá estudiar anualmente su amortización.
- Costes de operación y mantenimiento de las distintas centrales minihidráulicas, se adaptarán estos costes a los últimos datos actualizados del año 2019.

En la siguiente tabla se indican las centrales de las que se generaría energía minihidráulica para el proyecto:

Instalación	Tipo de central	Potencia instalada (MW)	Producción anual esperada (GWh)
C.H. de Ledesma	Agua fluyente	1,471	3,8246
Central de Almenara	Agua fluyente	0,396	1,0296
Zorita de Valverdón	Agua fluyente	1	2,6
La Flecha	Agua fluyente	0,984	2,5584
Villagonzalo I y II	Agua fluyente	3,86	10,036
C.H. Santa Eolina	Agua fluyente	0,42	1,092
San Fernando	Agua fluyente	5	13
Puente Congosto I	Agua fluyente	0,88	2,288
C.H. El Tejado	Agua fluyente	0,75	1,95
<b>Total</b>		<b>14,761</b>	<b>38,3786</b>

*Tabla 18. Instalaciones de energía minihidráulica Salamanca*

Según IDAE, para centrales de agua fluyente se estima un total de 2.600 horas de funcionamiento anuales.

## 2.1 INVERSIÓN INICIAL

El coste de inversión de una central hidráulica de tipo agua fluyente varía entre 1,3M€ y 1,6M€ por MW instalado. El IDAE asume un coste en España de entre los 1,5 M€ por MW.

Los principales costes de inversión que se encuentran en este tipo de centrales son:

Grupo turbogenerador	30%
Equipos Eléctricos, Regulación, Control y Línea	22%
Ingeniería y Dirección de Obra	8%
Obra Civil	40%

*Tabla 19. Costes inversión centrales minihidráulicas [24]*

Los mayores costes de inversión de este tipo de centrales son los del grupo turbogenerador, grupo que se dividiría entre la instalación de la turbina hidráulica y el generador, y la obra civil. Teniendo en cuenta estos porcentajes se obtiene los siguientes resultados:

Instalación	Potencia instalada (MW)	Coste turbina	Coste generador	Coste obra civil	Coste instalación + margen industrial	Coste total
C.H. de Ledesma	1,471	340.509 €	340.509 €	1.089.630 €	435.852 €	2.206.500 €
Central de Almenara	0,396	91.667 €	91.667 €	293.333 €	117.333 €	594.000 €
Zorita de Valverdón	1	231.481 €	231.481 €	740.741 €	296.296 €	1.500.000 €
La Flecha	0,984	227.778 €	227.778 €	728.889 €	291.556 €	1.476.000 €
Villagonzalo I y II	3,86	893.519 €	893.519 €	2.859.259 €	1.143.704 €	5.790.000 €
C.H. Santa Eolina	0,42	97.222 €	97.222 €	311.111 €	124.444 €	630.000 €
San Fernando	5	1.157.407 €	1.157.407 €	3.703.704 €	1.481.481 €	7.500.000 €
Puente Congosto I	0,88	203.704 €	203.704 €	651.852 €	260.741 €	1.320.000 €
C.H. El Tejado	0,75	173.611 €	173.611 €	555.556 €	222.222 €	1.125.000 €
<b>Total</b>	<b>14,761</b>					<b>22.141.500 €</b>

*Tabla 20. Coste total energía minihidráulica*

El precio total obtenido debe ser amortizado durante los 25 años que se ha decidido como vida útil de las centrales de las diferentes tecnologías, por lo tanto, será necesario un coste anual de:

$$P = 22.141.500 \cdot \frac{0,05 \cdot (1+0,05)^{25}}{(1+0,05)^{25} - 1} = \mathbf{1,57 \text{ M€/año}}$$

## 2.2 COSTES DE EXPLOTACIÓN

Suponiendo un coste de 50€/kW instalado según IDAE en cuanto a costes de mantenimiento y operación y suponiendo un funcionamiento anual de 2.600 horas se obtiene un coste de **738.050€ al año**.

Este precio deberá ser pagado durante los 25 años de vida útil de la central, aplicando los factores anteriormente comentados del 2% del IPC y el 1,6% de la curva de aprendizaje, dicha curva se aplica desde el año 4.

## 2.3 RESUMEN DE COSTES ENERGÍA MINIHIDRÁULICA

En la siguiente gráfica se exponen los diferentes costes que produce esta tecnología divididos en diferentes etapas de la vida útil de las centrales. Siempre se tiene en cuenta para la obtención de estos datos el valor de IPC y la variación de la curva de aprendizaje. Se presenta también el precio de cada kWh producido en los diferentes años, siendo el precio medio de unos 0,0616 € por cada kWh:

	Año 1	Año 5	Año 10	Año 15	Año 20	Año 25
Coste amortización (M€)	1,571	1,571	1,571	1,571	1,571	1,571
Coste de explotación (M€)	0,738	0,774	0,790	0,806	0,822	0,838
Electricidad producida (GWh)	38,379	38,379	38,379	38,379	38,379	38,379
Precio electricidad (€/kWh)	0,06016	0,06110	0,06151	0,06192	0,06235	0,06278

*Tabla 21. Tabla resumen costes energía minihidráulica*

## 3. ESTUDIO ECONÓMICO DE LA ENERGÍA EÓLICA

Se van a seguir los mismos pasos con los que se ha estudiado la energía minihidráulica.

Para este tipo de energía se deberá tener en cuenta el tipo de aerogenerador usado y sus características principales.

Para esta tecnología se estiman una producción de 2.200 horas.

