



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS BIOMÁSICOS URBANOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN FORMA DE HIDRÓGENO

Autor: Rafael Bravo Martín

Director: Julio Montes Ponce de León

Madrid

Julio de 2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Aprovechamiento de los residuos biomásicos urbanos para la
generación de energía en forma de hidrógeno
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.: Rafael Bravo Martín

Fecha: ..08../ ..07../ 2022



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Julio Montes Ponce de León

Fecha: ..7../ ..7../ 22



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS BIOMÁSICOS URBANOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN FORMA DE HIDRÓGENO

Autor: Rafael Bravo Martín

Director: Julio Montes Ponce de León

Madrid

Julio de 2022

APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS BIOMÁSICOS FORESTALES, AGRÍCOLAS Y URBANOS

Autor: Bravo Martín, Rafael.

Director: Montes Ponce de León, Julio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

Resumen del Proyecto

Introducción

En este proyecto se plantean dos principales problemas a corregir. El primero es el aumento de los residuos sólidos urbanos (RSU), forestales y agrícolas, cuya acumulación puede provocar problemas ambientales como la contaminación e incendios. El segundo problema enfrentado es la sostenibilidad del sistema eléctrico español y la falta de fuentes energéticas renovables y gestionables.

La Unión Europea ha proclamado que los vertederos controlados, los cuales suponen un 80% del tratamiento de residuos en España, deberán clausurarse para el año 2030, debiendo ser sustituidos por una tecnología menos contaminante y sostenible.

El crecimiento de las ciudades acarrea consigo el aumento de los residuos urbanos producidos en estas, necesitando ser gestionados para mantener unas condiciones de higiene. A su vez, en todo el país y en especial Andalucía, existe un problema con los residuos biomásicos que se encuentran en los montes andaluces, cuya acumulación suponen un foco de incendios, los cuales arrasan cada año miles de hectáreas de bosques. En Andalucía, la biomasa recogida supone el 18% de la biomasa disponible según la Consejería de Medio Ambiente, dejando mucho margen para el aumento de su recogida. La gasificación por plasma supone un incentivo para la recogida de la biomasa, pudiendo ser rentabilizada al transformarla en energía.

Definición del proyecto

En el proyecto se plantea una tecnología de tratamiento de residuos que consiga la transformación energética de estos, a la vez que se eliminan los residuos con el mínimo impacto ambiental posible. Estas características han decantado la balanza hacia la gasificación por plasma, la cual logra la eliminación total de residuos, llegando a la disociación de las moléculas por la alta temperatura del proceso, generando un gas de síntesis rico en hidrógeno que podrá ser utilizado como vector energético, y todo ello sin emitir contaminantes tóxicos y reduciendo las emisiones de metano y CO₂ en su práctica totalidad.

El proyecto está localizado en Algeciras, cuyas características geográficas y demográficas garantizan un aporte de residuos sólidos urbanos y biomasa forestal continuo que podrá suplir en su totalidad a la planta de gasificación. Se trata de una ciudad de 121.000

habitantes en crecimiento, la segunda más poblada de la provincia de Cádiz, y en ella se encuentra la central de ciclo combinado Bahía de Algeciras, que cuenta con una potencia instalada de 821 MW y que en 2019 generó 3342 GWh, lo que la situó como la central que más electricidad generó en la provincia de Cádiz ese año.

Se ha estimado que la recogida RSU será de unas 58.000 toneladas anuales, a lo que se suman 28.000 toneladas de biomasa forestal. Mientras que los RSU se tratan diariamente en la planta, los residuos forestales se acumulan en las épocas de trabajos de poda y acondicionamiento del Parque de los Alcornocales, almacenándola para su uso distribuido durante el año. Esta cantidad de residuos equivale a 17,77 MW de potencia, pero por prudencia se ha diseñado una planta de gasificación que genere 14 MW de gas de síntesis. La implantación de la gasificación por plasma significaría una reducción de 66.206.720 Kg de CO₂ al año, en comparación con los vertederos controlados.

La planta de gasificación aprovecha el calor del gas de síntesis a la salida del reactor para secar los residuos previamente y, mediante un ciclo Rankine, se genera electricidad que alimenta los consumos de la instalación. La planta genera hidrógeno con un rendimiento del 10,1% por cada kilogramo de residuo introducido.

El sistema energético intenta aumentar la porción de energía renovable en España incrementando el número de instalaciones de generación eólicas y solares. Sin embargo, estas presentan un claro inconveniente y es su falta de gestión, es decir, su fuente de energía no está disponible en todo momento y no es posible controlar cuando lo estará. Por ello, se ha determinado la necesidad de una fuente gestionable de energía que apoye a las energías renovables. Por otro lado, el sector gasístico importa el 99,7% del gas consumido en España, por lo que se encuentra en una situación dependiente de los países proveedores. Actualmente, los ciclos combinados ya cumplen el propósito de apoyar la demanda no suplida por la generación renovable, por lo que la introducción del gas de síntesis, fuente de energía renovable y no contaminante, creado en una planta de gasificación española, es una solución muy interesante, tanto por la parte ecológica como económica y política.

El gas de síntesis obtenido será vertido a la central de ciclo combinado Bahía de Algeciras, suponiendo una disminución del 10,77% del gas natural que utiliza como combustible, vertiendo el excedente a la red de gaseoductos nacional. Las principales ventajas son la reducción de emisiones de CO₂ de la CCC en un 8%, y la generación de gas autónoma y gestionable en el país, lo cual reduce la dependencia de España con los países productores de gas, pudiendo llegar a reducir el precio de la energía.

Descripción de la tecnología

A las temperaturas que se encuentra el plasma, unos 5000°C, cualquier tipo de residuo orgánico se desintegra en sus partículas elementales, carbono e hidrógeno, resultando en lo que se denomina gas de síntesis, una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono en presencia minoritaria de otros componentes. Por otro lado, la materia inorgánica se transforma en un cristal de silicato o un vitrificado inerte. Los metales que se encontrasen entre los residuos orgánicos se recogen en forma fundida junto al material vitrificado, y en caso de encontrarse en una cantidad abundante podrán ser reutilizados. Todo el proceso es libre de cenizas o gases tóxicos como las dioxinas y furanos, que no

se forman a tan alta temperatura, lo que supone una ventaja frente a otras técnicas de tratamiento térmico como la incineración.



Proceso de gasificación por plasma (Almudena Valenciano, 2015)

De este proceso se obtiene un gas de síntesis con un elevado porcentaje de hidrógeno que será dirigido a la central de ciclo combinado Bahía de Algeciras para la generación eléctrica o se verterá, a falta de demanda por parte de la CCC, a la red de gaseoductos nacional.

Análisis económico de viabilidad

Se ha realizado un análisis económico del proyecto, suponiendo una vida útil a efectos del cálculo de la amortización y los diferentes parámetros económicos. Se ha obtenido el payback, es decir, la fecha en la que el proyecto ha generado suficiente como para devolver la inversión y el ROI (retorno de la inversión). El payback ocurre a los 9 años y medio, y se obtiene un ROI del 15%, resultando en una inversión muy rentable, que además contribuye a la descarbonización del sistema energético español y que puede llegar a rebajar el precio de la electricidad que en la actualidad se encuentra a precios muy elevados derivados de la fuerte inflación sufrida por la incertidumbre provocada por la guerra en Ucrania y la indisponibilidad del gas ruso, principal proveedor de gas en Europa.

ENERGETIC USE OF FOREST, AGRICULTURAL AND URBAN BIOMASS WASTES.

Author: Bravo Martín, Rafael.

Director: Montes Ponce de León, Julio.

Collaborating Entity: ICAI - Universidad Pontificia Comillas.

Abstract

Introduction

There are two main problems to be corrected in this project. The first is the increase in municipal solid waste (MSW), forestry and agricultural waste, the accumulation of which can cause environmental problems such as pollution and fires. The second problem faced is the sustainability of the Spanish electricity system and the lack of renewable and manageable energy sources.

The European Union has proclaimed that controlled landfills, which account for 80% of waste treatment in Spain, should be closed by 2030 and replaced by less polluting and sustainable technology.

The growth of cities brings with it an increase in urban waste produced in them, which needs to be managed in order to maintain hygienic conditions. In turn, throughout the country and especially in Andalusia, there is a problem with the biomass waste found in the Andalusian mountains, the accumulation of which is a source of fires, which devastate thousands of hectares of forest every year. In Andalusia, the biomass collected represents 18% of the available biomass according to the Regional Ministry of the Environment, leaving much room for an increase in its collection. Plasma gasification provides an incentive for the collection of biomass, which can be made profitable by transforming it into energy.

Project definition

The project proposes a waste treatment technology that achieves the energetic transformation of waste while eliminating waste with the minimum possible environmental impact. These characteristics have tipped the balance towards plasma gasification, which achieves the total elimination of waste, reaching the dissociation of the molecules due to the high temperature of the process, generating a synthesis gas rich in hydrogen that can be used as an energy vector, and all this without emitting toxic pollutants and reducing methane and CO₂ emissions almost entirely.

The project is located in Algeciras, whose geographic and demographic characteristics guarantee a continuous supply of solid urban waste and forest biomass that will be able to supply the gasification plant in its entirety. This is a growing city of 121,000 inhabitants, the second most populated in the province of Cadiz, and is home to the Bahía de Algeciras combined cycle power plant, which has an installed capacity of 821 MW

and generated 3342 GWh in 2019, making it the plant that generated the most electricity in the province of Cadiz that year.

It has been estimated that MSW collection will be around 58,000 tonnes per year, plus 28,000 tonnes of forest biomass. While MSW is treated daily at the plant, forestry waste is accumulated during the pruning and conditioning work in the Alcornocales Park and stored for use throughout the year. This amount of waste is equivalent to 17.77 MW of power, but for prudence's sake a gasification plant has been designed to generate 14 MW of synthesis gas. The implementation of plasma gasification would mean a reduction of 66,206,720 kg of CO₂ per year, compared to controlled landfills.

The gasification plant uses the heat from the synthesis gas at the reactor outlet to pre-dry the waste and, by means of a Rankine cycle, electricity is generated to power the facility's consumption. The plant generates hydrogen with a yield of 10.1% for each kilogram of waste introduced.

The energy system is trying to increase the share of renewable energy in Spain by increasing the number of wind and solar generation facilities. However, these have a clear disadvantage and that is their lack of management, i.e. their energy source is not available at all times and it is not possible to control when it will be available. Therefore, the need for a manageable energy source to support renewable energies has been identified. On the other hand, the gas sector imports 99.7% of the gas consumed in Spain, and is therefore dependent on supplier countries. Currently, combined cycle plants already fulfil the purpose of supporting the demand not supplied by renewable generation, so the introduction of synthesis gas, a renewable and non-polluting energy source, created in a Spanish gasification plant, is a very interesting solution, both ecologically, economically and politically.

The synthesis gas obtained will be fed into the Bahía de Algeciras combined cycle power plant, reducing the amount of natural gas used as fuel by 10.77%, with the surplus being fed into the national gas pipeline network. The main advantages are the reduction of CO₂ emissions from the CCC by 8%, and the generation of autonomous and manageable gas in the country, which reduces Spain's dependence on gas-producing countries and may even reduce the price of energy.

Description of the technology

At plasma temperatures of around 5000°C, any kind of organic waste disintegrates into its elementary particles, carbon and hydrogen, resulting in what is called synthesis gas, a mixture of hydrogen and carbon monoxide in the presence of a minority of other components. On the other hand, the inorganic matter is transformed into a silicate crystal or an inert vitrification. Metals found in the organic waste are collected in molten form together with the vitrified material and, if found in abundant quantities, can be reused. The whole process is free of ash or toxic gases such as dioxins and furans, which are not formed at such a high temperature, which is an advantage over other thermal treatment techniques such as incineration.



Plasma gasification process (Almudena Valenciano, 2015).

This process produces a synthesis gas with a high percentage of hydrogen that will be sent to the Bahía de Algeciras combined cycle power plant for electricity generation or, in the absence of demand from the CCC, will be discharged into the national gas pipeline network.

Economic feasibility analysis

An economic analysis of the project has been carried out, assuming a useful life for the purposes of calculating the amortisation and the different economic parameters. The payback has been obtained, i.e. the date on which the project has generated enough to return the investment and the ROI (return on investment). The payback occurs after 9 and a half years, and an ROI of 15% is obtained, resulting in a very profitable investment, which also contributes to the decarbonisation of the Spanish energy system and can reduce the price of electricity, which is currently at very high prices due to the high inflation caused by the uncertainty caused by the war in Ukraine and the unavailability of Russian gas, the main gas supplier in Europe.

INDICE

1. Introducción	1
1.1. Motivación	3
1.2 Objetivos del proyecto	4
1.3 ESTADO DEL ARTE	5
1.3.1 Proyectos realizados	5
1.3.2 Proyectos en construcción	7
2. SISTEMAS DE VALORACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS EN ESPAÑA	9
2.1 SISTEMAS DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA.....	9
2.1.1 Vertedero controlado:.....	9
2.1.2 Incineración:.....	11
2.1.3 Pirólisis:	13
2.1.4 Digestión anaerobia	13
2.1.5 Gasificación	14
2.1.6 Gasificación por plasma	15
2.2 Hidrógeno.....	16
2.3 El plasma:	16
2.4 Características diferenciales del proceso.....	17
2.5 Tecnologías de gasificación por plasma	17
3. GASIFICACIÓN POR PLASMA: SISTEMA DIRECTO	19
3.1. Etapas del proceso de gasificación por plasma.....	19
3.1.1 Producción de hidrógeno	24
3.2. Sistemas y componentes de la planta de gasificación por plasma	25
3.2.1 Reactor y sistema de alimentación	25
3.2.2 Sistema de recuperación de calor (Ciclo Rankine)	28
3.2.3 Almacenamiento del hidrógeno.....	31
3.2.4 Sistema de compresión y vertido a la red	32
4. Análisis del panorama energético español	33
4.1 Mercado eléctrico	33
4.2 Mercado gasista	37
5. El gas de síntesis.....	41
5.1. Características del gas de síntesis	41
5.2. Usos y aplicaciones del gas de síntesis.....	41
5.2.1 Generación eléctrica utilizando máquinas térmicas o pilas de combustible	42
5.2.2 Inyección en redes de gas natural.....	45

5.3 Elección de la técnica para aprovechar el gas de síntesis	46
6. Proyecto de demostración	49
6.1. Localización de la planta	49
6.2. Residuos disponibles para la planta de Algeciras.....	51
6.2.1 Residuos Sólidos Urbanos	51
6.2.2 Residuos forestales	53
6.2.3 Residuos Agrícolas:.....	56
6.2.4 Resumen de residuos	57
7. Ciclos Combinados	59
7.1 Descripción de las centrales de ciclo combinado.....	59
7.2 Situación de los Ciclos Combinados en España.....	60
7.3 Central de Ciclo Combinado Bahía de Algeciras.....	61
7.4 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	63
8. Estudio económico de la tecnología de gasificación por plasma.....	65
8.1 Inversión Inicial: CAPEX	65
8.2 Costes de operación: OPEX	67
8.3 Flujos de caja	72
8.4 Retorno de la inversión	75
Bibliografía	77

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Planta de gasificación por plasma de Wuhan	6
Figura 2 Planta de Mihama-Mikata, Japón (Tecnología de Gasificación Por Plasma de Westinghouse, 2015)	7
Figura 3: Vertedero controlado (A. Ruiz, n,d)	10
Figura 4 Planta de revalorización energética incineradora del grupo TERSA en Barcelona	12
Figura 5 Esquema del proceso de pirolisis de biomasa (Agro Waste, n.d)	13
Figura 6 Esquema de planta de gasificación (INERCO, 2007).....	14
Figura 7 <i>Etapas del proceso de gasificación por plasma (Almudena Valenciano, 2015)</i>	19
Figura 8: Rango de temperaturas y etapas del plasma (Acciona, n.d.).....	21
Figura 9: Esquema del sistema de neutralización (Valenciano López, 2015)	23
Figura 10: Esquema de la vasija del sistema de conversión de plasma (Valenciano López, 2015)	25
Figura 11: Perfil de temperaturas en el interior de la vasija (Valenciano López,2015)	26
Figura 12: <i>Tecnologías de antorchas de plasma (Valenciano López, 2015)</i>	27
Figura 13: Esquema ciclo Rankine (J. Flavio, 2017)	29
Figura 14:Condensador a vacío (Thermal Engineering, 2019)	31
Figura 15: Generación eléctrica en España en 2021 (Red Eléctrica de España)	34
Figura 16: Evolución del grado de utilización de las diferentes tecnologías de generación (Naturgy, 2020)	35
Figura 17:Potencia instalada en la península a 31 de diciembre de 2021 (REE, 2022).....	36
Figura 18: Evolución de la generación eléctrica por tecnologías (Naturgy, 2021).....	36
Figura 19: Sistema de distribución de gas español (Sedigas, 2021).....	38
Figura 20: Demanda gasista nacional en 2021 (Enagas, 2021)	39
Figura 21: Evolución del precio por tonelada de CO2 generado (Naturgy, 2021)	40
Figura 22: Composición del gas de síntesis en función del residuo de entrada (Valenciano López, 2015)	41
Figura 23: Esquema simplificado del funcionamiento de un motor de combustión interna generador de electricidad. (Grupos Bravo Generadores Eléctricos, n.d.)	43
Figura 24: <i>Sección de una turbina de gas (Centrales Térmicas de Ciclos Combinados, n.d.)</i>	44
Figura 25: Pila de combustible de hidrógeno (IES Valle del Saja Departamento de física y química, n.d.).....	45
Figura 26: Mapa de las infraestructuras de gas en España (Enagas, 2021)	50
Figura 27: Residuos Urbanos tratados de la ciudad de Algeciras (ARCGISA, 2019).....	52
Figura 28: Posibilidad anual de extracción de biomasa forestal en Andalucía (Consejería de Medio Ambiente. 2006)	54
Figura 29: <i>Densidad energética media de diferentes residuos (Agencia Andaluza de la Energía, 2020)</i>	55
Figura 30: Generación de residuos vegetales en Andalucía por provincia (Surminas, 2018).....	56
Figura 31: Esquema de central de ciclo combinado (S.G. Guerra, 2005).....	59
Figura 32: Evolución de las emisiones nacionales de CO2	61

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Composición gas de síntesis (Valenciano López, 2015).....	23
Tabla 2: Plan estimado de los residuos tratados en la planta (Elaboración Propia)	58
Tabla 3: Generación eléctrica a partir de fuentes térmicas de Andalucía (REE, 2020).....	62
Tabla 4: Inversión inicial (Elaboración Propia)	66
Tabla 5: OPEX 1(Elaboración Propia).....	67
Tabla 6: OPEX 2(Elaboración Propia).....	68
Tabla 7: OPEX 3 (Elaboración Propia).....	69
Tabla 8: OPEX 4 (Elaboración Propia).....	70
Tabla 9: Costes por tonelada de operar la planta de gasificación por plasma (Elaboración Propia)	71
Tabla 10: Flujos de caja (Elaboración Propia)	73
Tabla 11: Extracto del flujo de cajas(Elaboración propia).....	75

1. Introducción

Las ciudades españolas están experimentando un crecimiento en el número de habitantes debido a la despoblación de los pueblos y la inmigración, con el consiguiente aumento de los residuos sólidos urbanos (RSU). A su vez, en España se generan residuos forestales en las diferentes sierras y montes del país, y existe una proliferación de industrias agrícolas, de las que derivan abundantes residuos orgánicos que no son aprovechados. Como dato, una persona media de España genera unos 470 kg de RSU al año, lo que equivale a 22 millones de toneladas producidas solamente por los ciudadanos españoles cada año. Pese al gran potencial energético que tienen estos residuos orgánicos, en su mayoría no están siendo aprovechados actualmente, por lo que es una opción inteligente tratarlos para contribuir así a solucionar dos cuestiones importantes; el tratamiento de los residuos biomásicos y la generación de energía sostenible a partir de una fuente renovable.

Analizando en mayor profundidad el tratamiento de residuos, estos son recogidos en su origen hasta los vertederos controlados, en las cuales pueden tratarlos mediante varias técnicas. Los residuos casi nunca son reciclados, mientras que en general son incinerados o llevados a un vertedero controlado. Estos últimos suponen el 56% de los residuos recogidos en España. El proceso comienza clasificando los residuos para después depositarlos por capas en un espacio amplio y diseñado para evitar filtraciones, uno de los principales riesgos de esta técnica de procesado, pues puede llegar a contaminar los subsuelos y acuíferos que se hallen cercanos al vertedero. Los residuos fermentan durante un tiempo, generando biogás, el cual podrá ser utilizado en parte como combustible o directamente será quemado. Finalmente, estos vertederos terminan su ciclo de vida tras unos 25 años de uso, sellándose y necesitando un control continuo para verificar que no se han producido filtraciones.

Para aprovechar la cantidad de residuos orgánicos que se almacenan y eliminar la gran mayoría de vertederos controlados, que solo podrán tratar como máximo el 10% de los residuos recogidos, tal y como está estipulado en la agenda 2030, se plantea tratarlos mediante la técnica de gasificación por plasma. Este método de tratamiento de residuos desintegra las moléculas orgánicas que los conforman y libera el hidrógeno que en ellas se encuentra, gas que podrá ser recogido para utilizarse como fuente de energía, y por otra parte libera el carbono que reacciona con el oxígeno en forma de CO₂, resultando en un proceso limpio y con un balance energético positivo, ideal para los objetivos de sostenibilidad impuestos para 2030.

Por otra parte, cabe presentar una visión general de la energía utilizada en España, analizando su fuente de origen y la procedencia. Para ello, se facilita la tabla 1:

Tipo de generación	Generación (GWh)	Generación (%)
Nuclear	55.756,8	22,20%
Eólica	54.878,7	21,85%
Ciclo combinado	44.023,8	17,53%
Hidráulica	30.548,7	12,16%
Solar fotovoltaica	15.261,7	6,08%
Carbón	5.022,0	2,00%
Generación total	251.159,5	100%

Tabla 1: Generación eléctrica en España. Fuente: Foro Nuclear con datos REE a 19.03.21 y IEA (Pérdidas en T y D)

Analizando los datos presentados en la tabla, puede observarse que la energía nuclear es la fuente de energía con mayor peso en la generación del país, seguida de cerca por la eólica. En cuanto al conjunto de principales fuentes renovables, reflejadas en la tabla (eólica, hidráulica y solar fotovoltaica), se aprecia que suponen un 40,09% de la generación eléctrica del país. Estas fuentes de energía renovables tienen un inconveniente principal, la imposibilidad de gestionar en todo momento la generación, es decir, al depender de factores climáticos que no pueden ser controlados ni predichos con exactitud, la generación se ve condicionada a unas condiciones específicas que no se pueden alterar a voluntad y por ello el sistema no se puede sustentar únicamente con estas fuentes, dada la variabilidad de este. Por otro lado, la biomasa se encuentra disponible y se puede aumentar o disminuir su procesamiento según interese, lo que la hace una alternativa renovable y a la vez perfectamente controlable.

En cuanto a las fuentes no renovables, cabe destacar el 5% de energía eléctrica que se produce con carbón. En España, el carbón que se obtiene contiene niveles especialmente elevados de azufre (entorno al 4% - 8%), en comparación con otras zonas del mundo que, por ello, lo pueden utilizar en mayor medida. Sin embargo, existe la posibilidad de tratar los gases emanados de este proceso para que no pasen los contaminantes a la atmósfera, pero las plantas españolas no lo llevan a cabo, resultando en una fuente importante de contaminación.

Además, cabe destacar la procedencia del gas que se utiliza en España, pues el 99,7% es importado, suponiendo una dependencia muy elevada a factores externos que pueden provocar el mal funcionamiento del sistema, ya sea por la falta de suministro o el encarecimiento del precio, el cual de hecho es un problema actual que puede derivar en problemas económicos y de competencia a nivel mundial, cuando cada vez más se avanza hacia un mundo más globalizado. Esta situación pretende ser aliviada por la introducción del hidrógeno como fuente de energía renovable, fácil de almacenar y sostenible.

Para ello y con el fin de realizar un proyecto concreto de la implantación de una planta de tratamiento de residuos biomásicos por gasificación de plasma para la generación de hidrógeno, este estudio se centra en la provincia de Cádiz, concretamente en Algeciras. Se estudiará la generación de RSU de la ciudad andaluza, así como de otros núcleos urbanos cercanos, y se analizará las diferentes fuentes de biomasa que existen y alimentarán la planta de tratamiento, provenientes de sierras y montes de la provincia de Cádiz.

Por último, como novedad del proyecto, está la introducción del gas de síntesis en sustitución del gas natural en una central de ciclo combinado. Como se explicará en el trabajo, se escogerá Algeciras por la cercanía de una gran fuente de residuos urbanos y forestales, y por la presencia de una central de ciclo combinado, la CCC Bahía de Algeciras, de forma que se pueda aliviar el impacto ambiental que tiene la utilización de combustibles fósiles como el gas natural, a la par que se obtiene energía eléctrica gestionable y de forma autónoma.

1.1. Motivación

Reemplazar los vertederos controlados por otro método menos contaminante. Los vertederos controlados tienen ciertos problemas. Son espacios de gran tamaño, pero limitados, y una vez son llenados por completo, los residuos se sellan y se comienza a utilizar un nuevo vertedero. Esta práctica no es sostenible en el largo plazo, debiendo ser sustituida por alguna otra tecnología que sí pueda mantenerse en el tiempo. Además, estos residuos podrían llegar a contaminar acuíferos si falla la estructura en la que se guardan, con el consiguiente desastre medioambiental, por todo lo cual se ha propuesto reducir su uso hasta un tratamiento del 10% de los residuos como máximo en la agenda 2030. En su lugar, este estudio propone aprovechar los residuos que estaban siendo acumulados en los vertederos para generar hidrógeno de una forma sostenible y que elimina completamente los residuos.

Conseguir una fuente renovable que sea gestionable, que no dependa de las inclemencias del tiempo como las actuales, para poder reemplazar el máximo de fuentes no renovables y su carácter contaminante, que son necesarias en el sistema energético por su capacidad inmediata en cualquier momento de disponer de la energía. El hidrógeno se posiciona como la unión entre la sostenibilidad de las fuentes renovables y la posibilidad de almacenar la energía de forma sencilla y gestionable de las no renovables.

Evitar incendios forestales. En España, la industria agrícola en crecimiento y los abundantes bosques y sierras repletas de vegetación son una fuente de biomasa muy importante. Estos residuos permanecen en estos lugares y suponen un peligro para el ecosistema, pues la materia seca es muy inflamable y junto con las temperaturas que se

alcanzan en verano en todo el país se traduce en incendios forestales de gran envergadura, los cuales suceden cada año y llegan a ser causa de muerte de bomberos que intentan extinguir las llamas y en ocasiones incluso civiles. Concretamente, en Andalucía han vivido los últimos años incendios muy importantes y que han causado destrozos en cientos de hectáreas de terreno y causado víctimas mortales. Con el nuevo tratamiento de esos residuos biomásicos por plasma, la rentabilidad de recoger los residuos orgánicos para generar hidrógeno incentivaría su recogida y conllevaría un avance en el cuidado y protección de los bosques y montes de España.

Reemplazar al carbón, puesto que es una fuente de energía cuya combustión libera contaminantes como el azufre (el carbón español contiene entre 4% - 8%), realmente perjudicial para los humanos cuando se encuentra en el aire, y que puede causar episodios naturales como la lluvia ácida. La utilización del hidrógeno eliminaría el problema de la contaminación atmosférica del carbón, pues es un gas inerte e inocuo.

Reducir el precio del gas, puesto que el hidrógeno puede introducirse en el sistema de gas natural de las centrales de ciclo combinados, reduciendo la demanda de este y, por lo tanto, reduciendo la dependencia económica de nuestro país con los productores de gas natural.

1.2 Objetivos del proyecto

Estudiar la implementación del método de gasificación por plasma y sus ventajas e inconvenientes en el tratamiento de residuos

Se analizarán las diferentes opciones que tiene Algeciras a la hora de aprovechar los residuos orgánicos como fuente energética y sustituir a los vertederos controlados, razonando por qué se ha optado por la gasificación por plasma y qué tecnología de gasificación es la más conveniente para la planta. Se estudiará la viabilidad económica de la planta.

Conocer el estado del sistema de tratamiento de residuos actuales en Algeciras

Se efectuará un análisis de las plantas de tratamiento de residuos de la ciudad de Algeciras, para conocer si existen plantas suficientes y el estado de estas, si son recientes o necesitan una renovación, y los tipos de contratos que se establecen con el gobierno de la región. A su vez, se evaluará la biomasa disponible (residuos sólidos urbanos, agrícolas y forestales), así como la forma de distribuirla hasta la planta de tratamiento de residuos, estimando la producción de hidrógeno que puede alcanzarse.

Proponer la sustitución de gas natural por hidrógeno en las centrales de ciclo combinado

Plantear la integración del hidrógeno para la cogeneración en la central de ciclo combinado de Cádiz, en la bahía de Algeciras. Se analizará cómo almacenar el hidrógeno generado del tratamiento de biomasa mediante gasificación por plasma, y de qué manera implantarlo en la central de CC, reduciendo así el uso del gas natural importado, y de esta forma reducir la dependencia de otros países.

Analizar el sistema energético español y las posibilidades que ofrece el hidrógeno para sustituir fuentes de energía no renovables

Se busca conocer qué fuentes de energías podrían ser sustituidas y en qué medida por el hidrógeno, para conseguir un sistema más sostenible y reducir las fuentes de energía no renovables y la contaminación que se deriva de ellas. Para ello se analizará el sistema energético actual y la influencia de introducir en él hidrógeno, tanto desde el punto de vista económico como ecológico. A su vez, se planteará en qué sectores podrá introducirse el hidrógeno producido en la planta, estudiando la demanda de este por las diferentes industrias y analizando las proyecciones de demanda a medio-largo plazo.

1.3 ESTADO DEL ARTE

La técnica de gasificación por plasma para tratar residuos ha sido implementada en Japón principalmente, ya que debido a sus limitaciones de espacio necesitaron desarrollar tecnologías que utilizaran poco espacio y eliminaran el máximo volumen de residuos.

Existen varias plantas de gasificación por plasma, algunas en activo desde los 2000, todas ellas ubicadas en Asia. El único acercamiento a esta tecnología con éxito fuera de un país asiático ha sido su implantación en un barco de la armada de EEUU, el US Gerald R. Ford, botado en 2013.

1.3.1 Proyectos realizados

Wuhan, China (Construido por Alter NRG)

Una de las más recientes construcciones de plantas de tratamiento de residuos por gasificación por plasma es la de Wuhan. Su inauguración en enero de 2013 fue el inicio de un proyecto de demostración de esta tecnología, el cual trataría 100 toneladas al día de residuos biomásicos, convirtiéndolos en syngas que se aprovecharía luego para generar diésel y otros biocombustibles para su uso en el transporte.



Figura 1: Planta de gasificación por plasma de Wuhan

Tainan City, Taiwan (PEAT International)

PEAT International construyó en 2005 en la National Cheng Kung University una pequeña planta de gasificación por plasma que puede tratar entre 3 y 5 toneladas de residuos al día. Se utiliza para deshacerse de todo tipo de residuos, desde médicos baterías y piezas de metales pesados. Esta planta carece de sistemas de recuperación de energía.

Mihama-Mikata, Japan (Hitachi Metals Ltd.)

La planta de Mihama-Mikata existe gracias a un proyecto piloto que vio la luz en el 2000, con un volumen tratado de residuos previsto de 151 toneladas al día. La planta, construida en Yoshii por Hitachi Metals Ltd., en colaboración con Westinghouse Plasma, fue desmantelada en 2004, tras completar su periodo de prueba.

En 2002, tras haber experimentado en la ciudad de Yoshii, se puso en marcha la planta de gasificación por plasma en las ciudades gemelas de Mihama y Mikata. Esta tiene la capacidad de trata 28 toneladas de residuos y el syngas obtenido es empleado para generar calor, el cual se utiliza posteriormente para secar los lodos residuales de la entrada. Además, el vitrificado que se obtiene a partir de la materia inorgánica que contienen los residuos se utiliza para la construcción, integrándola en hormigón o adoquines.



Figura 2 Planta de Mihama-Mikata, Japón (Tecnología de Gasificación Por Plasma de Westinghouse, 2015)

1.3.2 Proyectos en construcción

CC con Hidrógeno, Amorebieta

En cuanto a los ciclos combinados que utilizan hidrógeno para generar parte de la energía, en Amorebieta, España, se encuentra un proyecto muy avanzado que pretende estar listo para 2023. En este proyecto, se aprovecharán unas instalaciones cercanas a una planta existente de ciclo combinado para construir una central generadora de hidrógeno verde de 20MW, el cual después será implementado en la red de distribución de gas natural de Amorebieta, supliendo así a la central de ciclo combinado. (Sener, 2022).

Para la generación eléctrica se dedicará el 30% del hidrógeno generado, lo que se estima suponga el 4% de la electricidad anual generada en la planta. El hidrógeno restante cubrirá las necesidades del transporte e industria local o será exportado.

Southern California

La compañía SGH2 Energy planea comenzar a operar para verano de 2023 una nueva planta de gasificación por plasma que suplirá la demanda de hidrógeno verde de dos de los mayores operadores de estaciones de servicio de hidrógeno de California por un periodo de diez años (Recharge News, nd).

El proyecto está financiado en parte por el gobierno de California y el resto por SGH2, y tendrá una capacidad de producir 11 toneladas diarias de hidrógeno a pleno rendimiento. El hidrógeno se comprimirá en 11 camiones cisterna cada 24 horas para su

distribución en el sur de California, y el gas proporcionará suficiente combustible para 2.000 coches o 250 autobuses o camiones pesados al día.

2. SISTEMAS DE VALORACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS EN ESPAÑA

Los sistemas de valoración energética son aquellos procesos que transforman los residuos para ser aprovechados de forma más eficiente, minimizando su volumen para ocupar el mínimo espacio y, por otro lado, aprovechando el potencial energético de sus componentes para generar energía, ya sea produciendo vapor, electricidad o la combustión de gases como el biogás o el syngas. Parte de la energía se dedicará para la demanda de la planta y el resto se comercializará. Por ejemplo, según datos del grupo Torsa, que gestiona la planta de valoración energética del distrito de Barcelona y alrededores, un 12% de la electricidad generada en su planta se utiliza para el autoconsumo, y un 88% se vende a la red eléctrica.

2.1 SISTEMAS DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA

A continuación, se describirán los procesos de valoración energética más extendidos:

2.1.1 Vertedero controlado:

Se trata del sistema más utilizado en España, llegando a tratar el 60% de los residuos del país.

Los vertederos controlados son instalaciones de gran tamaño que almacenan los residuos de forma indefinida, pudiendo encontrarse en la superficie o subterráneos. Los residuos son llevados a la planta y almacenados en un agujero debidamente impermeabilizado, donde se compactan por capas que cada día son cubiertas con una delgada capa de tierra para evitar la proliferación de roedores y malos olores, además de disminuir el riesgo de incendios.

En los vertederos controlados se instalan sofisticados sistemas de drenaje para los líquidos que rezuman los residuos, llamados lixiviados, y para los gases que emanan como el metano. El líquido es principalmente agua, y debe ser tratada en plantas depuradoras previamente a ser vertidas al mar o ríos. La percolación de los lixiviados es uno de los mayores riesgos de este tipo de vertederos, pues puede contaminar aguas subterráneas o el suelo de forma que suponga un peligro para la vida de los ecosistemas y la sanidad pública. Por otra parte, el gas es recolectado y se dedica a suplir parcial o

totalmente la demanda energética de la planta, e incluso en caso de excedente venderse a la red de energía general.

La vida útil de estos vertederos es limitada, y cuando llegan al máximo de su capacidad, deben ser sellados, de forma que se integre lo máximo posible con el paisaje, y controlados durante un periodo de tiempo que estipula la entidad gubernamental competente, pero nunca es menos de 30 años. Esto es para controlar que no entren personas al recinto y evitar accidentes, además de prevenir o notificar cuanto antes fugas de lixiviados y su consiguiente amenaza al medio, además de acumulaciones de metano que pueden provocar peligrosas explosiones.

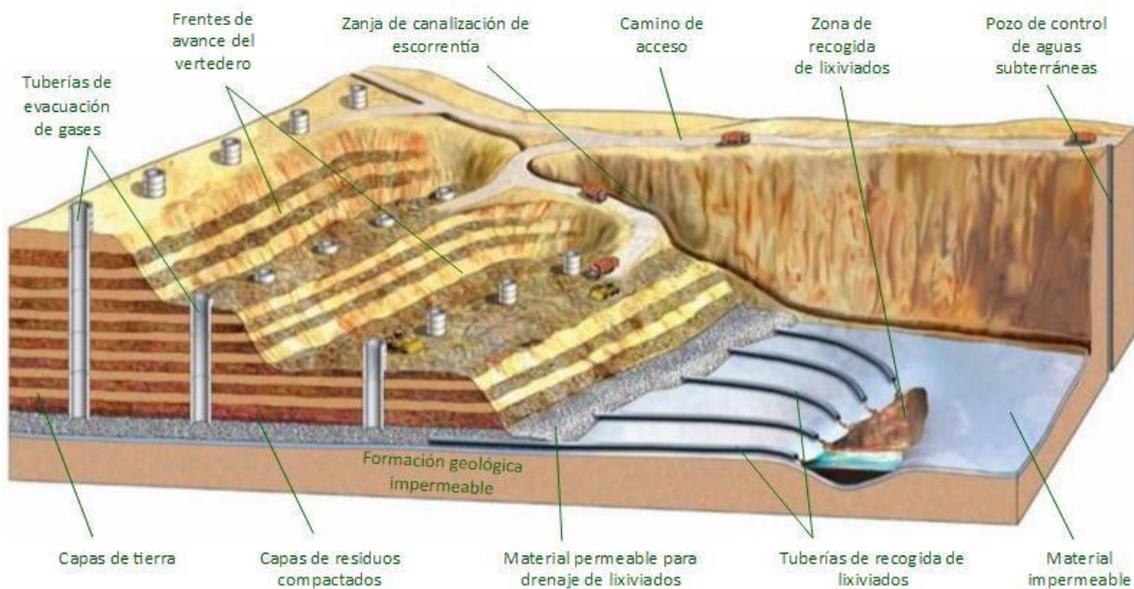


Figura 3: Vertedero controlado (A. Ruiz, n,d)

El Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. Su objetivo es “garantizar una reducción progresiva de los residuos depositados en vertedero, especialmente de aquellos que son aptos para su preparación para la reutilización, reciclado y valorización”, estableciendo “medidas y procedimientos para prevenir, reducir e impedir, tanto como sea posible, los efectos negativos en el medio ambiente relacionados con el vertido de residuos, en particular, la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, del suelo y del aire, y la emisión de gases de efecto invernadero, así como cualquier riesgo derivado para la salud de las personas”. Su fin último es avanzar hacia una economía circular y cumplir con los requisitos de eliminación de residuos establecidos.