Parque eólico	Aerogenerador	Tecnología	Nº turbinas	Potencia instalada (MW)	Producción anual esperada (GWh)
Sierra de Dueña	Gamesa, G-58	DFIG	37	31,45	69,19
Matabuey	Vestas, V-90	DFIG	8	16,2	35,64
Los Concejiles	Ecotecnia 74	DFIG	7	11,69	25,718
Teso Santo (Santiz y Palacios de Arzobispo)	Vestas, V-90	DFIG	25	50	110
Alba de Tormes	Vensys Energy	-	3	4,5	9,9
Bandeleras	Gamesa, G-90	DFIG	18	34	74,8
<b>Total</b>				<b>147,84</b>	<b>325,248</b>

*Tabla 22. Instalaciones de energía eólica Salamanca*

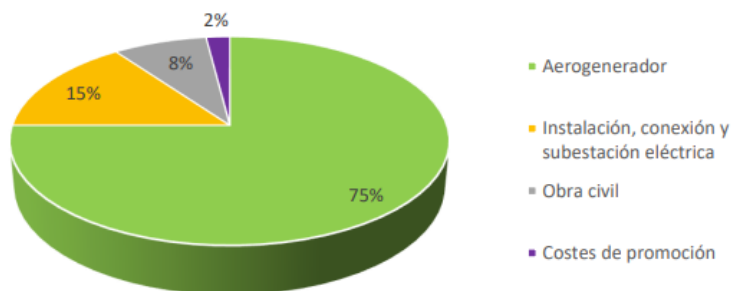
### 3.1 INVERSIÓN INICIAL

El mayor coste de inversión para este tipo de tecnologías son los aerogeneradores, su coste de adquisición y montaje, las instalaciones con la red o conexas con subestaciones y la obra civil para la creación del parque eólico, donde se encontrarán actividades como movimientos de tierra, drenajes, cimentaciones, etc.

Estos costes varían entre 1 y 1.3 M€/MW, aunque dependen del tipo de aerogenerador que se utilice. Se ha elegido un precio medio entre los dos aportados para el estudio de este proyecto, es decir se estima que el coste de inversión de esta tecnología rondará los 1,15 M€/MW.



Costes de inversión eólica



*Figura 53. Costes inversión energía eólica*

Con los porcentajes obtenidos y el precio estimado de la generación eólica se obtienen en la siguiente tabla los datos de finales de la inversión de esta tecnología:

Parque eólico	Potencia instalada (MW)	Coste aerogenerador	Coste instalación eléctrica	Coste obra civil	Costes de promoción	Coste total
Sierra de Dueña	31,45	27.125.625 €	5.432.417 €	2.880.275 €	729.183 €	36.167.500 €
Matabuey	16,2	13.972.500 €	2.798.256 €	1.483.639 €	375.605 €	18.630.000 €
Los Concejiles	11,69	10.082.625 €	2.019.235 €	1.070.601 €	271.038 €	13.443.500 €
Teso Santo (Santiz y Palacios de Arzobispo)	50	43.125.000 €	8.636.593 €	4.579.133 €	1.159.274 €	57.500.000 €
Alba de Tormes	4,5	3.881.250 €	777.293 €	412.122 €	104.335 €	5.175.000 €
Bandeleras	34	29.325.000 €	5.872.883 €	3.113.810 €	788.306 €	39.100.000 €
<b>Total</b>						<b>170.016.000 €</b>

*Tabla 23. Coste total inversión energía eólica*

El precio total obtenido debe ser amortizado durante los 25 años que se ha decidido como vida útil de las centrales de las diferentes tecnologías, por lo tanto, será necesario un coste anual de:

$$P = 170.016.000 \cdot \frac{0,05 \cdot (1+0,05)^{25}}{(1+0,05)^{25} - 1} = \mathbf{12,06 \text{ M€/año}}$$

### 3.2 COSTES DE GEERACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIETO

Según la principal fuente de información para el estudio económico (IDAE), este tipo de costes en los parques eólicos rondan los 45.000€ por MW instalado. Sumándole a estos constes seguros anuales de inversión, costes de alquiler, tasas y costes por todo tipo de gestiones se estima un precio total de **6.652.800€ al año**.

### 3.3 RESUMEN DE COSTES ENERGÍA EÓLICA

En la siguiente gráfica se exponen los diferentes costes que produce esta tecnología divididos en diferentes etapas de la vida útil de las centrales. Siempre se tiene en cuenta para la obtención de estos datos el valor de IPC y la variación de la curva de aprendizaje. Se presenta también el precio de cada kWh producido en los diferentes años, siendo el precio medio de unos 0,0591 € por cada kWh:

	Año 1	Año 5	Año 10	Año 15	Año 20	Año 25
Coste amortización (M€)	12,063	12,063	12,063	12,063	12,063	12,063
Coste de explotación (M€)	6,653	6,977	7,118	7,261	7,408	7,557
Electricidad producida (GWh)	325,248	325,248	325,248	325,248	325,248	325,248
Precio electricidad (€/kWh)	0,05754	0,05854	0,05897	0,05941	0,05986	0,06032

*Tabla 24. Tabla resumen costes energía eólica*

## 4. ESTUDIO ECONÓMICO DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA

La trayectoria del estudio de este tipo de tecnología sigue la misma trayectoria que en los anteriores casos con la energía eólica y minihidráulica.

Teniendo en cuenta un IPC del 2% anual y una reducción del 1,6% por la curva de aprendizaje a partir del año 4 se obtendrán los diferentes costes con los que este tipo de energía se va a encontrar.

La IDAE estima un tiempo de 1.560 horas de funcionamiento para esta tecnología.

Instalación	Potencia instalada (MW)	Producción anual esperada (GWh)
Valverdón	5	7,8
Zarapicos	11,69	18,2364
San Pedro del valle	1,4	2,184
Zorita de la frontera	2	3,12
Mozárbez	4,44	6,9264
Pitiegua	4,3	6,708
Narros de Matalayegua	1,13	1,7628
Ledesma	0,84	1,3104
Pedrosillo el Ralo	0,9	1,404
Topas	0,5	0,78
Galindo y Perahuy	0,55	0,858
Morille	3,3	5,148
Negrilla de Palencia	0,64	0,9984
Salamanca	1,6	2,496
Carbajosa de la Sagrada	3,3	5,148
Abusejo	11,17	17,4252
<b>Total</b>	<b>52,76</b>	<b>82,3056</b>

*Tabla 25. Instalaciones energía fotovoltaica Salamanca*

### 4.1 INVERSIÓN INICIAL

En cuanto a los paneles fotovoltaicos se diferencian tres grandes tipos: paneles monocristalinos, paneles policristalinos y paneles de silicio. También hay diferentes maneras de instalar este tipo de paneles, en el suelo o en tejado. Dependiendo del tipo de instalación y del tipo de panel el coste de inversión varía.

Para este proyecto los paneles usados serán los paneles de silicio y se instalarán en el suelo.