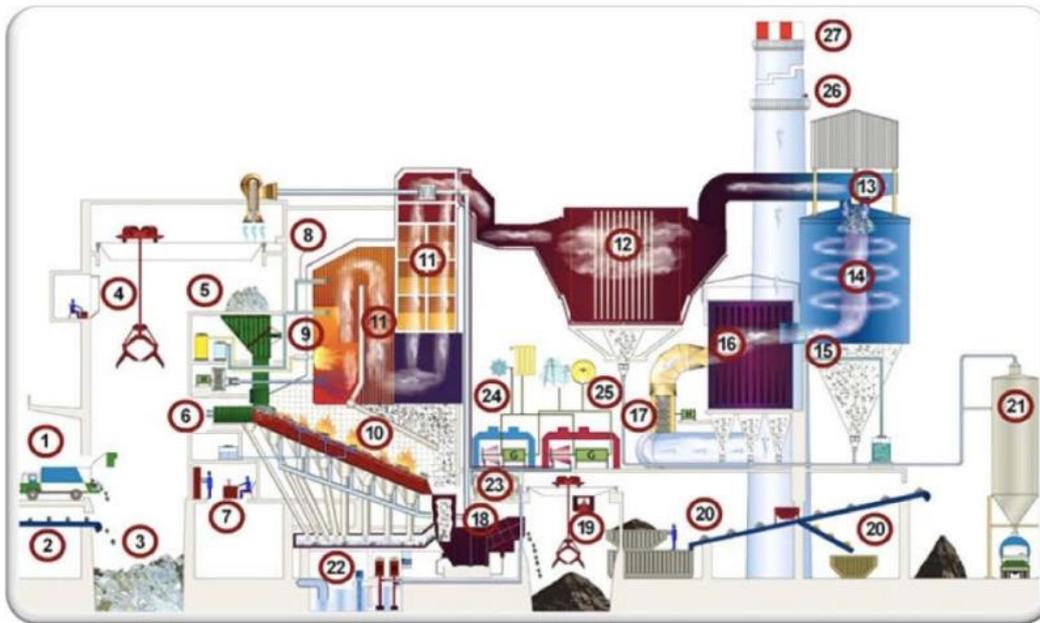
Es una técnica de tratamiento de residuos que puede aprovechar el metano que emanan los residuos orgánicos para usarlo como energía, su combustión en motogeneradores o en turbinas de gas, generando electricidad. Entre estas dos formas de aprovechar los

gases emanados, la más sencilla para verter la energía generada a la red es la utilización de motogeneradores, y además pueden incluir sistemas de aprovechamiento térmico. No obstante, requiere un nivel de metano mayor del 40%, y el rendimiento eléctrico que se consigue es relativamente bajo, de entorno a un 44%, pudiendo generar 2000kW en motores diseñados específicamente para este combustible. Por otra parte, las turbinas admiten concentraciones de metano menores (menor del 35%), a la vez que su coste de mantenimiento es menor y la potencia que se puede generar es mayor. Sin embargo, su rendimiento es incluso menor que el de los motogeneradores, de entorno al 38%.

Por todo lo comentado, los vertederos controlados están siendo eliminados por su riesgo medioambiental y su falta de sostenibilidad, lo cual se aleja de los O.D.S. Además, no son lo suficientemente eficientes como para justificar su uso. Por todo ello, no será la técnica elegida en el proyecto.

2.1.2 Incineración:

La incineración es un método de tratamiento de residuos utilizado especialmente en grandes poblaciones con alta densidad de población desde hace varias décadas, siendo un complemento de los vertederos controlados. En España, tratan anualmente 2,55 millones de toneladas de residuos con esta técnica, en plantas como la de Sant Adrià de Besòs, en Barcelona, la cual presenta el siguiente esquema, donde se pueden ver las diferentes partes de una planta de revalorización energética que utiliza una incineradora para tratar los residuos:



- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Zona plataforma de descàrrega | 2. Traspàs de rebuig del Ecoparc 3 |
| 3. Fossar d'escombraries | 4. Zona grues escombraries |
| 5. Tova d'alimentació | 6. Empenyedor d'escombraries a graelles |
| 7. Sala de Control i comandament | 8. Injectors d'urea a la cambra combustió |
| 9. Cremadors a gas natural | 10. Graelles de combustió |
| 11. Zona de forn - caldera | 12. DENOx catalític |
| 13. Atomitzador de dissolució de calç | 14. Absorbidor de gasos àcids |
| 15. Injecció de carbó actiu | 16. Filtre de mànigues |
| 17. Ventilador de tir | 18. Canals de cendres i escòries |
| 19. Evacuació de escòries | 20. Separació de terres |
| 21. Receptor de les cendres volants | 22. Aigua de mar per a refrigeració |
| 23. Condensadors | 24. Turbina KKK |
| 25. Turbina Alstom | 26. Control de les emissions atmosfèriques |
| 27. Xemeneia | |

Figura 4 Planta de revalorización energética incineradora del grupo TERSA en Barcelona

La incineración reduce el volumen de los residuos entre un 75-90%, a la vez que resulta un sistema de tratamiento muy interesante por su facilidad de aprovechar el calor del proceso para generar energía, calentando agua que se convierte en vapor de agua y mueve unas turbinas para generar electricidad. Para evitar la formación de dioxinas y furanos se debe trabajar por encima de los 850°C durante al menos 2 segundos, y además se necesita que la temperatura sea la misma en toda la vasija donde se combustionan los residuos. Estas sustancias se generan a temperaturas entre 200°C y 400°C, por lo que al enfriarse las cenizas deben de hacerlo rápidamente para no permitir su formación. A pesar de estas medidas para evitar la formación de estas sustancias tóxicas, se pueden formar en una concentración mayor a 0,1 ng/Nm³ (límite de la concentración admitida de dioxinas y furanos), por lo que, ecológicamente, la incineración puede tener desventajas importantes que necesitan de sistemas y controles concienzudos para ser sostenible con el medio.

2.1.3 Pirólisis:

La pirólisis se define como un proceso termoquímico en el que el material orgánico se descompone por la acción del calor y una serie compleja de reacciones químicas, en una atmósfera en ausencia de oxígeno. Como resultado queda una mezcla líquida de hidrocarburos, gases combustibles y agua. Los gases pueden utilizarse como fuente de energía para generar electricidad o directamente para accionar motores diésel, además de dirigirse en parte al propio funcionamiento del proceso. A continuación, se puede observar el esquema del proceso de pirólisis de biomasa:

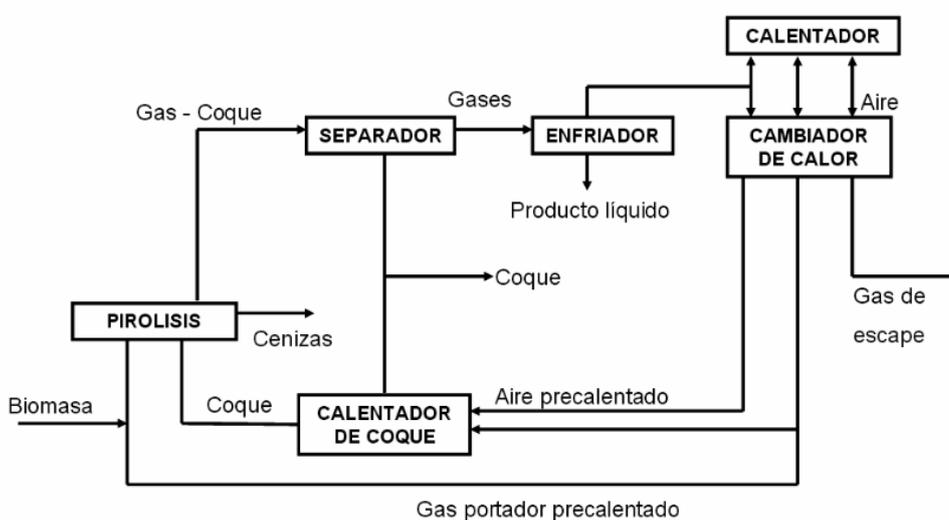


Figura 5 Esquema del proceso de pirólisis de biomasa (Agro Waste, n.d)

La pirólisis es una tecnología con poco recorrido en el tratamiento de residuos, y se ha llevado a cabo con éxito sobretodo en plantas alimentadas de forma homogénea con neumáticos, madera o residuos plásticos. Frente a la gasificación por plasma, dado su poco recorrido en el sector y la necesidad de tratar previamente los subproductos para su aprovechamiento energético, lo cual elevaría el coste, se descarta la pirólisis como método adecuado para la planta que se estudia en este trabajo.

2.1.4 Digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia consiste en la descomposición de la materia orgánica por la acción de unas bacterias específicas en ausencia de oxígeno, derivando en biogás que, tras un filtrado y depurado, se utiliza como biocombustible dado su alto contenido en metano (entre 50-70%), y el llamado digestato, que está compuesto por diferentes minerales (N, P, Ca, K, etc.), el cual puede utilizarse como fertilizante.

La digestión anaerobia se puede llevar a cabo bajo las premisas de que los residuos sean líquidos, contengan material fermentable, y tengan una composición y concentración relativamente estable (IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007). Por ello, y teniendo en cuenta que los subproductos que se forman en el proceso deben ser tratados y eliminados, esta tecnología se descarta para la planta en estudio.

2.1.5 Gasificación

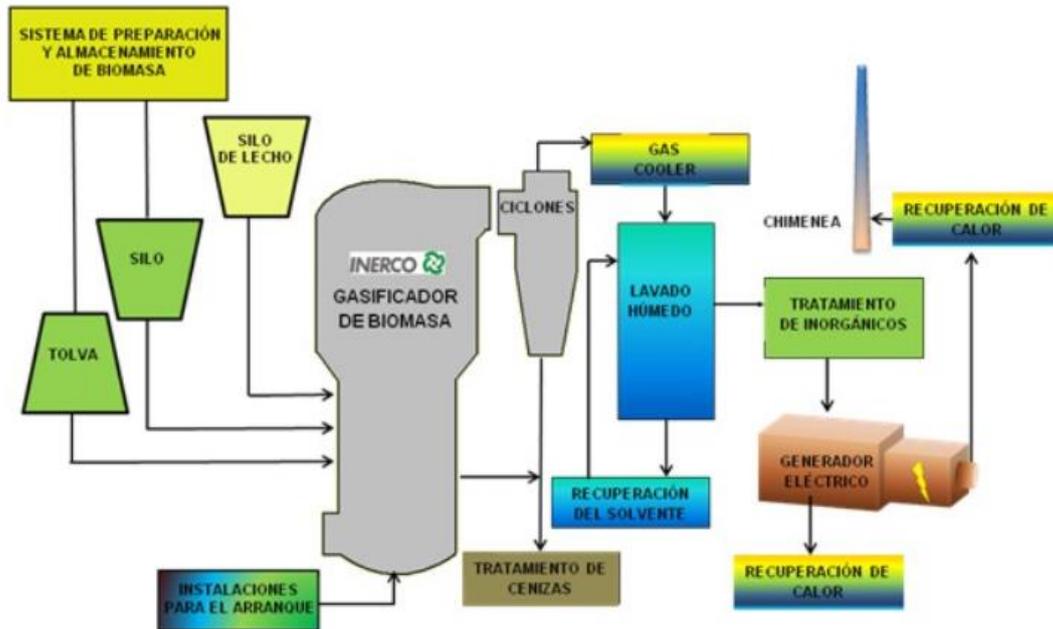


Figura 6 Esquema de planta de gasificación (INERCO, 2007)

La gasificación de biomasa es un proceso que se basa en un conjunto de reacciones termoquímicas que, en ausencia de oxígeno, transforman materia sólida en una mezcla de gases, llamado gas de síntesis o “syngas”, que puede ser dedicado al accionamiento de motores o turbinas, tras ser debidamente acondicionados. El proceso de gasificación tiene un rendimiento que varía dependiendo de la tecnología utilizada, y el combustible y los agentes gasificantes empleados, en el rango de 70-80%. El rendimiento energético es menor que el de los combustibles fósiles, y para conseguir aprovechar energéticamente los residuos deben pasar antes un acondicionamiento previo.

En el proceso de gasificación, la materia orgánica se transforma en hidrocarburos más simples, incluso en monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂). Estas moléculas conforman el llamado gas de síntesis, con un poder calorífico inferior (PCI) equivalente a la sexta parte del PCI del gas natural, cuando se aplica aire como agente gasificante. Este agente lo conforma un gas, o mezcla de ellos, que aporta calor para comenzar las reacciones, además de oxígeno. (IDAE, 2007).

La gasificación tiene ciertas limitaciones para su correcto funcionamiento. La biomasa tratada debe tener un tamaño determinado y homogéneo, recomendable un tamaño de partícula entre 80 y 300 mm, 2-3 mm como mínimo, porque de ser menores podrían hacer que se atasquen los conductos o ser arrastradas junto con las cenizas volantes fuera del reactor antes de tiempo. Por otra parte, cuanto menor sean las partículas, mayor calidad tendrá el syngas, a la vez que se puede utilizar un reactor de menor tamaño o aumentar el tiempo de permanencia para craquear las sustancias como alquitranes, subproductos del proceso. Además, la densidad de la biomasa debe ser de 200-250 kg/m³ como mínimo, para poder manejar correctamente la biomasa por los conductos verticales. En cuanto a su composición química, se debe evitar el exceso de humedad (10-15% los valores más adecuados), que la materia tenga un alto PCI, que la presencia de carbono sea suficiente para que se den las reacciones del proceso y evitar las sustancias peligrosas.

El gas de síntesis puede sustituir a combustibles ligeros de origen fósil, o electricidad, remarcando los altos rendimientos eléctricos que la gasificación consigue a partir de biomasa de hasta un 30-32%, mediante el uso de moto-generadores accionados por syngas, mientras que implantando un ciclo Rankine convencional, el rendimiento eléctrico ronda el 22%. Es interesante también su introducción en redes de gas natural, para lo que se necesita separar previamente el CO₂ y el O₂ residual).

En cuanto a los subproductos derivados de esta técnica, cabe destacar que no se generan sustancias que contribuyan al efecto invernadero ni compuestos de N ni S que puedan contaminar la atmósfera. Lo que sí se genera en este proceso es alquitrán, sustancia peligrosa por ser cancerígena y puede obstruir los pulmones de ser inhalado, por lo que se debe encontrar en una cámara sellada para evitar la salida de gases sin tratar.

2.1.6 Gasificación por plasma

El método de gasificación por plasma trata térmicamente los residuos a una temperatura tal que desintegra la materia en sus partículas elementales (5000°C), transformando la materia orgánica en un gas formado por compuestos de C y O, e hidrógeno, y depositando un vitrificado conformado por la materia inorgánica. Es un método que permite el tratamiento de prácticamente cualquier residuo y sin necesidad de hacer distinción entre ellos o procesos específicos, lo cual es interesante para este proyecto que pretende recopilar residuos urbanos, forestales y agrícolas.

Es un sistema que no genera subproductos nocivos, como dioxinas o furanos, ya que a las temperaturas que se trabajan no pueden formarse, y el vitrificado obtenido es totalmente inerte. Además, el gas de síntesis generado se puede aprovechar para la obtención de energía y, por otra parte, el vitrificado se puede aplicar a la construcción como material de relleno y aislante.

Por todo ello, se concluye que es la mejor tecnología para enfocar el trabajo, ya que cumple con los objetivos de sostenibilidad y contaminación (el proceso más limpio de todos, no genera subproductos tóxicos de ningún tipo), trata cualquier tipo de residuo independientemente de su composición, y además se obtiene hidrógeno, un vector energético limpio que se prevé sea clave en el futuro energético cercano, y que puede incorporarse fácilmente a las centrales de ciclo combinado.

2.2 Hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo (en torno a un 70% de la materia). Consta de un único protón y un electrón, y se encuentra o en forma de molécula diatómica o formando compuestos químicos con otros elementos, en la mayor parte junto al oxígeno formando agua (3/4 partes de la superficie terrestre) o los hidrocarburos, elementos constituidos principalmente por el hidrógeno y el carbono. Es un gas incoloro, inhodoro e insípido

Hay tres isótopos de hidrógeno: el protio, constituido únicamente por un protón y un electrón, es el más abundante, suponiendo más del 99,985% del elemento natural; el deuterio, formado por un protón acompañado de un neutrón y el electrón, se encuentra en la naturaleza en un 0,015% aproximadamente, y el tritio, el cual consta de dos neutrones, el cual aparece en pequeñas cantidades en la naturaleza, pero puede ser obtenido artificialmente por procesos de reacciones nucleares.

El hidrógeno ha sido obtenido por diferentes métodos desde antes incluso de que Robert Boyle lo reconociera como un propio gas en 1671, lo cual consiguió disolviendo hierro en ácido clorhídrico diluido. Actualmente, se extrae del electrólisis del agua, y dependiendo de la fuente de energía que generó la electricidad utilizada, el hidrógeno obtenido se califica como limpio o no, como el caso del llamado hidrógeno verde que es aquel que procede de fuentes renovables.

2.3 El plasma:

El plasma es el denominado cuarto estado de la materia, aun siendo el estado en el que se encuentra el 99,9% de la materia en el universo, especialmente en las estrellas; en la Tierra aparece como auroras boreales o rayos. Alguna de sus características es la gran capacidad que presenta para conducir la electricidad y la luz, debido a que está constituido por el mismo número de cargas eléctricas libres, positivas y negativas.

Se trata de gas ionizado a alta temperatura (por encima de los 5000°C), que se crea cuando además existe la presencia de un campo magnético. Un electrón choca con un átomo neutro, liberando otro electrón, quedando el átomo en forma de ion. Este

proceso ocurre en forma de cascada pues los dos electrones chocarán cada uno con otro átomo y así sucesivamente. A esas temperaturas, se produce una disociación completa de la materia orgánica que se introduce en el plasma, liberando hidrógeno que podrá ser recogido para utilizar como energía.

2.4 Características diferenciales del proceso

La tecnología que se pretende utilizar es un sistema convertidor de plasma, que genera un intenso campo de energía radiante que produce la disociación molecular de la materia. Esto elimina de forma permanente los residuos introducidos en la vasija.

A las temperaturas que se encuentra el plasma, unos 5000°C, cualquier tipo de residuo orgánico se desintegra en sus partículas elementales, carbono e hidrógeno, resultando en lo que se denomina gas de síntesis, una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono en presencia minoritaria de otros componentes. Por otro lado, la materia inorgánica se transforma en un cristal de silicato o un vitrificado inerte. Los metales que se encontrasen entre los residuos orgánicos se recogen en forma fundida junto al material vitrificado, y en caso de encontrarse en una cantidad abundante podrán ser reutilizados. Todo el proceso es libre de cenizas o gases tóxicos como las dioxinas y furanos, que no se forman a tan alta temperatura, lo que supone una ventaja frente a otras técnicas de tratamiento térmico como la incineración.

2.5 Tecnologías de gasificación por plasma

Existen tres tecnologías para la implementación de un sistema convertidor de plasma: sistema de plasma tradicional, sistema de plasma mixto y sistema de plasma directo.

El sistema de plasma elegido para el proyecto es el sistema directo. Se ha aprovechado la información recopilada por Almudena Valenciano López en su trabajo de fin de carrera (A. Valenciano, 2015). *Estudio de una microrred inteligente en la ciudad de Huesca*, y con la ayuda de Materiales Renovados acerca del sistema directo, el cual se explicará detalladamente en el siguiente apartado.

3. GASIFICACIÓN POR PLASMA: SISTEMA DIRECTO

En este apartado se explica a fondo en qué consiste el sistema directo, así como las etapas y componentes de las que consta este sistema de gasificación por plasma y la planta de tratamiento completa.

3.1. Etapas del proceso de gasificación por plasma

En la siguiente imagen se encuentra un esquema de una planta de gasificación por plasma:



Figura 7 Etapas del proceso de gasificación por plasma (Almudena Valenciano, 2015)

a) Etapa 1: Alimentación

Esta etapa comienza con el sistema de alimentación, en el que se vierten los residuos al reactor, previamente a su gasificación. Sirve para controlar el flujo de residuos que llegan al reactor, pudiendo gestionar el proceso de la forma más óptima.

Aunque la gasificación por plasma puede tratar cualquier residuo sin necesidad de tratamientos previos, para que sea un proceso más eficiente se llevan a cabo ciertas operaciones:

- Reducción del tamaño de los residuos. Al hacer los residuos de menor tamaño, resultan más manejables y las antorchas desintegran el material de forma más sencilla, pues la superficie de contacto es mayor. El proceso busca una homogeneización del tamaño de las partículas, para que el proceso sea más eficiente.
- Separación. De nuevo, en esta etapa se persigue la uniformidad de los residuos, ya que, al introducir el mismo tipo de residuos, se obtiene un gas de síntesis con una composición más estable. Dependiendo del tipo de residuo pueden emplearse separadores balísticos, magnéticos u ópticos.

- Compactación. Con la etapa de compactación se busca aumentar la densidad de los residuos para así resulte más fácil el transporte y almacenamiento de los residuos. Se realiza con la técnica de peletización, en la que se forman pequeños rectángulos de poco volumen que pueden almacenarse fácilmente durante meses sin mayor inconveniente.
- Reducción de la humedad. Es una medida que mejora mucho el rendimiento del proceso de gasificación y aligera los residuos a la hora de ser almacenados, y además es un proceso que puede desarrollarse aprovechando la elevada temperatura a la que se extrae el gas de síntesis, reduciendo la humedad de un habitual 20% hasta un 5%.

Por otro lado, hay que considerar también el sistema de alimentación que introduce los gases necesarios para conseguir el estado de plasma:

- Oxígeno: Alimentar el reactor con oxígeno para crear el medio oxidante, necesario para la siguiente etapa, la disociación.
- Gas plasmógeno (aire): El gas que utilizan las antorchas de plasma.

b) Etapa 2: Disociación

La disociación se produce en la vasija de plasma y consiste en la ruptura de los enlaces de las moléculas que conforman los residuos. El plasma es generado mediante un arco eléctrico que eleva la temperatura hasta el punto en el que permita la disociación completa de la materia orgánica. El resultado es un gas de síntesis, al que se le dedicará un capítulo del trabajo para estudiarlo, y un vitrificado inerte.

El cebado del arco eléctrico ocurre por la diferencia de potencial entre los dos electrodos de la antorcha de plasma, conectada a corriente continua. En el proceso se pueden distinguir varias etapas en función de la temperatura que se alcanza:

A temperaturas inferiores, entre los 500°C y 1000°C, se produce la traslación y rotación de partículas, las cuales empiezan a vibrar a partir de los 2000°C. Al llegar a los 2750°C, ocurre la disociación de las partículas, que ionizan llegados los 5250°C, obteniéndose como resultado partículas e iones excitados que conforman el estado de plasma necesario para el proceso. La disociación tiene lugar entre los 2700 y 5000°C, por lo que se alcanzarán temperaturas entorno a los 5000°C para asegurar la disociación de la materia en la vasija.

En la figura siguiente, se aprecian claramente las diferentes transformaciones en función de la temperatura:

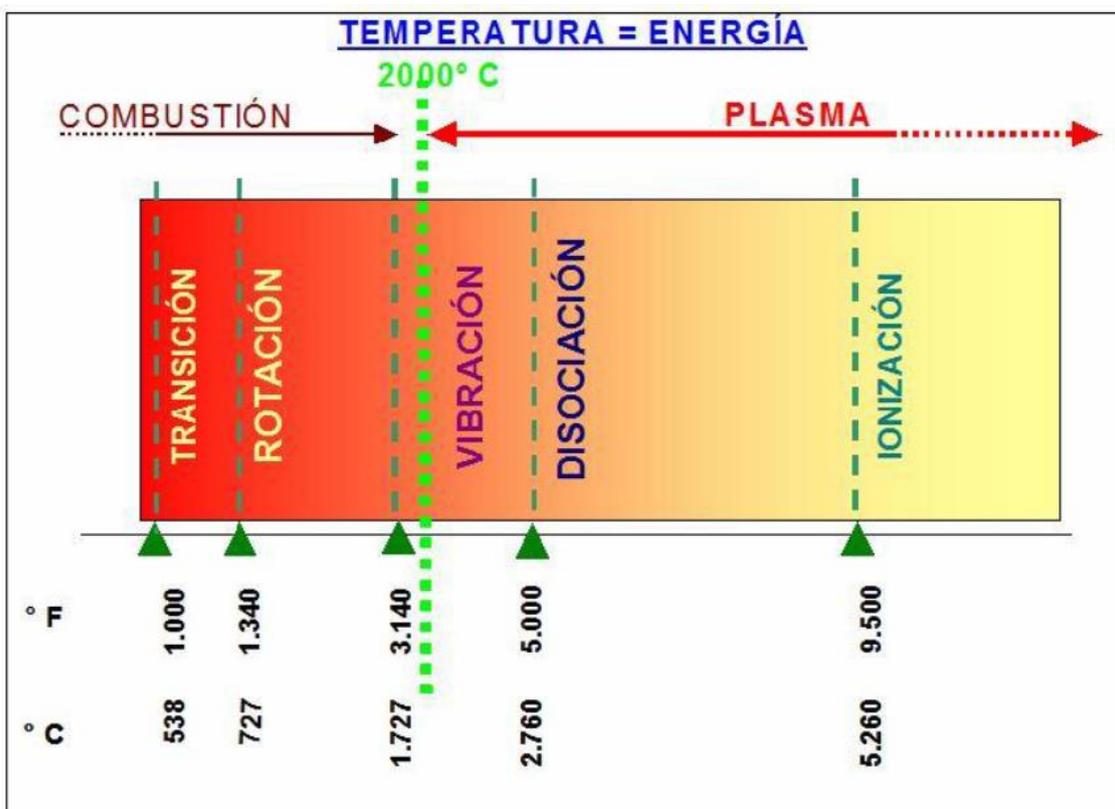
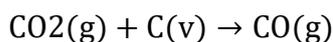
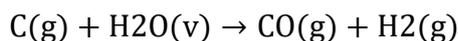


Figura 8: Rango de temperaturas y etapas del plasma (Acciona, n.d.)

Para que se dé la disociación, se deben alcanzar muy altas temperaturas y encontrarse en una atmósfera reductora. Los procesos térmicos que se producen en la vasija son los siguientes:

- Cracking térmico: Las moléculas más complejas se disocian en otras más simples, como hidrocarburos e hidrógeno.
- Oxidación parcial: Aumenta la formación de monóxido de carbono y genera como subproducto CO_2 y H_2O , que empobrecen el gas de síntesis, disminuyendo su poder calorífico. Por ello, se debe controlar la presencia de O_2 en el reactor para mantener la formación de ambos componentes en un rango razonable.
- Reformación: Los elementos obtenidos a partir de la disociación se combinan entre sí para dar lugar a otras moléculas, especialmente CO e H_2 , desarrollándose las siguientes reacciones químicas:



El fondo de la vasija termina cubierto por arena fundida, rica en silicio, la cual reacciona con el resto de materiales inorgánicos que se depositan en el fondo, generando un vitrificado inerte e inocuo, el cual no es ni tóxico ni lixiviable. Tras esta etapa, los residuos se han reducido en volumen, más de un 200%.

c) Etapa 3: Enfriamiento

Puesto que el gas de síntesis a la salida de la vasija se encuentra a unos 1000°C, debe ser enfriado para proteger los equipos del resto de la planta. Esta etapa es muy importante, ya que ese calor se utiliza para generar energía eléctrica mediante un ciclo Rankine y secar los residuos antes de entrar a la vasija.

d) Etapa 4: Filtrado de gases

Pese a que el gas de síntesis se conforma en mayor parte de hidrocarburos e hidrógeno, existen otros componentes que pueden estar presentes en el “syngas” en muy pequeñas concentraciones, pero que influyen en el rendimiento energético del gas, empeorándolo. Se utiliza usualmente un ciclón para ello, aunque existe una alternativa, los electrofiltros, más eficientes (99,99% en partículas menores a 10 µm), pero muchos más caros.

El sistema se ayuda de las diferencias de densidad entre las partículas sólidas y gaseosas de la corriente; los ciclones separan las partículas sólidas de las gaseosas cambiando la dirección del flujo del aire, actuando la fuerza centrífuga. Las partículas chocan con las paredes del ciclón y caen finalmente a una tolva por acción de la gravedad. El gas se escapa por la parte superior del ciclón, ya filtrado.

Este sistema tiene un rendimiento del 65-99%, el cual varía según el gas y las características del ciclón empleado. Los costes del proceso son bajos, tanto la inversión inicial como el mantenimiento. Sin embargo, solo es efectivo para partículas mayores a 10 µm.

e) Etapa 5: Neutralización

Tras pasar por el ciclón el gas aún presenta componentes halogenados que deben ser reducidos, para lo que se combina el “lavado de Scrubber” con el “quench”. El sistema de lavado somete a una ducha básica al gas de síntesis que neutraliza los halógenos, dejando como subproducto agua salada que se deposita al fondo del depósito. El gas, que contiene aún sulfuros, es ahora llevado a un filtro HEPA (High efficiency particle arresting), eliminando los compuestos de azufre gracias al carbón activo.

En el siguiente esquema, se muestra el proceso de forma visual:



Figura 9: Esquema del sistema de neutralización (Valenciano López, 2015)

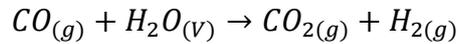
Finalmente, el gas de síntesis queda libre de compuestos halogenados y sulfuros, obteniéndose a la salida del proceso a una temperatura de unos 30°C y con la siguiente composición química:

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

Tabla 1: Composición gas de síntesis (Valenciano López, 2015)

Se puede apreciar en la tabla que la presencia de CO es aún muy elevada en comparación con la de hidrógeno, encontrándose además CO₂ que deberá ser capturado y eliminado. Para reducir los niveles de ambos gases, se llevan a cabo los siguientes procesos químicos:

- **Reacción shift:** Para aumentar la pureza del hidrógeno del gas de síntesis, se requiere eliminar el CO y CO₂. Para ello, el primer paso del proceso será convertir el CO a CO₂ mediante la reacción siguiente, utilizando un catalizador de hierro, de la cual también se obtiene más H₂:



- **Captura y secuestro de CO₂:** En esta etapa, se elimina el CO₂ del gas de síntesis, lo que se logra pasando el gas por un baño solvente de aminas.

Tras la aplicación de los procesos mostrados anteriormente, se consigue incrementar el porcentaje de hidrógeno del gas de síntesis hasta un 40-50%, a la vez que el CO₂ generado se ve drásticamente reducido.

3.1.1 Producción de hidrógeno

De esta forma, mediante la reacción shift, se obtiene la siguiente cantidad de hidrógeno:

$$\dot{m}_{H_2,shift} = \frac{\dot{m}_{CO}}{MM_{CO}} * MM_{H_2} = \frac{0,776 * 9714}{28} * 2 = 538,4 \frac{Kg}{h}$$

Además, inicialmente se obtuvo un 4,46% de H₂, lo cual equivale a:

$$\dot{m}_{H_2,inicial} = 0,046 * 9780 = 449,9 \text{ Kg/h}$$

Por lo que se obtienen 988,3 Kg/h de hidrógeno, de manera que, con la cantidad de residuos recogida, se tiene la siguiente ratio de hidrógeno generado por cada kg/hora de residuos:

$$\frac{\dot{m}_{H_2,Total}}{\dot{m}_{syngas}} = \frac{988,3}{9780} = 10,1\%$$

El rendimiento de producción de hidrógeno es del 10,1% del gasto másico de los residuos introducidos.

3.2. Sistemas y componentes de la planta de gasificación por plasma

3.2.1 Reactor y sistema de alimentación

a) Vasija

Es el lugar donde se dan las reacciones de disociación de materia orgánica, también llamado reactor, y está compuesta por dos elementos: una tapa de acero inoxidable y el cuerpo. Es muy importante que las dos partes se encuentren selladas completamente, para evitar fugas del gas de síntesis al introducir nuevos residuos en la vasija, lo que se consigue trabajando a presiones negativas. En cuanto a la salida de los productos obtenidos (“syngas” y vitrificado), pueden extraerse por una salida común para los dos, o una específica para cada uno.

A continuación, se muestra una imagen del esquema de una vasija, pudiendo observar parte del proceso de disociación, así como el rango de temperaturas que se alcanzan en la vasija:

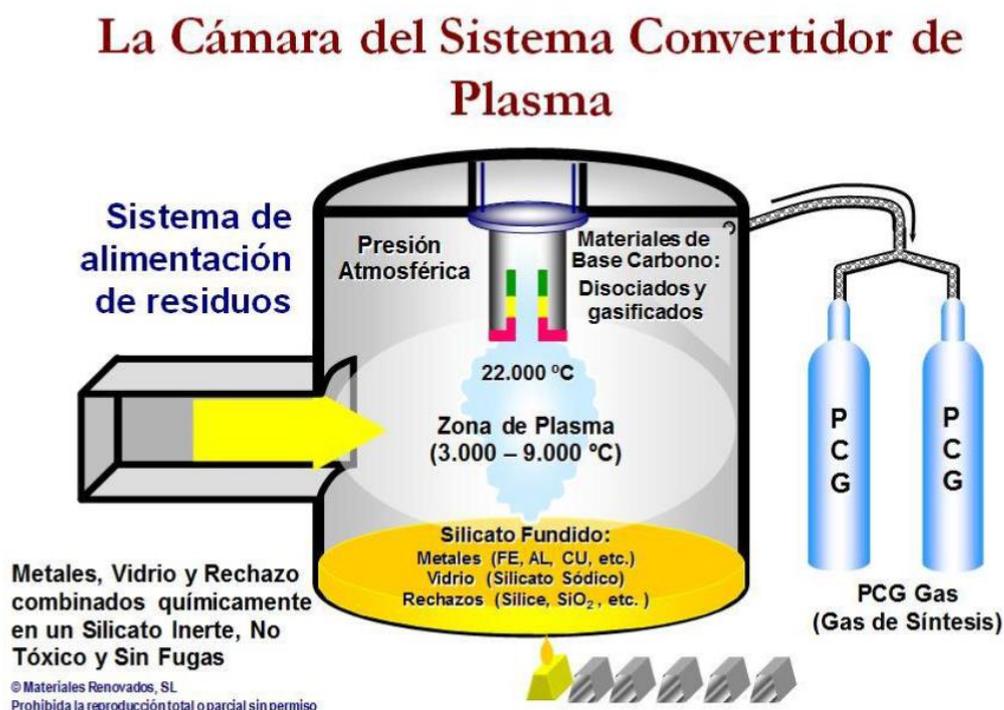


Figura 10: Esquema de la vasija del sistema de conversión de plasma (Valenciano López, 2015)

Se cubren las paredes del cuerpo del reactor con un material refractario aislante para protegerlo de las altas temperaturas que se alcanzan en su interior. A su vez, el aislante permite mantener la temperatura del interior de la vasija por encima de la temperatura de condensación de los gases ácidos, y de esta forma, impedir la aparición de compuestos tóxicos en el syngas.

En la siguiente figura, se muestra el perfil de temperaturas alcanzadas en el interior de la vasija:

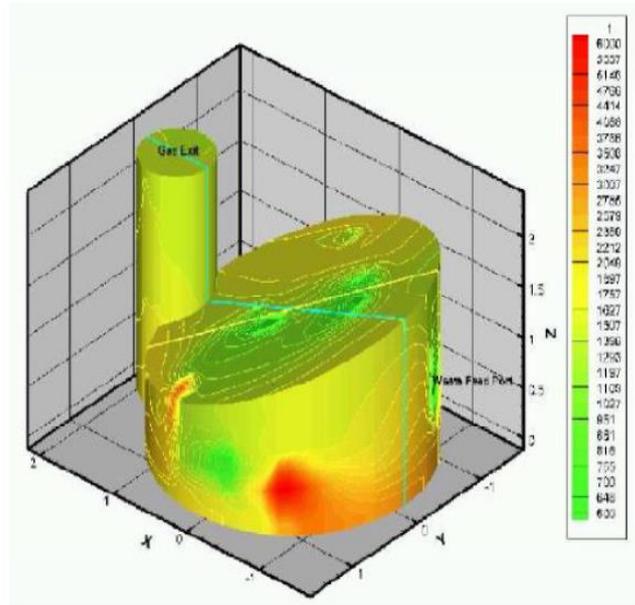


Figura 11: Perfil de temperaturas en el interior de la vasija (Valenciano López,2015)

La temperatura más elevada es de 6000°C y se alcanza en la punta de la antorcha. El resto de la vasija se encuentra mucho por debajo, cerca de los 1400°C.

b) Antorcha de plasma

La antorcha está conformada por un ánodo y un cátodo que se encargan de generar el arco eléctrico. Como se ha visto en el perfil de temperaturas, la temperatura máxima se alcanza en la antorcha, por lo que se necesita un sistema de refrigeración. Existen dos técnicas para resolver este problema:

- Antorcha transferida: Se utiliza cuando se requiere fundir materias sólidas o semisólidas (pastosas). En esta modalidad, se emplea un ánodo de sacrificio, que se reemplaza periódicamente, y un cátodo localizado al fondo de la vasija, generando un arco eléctrico. El calor se transmite por la vasija por radiación, convección y conducción.
- Antorcha no transferida: Permite tratar tanto sólidos como líquidos y gases. En el caso de la antorcha no transferida, tanto ánodo como cátodo se encuentran dentro de la antorcha y deben ser sustituidos periódicamente. Puesto que es la

única que puede tratar todo tipo de materiales en cualquier estado, lo cual es necesario para este proyecto, además de ser una tecnología más barata que la antorcha transferida, será la tecnología elegida para realizar el proyecto.

En la siguiente figura se muestran ambas tecnologías esquemáticamente, marcando sus elementos característicos:

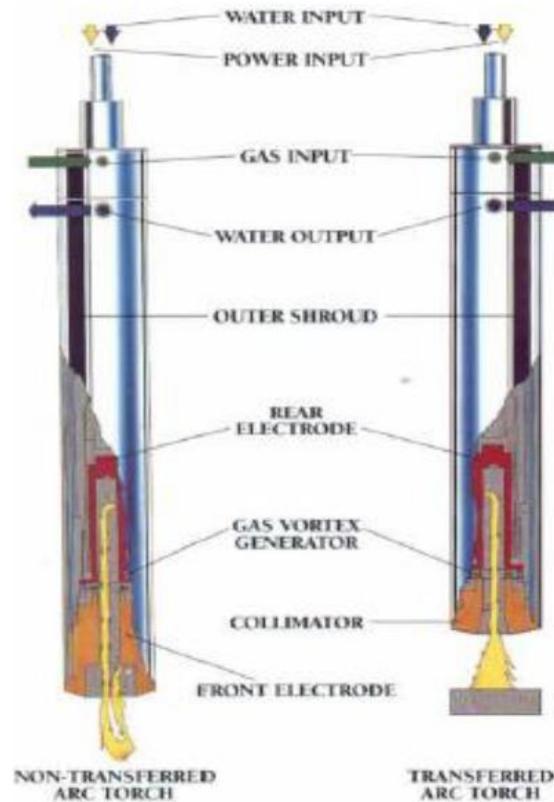


Figura 12: *Tecnologías de antorchas de plasma (Valenciano López, 2015)*

c) Generador de corriente eléctrica

Su función es alimentar eléctricamente a la antorcha de plasma, la cual requiere corriente continua.

d) Sistema de control del proceso

Este sistema se basa en un control lógico programable (PLC), que controlan en todo momento operadores de la planta en un puesto de control centralizado. Sus principales funciones son: la monitorización de la composición del gas a tiempo real, modificar en su caso el ritmo de alimentación de la vasija y su contenido, y controlar el sistema de corriente continua.

e) Refrigeración de la antorcha

Aunque los materiales de la antorcha están diseñados para aguantar temperaturas elevadas, es necesario un sistema de refrigeración, pues las temperaturas que se

alcanzan continuamente en el reactor son perjudiciales para la antorcha. También es necesario controlar la temperatura del electrodo. Para ello, se implementa un intercambiador de calor agua-agua, el cual transfiere el calor a su vez a un sistema secundario de agua desionizada, que contiene un intercambiador agua-aire.

f) Sistema de gas

EL sistema de gas es necesario para la generación del arco eléctrico, que introduce por la antorcha a una presión entre 6 y 7 bares lo que se conoce como gas plasmógeno (comúnmente aire al ser el más barato, pero se puede emplear O₂, N₂ o H₂). El sistema de control se encarga de regular la cantidad introducida.

g) Sistema de descarga del material vitrificado

Este sistema expulsa de la vasija el material vitrificado generado en el proceso de gasificación. La extracción puede realizarse de dos formas:

- Lateralmente, por inclinación. Es la forma usual de expulsarlos, ya que las cantidades generadas de vitrificado son pequeñas, por lo que es interesante realizar cargas discontinuas.
- Tornillo sinfín, una forma mecánica de extraer el vitrificado de forma continua.

Para el proyecto, se ha escogido el tornillo sinfín como método de extracción. De esta forma, se busca evitar la acumulación de escoria vitrificada a la salida de la vasija. Finalmente, la materia vitrificada será enfriada en un carro por agua, donde se dejará hasta que disminuya su temperatura y sea manejable.

3.2.2 Sistema de recuperación de calor (Ciclo Rankine)

Tal y como se ha explicado anteriormente, los gases extraídos de la vasija se encuentran a muy alta temperatura (unos 1000°C) y han de ser enfriados, para evitar daños en el resto del sistema. Además, este enfriamiento es una oportunidad para aprovechar la energía calorífica mediante un sistema de recuperación, como el ciclo Rankine, y así elevar el rendimiento energético del proceso.