Dentro de estos costes de inversión se encuentra el montaje, cableado, obra civil y todo tipo de licencias y administraciones necesarias para los paneles fotovoltaicos.

Los últimos datos recogidos en 2019 por la IDAE reflejan un coste de 1,15M€/MW, por lo que el total de la inversión sabiendo que la potencia instalada que deseamos que cubra esta tecnología es de 52,76 MW será de **60,674 M€**. Teniendo en cuenta todo tipo de amortizaciones y la vida útil de la instalación, el coste anual será de **4,3 M€**.

$$P = 60.674.000 \cdot \frac{0,05 \cdot (1+0,05)^{25}}{(1+0,05)^{25} - 1} = \mathbf{4,3 \text{ M€/año}}$$

## **4.2 COSTES DE GEERACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIETO**

Según la principal fuente de información para el estudio económico (IDAE), este tipo de costes en los parques eólicos rondan los 42.000€ por MW instalado. Sumándole a estos constes seguros anuales de inversión, costes de alquiler, tasas y costes por todo tipo de gestiones se estima un precio total de **2.243.300€ al año**.

## **4.3 RESUMEN DE COSTES ENERGÍA FOTOVOLTAICA**

En la siguiente gráfica se exponen los diferentes costes que produce esta tecnología divididos en diferentes etapas de la vida útil de las centrales. Siempre se tiene en cuenta para la obtención de estos datos el valor de IPC y la variación de la curva de aprendizaje. Se presenta también el precio de cada kWh producido en los diferentes años, siendo el precio medio de unos 0,0816 € por cada kWh:

	Año 1	Año 5	Año 10	Año 15	Año 20	Año 25
Coste amortización (M€)	4,305	4,305	4,305	4,305	4,305	4,305
Coste de explotación (M€)	2,242	2,352	2,399	2,447	2,497	2,547
Electricidad producida (GWh)	82,306	82,306	82,306	82,306	82,306	82,306
Precio electricidad (€/kWh)	0,07955	0,08088	0,08145	0,08204	0,08264	0,08325

*Tabla 26. Tabla resumen costes energía fotovoltaica*

## 5. ESTUDIO ECONÓMICO DE LA PLANTA DE GASIFICACIÓN POR PLASMA

Para el estudio económico de la planta de gasificación se deben destacar los tres principales pilares que conllevan el funcionamiento de esta planta.

Primero de todo el proceso de gasificación por medio de los residuos de alimentación, en segundo lugar, el ciclo de Rankine donde se aprovecha el calor para la generación posterior de energía, y por último las pilas de combustible donde se almacenará todo el hidrógeno creado a través de la planta de gasificación.

En los siguientes apartados se analizará de forma separada estos tres pilares fundamentales.

### 5.1 GASIFICACIÓN POR PLASMA

Como ya se comentó en el capítulo 5 las horas de funcionamiento de la planta de gasificación por plasma van a ser de 8.760, es decir la planta estará en funcionamiento el año entero.

En cuanto a los residuos introducidos para alimentar la planta también se comentó que la capacidad de la vasija deseada para esta planta sería de 250 toneladas diarias ya que se estima una obtención próxima a esa cantidad de residuos en los años de mayor demanda (RSU + residuos agrícolas).

En este apartado no se tendrán en cuenta costes de generación de energía ya que estos serán mas relevantes cuando se describa el estudio económico del ciclo de Rankine y el estudio económico del almacenamiento del hidrógeno en pilas de combustible.

Por lo tanto, los costes más importantes en cuanto a la planta de gasificación por plasma se refieren son los de inversión y los de explotación de esta.

Se supondrá como en las tecnologías anteriormente descritas una vida útil de 25 años de la planta con un interés efectivo del 5% y se seguirán tomando los valores correspondientes al IPC (2%), y la reducción anual del 1,6% por la curva de aprendizaje a partir del año 4.

Los datos económicos obtenidos proceden de la empresa Materiales Renovados y del trabajo de fin de grado de Almudena Valenciano. Todos estos datos se intentarán adaptar al máximo a la ciudad de Salamanca.

### **5.1.1 INVERSIÓN INICIAL**

Dentro de estos costes de inversión se encuentran principalmente la instalación de los distintos componentes que forman la planta entre los que destacan el sistema de alimentación de residuos, el gasificador, el sistema de control y de antorcha, el sistema de retirada de los residuos no utilizados y todo tipo de equipos de protección.

Se supondrá una inversión desde el año cero para así simplificar las cuentas y tras el estudio de todos estos componentes se estima un coste de unos 36 millones de euros, que se traduce en un **coste de amortización** anual de **2,55 M€**.

### **5.1.2 COSTES DE EXPLOTACIÓN**

Dentro de estos costes cabe destacar a parte de los costes de operación y mantenimiento los costes de personal. En las siguientes tablas se representan los costes de personal donde se ha decidido que para el tamaño de la planta con tener a 9 operarios en total divididos en turnos

de 8 horas cada uno, es decir siempre habrá 3 operarios en la planta presentes sería suficiente. Para cada turno también habrá un jefe de planta, es decir, un jefe por cada tres operarios, también con turnos de 8 horas.

<b>Coste operación y mantenimiento</b>	<b>€/Tm</b>	<b>Tm</b>	<b>Total (€)</b>
Consumibles químicos	9	80300	722700
Electrodos	5	80300	401500
Mantenimiento refractario y antorchas	6	80300	481800
Mantenimiento general	7	80300	562100
<b>Total</b>			<b>2168100</b>

*Tabla 27. Costes de operación y mantenimiento de la planta de gasificación por plasma*

<b>Coste personal</b>	<b>Salario (€/persona)</b>	<b>Nº empleados</b>	<b>Total (€)</b>
Operarios	24000	9	216000
Jefes de planta	48000	3	144000
<b>Total</b>			<b>360000</b>

*Tabla 28. Costes de personal de la planta de gasificación por plasma*

Sumando el coste del personal y el coste de operación y mantenimiento se obtiene un coste total de 2.528.100€, este será el coste del primer año de operación, tras él se comenzará a aplicar la subida por el IPC y la reducción de la curva de aprendizaje.