En la implantación del ciclo Rankine se buscan dos objetivos principales: generar electricidad a partir de la energía calorífica, de tal forma que pueda alimentar los consumos propios de la planta, como lo son el arco eléctrico de la antorcha o el sistema de alimentación y, por otro lado, utilizar el calor para secar los residuos brutos, que suelen presentar una humedad del 20%, y es necesario reducirla entorno al 5% para que la gasificación sea lo más óptima posible, obteniendo un gas de síntesis con mayor PCI.

A continuación, se muestra un esquema básico del ciclo Rankine:

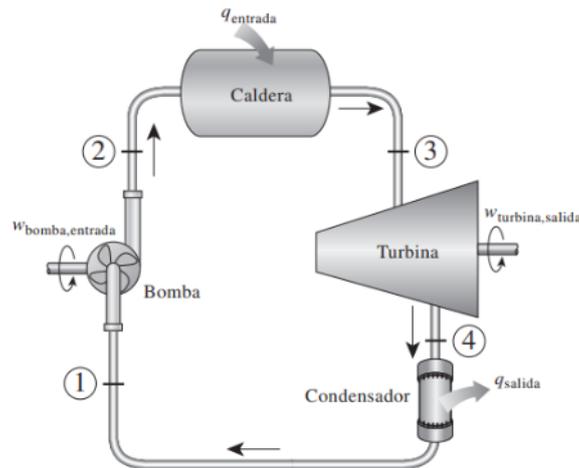


Figura 13: Esquema ciclo Rankine (J. Flavio, 2017)

El ciclo Rankine está formado por las siguientes partes:

- **Caldera de recuperación de calor**

La caldera es un intercambiador de calor formado por dos circuitos:

- Un circuito por el que circula el gas de síntesis extraído directamente del reactor, cuya temperatura de entrada es de unos 1000°C y que al salir de la caldera baja a los 600°C. Esta variación de temperatura libera 423,28 KW, y se utiliza para calentar el circuito de agua, convirtiéndola en vapor sobrecalentado, que podrá accionar la turbina.
- El circuito de agua, que como se ha comentado, es el sistema por el que se enfría el gas de síntesis. Se colocará el circuito a contracorriente del circuito de gases para así maximizar la transferencia de calor. El agua, tras haber absorbido el calor del gas de síntesis, se encuentra a unos 600°C, y puesto que la caldera trabaja a 50 bar, se puede afirmar que el agua se encuentra en forma de vapor sobrecalentado.

El sistema no es ideal, teniendo pérdidas por ineficiencia del intercambiador. Estas se suponen de un 10%, por lo que el calor cedido realmente es de 381 KW.

Calor necesario para el secado de los residuos

Para que en el proceso de gasificación se obtenga un gas de síntesis de alta calidad, se necesita que la materia que se introduce cumpla unos requisitos, entre ellos un porcentaje de humedad bajo, de entorno al 5%. Sin embargo, tal y como se puede comprobar en la figura 29, los residuos biomásicos forestales especialmente presentan una elevada humedad, por lo que se necesita un pretratamiento que la reduzca.

Debido al proceso de gasificación por plasma se alcanzan temperaturas muy altas, de unos 1200°C, es clave su aprovechamiento para secar los residuos y así elevar el rendimiento del proceso. Suponiendo un nivel de entrada de residuos

de 9780 Kg/h, y considerando una humedad media del 25%, se puede calcular el calor necesario para secar los residuos:

$$\dot{m}_{vapor} = (0,25 - 0,05) * 9.780 = 1.956 \text{ Kg/h}$$

$$Q = \dot{m}_{vapor} * C_{L,Agua} = 1.956 * 2.255 = 4.411 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} = 1.225 \text{ KW}$$

$C_{L,Agua}$ = Calor latente del agua -> 2.255 Kj/Kg

\dot{m}_{vapor} = Gasto másico de vapor que se desea eliminar

Lo cual es un calor que se puede conseguir con el calor extraído en el condensador, el cual es de 1232 KW

- **Turbina de vapor**

El vapor sobrecalentado procedente de la caldera se traslada a la turbina, donde el vapor sufre una expansión isentrópica, provocando el movimiento de la turbina y la conversión de este en electricidad, la cual alimentará a la bomba del propio ciclo Rankine, así como las diferentes etapas del proceso de gasificación por plasma.

El vapor de agua entra en la turbina a 600°C y una presión de 50 bar, y tras el paso por esta y su expansión isentrópica, el vapor se encuentra a una baja presión de 0,08 bar y una temperatura de 41,51°C.

- **Condensador a vacío**

El condensador se dedica a reducir la entalpía del circuito de agua, convirtiendo el vapor en agua líquida para así poder ser correctamente bombeado de nuevo al intercambiador de calor, ya que, de lo contrario, si llega vapor de agua a la bomba se pueden presentar problemas de cavitación.

A la entrada y la salida, el agua se encuentra a la misma temperatura, el condensador solo modifica su estado de vapor a líquido. El condensador a de trabajar a una presión cercana al vacío, a 0,08 bar, para permitir optimizar el salto entálpico del vapor en la turbina y maximizar la electricidad producida.

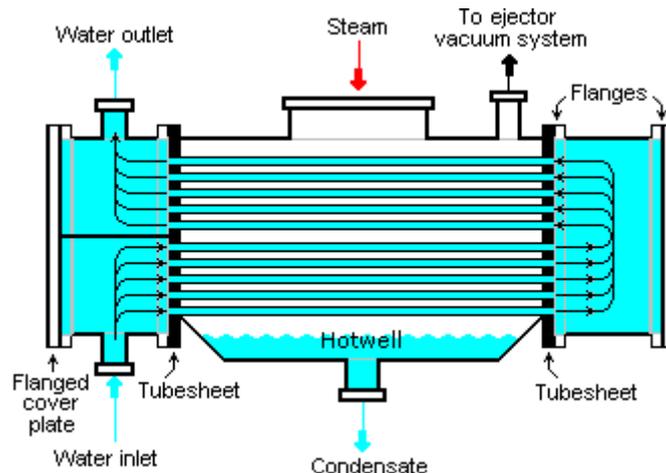


Figura 14: Condensador a vacío (Thermal Engineering, 2019)

- **Bomba de agua**

La bomba sirve para aumentar la presión del agua mediante una compresión isentrópica hasta la presión de trabajo de la caldera, 50 bar. Esta es accionada por parte de la electricidad generada en la turbina.

3.2.3 Almacenamiento del hidrógeno

La idea del proyecto es verter el gas de síntesis, enriquecido en hidrógeno tras la reacción shift, directamente a la central de ciclo combinado o bien a la red de gas natural. Por ello, el gas no se almacenará en grandes cantidades, si no que será continuamente vertido a una de las dos vías elegidas. No obstante, en adelante de imprevistos que puedan surgir, por ejemplo, en ciertas labores de mantenimiento, será conveniente disponer de un sistema de almacenamiento temporal.

El almacenamiento será simple, reservando el gas de síntesis a baja presión, lo que significa que su volumen será muy elevado, e impide la instalación de un tanque que pueda albergar la generación de syngas durante un largo período de tiempo. Por ello, el depósito será diseñado para mantener como máximo la generación de syngas de dos días. (Antonio García, 2021).

El depósito tendrá, además, otra función relevante para la planta, y es la correcta y continua alimentación del gas de síntesis al sistema de compresión. Esto es necesario pues, a pesar de los controles de caudal de los residuos introducidos en la vasija, siempre aparecen ciertas oscilaciones en los valores de generación del syngas. Por ello, el depósito actuará como regulador para ofrecer la debida alimentación al compresor, además de asegurar la composición homogénea del syngas.

3.2.4 Sistema de compresión y vertido a la red

Tras su paso por el depósito, el gas llega al sistema de compresión y su posterior vertido a la red de gas. El sistema de compresión lo conforman dos compresores, actuando uno continuamente y otro como reserva, elevando la presión del syngas a 82 bar, ligeramente por encima de la presión a la que se encuentran los gaseoductos del país (72-80 bar).

Para determinar la presión de inyección a la red nacional, en cada momento el sistema de control se encargará de regular la presión en función de la demanda del gaseoducto central, reduciendo la presión desde los 82 bar a la requerida por el sistema. Los compresores requieren de motores eléctricos trabajando a 360V. (Antonio García, 2021)

4. Análisis del panorama energético español

4.1 Mercado eléctrico

Uno de los objetivos del proyecto es conseguir una fuente de energía sostenible, no contaminante, al estilo de las renovables actuales, pero que resuelva las limitaciones que surgen de las tecnologías renovables, especialmente su falta de gestionabilidad.

Para entender a qué nos referimos con los problemas que sufren las tecnologías renovables y las limitaciones del sistema energético español, se analizará en profundidad la generación eléctrica y su demanda, para poder encontrar una solución al respecto.

Uno de los principales inconvenientes de la generación de energía eléctrica es que no puede ser almacenada en grandes cantidades, por lo que siempre deben encontrarse generadores sufriendo de energía a la red. Se necesita, además, un equilibrio entre la energía generada y demandada, para mantener el sistema a la frecuencia nominal de 50Hz. De esto se encarga Red Eléctrica España, la cual es operadora del sistema, velando por mantener el equilibrio del sistema cuando se produzcan cambios repentinos en la demanda, desconexiones de generadores u otros imprevistos. A su vez, Red Eléctrica gestiona los intercambios de electricidad con los sistemas de países extranjeros.

En cuanto a la demanda, es una variable que depende de la época del año o las condiciones ambientales, y cuya mayor variación se presenta a lo largo del día, en las denominadas horas pico y horas valle. En esos tramos del día en los que todo el conjunto de la población se encuentra activo, con las diferentes industrias y servicios funcionando, se llegan a los valores más elevados de demanda, ocurriendo entre las 12:00 y las 14:00 horas. Por otro lado, en aquellos momentos que la población descansa, especialmente por la noche, y la mayoría de empresas se encuentran inactivas, no existe tanta demanda de energía, llegando a valores mínimos entorno a las cuatro de la mañana. Esta diferencia entre los diferentes tramos horarios obliga al sistema a ser flexible a lo largo de la jornada, desconectando fuentes de generación según sea necesario. La flexibilidad del sistema viene dada por aquellas fuentes de generación eléctrica gestionables, siendo la principal los ciclos combinados. Además, la proliferación de las energías renovables y su priorización en el sistema provoca que el papel de los ciclos combinados y otras energías gestionables sea cada vez más importante, ya que se prioriza una energía cuya generación no está asegurada y se necesita una fuente gestionable que genere inmediatamente la energía restante.

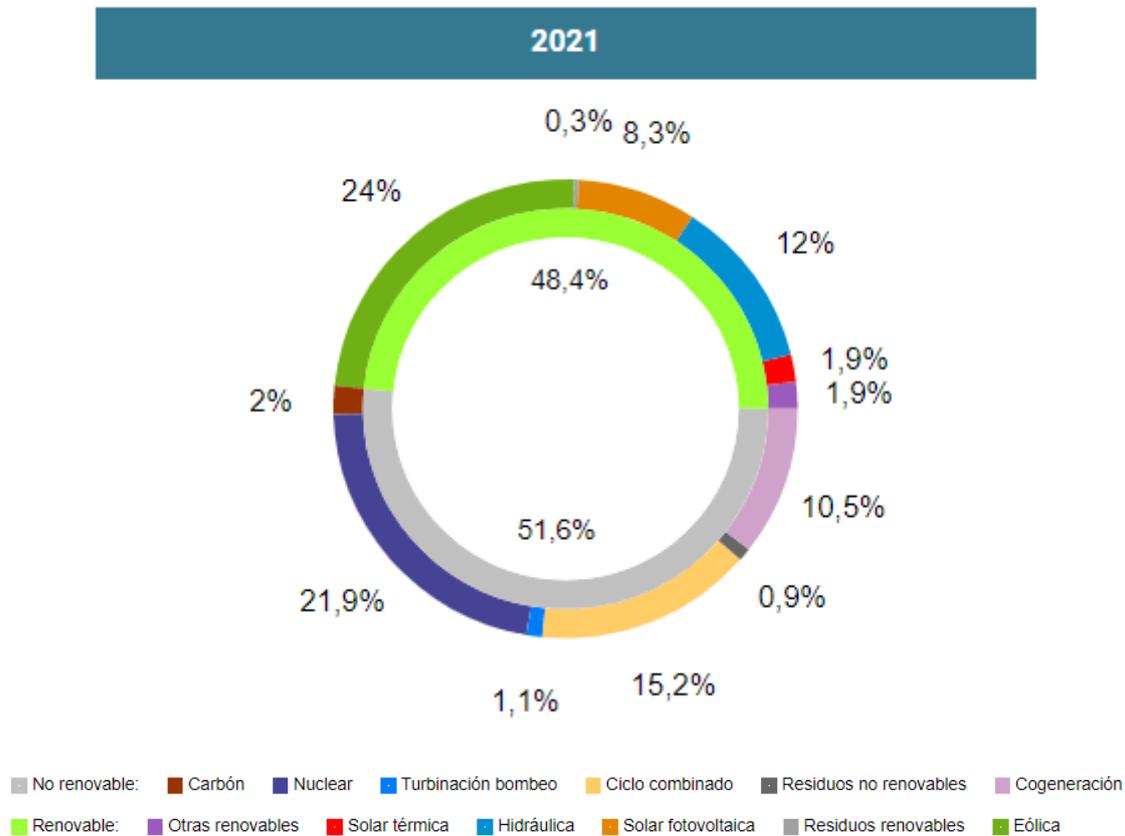


Figura 15: Generación eléctrica en España en 2021 (Red Eléctrica de España)

La energía renovable en España está en auge, intentando cada vez asumir una mayor parte de la generación eléctrica anual. Sin embargo, para ello se está llevando a cabo una estrategia poco ambiciosa, en el sentido de que es simplemente una solución a corto plazo, que puede aumentar el porcentaje de energía renovable, pero no es suficiente si se plantea un futuro en el que todo el sistema eléctrico sea sostenible y limpio. La estrategia actual se enfoca en aumentar el número de parques de renovables en diferentes localizaciones que puedan suplir de energía en aquellos momentos que otras no pueden por falta de su fuente de energía. No obstante, el sistema eléctrico español no puede depender de tecnologías que no sean gestionables, cuya fuente de energía primaria esté condicionada a elementos aleatorios o incontrolables, como lo puede ser la radiación solar cuando es de noche, o las ocasiones en las que no sopla el viento, ya que plantea un escenario en el que puede haber desabastecimiento de energía. Por ello, en la actualidad es completamente necesario la continuidad a corto-medio plazo de tecnologías como los ciclos combinados que utilizan fuentes de energía no renovables, que se caracterizan por su faceta contaminante y no sostenible, o el uso de energía nuclear, cuyos residuos radiactivos permanecen durante años.

En la figura siguiente, se puede ver el grado de utilización de las diferentes tecnologías del parque de generación eléctrica nacional. Los datos han sido recopilados del informe anual de Naturgy “El sector eléctrico español en números. Informe 2020):

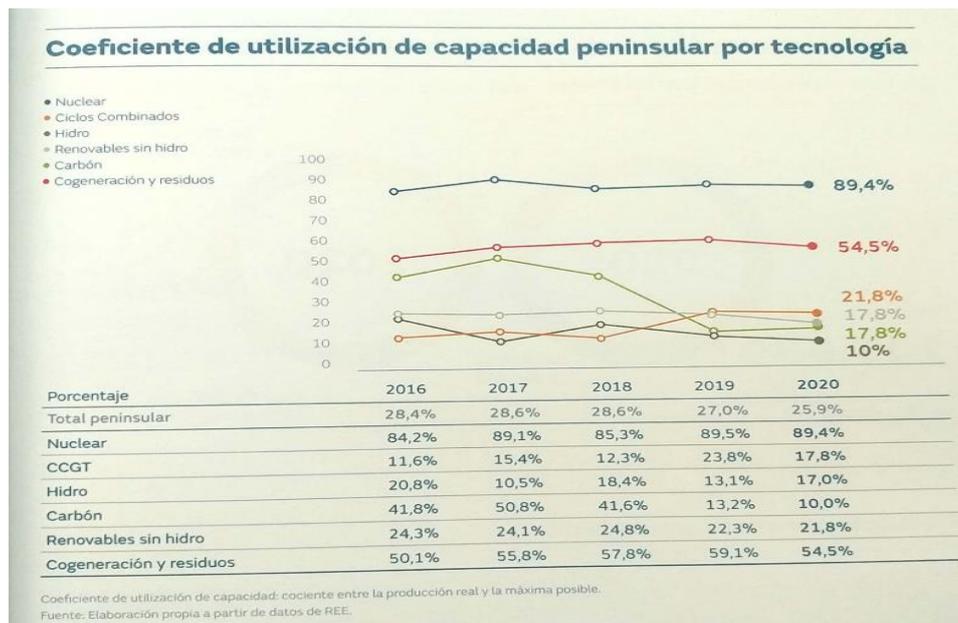


Figura 16: Evolución del grado de utilización de las diferentes tecnologías de generación (Naturgy, 2020)

Como se ha comentado previamente, las renovables tienen un bajo coeficiente de utilización (22%-18%), debido a la imposibilidad de su gestión, ya que por más que se aumente el número de instalaciones y aumenten los GWh generados por estas tecnologías, depende de la disponibilidad de la fuente de energía, la cual no es continua ni predecible. Ese carácter impredecible y no gestionable hace que la estrategia respecto a las renovables en España haya sido de expansión, es decir, aumentar el número de MW instalados, ya que no es posible incrementar el uso de las instalaciones ya existentes y su coeficiente de utilización. La más eficiente es la nuclear, encontrándose a un nivel alto, de entorno al 90%, a la cual sigue en eficiencia los ciclos combinados, con un coeficiente también estable en un nivel del 54%.

A continuación, se presenta la potencia instalada en España por tecnologías en el año 2021:

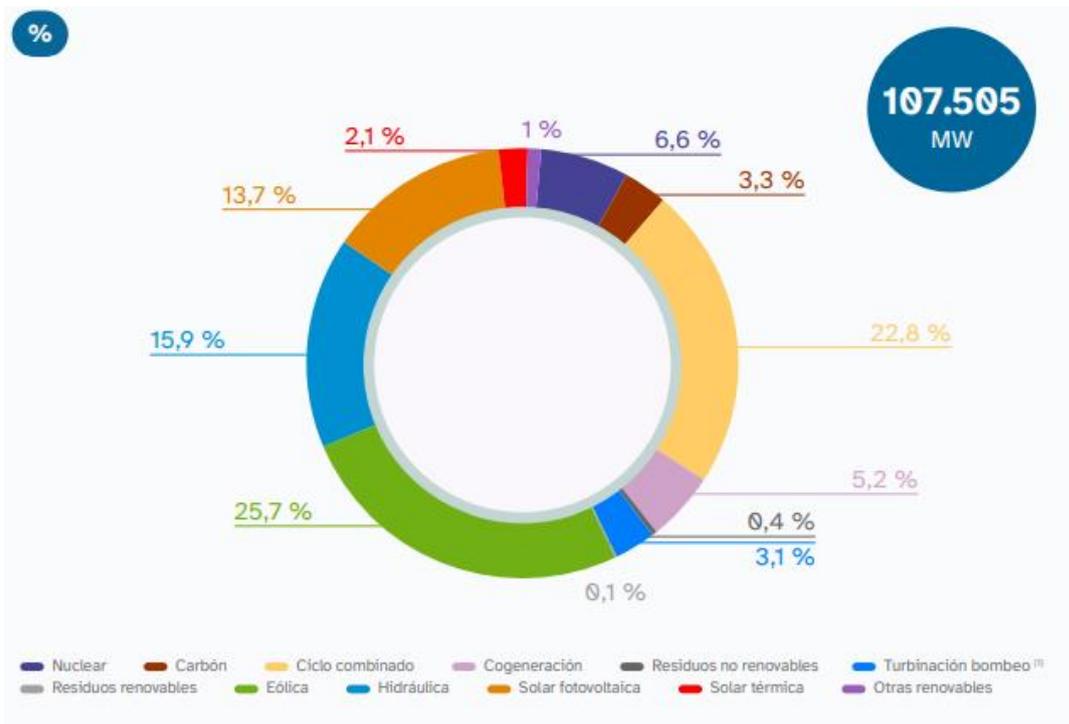


Figura 17: Potencia instalada en la península a 31 de diciembre de 2021 (REE, 2022)

Por otra parte, en la siguiente figura, se muestra la generación eléctrica en España por las diferentes tecnologías:

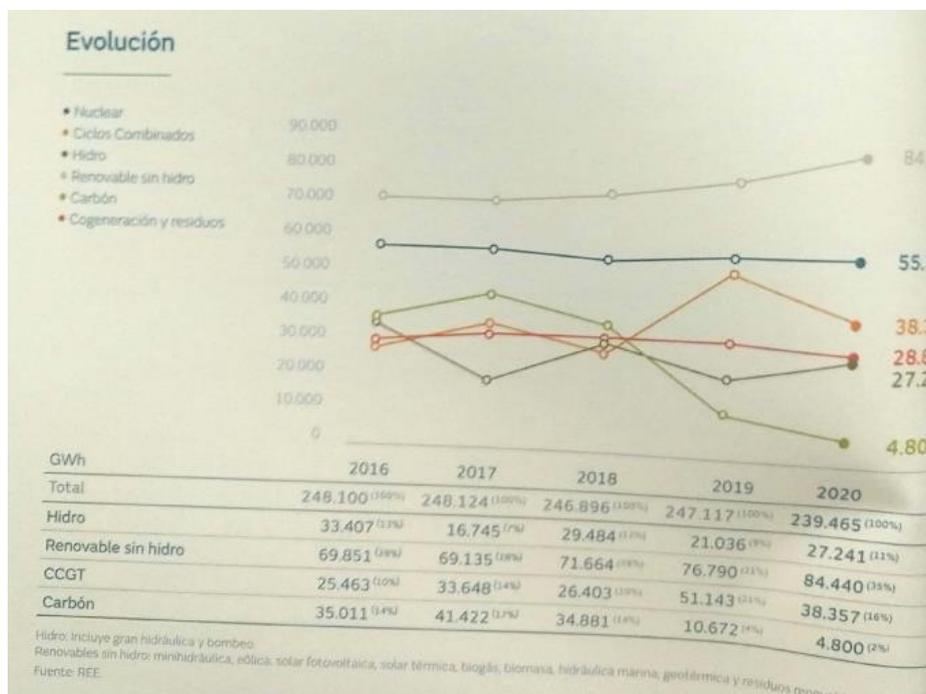


Figura 18: Evolución de la generación eléctrica por tecnologías (Naturgy, 2021)

Analizando los datos presentados, se puede ver cómo del 59% de energía renovable instalada, en 2020 supuso un 41% de la energía generada en España, pese a que la

energía renovable es prioritaria y siempre que es posible está en funcionamiento. Esto es, como ya se ha comentado, a la falta de disponibilidad de las fuentes de energía renovables en cualquier momento. Por otro lado, la nuclear supone el 23% de la energía generada, y esto es debido a que está continuamente en funcionamiento y de ahí su gran ratio de utilización del 90%. En cuanto a los ciclos combinados, estos suponen el 16% de la generación. Su utilización varía en función de la ausencia de generación eléctrica renovable, por lo que, si bien cuando las renovables están a pleno rendimiento, las centrales de ciclo combinado (CCC) están a un porcentaje bajo de generación, cuando fallan las fuentes de energía renovable, el sistema se sustenta en su mayor parte por las CCC.

De la figura 18, es interesante apreciar la reducción del carbón hasta suponer tan solo un 2% de la generación, cuando en 2017 se encontraba todavía en el 17% y cuando en 1985 llegó a ser de un 44% (Banco Mundial de Datos). Esta reducción ha sido sustentada por el aumento de las energías renovables y el apoyo de los ciclos combinados y la cogeneración.

En cuanto al mercado eléctrico, se trata de un mercado liberalizado, en el que las empresas producen la energía y la ofrecen en una subasta a diferentes precios. Una vez realizada la subasta, todas las empresas venden la electricidad a un mismo precio fijado estimando la demanda del día siguiente. Este precio se elige a través del OMIE, (Operador del Mercado Ibérico de Energía) utilizando el algoritmo EUPHEMIA, ordenando de manera ascendente los precios ofertados y, de este modo, conformando la curva de oferta del mercado para cada hora, cubriendo la demanda comenzando desde las ofertas más baratas hasta las más caras, estableciendo como precio fijo el de la última oferta seleccionada, es decir, el precio de la electricidad lo marca la oferta más cara.

4.2 Mercado gasista

La creación de un sistema de gaseoductos en España fue bastante tardía, debido a los pocos yacimientos de gas natural en el país y a la gran distancia que separa la península de los principales proveedores de gas, ubicados al norte de Europa y Rusia. El sistema comenzó a funcionar a finales de los años 60, construyendo en 1969 la primera planta de regasificación, en Barcelona. El panorama actual está compuesto por más de 11.000 Km de gaseoductos, con 6 conexiones internacionales con África, Portugal y Francia, a las que se suman 6 plantas de gas natural licuado (GNL) localizadas en Barcelona, Bilbao, Cartagena, Huelva, Mugaridos y Sagunto, además de 3 almacenamientos estratégicos. En la siguiente figura se puede apreciar el sistema de distribución de gas español:

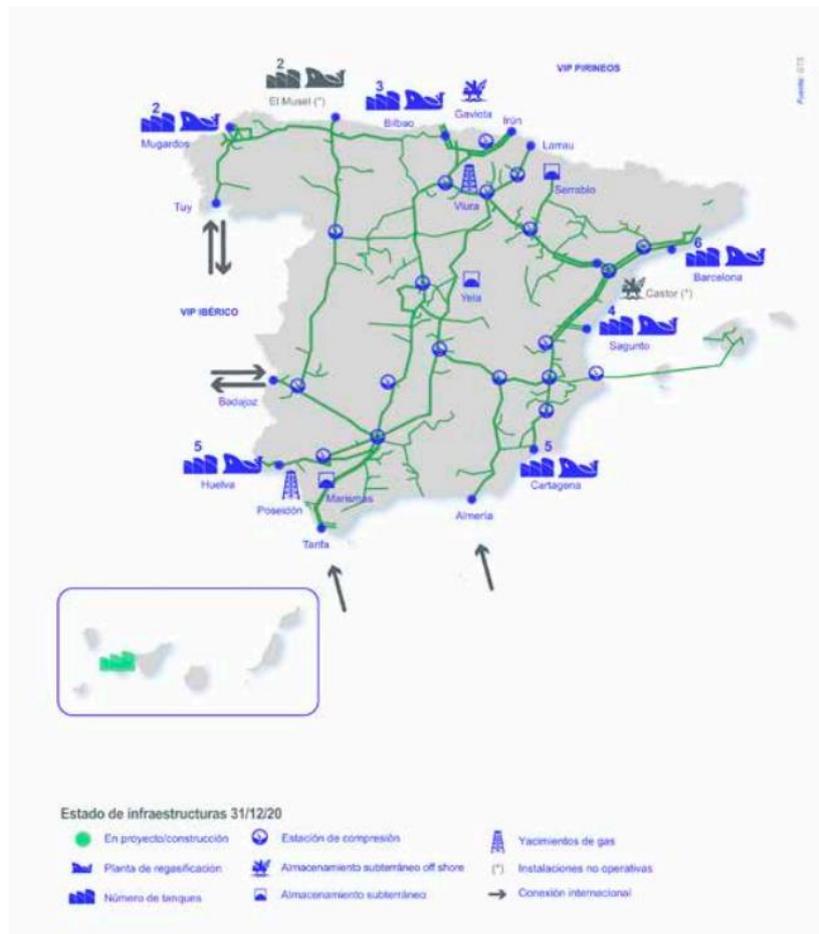


Figura 19: Sistema de distribución de gas español (Sedigas, 2021)

En cuanto a la demanda de gas en España, esta alcanzó los 378,5 TWh, incrementando su valor un 5% con respecto a 2020, especialmente por la recuperación económica que muestra el país tras un 2020 marcado por la pandemia de COVID-19, pero también continuando con una tendencia de aumento de la demanda que se observa desde los últimos años.

378,4 TWh

Demanda gasista nacional en 2021, un 5,1% más que en 2020 y un 9,2% superior a la media de los últimos diez años

Demanda de gas natural en 2021

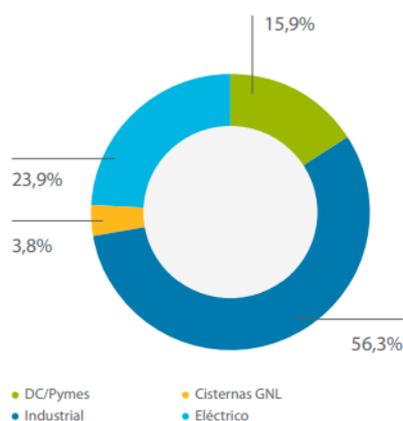


Figura 20: Demanda gasista nacional en 2021 (Enagas, 2021)

Como se aprecia en la figura 20, la mayor parte de la demanda se dedica al sector de la industria, con un 56,3%, seguido del sector eléctrico, que por los consumos de los ciclos combinados alcanza el 23,9% de la demanda. En los años anteriores, la demanda de gas por parte del sector de la electricidad era mayor, pero se ha visto reducida debido a la mayor presencia de las energías renovables, las cuales relegan al gas a un segundo plano, sirviendo este como principal sustento en aquellas ocasiones que las energías renovables no están disponibles y para terminar de suplir la demanda que el resto de tecnologías de generación eléctrica no llegan a satisfacer.

El precio del gas es una cuestión prioritaria en los últimos años, especialmente en 2022 donde se ha visto incrementado más de un 10% respecto al año anterior, debido a la guerra provocada por Rusia, principal proveedor de gas del norte de Europa. Esta situación pone de manifiesto la importancia de tener una fuente de energía gestionable e independiente de otros países. Otro aspecto que ha influenciado históricamente el precio del gas es el precio del petróleo, estando ambos muy ligados, incluso encontrando muchos acuerdos contractuales en los que el precio del gas se encuentra indexado al del petróleo. Finalmente, en el mercado gasista otra variable influyente es el precio del CO2 generado, siendo clave para la competencia del sector de generación eléctrica gasista frente a otras tecnologías.



Figura 21: Evolución del precio por tonelada de CO2 generado (Naturgy, 2021)

De esta manera, el sector gasista español presenta un papel importante en la descarbonización de la generación eléctrica del país, sirviendo como sustento para las limitaciones de generación de las energías renovables. Por otro lado, las tensiones políticas actuales han demostrado la dependencia del sector energético de los países proveedores, siendo muy interesante la implantación de tecnologías como el hidrógeno que puedan ser originadas en España de forma independiente.

5. El gas de síntesis

5.1. Características del gas de síntesis

El gas de síntesis, tal y como se expuso previamente (ver tabla 1), está formado principalmente por CO y H₂, suponiendo un 80% de la composición del gas. De manera más residual, se encuentran otros gases como N, CO₂, H₂O y Ar.

Observando la gráfica siguiente, se puede apreciar una de las características más interesantes y decisivas para haber elegido la tecnología de gasificación por plasma para realizar el proyecto. Independientemente del tipo de residuo que se introduzca en el reactor, la composición del gas de síntesis es prácticamente invariante, por lo que no es necesaria una preclasificación de los residuos exhaustiva ni estudiar previamente la composición de los residuos, lo que se traduce en un ahorro de tiempo, dinero y recursos.

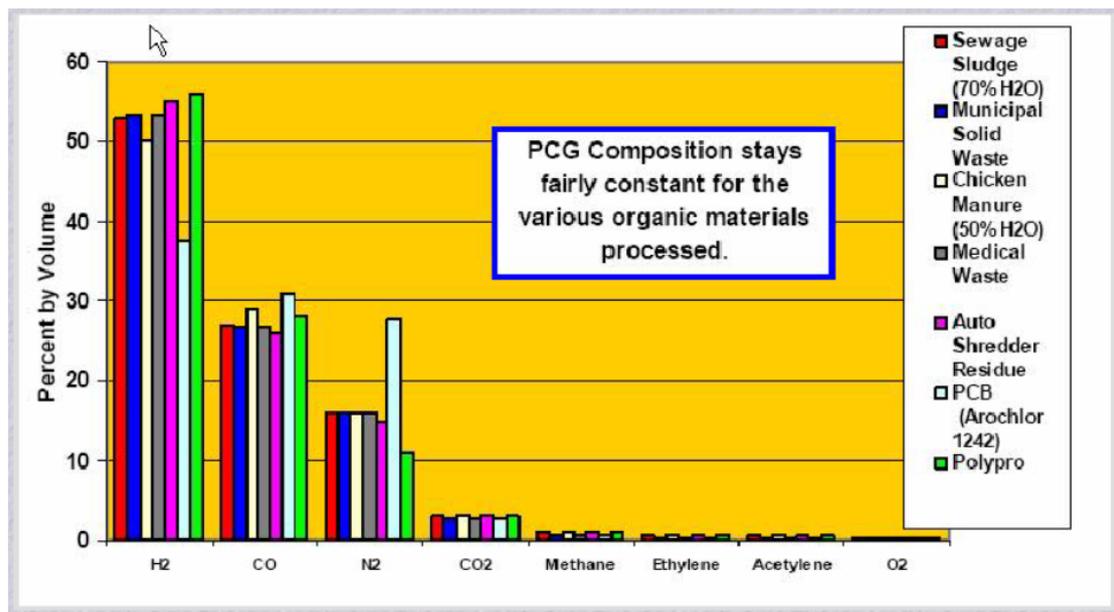


Figura 22: Composición del gas de síntesis en función del residuo de entrada (Valenciano López, 2015)

5.2. Usos y aplicaciones del gas de síntesis

En este apartado se van a presentar las diferentes opciones que se pueden plantear a la hora de aprovechar el gas de síntesis, al menos aquellas que son tanto técnica como, en principio, económicamente viables. Existen más tecnologías para aprovechar el “syngas”, pero se descartan por no ser idóneas teniendo en cuenta la composición del gas debido a su procedencia de residuos tanto urbanos como agrícolas y forestales.

Las principales opciones son dos:

- Generación eléctrica a través de máquinas térmicas (turbinas de gas o motores) o pilas de combustible.
- Inyección del gas de síntesis en la red de gas natural.

Se ha desechado la opción de almacenar el hidrógeno para el proyecto, puesto que resulta una tecnología compleja de desarrollar, cara y que sigue en vías de desarrollo para plantas de la envergadura de este proyecto. Esta opción sería interesante de encontrarse cerca un parque amplio de vehículos alimentados por hidrógeno, el cual no es el caso, o podría plantearse su uso para cubrir picos de demanda energética o aprovechar su uso en momentos que el pool eléctrico fuese más caro. Sin embargo, no es suficiente para justificar su uso en este trabajo.

A continuación, se explicarán en detalle las dos opciones presentadas, justificando, finalmente, cual será elegida.

5.2.1 Generación eléctrica utilizando máquinas térmicas o pilas de combustible

Habitualmente, el gas de síntesis es utilizado como un biocombustible que reemplaza a otros vectores energéticos más contaminantes, accionando máquinas térmicas o utilizándose en pilas de combustible.

- Motores de combustión interna

El gas de síntesis se emplea para accionar un motor, transformando la energía química del gas en energía mecánica. Particularmente, estos motores son de combustión interna, es decir, la combustión tiene lugar en el interior del cilindro. Este proceso consta de varias etapas; primero, el fluido se introduce en el cilindro, donde será comprimido, siguiendo con su combustión y, finalmente, dejando escapar los subproductos quemados.

La energía eléctrica se obtiene a partir de la mecánica gracias a un alternador accionado por el motor, suministrándola finalmente a la red. Tienen un rendimiento del 40%, mayor que las turbinas de gas, y resultan una opción interesante para la planta.

En la siguiente figura se puede apreciar el funcionamiento y los diferentes componentes de un motor de combustión interna:

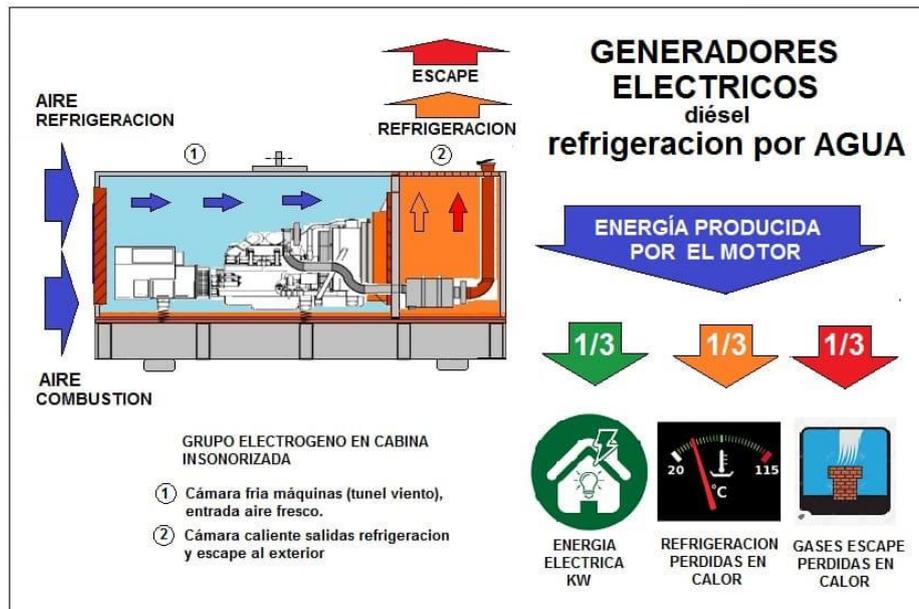


Figura 23: Esquema simplificado del funcionamiento de un motor de combustión interna generador de electricidad. (Grupos Bravo Generadores Eléctricos, n.d.)

- Turbinas de gas

Las turbinas de gas son motores térmicos rotativos que generan energía mecánica a partir de la compresión del aire y la combustión con gas. El proceso en el que se basa el funcionamiento de las turbinas se denomina ciclo de Brayton, consistente en la aspiración y posterior compresión de aire, el cual es guiado hasta las cámaras de combustión, donde se produce la ignición añadiendo gas al aire comprimido. Los gases a alta temperatura derivados de la combustión continúan su paso por la turbina, llegando a un proceso de expansión que mueve el eje de esta, accionando tanto el compresor de la turbina como el generador de electricidad. El gas de síntesis ha de ser comprimido hasta los 7 bar para mezclarlo con el aire en la cámara de combustión.

Las turbinas presentan una baja inercia térmica, por lo que su puesta en marcha es rápida, siendo ideales para plantas que suplan la demanda en picos puntuales de esta. No obstante, existen dos inconvenientes. El primero es la elevada velocidad de rotación. El segundo inconveniente es su menor rendimiento frente a los motores de combustión interna, llegando las turbinas al 30-35% de rendimiento.

En la siguiente figura, se muestra el proceso que transcurre en el interior de la turbina:

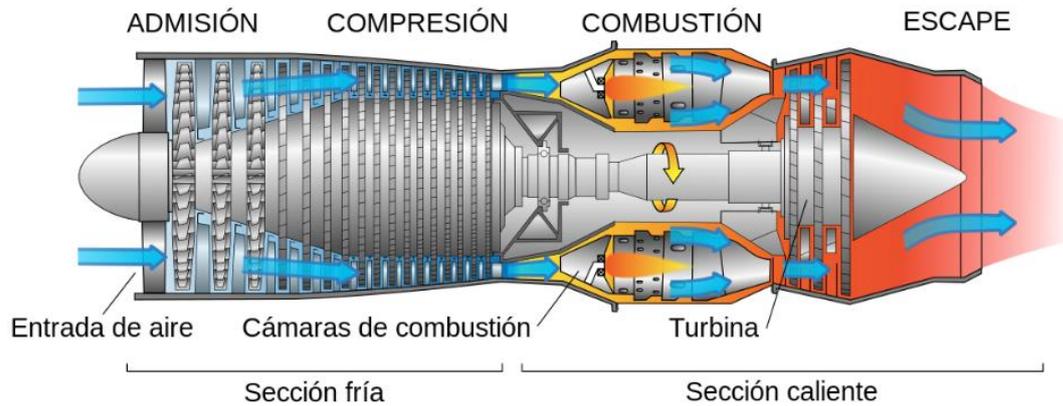


Figura 24: Sección de una turbina de gas (*Centrales Térmicas de Ciclos Combinados, n.d.*)

- Pilas de combustible

Se trata de un dispositivo electroquímico que permite transformar la energía química de una sustancia en energía eléctrica y calorífica, mediante un procedimiento electroquímico, es decir, sin necesitar de un proceso extra como un ciclo termodinámico para convertir el calor en trabajo. Las pilas de combustible se alimentan con hidrógeno como combustible, y un elemento oxidante, que es el oxígeno. Además, un aspecto a favor de las pilas de combustible es que estos dos elementos no necesitan de la combustión para generar la energía, simplemente su combinación electroquímica. Esto impide la formación de compuestos nocivos contaminantes y mejora la eficiencia del proceso, en comparación con otros procesos de transformación de energía tradicionales.