## **5.2 CICLO DE RANKINE**

La potencia total generada por este ciclo es de 10,164 GWh. Según los datos obtenidos la inversión inicial para obtener esta potencia, es decir, la instalación de la bomba, condensador, caldera de recuperación y turbina se estima en los 7,16 M€. Por lo tanto, anualmente:

$$P = 7.160.000 \cdot \frac{0,05 \cdot (1+0,05)^{25}}{(1+0,05)^{25}-1} = \mathbf{0,508 \text{ M€/año}}$$

En cuanto a los costes de explotación por operación y mantenimiento se estima en el primer año un pago de **0,119 M€**, que se verá modificado en los siguientes años por el IPC y la curva de aprendizaje.

## **5.3 PILAS DE COMBUSTIBLE**

### **5.3.1 INVERSIÓN INICIAL**

Las pilas con las que se va a realizar el proyecto provienen de la empresa Ballard y pueden producir 1MW de potencia neta. El pico de potencia estimado que se calculó en los primeros capítulos era de 120 MWh por lo que serán necesarias al menos 120 pilas para cubrir la demanda en el caso excepcional de ese pico de potencia.

Los costes de cada pila de combustible incluyendo los costes de su almacenamiento toman el valor de 2,61 millones de euros, por lo tanto, si se necesitan 120 pilas se necesitará un coste inicial de 313,2 M€. Teniendo en cuenta todo tipo de amortizaciones y la vida útil de 25 años estimada para las pilas en este proyecto se obtiene un resultado amortizado anual de:

$$P = 313.200.000 \cdot \frac{0,05 \cdot (1+0,05)^{25}}{(1+0,05)^{25}-1} = \mathbf{22,22 \text{ M€/año}}$$

### **5.3.2 COSTE DE EXPLOTACIÓN**

La empresa Ballard Power Systems estima su precio de operación en 20\$/MWh, si se hace la conversión al euro se hablaría de unos 17,72€/MWh. Por lo tanto, asumiendo en el caso más desfavorable de consumir 120 MWh durante todos los días del año la producción total sería de:



$$\text{Producción pilas} = 120 \frac{\text{MWh}}{\text{día}} \cdot 365 \text{ días} = 43.800 \text{ MWh}$$

$$\text{Coste explotación} = 17,72 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \cdot 43.800 \text{ MWh} = 776.136 \text{ €}$$

Igual que en los demás costes este precio será el del primer año mientras que se verá modificado en los siguientes años por el IPC y la curva de aprendizaje.

### 5.3.3 RESUMEN PILAS DE COMBUSTIBLE

	Año 1	Año 5	Año 10	Año 15	Año 20	Año 25
Coste amortización (M€)	25,285	25,285	25,285	25,285	25,285	25,285
Coste de explotación (M€)	3,435	3,603	3,675	3,749	3,825	3,902
Electricidad producida (GWh)	43,800	43,800	43,800	43,800	43,800	43,800
Precio electricidad (€/kWh)	0,65570	0,65952	0,66118	0,66287	0,66460	0,66636

*Tabla 29. Tabla resumen costes pilas de combustible*

En la gráfica se muestran los valores del precio de la electricidad, siendo el valor medio del KW de unos 0,6617 €/KWh.

Los costes pueden parecer elevados, pero son debidos a la gran inversión necesaria para este tipo de obras, para un plan a futuro logrando que las pilas de combustibles estén conectadas y en funcionamiento se vería un cambio drástico en los precios reduciéndose estos de manera considerable.

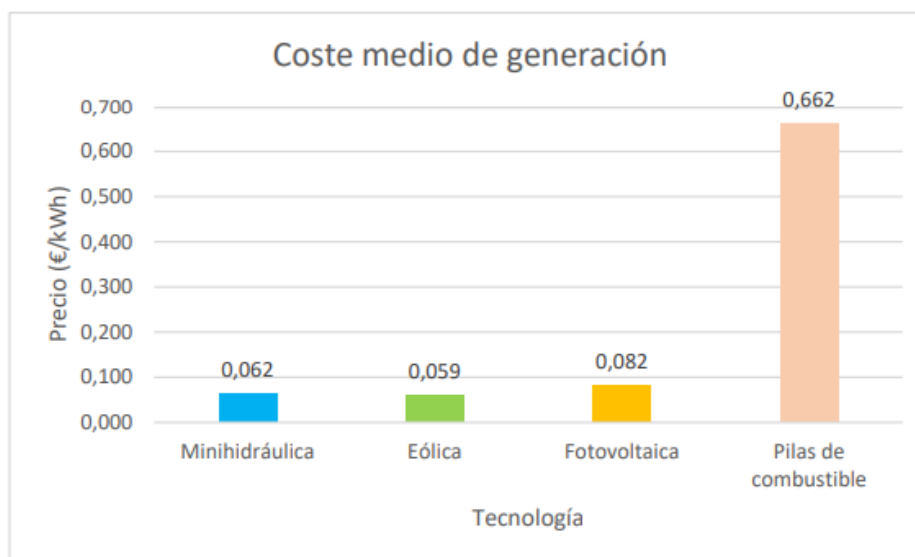
## 6. ESTUDIO ECONÓMICO DE LA MICRORRED

En la siguiente gráfica se muestran los costes medios y la producción anual producida por las diferentes tecnologías con las que se va a alimentar la microrred inteligente: energía eólica, energía minihidráulica, energía fotovoltaica y las pilas de combustible para rellenar los picos de la curva de demanda:

Tecnología	Coste medio (€/kWh)	Producción anual esperada (GWh)
Minihidráulica	0,062	38,38
Eólica	0,059	325,25
Fotovoltaica	0,082	82,31
Pilas de combustible	0,66171	43,80

*Tabla 30. Tabla resumen costes y producción de las distintas tecnologías*

En este siguiente gráfico se comparan los costes de las tecnologías comentadas, donde se puede observar como las pilas de combustible y su almacenamiento de hidrógeno serán la tecnología más costosa:



*Figura 54. Coste medio de generación de las distintas tecnologías*

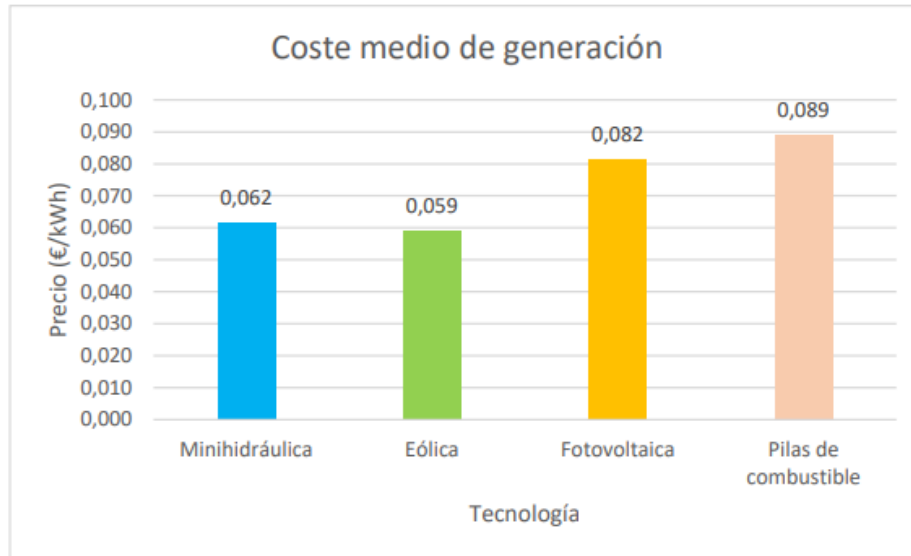
Aunque tras ver esta gráfica la idea del uso de pilas de combustible como forma de almacenamiento del hidrógeno no parezca la más económicamente adecuada se debe recordar que estas pilas se conectarán a la red en las horas pico, es decir, en las horas donde haya mayor demanda y por lo tanto el precio de la energía sea mayor, por lo que este gran coste de inversión se verá compensado ya que sería mucho más costoso conectarse directamente a la red para poder satisfacer la demanda de la ciudad.

También cabe destacar que todos estos estudios se han hecho para el caso más desfavorable, es decir teniendo que conectar todas las pilas al mismo tiempo ya que se ha supuesto para este estudio que se llegan a picos de 120 MWh. Esta situación sí que podría llegar a darse, pero no sería una situación cotidiana, por lo que los precios que se enseñan en las gráficas serían para el caso de estar en esos casos extremos, en la realidad diaria los costes serían menores.

En la siguiente gráfica se va a plantear un caso menos extremo, donde se va a suponer que las 120 pilas están conectadas durante 10 horas al día produciendo su máxima potencia. Se va a establecer un periodo de 334 días, dejando un mes sin funcionamiento para cualquier tipo de reparación de las pilas. Se obtendrían los siguientes resultados:

$$120 \text{ MW} \cdot 10 \text{ horas} \cdot 334 \text{ días} = 400.800 \text{ MWh/año}$$

Esta cantidad de 400.800 MWh/año suponen un coste de 0,0893€/kWh, viéndose reducido el precio del kWh.



*Figura 55. Coste medio de generación de las distintas tecnologías*

## **7. RENTABILIDAD DE LA MICORRED**

Todo lo estudiado en este proyecto ha sido para comprobar si la microrred que se desea crear mejoraría las funciones eléctricas de la ciudad de Salamanca, mejorando así su flujo de energía y a la vez crear un sistema más seguro, eficiente y económico.

Para comparar la competitividad y la rentabilidad de esta nueva infraestructura será necesario comparar los costes de la red que existe hoy en día en la ciudad de Salamanca, es decir comparar las tarifas de la Red Eléctrica de España con los costes que supondría para la ciudad abastecerse energéticamente por medio de la microrred.

A partir del 1 de junio de 2021 se empezó a aplicar una nueva estructura en la que el Real Decreto-ley 1/2019 introduce la diferenciación de la tarifa de acceso entre peajes y cargos, siendo los peajes los precios regulados destinados a recuperar los costes de las redes de transporte y distribución, y los cargos los precios regulados destinados a cubrir el resto de los costes regulados, tales como la financiación de las renovables o el sobrecoste de producción de energía.

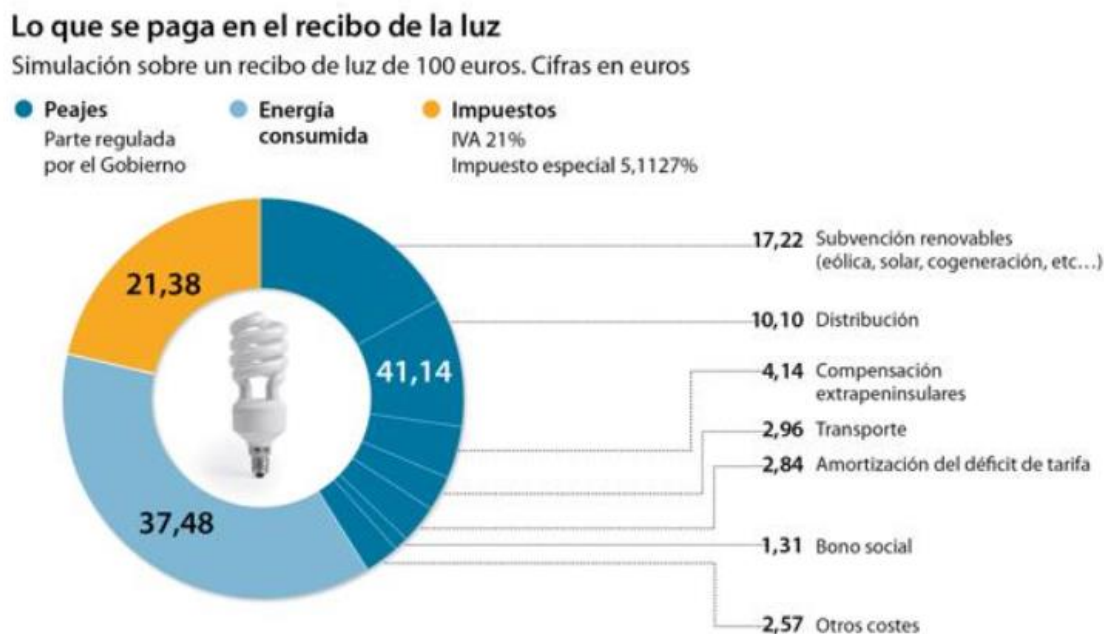
Es decir, los consumidores deberán pagar un peaje con discriminación horaria dependiendo de la punta/valle/llano, viéndose esto afectado en el Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor (PVPC).