Las pilas de combustible constan de tres partes principales, ánodo (electrodo negativo), cátodo (electrodo positivo) y el electrolito, el cual hace la función de catalizador para las reacciones producidas en la pila de combustible. El electrolito debe ser capaz de permitir pasar los iones necesarios para que ocurra la reacción, a la vez que evite el paso de electrones libres que pueden complicar la reacción.

En la figura 25, se muestra un simple esquema del funcionamiento de una pila de combustible:

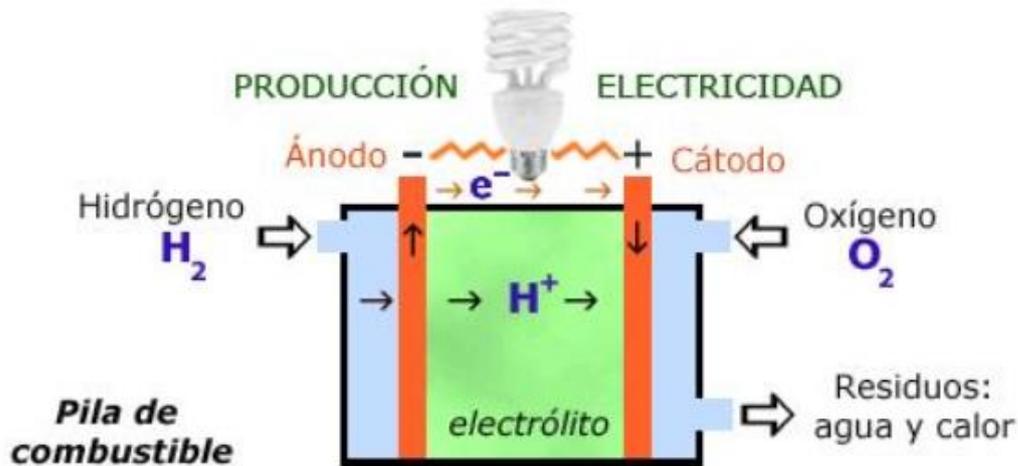


Figura 25: Pila de combustible de hidrógeno (IES Valle del Saja| Departamento de física y química, n.d.)

En la figura 25 se puede apreciar que la pila de combustible opera con dos gases diferentes, el combustible (hidrógeno) y el oxidante (oxígeno), atravesando las paredes del ánodo y el cátodo hacia el electrolito.

La pila de combustible se postula como una de las mejores formas de generar electricidad con hidrógeno, debido a sus buenos rendimientos, de entorno a un 40-60%, ya que, a diferencia de los sistemas térmicos como los motores y las turbinas, este proceso es químico y no está limitado por el rendimiento del ciclo de Carnot. Además, existen pilas de combustible de todo tipo de tamaños y diferentes rangos de potencia, por lo que se pueden adaptar a proyectos de menor y mayor calibre, desde aplicaciones en electrónica a la generación de electricidad en plantas de gran capacidad. Por último, cabe mencionar la limpieza del proceso, en cuanto a emisiones y residuos generados, pues no se produce más que agua y calor como residuo, resultando en una tecnología ideal para los objetivos de desarrollo sostenible.

5.2.2 Inyección en redes de gas natural

La otra opción a generar directamente la electricidad es introducir el gas de síntesis, filtrado y purificado en hidrógeno, en la red de gas natural española. Existen diferentes sistemas de generación eléctrica renovables suministrando electricidad, pero son muy escasos las tecnologías que generan gas, mucho menos tan limpio como el hidrógeno proveniente de la gasificación por plasma de residuos. Esto significa que prácticamente todo el gas consumido en España proviene de origen fósil y, lo que es más relevante, importado de países que poseen gaseoductos, aspecto del que España carece. Posteriormente se analizará la situación energética española, pero, en resumen, es

dependiente del suministro de países extranjeros, por lo que no puede controlar el precio de este.

Otro inconveniente de la energía eléctrica renovable generada es su imposibilidad de ser gestionadas, esto es, las tecnologías dependen de un agente externo poco predecible e incontrolable, como lo son el viento en la eólica o el sol en la fotovoltaica. Por ello, la inyección de gas a la red se plantea como una interesante propuesta, ya que puede ser una solución óptima para el almacenamiento de la energía sobrante generada por estas tecnologías renovables no gestionables, que en ocasiones producen por encima de la demanda que debían suplir, por lo que se necesita desconectar generadores temporalmente para evitar la saturación de la red, resultando en una ineficiencia del sistema.

Además, como se justificará más adelante, este proyecto se enfoca en introducir el gas en la red para utilizarlo en la generación de electricidad en la central de ciclo combinado de la bahía de Algeciras. Es una estrategia que ha sido ya desarrollada en proyectos reales, como el de Amorebieta, Vizcaya, y la idea es construir en la cercanía de las instalaciones de una central de ciclo combinado una central de generación de hidrógeno, que pueda suplir parte del combustible empleado para la generación de electricidad. La ventaja principal, en especial para un proyecto realizado en España, es la posibilidad de obtener gas combustible de manera independiente, generando la riqueza en el país, consiguiendo no solo el preciado gas, si no generando empleo de calidad y, en el caso del proyecto, en el que se obtiene hidrógeno a partir de la gasificación por plasma de residuos biomásicos, reduciendo las emisiones contaminantes que se liberaban por el tratamiento previo de los residuos en vertederos controlados o mediante la incineración.

Todo ello apunta a la inyección de gas natural como una alternativa interesante a nivel técnico y estratégico, reduciendo la dependencia energética de España a otros países y que, además, mejoraría la eficiencia del sistema energético español.

5.3 Elección de la técnica para aprovechar el gas de síntesis

Hasta ahora, se han presentado las distintas técnicas planteadas para la utilización del gas de síntesis generado en la planta de gasificación en la generación energética, analizando además la situación del mercado energético español, así como el mercado de gas natural, todo para elegir la forma de generar energía a partir del “syngas” más óptima.

Las dos opciones que se barajan son introducir el gas de síntesis directamente al mercado gasista, principalmente alimentando las centrales de ciclo combinado, o bien dedicarlo directamente a la generación eléctrica mediante motores térmicos o pilas de combustible.

En lo que refiere a las pilas de combustible, se ha desestimado su uso por ser una tecnología todavía poco desarrollada, que presenta limitaciones de capacidad y funcionamiento que hacen que otras opciones sean más óptimas en este proyecto. De seleccionarse como tecnología de la planta, las pilas deberían generar los 14 MW que se ha estimado, además de permitir un uso estacionario, económicamente viable y con una vida útil larga. Otras necesidades serían que la pila tuviese un alto rendimiento y que tolerase la presencia de impurezas en el hidrógeno que no se hayan eliminado en los procesos previos de neutralización.

A la hora de buscar una pila que cumpla con todo lo especificado, nos encontramos que en el mercado la mejor opción son las pilas tipo PEMFC, fabricadas, entre otros, por Ballard, Fuel Cell Energy o Hydrogenics. Realizando una comparativa de los productos que ofrecen las diferentes empresas, se ha llegado a la conclusión que el modelo ideal sería el desarrollado por Ballard Power, el “Ballard’s Clear Gen fuel cell system”, el cual presenta un rendimiento del 40% con una tasa de entrada de 63 kg/s de hidrógeno. Sin embargo, tanto este modelo como los presentados por el resto de empresas son capaces de generar una potencia máxima de 1MW, por lo que, de implantarse esta tecnología en la planta, se necesitarían 14 pilas, número factible, pero dato junto al resto de los expuestos que aparta a las pilas de combustibles de su implantación en el proyecto como forma de aprovechar el gas de síntesis.

De las opciones de generación eléctrica directa, solo quedan dos opciones, el motor de combustión interna y la turbina de gas. Aunque los motores presenten un mayor rendimiento que las turbinas de gas, que además presenta la necesidad de incorporar un compresor que incremente la presión por encima de los 7 bar, lo cual consume potencia y, por lo tanto, reduce aún más la eficiencia del proceso. No obstante, ha de tenerse en cuenta las altas temperaturas que se generan en el proceso de gasificación por plasma y que interesa aprovechar energéticamente. Por ello, la turbina de gas, implementada en un ciclo combinado, el cual aprovecha el calor de los gases para generar electricidad mediante un ciclo Rankine, sería la elección más eficiente y económicamente viable. Es más, también se puede aprovechar el calor liberado en el proceso de enfriamiento del syngas, que a la salida del gasificador se encuentra a unos 1000°C, produciendo vapor de agua que de ser utilizado permite alcanzar rendimientos globales de la planta realmente elevados, de entorno al 80%.

Por este motivo se ha decidido realizar el proyecto de la planta de tratamiento de residuos biomásicos en la cercanía de las instalaciones de una central de ciclo combinado, en concreto la localizada en la bahía de Algeciras. Su uso principal será suplir a la central con hidrógeno, un combustible limpio y generado de forma independiente y totalmente gestionable, es decir, se podrá modificar según convenga, dentro de unos límites, la generación de energía en forma de hidrógeno, uniendo las ventajas ecológicas de las energías renovables con la versatilidad de los combustibles fósiles. De existir un excedente de hidrógeno generado por la planta que no admita la central será vertido

directamente a la red de gas natural de España, comercializándolo y recibiendo una retribución por ello.

De esta forma, se consigue reducir el gasto de gas natural en la planta de ciclo combinado, resultando en una rebaja de los costes, debido al alto precio que alcanza el gas desde los últimos años, a la vez que se rebajan las emisiones contaminantes emitidas por su combustión, y se consigue una fuente limpia producida en el propio territorio español, es decir, que no debe ser importada, siendo esta una forma de asegurar el suministro de energía nacional a un precio más económico e invariante.

6. Proyecto de demostración

6.1. Localización de la planta

Para elegir la localización de la planta, se han de cumplir los siguientes requisitos mínimos:

- Seleccionar una zona que no disponga ya de una instalación de valorización energética. Dicha limitación no es demasiado relevante, ya que de las 12 incineradoras establecidas en España, Andalucía no alberga ninguna, encontrándose en la ciudad autónoma de Melilla la más cercana.
- Disponer de un suministro de RSU importante en un radio cercano a la planta, de no más de 40 km, para que el transporte no suponga un coste elevado en el proceso. Realizando un cálculo aproximado, basándonos en los 470 Kg anuales que se generan por habitante en España, la central de tratamiento deberá encontrarse cerca de un núcleo urbano importante, con una población de al menos 110.000 habitantes. Esta sí es una limitación que concretará las zonas viables para la explotación de una planta, ya que existen contadas poblaciones mayores de 100.000 habitantes.
- Disponer también de un suministro de residuos biomásicos agrícolas y/o forestales que no se traten ya con valorización energética. Como se ve en el análisis de residuos, en España prácticamente no se aprovechan estos residuos energéticamente, pese a que el país posee un gran número de explotaciones agrícolas y zonas forestales. Por todo esto, este requisito no supone un desafío a primera vista.
- La zona debe de encontrarse conectada a la red de gaseoductos nacional, pues se quiere inyectar el syngas en esta y, de lo contrario, la obra necesaria para habilitar un nuevo gaseoducto haría inviable económicamente el proyecto. Este requisito es relevante pues la red de gas no cubre el área completa del país, tal y como se aprecia en la figura, limitando así las ciudades candidatas a albergar el proyecto:



Figura 26: Mapa de las infraestructuras de gas en España (Enagas, 2021)

En relación con los anteriores requisitos, existen ciertas localidades en el territorio español que los cumplen todos. Entre las opciones de la península, se ha seleccionado una ciudad de la comunidad autónoma de Andalucía, por albergar ciudades que cumplen holgadamente los requisitos. De entre las ciudades andaluzas candidatas, se ha optado por Algeciras por una razón, y es la ubicación de las instalaciones de la central de ciclo combinado Bahía de Algeciras, ya que, como se ha expuesto en este trabajo, el syngas obtenido del proceso de gasificación se ha decidido emplearlo para la generación eléctrica mediante un ciclo combinado, y que vierte el excedente de hidrógeno a la red de gas nacional. De esta manera, se aprovechan las instalaciones ya en funcionamiento, dándoles una mejora en el apartado de sostenibilidad y ecología, a la par que una nueva fuente de riqueza económica al área.

Para entender por qué se ha elegido Andalucía como comunidad candidata para albergar el proyecto, se presentan unos datos reveladores de la comunidad. Para empezar, la región andaluza es el hogar de varios de los mayores núcleos de población de España, siendo la comunidad más poblada de España. Por otro lado, un 51% del territorio es superficie forestal y otro 47,1% la superficie dedicada a la agricultura, resultando en una gran cantidad de residuos biomásicos.

En cuanto a la elección de del núcleo de población concreto, el hecho más relevante y que ha declinado la balanza hacia la ciudad de Algeciras ha sido la existencia de la planta de ciclo combinado Bahía de Algeciras, pues es la solución técnica elegida para el proyecto, pudiendo dar un uso muy eficiente al hidrógeno generado en la planta de

tratamiento. Otras grandes ciudades como Málaga, Granada o Antequera cumplen los requisitos, pero carecen de una forma tan directa y simple a la par que eficiente de emplear el hidrógeno y capaz de resolver tantas cuestiones importantes, como son el reemplazo de gas natural en las centrales de ciclo combinado y la consiguiente reducción del precio del gas y electricidad a nivel nacional, además de la reducción de emisiones contaminantes.

La población de Algeciras cuenta con unos 121.000 habitantes censados, la más poblada de la comarca del Campo de Gibraltar, que generó en 2019 unas 58.000 toneladas de RSU (Algesa, 2019), y está situada cerca de varios parques naturales que son una fuente de residuos forestales, como el Parque Natural de los Alcornocales, del que se extraen 3.700 toneladas anuales de biomasa (Junta de Andalucía, 2019), o el Parque Natural del Estrecho. Las altas temperaturas que se alcanzan en verano hacen de vital importancia el acondicionamiento de estas zonas forestales para la prevención de incendios y la preservación del medio, de la cual derivan una cantidad abundante de residuos biomásicos. La comarca a la que pertenece Algeciras no posee abundantes explotaciones agrícolas, debido a la gran superficie forestal en la que se encuentra. En el campo de Gibraltar se dedican 60.787 ha como superficie agraria útil (SAU), lo que supone el 11% del territorio, mientras que las superficies forestales y naturales conforman el 81% de la comarca, muy por encima de la media andaluza, 51% (Agencia de Gestión Agraria y Pesquera de Andalucía, 2014).

Además, la ciudad de Algeciras ha tenido malas experiencias con vertederos controlados recientemente, pues el vertedero de El Cobre tuvo en 1996 un vertido contaminante accidental, y posteriormente, tras su sellamiento en 2008, se han seguido sucediendo vertidos de lixiviados del vertedero, suponiendo un gasto anual de un millón de euros por su transporte y tratamiento a la EDAR de Algeciras. Por ello, la existencia de una planta de tratamiento de residuos por gasificación por plasma, la cual elimina totalmente el riesgo de subproductos contaminantes, sería muy bien recibida por la comunidad.

6.2. Residuos disponibles para la planta de Algeciras

En las sociedades modernas, hay una generación de residuos inherente muy importante, debida al desarrollo alcanzado en calidad de vida e higiene. Esto implica una cantidad cada vez mayor de residuos que deben ser debidamente tratados, pudiendo obtener un rédito energético y económico.

En este proyecto de la ciudad de Algeciras, se van a considerar tres tipos de residuos según su procedencia: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos forestales y residuos agrícolas, que significarán la práctica totalidad de los residuos tratados.

6.2.1 Residuos Sólidos Urbanos

Los residuos sólidos urbanos o RSU están conformados por un conjunto de los residuos generados en los domicilios, previamente clasificados como orgánicos,

aquellos depositados en el contenedor verde o gris, los denominados de recogida selectiva, entre los que se incluyen papel y cartón, envases y plásticos y vidrio), y también los de recogida domiciliaria o punto limpio, como electrodomésticos y otros aparatos electrónicos, pilas, aceite vegetal...

En la siguiente tabla se puede ver la evolución de la recogida de residuos selectiva en la ciudad de Algeciras, pudiendo apreciar una cierta estabilidad en el tiempo, alrededor de las 58.000 toneladas. Esto se traduce en 479,3 kg de residuos generados por cada habitante, cercano a la media española que en 2019 ascendía a los 483,7 kg de RSU urbanos por habitante (INE, 2019).

Histórico Tratamiento de Residuos. Procedentes de Recogida Selectiva						
FRACCIÓN	UD	2014	2015	2016	2017	2018
Envases de vidrio	kg	725.210	777.890	742.110	730.570	737.770
Envases ligeros	kg	782.851	903.429	855.843	919.047	970.321
Papel-cartón	kg	1.270.698	1.424.445	1.568.590	1.559.858	1.499.536
Aceites	kg	23.522	26.002	27.275	26.655	29.833
Pilas	kg	2.394	2.040	2.314	2.262	2.077
Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAAEs)	kg	66.440	70.084	75.820	57.333	83.190
Fración resto	T.M.	53.623,23	55.501,70	55.464,70	53.934,78	55.774,58

Figura 27: Residuos Urbanos tratados de la ciudad de Algeciras (ARCGISA, 2019)

La gestión de residuos en la ciudad de Algeciras está encargada a la empresa pública Actividades de Limpieza y Gestión, S.A., (ALGESA) constituida en 2005 y por Aguas y Residuos del Campo de Gibraltar (ARCGISA). Hay habilitados dos puntos limpios, Los Guijos y La Menacha. Los residuos son posteriormente trasladados a la “Planta de Clasificación y Planta de Recuperación y Compostaje Sur de Europa-Los Barrios”, la cual trata los residuos de toda la comarca del Campo de Gibraltar, así como los de Gibraltar y Ceuta. Pese a ser una planta de tratamiento bastante puntera a nivel tecnológico, y poder reciclar una buena cantidad de ellos, otros métodos de gestión de residuos son los vertederos, que como se ha expuesto en este trabajo, implican una serie de riesgos importantes que, como se comentó previamente, la ciudad de Algeciras ya ha sufrido recientemente.

Los residuos se clasifican internamente en dos grupos principales, aquellos denominados residuos domésticos mezclados, que incluyen la basura orgánica y los demás residuos que no necesitan de separación selectiva, y los residuos de

recogida selectiva y puntos limpios. Según datos proporcionados por ALGESA, tan solo un 3,81% (2016) de los residuos se recogieron en los dos puntos limpios habilitados en la ciudad. Todos tienen como destino final la planta de tratamiento de Los Barrios.

Para analizar la cantidad de energía que se puede extraer de estos residuos se realiza el siguiente cálculo. Ya que el poder calorífico interno o PCI de los RSU puede encontrarse entre los 1200 y las 1800 Kcal/Kg para los RSU brutos, y entre 1800 y 3500 Kcal/Kg para algunos restos de tratamientos alternativos, se estimará un PCI de los RSU medio de 2000 Kcal/Kg. Junto al volumen de residuos, que como se ha visto en los datos de la Figura 26, es de unas 58.000 Tn, se puede obtener la energía que se podría conseguir de los residuos en un proceso ideal, sin contemplar los rendimientos energéticos, mediante el siguiente cálculo:

$$58.000 \frac{Tn}{año} * 1000 \frac{Kg}{Tm} * 2000 \frac{Kcal}{Kg} * \frac{1 año}{8760 horas} = 13,24 \frac{Gcal}{h} = 15,4 MW$$

6.2.2 Residuos forestales

Andalucía es una comunidad autónoma con grandes zonas forestales, incluyendo parajes naturales únicos en el mundo como la reserva de Doñana, la Sierra de Grazalema o Sierra Morena. El 51% de la superficie andaluza es superficie forestal, y de ella se pueden extraer anualmente 2,1 millones de Tm, como se muestra en la Figura 28, datos recopilados tomando una humedad del 22,2%, nivel de humedad con el que se consigue una equivalencia energética de 0,35 tep por cada tonelada métrica. Por ello, la energía equivalente de la biomasa disponible en Andalucía sería de 737.832 Tep/año.