Siendo esta la visualización de la tarifa en España:



*Figura 56. Tarifa eléctrica de España*

Siendo este un mayor desglose de la factura:



*Figura 57. Desglose tarifa eléctrica de España*

La tarifa de la microrred difiere en algunos aspectos:

En primer lugar, los costes producidos por las primas no estarían incluidas en la tarifa de la microrred, ya que por estar alimentada por energías renovables no se le aportará ninguna subvención.

El coste por transporte también se vería eliminado ya que la microrred solo alimentaría al espacio reducido de la ciudad de Salamanca, por lo que no habría necesidad de transportar a ningún otro lugar.

Sumando estos porcentajes podemos reducir un 20,18% del 41,14% de los costes por peajes mostrados en la *Figura 57*, es decir, un 20,18% de costes menos por producir energía a través de la microrred.

Hoy en día el precio del kWh varía no solo diariamente, si no que como se ha comentado antes dependiendo de la hora del día también cambia su precio. A parte los últimos acontecimientos vividos en Europa han hecho que los precios de la electricidad tomen valores excesivamente altos.

En la siguiente tabla se exponen los diferentes precios del kW hora el día 29/06/2022 en España.

Hora	Península, Baleares y Canarias	Ceuta y Melilla
00h	0,33825 €/kWh	0,33825 €/kWh
01h	0,33888 €/kWh	0,33888 €/kWh
02h	0,33292 €/kWh	0,33292 €/kWh
03h	0,3398 €/kWh	0,3398 €/kWh
04h	0,34339 €/kWh	0,34339 €/kWh
05h	0,35161 €/kWh	0,35161 €/kWh
06h	0,35609 €/kWh	0,35609 €/kWh
07h	0,33825 €/kWh	0,34629 €/kWh
08h	0,34629 €/kWh	0,34629 €/kWh
09h	0,30374 €/kWh	0,30374 €/kWh
10h	0,32701 €/kWh	0,2788 €/kWh
11h	0,31519 €/kWh	0,31519 €/kWh
12h	0,31016 €/kWh	0,31016 €/kWh
13h	0,30577 €/kWh	0,30577 €/kWh
14h	0,25122 €/kWh	0,29914 €/kWh
15h	0,23225 €/kWh	0,23225 €/kWh
16h	0,222 €/kWh	0,222 €/kWh
17h	0,21986 €/kWh	0,21986 €/kWh
18h	0,26493 €/kWh	0,21709 €/kWh
19h	0,2843 €/kWh	0,2843 €/kWh
20h	0,31778 €/kWh	0,31778 €/kWh
21h	0,32974 €/kWh	0,32974 €/kWh
22h	0,28691 €/kWh	0,33516 €/kWh
23h	0,29251 €/kWh	0,29251 €/kWh

*Tabla 31. Precios del kWh en España del día 29/06/2022 [25]*

Como los precios son muy variados y el estudio de las energías renovables se ha hecho con los últimos datos obtenidos del año 2019 según la IDAE, se van a ajustar los datos a este año.

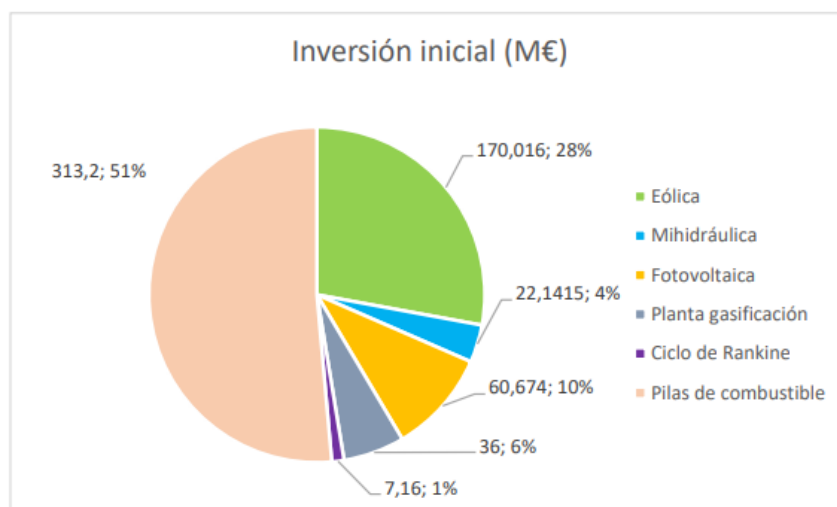
La distribución de los costes durante el año 2019 fue:

Peaje de acceso (€/kWh)	Coste de la energía (€/kWh)	Coste total (€/kWh)	Coste con reducción por primas/transporte (€/kWh)
0,044027	0,070834	0,114861	0,083848

*Tabla 32. Distribución costes año 2019 en España*

Para poder comparar estos precios con los de la microrred se va a analizar la evolución de los costes de la microrred durante los 35 años de vida útil del proyecto.

La inversión inicial global del proyecto se estima en 609, 2 M€ para el año 0. Está inversión inicial se desglosa de la siguiente manera:



*Figura 58. Inversión inicial global del proyecto*



Tras el año cero de la inversión inicial se verá afectado en el coste el incremento del 2% del IPC y la reducción del 4% por la curva de aprendizaje.

Para el cálculo de los ingresos se tomará la hipótesis de producción total de energía de todas las tecnologías para así poder cubrir con ellas todo lo posible la curva de demanda y además la venta a la red principal en caso de exceso de energía.

La producción total de la microrred será por tanto de 489,73 GWh.

En la siguiente tabla se recoge el flujo económico de la microrred inteligente de la ciudad de Salamanca:

	Generación (GWh)	Precio (€/kWh)	Ingresos (M€)	Gastos (M€)	Beneficio anual (M€)	Beneficio acumulado (M€)
Año 0	-	-	-	609,192	-609,192	-609,192
Año 1	489,732	0,06136	30,048	13,068	16,980	-592,212
Año 2	489,732	0,06258	30,649	13,330	17,320	-574,892
Año 3	489,732	0,06384	31,262	13,596	17,666	-557,226
Año 4	489,732	0,06511	31,887	13,651	18,237	-538,989
Año 5	489,732	0,06641	32,525	13,705	18,820	-520,169
Año 6	489,732	0,06774	33,176	13,760	19,416	-500,753
Año 7	489,732	0,06910	33,839	13,815	20,024	-480,729
Año 8	489,732	0,07048	34,516	13,870	20,646	-460,084
Año 9	489,732	0,07189	35,206	13,926	21,281	-438,803
Año 10	489,732	0,07333	35,910	13,982	21,929	-416,874
Año 11	489,732	0,07479	36,629	14,037	22,591	-394,283
Año 12	489,732	0,07629	37,361	14,094	23,268	-371,015
Año 13	489,732	0,07781	38,108	14,150	23,959	-347,057
Año 14	489,732	0,07937	38,871	14,207	24,664	-322,393
Año 15	489,732	0,08096	39,648	14,263	25,385	-297,008
Año 16	489,732	0,08258	40,441	14,320	26,121	-270,887
Año 17	489,732	0,08423	41,250	14,378	26,872	-244,015
Año 18	489,732	0,08591	42,075	14,435	27,640	-216,376
Año 19	489,732	0,08763	42,916	14,493	28,423	-187,952
Año 20	489,732	0,08938	43,775	14,551	29,224	-158,729
Año 21	489,732	0,09117	44,650	14,609	30,041	-128,688
Año 22	489,732	0,09300	45,543	14,668	30,876	-97,812
Año 23	489,732	0,09486	46,454	14,726	31,728	-66,084
Año 24	489,732	0,09675	47,383	14,785	32,598	-33,486
Año 25	489,732	0,09869	48,331	14,844	33,486	0,000

*Tabla 33. Flujo económico ciudad de Salamanca*

Se puede observar como el coste del kWh se reduce en comparación con el de la tarifa de la red en el que el kWh tiene un precio total de 0,1148 €, mientras que con la microrred siempre se obtienen valores inferiores, estando su máximo en 0,9896€. Los precios son mayores cada vez que pasan los años por la subida del IPC.

Si suponemos la hipótesis ya comentada en otros capítulos en la cual se necesitaba pedir ayuda a la red principal para cubrir la curva de la demanda los precios cambiarían ya que la *Tabla 33* representa los valores de la microrred si funcionara en modo isla. Pero el precio del MWh en el año 2019 era de 58€/MWh, seguiría siendo más económico la compra a la red que la tarifa española.

# PARTE III: ANEJOS Y BIBLIOGRAFÍA

# 1. ANEJOS

## ANEXO A. Catálogo BALLARD pilas de combustible



SMARTER SOLUTIONS FOR A CLEAN ENERGY FUTURE



SPECIFICATION SHEET



**> Distributed Generation - 1MW**

Ballard's ClearGen™ 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) Weight	2.9 x 2.4 x 9 meters (x2) <40,000 kg	
	Electrical Module: Dimensions (H x W x L) Weight	2.9 x 2.4 x 6.3 meters 15,000 kg	
	Fuel:	Hydrogen	>98% <sup>2</sup>
		Fuel consumption	63 kg/hr (700 m <sup>3</sup> /hour)
Available heat:	Output heat load	>950 kWt <sup>4</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 (BRL).  
2. Ballard can work with customer to provide customized fuel purification system.  
3. System interface cooling flow rate and rejection temperature to be determined.



FROST & SULLIVAN  
2011 BEST PRACTICES AWARD  
NORTH AMERICAN STATIONARY PEM FUEL CELLS NEW PRODUCT INNOVATION AWARD

Specifications and descriptions in this document were in effect at the time of publication. Ballard Power Systems, Inc. reserves the right to change specifications, product appearance or to discontinue products at any time (02/2012) SPC5103076-0E

BALLARD®, Ballard®, Powered by Ballard®, FCgen®, FCvelocity®, ClearGen™, ElectraGen™ and HydroPlus™ are trademarks of Ballard Power Systems Inc.

**ANEXO B. Costes de operación y mantenimiento (IPC y Curva de aprendizaje)**

**B.1 Energía minihidráulica**

Costes de explotación (M€)	
Año 1	0,738
Año 2	0,753
Año 3	0,768
Año 4	0,771
Año 5	0,774
Año 6	0,777
Año 7	0,780
Año 8	0,783
Año 9	0,786
Año 10	0,790
Año 11	0,793
Año 12	0,796
Año 13	0,799
Año 14	0,802
Año 15	0,806
Año 16	0,809
Año 17	0,812
Año 18	0,815
Año 19	0,819
Año 20	0,822
Año 21	0,825
Año 22	0,828
Año 23	0,832
Año 24	0,835
Año 25	0,838

## B.2 Energía Eólica

Costes de explotación (M€)	
Año 1	6,65
Año 2	6,79
Año 3	6,92
Año 4	6,95
Año 5	6,98
Año 6	7,00
Año 7	7,03
Año 8	7,06
Año 9	7,09
Año 10	7,12
Año 11	7,15
Año 12	7,17
Año 13	7,20
Año 14	7,23
Año 15	7,26
Año 16	7,29
Año 17	7,32
Año 18	7,35
Año 19	7,38
Año 20	7,41
Año 21	7,44
Año 22	7,47
Año 23	7,50
Año 24	7,53
Año 25	7,56

### **B.3 Energía Fotovoltaica**

	Costes de explotación (M€)
Año 1	2,242
Año 2	2,287
Año 3	2,333
Año 4	2,342
Año 5	2,352
Año 6	2,361
Año 7	2,370
Año 8	2,380
Año 9	2,389
Año 10	2,399
Año 11	2,409
Año 12	2,418
Año 13	2,428
Año 14	2,438
Año 15	2,447
Año 16	2,457
Año 17	2,467
Año 18	2,477
Año 19	2,487
Año 20	2,497
Año 21	2,507
Año 22	2,517
Año 23	2,527
Año 24	2,537
Año 25	2,547

#### **B.4 Pilas de Combustible**

<b>Costes de explotación (M€)</b>	
Año 1	3.435
Año 2	3,504
Año 3	3,574
Año 4	3,588
Año 5	3,603
Año 6	3,617
Año 7	3,631
Año 8	3,646
Año 9	3,661
Año 10	3,675
Año 11	3,690
Año 12	3,705
Año 13	3,719
Año 14	3,734
Año 15	3,749
Año 16	3,764
Año 17	3,779
Año 18	3,794
Año 19	3,810
Año 20	3,825
Año 21	3,840
Año 22	3,856
Año 23	3,871
Año 24	3,886
Año 25	3,902



## 2.REFERENCIAS

- [1] *Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética.* (2021, 20 mayo). BOE. [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-8447](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-8447)
- [2] *Mapa de Redes Eléctricas de Salamanca.* (2018). Red Eléctrica de España.
- [3] Gobierno De España. (2013). *CARACTERIZACIÓN DE LAS COMARCAS AGRARIAS DE ESPAÑA.* <http://comarcasagrarias.chil.me/download-doc/93432/tomo-39-provincia-de-salamanca>. <http://comarcasagrarias.chil.me/download-doc/93432/tomo-39-provincia-de-salamanca>
- [4] S. R. al día Salamanca, líder nacional en producción hidroeléctrica, Salamanca rtv al día: El periódico digital de toda Salamanca.
- [5] J. de C. y León. (2019). Energía y minería en Castilla y León. <https://energia.jcyl.es/web/jcyl/Energia/es/Plantilla100/1267710822752/ / / .>
- [6] TFG, L. Tapiador Ferrero, Estudio de una microrred inteligente en la ciudad de Toledo, proyecto fin de carrera, Univ. Pontificia Comillas, Madrid, 2011.
- [7] TFM, A. Rubi Rodríguez, Estudio de una microrred inteligente en la ciudad de Salamanca con el aprovechamiento energético de los residuos biomásicos, proyecto fin de máster, Univ. Pontificia Comillas, Madrid, 2019.
- [8] Red Eléctrica. (2022). <https://www.ree.es/es>
- [9] ADRASE - Acceso a datos de radiación solar de España - Mapa zona Península.
- [10] INE - *Recogida de residuos, datos y estadísticas.* (2021, 8 diciembre). [https://www.epdata.es/datos/recogida-residuos-datos-estadisticas/225#:~:text=Datos%20actualizados%20el%20de%20diciembre%20de%202021&text=En%20Espa%C3%B1a%20se%20recogieron%20un.Nacional%20de%20Estad%C3%ADstica%20\(INE\).](https://www.epdata.es/datos/recogida-residuos-datos-estadisticas/225#:~:text=Datos%20actualizados%20el%20de%20diciembre%20de%202021&text=En%20Espa%C3%B1a%20se%20recogieron%20un.Nacional%20de%20Estad%C3%ADstica%20(INE).)
- [11] *COGERSA - Vertedero residuos no peligrosos.* (2020). COGERSA. <https://www.cogersa.es/metaspaces/portal/14498/19172>
- [12] *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021–2030.* (2021). PNIEC. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx>

- [13] *Vertederos incontrolados en Salamanca*. (2018). TRIBUNA SALAMANCA.  
<https://www.tribunasalamanca.com/noticias/261138/sellados-los-nueve-vertederos-de-salamanca-por-los-que-europa-sanciono-al-estado-espanol>
- [14] M. <sup>a</sup>. J. B. A. (2008). *PLAN ESTRATÉGICO PARA LA MEJORA CONTINUA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS DE LA PROVINCIA DE SALAMANCA*.  
[https://bci.inap.es/alfresco\\_file/33a6ae05-9a40-4952-ae76-30976ad04985](https://bci.inap.es/alfresco_file/33a6ae05-9a40-4952-ae76-30976ad04985)
- [15] *Statistics Explained*. (2020). EUROSTAT. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal\\_waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics)
- [16] León, C. D. J. Y. (2022). *Página principal de la Junta de Castilla y León*. Junta de Castilla y León.  
[https://www.jcyl.es/web/jcyl/Portada/es/Home/1246890364336/ / /](https://www.jcyl.es/web/jcyl/Portada/es/Home/1246890364336/)
- [17] *Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía*. (2022). IDAE.  
<https://www.idae.es/home>
- [18] León, C. D. J. Y. (2022a). *Estadística agraria*. Agricultura y Ganadería.  
<https://agriculturaganaderia.jcyl.es/web/es/estadistica-informacion-agraria/estadistica-agraria.html>
- [19] TFG, A. Valenciano López, *Estudio de una microrred inteligente en la ciudad de Huesca, proyecto fin de carrera*, Univ. Pontificia Comillas, Madrid, 2015.
- [20] *Pilas de Combustible*. (2019, 7 febrero). Centro Nacional de Hidrógeno.  
<https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/#:%7E:text=Una%20pila%20de%20combustible%20es,de%20corrient e%20continua%20y%20calor>.
- [21] *Hidruros Metálicos*. (2019). ARIEMA.  
<https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2#:~:text=El%20hidr%C3%B3geno%20puede%20ser%20almacenado,envasa%20en%20botellas%20o%20plataformas>
- [22] *EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA Y PROSPECTIVA DE COSTES POR TECNOLOGÍAS DE ENERGÍAS RENOVABLES A 2020–2030*. (2009, junio). IDAE.  
[https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_PCT\\_11227.16\\_09\\_Estudio\\_evolucion\\_tecnologica\\_y\\_prospectiva\\_costes\\_EERR\\_64328903.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_PCT_11227.16_09_Estudio_evolucion_tecnologica_y_prospectiva_costes_EERR_64328903.pdf)
- [23] *Evolución Tecnológica y prospectiva de costes de las energías renovables. 2011–2020*. (2011). IDAE.  
[https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_11227\\_e2\\_tecnologia\\_y\\_costes\\_7d24f737.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e2_tecnologia_y_costes_7d24f737.pdf)

- [24] *Minicentrales hidroeléctricas*. (2006). IDAE.  
[https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_2.1.7\\_Minicentrales\\_hidroelctricas\\_125f6cd9.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_2.1.7_Minicentrales_hidroelctricas_125f6cd9.pdf)
- [25] Tarifaluzhora.es. (2022, 15 junio). *¿Cuánto cuesta el kilovatio hora de luz (kWh) en España?* <https://tarifaluzhora.es/info/precio-kwh>