Además, el acondicionamiento de los bosques es clave para evitar los incendios que arrasaron los montes andaluces cada verano, resultando en destrozos medioambientales, y el aprovechamiento energético de la biomasa sería un incentivo para hacerlo.

PROVINCIA	Biomasa forestal (t/año)			Tep/año
	Pública	Privada	Total	
Almería	40.988	39.107	80.095	228.843
Cádiz	33.730	105.410	139.140	48.699
Córdoba	31.057	345.394	376.451	131.758
Granada	76.590	158.009	234.599	82.110
Huelva	178.110	456.884	634.994	222.248
Jaén	142063	165.092	307.155	107.504
Málaga	38.288	81.032	119.320	41.762
Sevilla	21.335	195.002	216.337	75.718
Andalucía	562.161	1.545.930	2.108.091	737.832

Fuente: Plan Integrado de Aprovechamiento de la Biomasa Forestal. Consejería de Medio Ambiente. 2006

Figura 28: Posibilidad anual de extracción de biomasa forestal en Andalucía (Consejería de Medio Ambiente. 2006)

Para hacerse a la idea del desaprovechamiento de la biomasa, en Andalucía hay un total de 2.108.091 toneladas disponibles para ser recogidas. Sin embargo, la media de biomasa recogida en los años 2006 a 2010 según un informe de la Consejería de Agricultura y Pesca fue de 391.484 toneladas, es decir, solo se recogió el 18% de la biomasa accesible. Esto deja un claro margen de mejora a la hora de aprovechar los residuos disponibles y que, gracias a la gasificación por plasma, pueden ser transformados en una fuente de energía limpia y gestionable.

La fuente principal de biomasa forestal de Cádiz es el parque de los Alcornocales, el cual se encuentra a escasos kilómetros de la localización de la central de ciclo combinado, por lo que, si bien Cádiz no es la provincia que más biomasa genera, esta se encuentra en el radio de 40 Km establecido como requisito para ubicar la planta de tratamiento de residuos, pudiendo suplir sin un gasto excesivo en transportes a la central de los residuos necesarios. De hecho, como se ha comentado previamente sobre la comarca del Campo de Gibraltar, esta se encuentra conformada en un 81% por superficie forestal, en su mayor parte concentrada en el parque natural de los Alcornocales, pudiendo abastecer a la futura planta de tratamiento de residuos.

En la siguiente figura, se puede observar el potencial que tienen diferentes tipos de especies que se encuentran en las zonas forestales andaluzas:

ESPECIE FORESTAL	TIPO DE RESIDUO	P.C.I (kcal/kg)	Humedad (% b.h)	Años de tratamiento	DENSIDAD ENERGÉTICA SUPERFICIAL	
					te/ha*año	kg/ha*año
Pinus spp	Residuos de cortas finales y restos de poda	5.057	40 %	100	1.548,4	569
		4.686		80	6.835,0	2.379
				40		
Quercus ilex encina	Restos de poda (leña y ramón)	4.506	40 %	9	840,3	311
Quercus suber alcornoques	Restos de poda (leña y ramón)	4.383	40 %	9	711,3	270
Populus nigra chopo	Residuos de cortas finales	4.299	60 %	10	3.257,1	1.239
Eucaliptus globulus	Residuos de cortas finales	4.129	60 %	15	5.290,1	3.077
		4.468			4.611,7	2.792
					4.990,4	

Figura 29: Densidad energética media de diferentes residuos (Agencia Andaluza de la Energía, 2020)

Los residuos forestales serán una fuente importante de biomasa para la planta, debido a la gran extensión de zonas forestales (81% de la superficie del territorio) que se encuentran en la comarca del Campo de Gibraltar. Sin embargo, la elevada humedad de los residuos forestales tiene dos inconvenientes, uno insalvable que es el volumen que tienen, que implica un transporte menos eficiente, pero que al encontrarse cerca de la planta supone un menor problema, y uno que tiene solución, y es la problemática de que los residuos tan húmedos limitan el rendimiento del proceso, lo que puede solucionarse secando los residuos previo a entrar al reactor de gasificación, perdiendo la humedad hasta unos niveles que permiten elevar la eficiencia del proceso de gasificación.

Por otra parte, es interesante conocer el estado de la propiedad de las parcelas de superficie forestal, pues es diferente negociar la adquisición y recolección de biomasa de terrenos públicos que privados. Entorno a un 38% de la superficie forestal se encuentra en manos de la administración pública, a lo que hay que sumar los condominios firmados por los que una superficie total de 1.048 ha de montes de titularidad privada ceden la titularidad de la arboleda a la administración pública.

Para poder estimar la energía que se puede obtener a partir de la biomasa forestal, se realizará un sencillo cálculo para el que se necesita una serie de suposiciones. Apoyándonos en los datos de la Figura 29, se supondrá un PCI medio fijo de 4500, y un volumen de biomasa anual de 28.000 Tm (20% de la biomasa potencial de Cádiz), de la que se priorizaría que su procedencia fuese de dominio público, para evitar las complicaciones debidas a las negociaciones con los propietarios. De esta forma, se consigue la siguiente fórmula ideal, sin tener en cuenta rendimientos de ningún tipo:

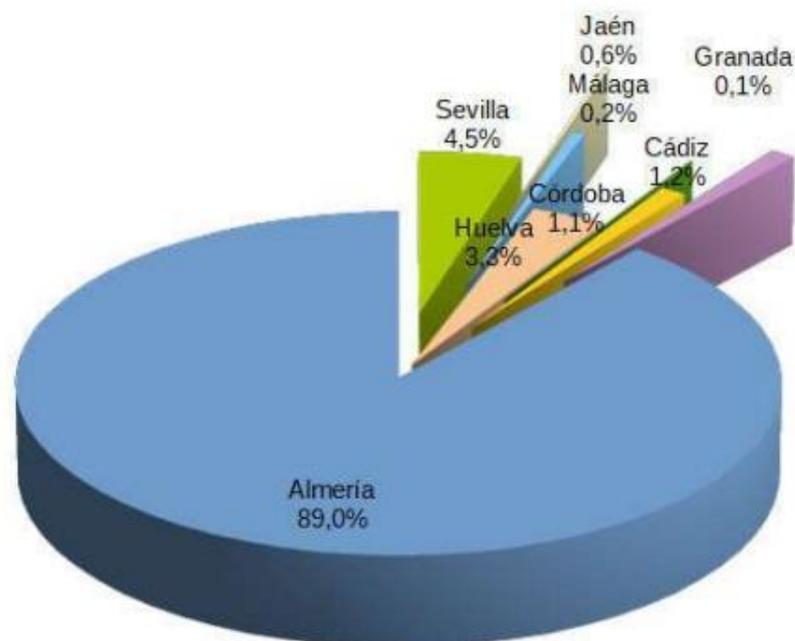
$$28.000 \frac{Tm}{año} * 1000 \frac{Kg}{Tm} * 4500 \frac{Kcal}{Kg} * \frac{1 año}{8760 horas} = 14,38 \frac{Gcal}{horas}$$

Lo que equivale a 16,72 MW.

6.2.3 Residuos Agrícolas:

Pese a que Andalucía es una tierra fértil y repleta de explotaciones agrícolas, especialmente los olivos en Jaén o el valle del Guadalquivir, en este proyecto no supondrán una gran fuente de biomasa, debido al escaso uso agrícola de las zonas cercanas a la planta de Algeciras (tan solo un 11 % de la comarca del Campo de Gibraltar está dedicado a la agricultura). Aun así, cabe analizar qué cantidad de energía podría conseguirse y plantear su incorporación o no en el proyecto según su viabilidad económica.

Como se puede ver en la Figura 30, en la comunidad de Andalucía, podemos observar que se generan 464.419 toneladas de residuos vegetales relacionados con la actividad agrícola, de los cuales un 89% se genera en la provincia de Almería, mientras que la provincia de Cádiz genera únicamente un 1,2% del total. La comarca del Campo de Gibraltar supone un 20% de la superficie de Cádiz, y el 11% de la superficie del campo de Gibraltar está dedicado a la agricultura, por lo que se puede extrapolar que en el campo de Gibraltar se generan unas 122 toneladas anuales de residuos vegetales en la comarca.



Fuente: MAG Y DAP

Figura 30: Generación de residuos vegetales en Andalucía por provincia (Surminas, 2018)

Se puede ver que es un número demasiado bajo de biomasa como para generar una cantidad importante de energía, por ello, si bien los residuos podrán ser tratados en la planta y supondrán una fuente de biomasa, no será rentable una recogida continuada de estos residuos, pudiendo establecer días del año que se organicen rutas de recogida de estos para su aprovechamiento puntual.

6.2.4 Resumen de residuos

Por su volumen, disponibilidad y facilidad de ser recogidos, los residuos sólidos urbanos harán posible la gestionabilidad del sistema, aportando una constante fuente de recursos para su tratamiento. Los residuos forestales, abundantes también, pasan a un segundo plano al depender de las campañas de acondicionamiento del parque natural, si bien pueden ser almacenados para su posterior tratamiento, aparte de llegar un mínimo de estos diariamente proveniente de los trabajos diarios de mantenimiento del parque de los Alcornocales.

Para el dimensionamiento de la planta se observa las 58.000 Tn anuales de RSU que son recogidas, a la vez que las 28.000 Tn anuales de residuos forestales. Traduciéndolo a toneladas por día, para mayor comodidad:

$$\frac{Tn\ RSU}{día} = \frac{58.000\ Tn\ \backslash año}{365\ días\ \backslash año} = 158,9$$

$$\frac{Tn\ R.\ forestal}{día} = \frac{28.000\ Tn\ \backslash año}{365\ días\ \backslash año} = 76.71$$

Por ello, la planta deberá tener una capacidad de 235,6 Tn diarias de residuos. Debido a la fluctuabilidad de los residuos forestales, se dejará un margen de seguridad para aquellos momentos en que se efectúen campañas de acondicionamiento especialmente en verano, dimensionando la planta para tratar 250 Tn diarias. Además, los módulos de máquinas ofertados por la empresa Materiales Renovados son de 5, 10, 35, 50, 125 y 250 Tn diarias, por lo que la que más se asimila a las necesidades del proyecto es la de 250 Tn/día. Debido a la gran diferencia de biomasa recogida entre los meses de verano y el resto, en vez de tener una planta de más capacidad, se utilizará un almacén para guardar la biomasa forestal hasta que sea conveniente su transformación, de manera que se trate diariamente la misma cantidad de residuos.

Se ha realizado una tabla que recoge los datos de los residuos que llegarían diariamente a la planta según los meses del año, estimando los valores según los datos recopilados de las instituciones:

Categoría	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
RSU (Tn)	5080,9	4141,2	4677,9	5127	4770,9	5007	4987,9	5173,9	4557	4708,9	4557	4863,9	57653,5
Forestal (Tn)	0,0	0,0	0,0	5893,3	6572,0	5773,2	5229,6	3571,1	977,3	0,0	0,0	0,0	28016,5
RSU día (Tn)	163,9	147,9	150,9	170,9	153,9	166,9	160,9	166,9	151,9	151,9	151,9	156,9	
Forestal diaria(Tn)	0,0	0,0	0,0	196,4	212,0	192,4	168,7	115,2	32,6	0,0	0,0	0,0	
Almacenamiento				117,3	115,9	109,3	79,6	32,1					
Residuos tratados al día	234,7	234,7	234,7	234,7	234,7	234,7	234,7	234,7	234,7	234,7	234,7	234,7	85670

Tabla 2: Plan estimado de los residuos tratados en la planta (Elaboración Propia)

Como se puede apreciar en la tabla, se ha considerado la estacionalidad de la producción de biomasa forestal, la cual se inicia meses antes del verano para acondicionar los bosques y así reducir el riesgo de incendios. La cantidad media de residuos tratados resulta de 234,7 toneladas, pudiendo variar dependiendo del posible aumento de los RSU en los próximos años debido al crecimiento de la ciudad u otros factores. Los valores de RSU se han elegido atendiendo a los datos recogidos por parte de ARCGISA en 2021, empresa encargada de la gestión de los residuos de Algeciras. La recogida de residuos se ha establecido entre abril y septiembre, con una reducción de la generación en los últimos meses, pero puede variar según se planifique de otra forma las campañas de poda y acondicionamiento del parque natural, según convenga a la planta, siempre que cumpla las necesidades del parque. Los residuos agrícolas, debido a su bajo volumen, no se considera relevante su consideración, pues conforman una cantidad asumible por la planta en cualquier momento, y cuyo tratamiento no supondrá ningún problema de capacidad.

7. Ciclos Combinados

7.1 Descripción de las centrales de ciclo combinado

Las centrales de ciclo combinado las conforman dos ciclos térmicos diferentes que generan electricidad, uno a partir de gas como combustible, el ciclo Bryton, y el otro mediante una turbina que es accionada por vapor de agua, generado aprovechando el calor desprendido en el ciclo de gas, denominado ciclo Rankine.

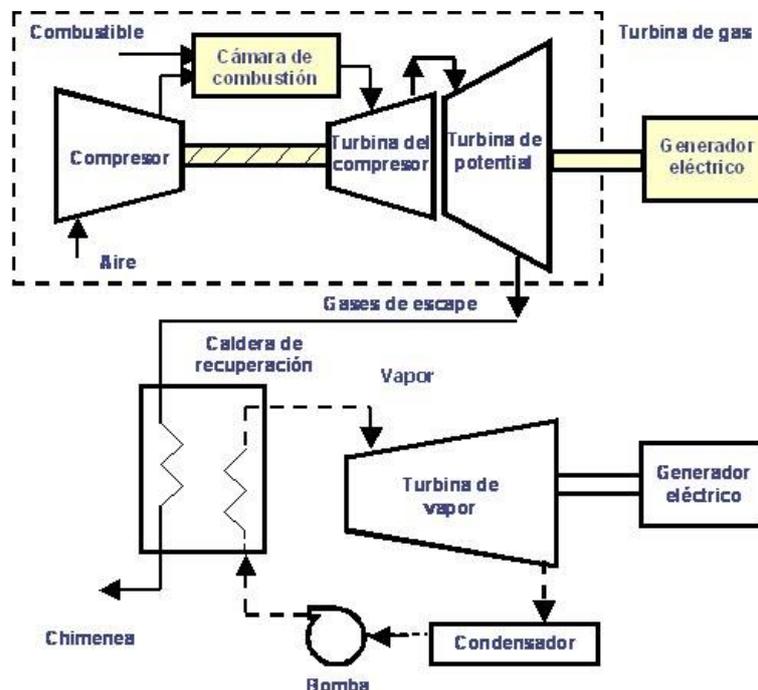


Figura 31: Esquema de central de ciclo combinado (S.G. Guerra, 2005)

El proceso consta de varias etapas, que se describen a continuación:

- Ciclo Bryton:

El ciclo Bryton es el principal ciclo termodinámico del sistema de ciclo combinado y es el que, a partir de un combustible, usualmente gas natural o fuel, alimenta una turbina de gas para la generación de electricidad.

Para la alimentación de la turbina, se necesita previamente realizar ciertos procesos:

- Compresión de aire. El gas se comprime previo a su mezcla con el combustible para que la turbina trabaje a las condiciones idóneas que favorezcan la generación de potencia mecánica, que se traduce en un mayor rendimiento de la turbina y mayor generación eléctrica. El

compresor se encuentra unido al eje de la turbina de gas para poder trabajar con la propia energía generada en el ciclo.

- Adición del gas combustible al flujo de aire comprimido.
- Paso por la turbina, generación eléctrica.
- Traslado de los gases de salida de la turbina hacia la caldera de recuperación, donde mediante un intercambiador de calor, concretamente un condensador, se aprovechará la elevada temperatura de los gases de salida en el ciclo Rankine, además de enfriar los gases que deben ser emitidos a la atmósfera a una temperatura dentro de los valores estipulados por las instituciones, de manera que no suponga un foco de contaminación térmico.

- Ciclo Rankine

Su función es la de aprovechar la alta temperatura de los gases que pasan por la turbina para producir vapor de agua que accionará una turbina de vapor, generando electricidad y aumentando el rendimiento global del ciclo combinado. Este ciclo ha sido implementado en la planta de gasificación por plasma y explicado detalladamente en el apartado 3.2.2.

7.2 Situación de los Ciclos Combinados en España

En España, suponen el 23% de la potencia instalada, resultando en un 15-20% de la generación eléctrica nacional. Su papel es el de ajustar la demanda que las energías renovables y nuclear no sean capaces de suministrar, siendo claves debido a la indisponibilidad de las energías renovables en ciertos momentos, en los que se necesita de una tecnología que pueda aumentar la generación sin mucha capacidad de previsión. Para este cometido, los ciclos combinados son ideales pues lo único que se necesita es aumentar o reducir el combustible utilizado, y así se sigue priorizando la generación renovable sin poner en riesgo la cobertura de la demanda.

El mayor inconveniente de la generación de electricidad por medio de ciclos combinados es la contaminación. En la siguiente figura se puede apreciar la generación de CO₂ por las diferentes tecnologías térmicas en España en los últimos años:

Emisiones nacional

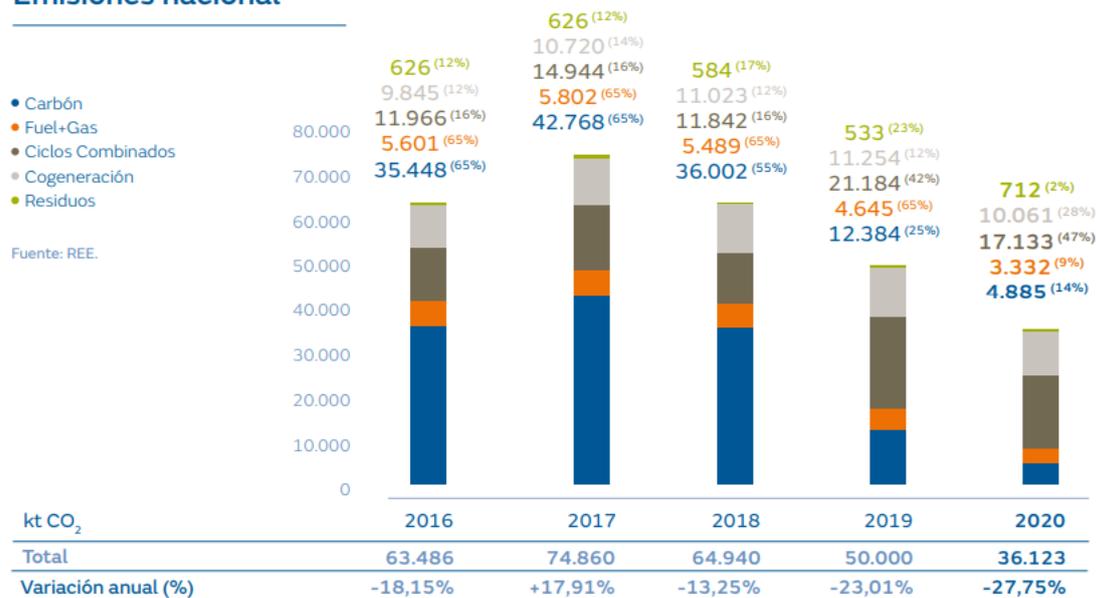


Figura 32: Evolución de las emisiones nacionales de CO₂

Se puede apreciar una clara e importante reducción de las emisiones en los últimos años, especialmente con la supresión casi total del carbón como fuente de energía eléctrica, gracias al aumento de la generación por parte de energías renovables. De esta manera, los ciclos combinados han pasado a ser la tecnología que mayor nivel de emisiones de CO₂ genera en el país, debido a su mayor implicación en la generación eléctrica.

7.3 Central de Ciclo Combinado Bahía de Algeciras

Este proyecto tiene lugar en la ciudad de Algeciras, concretamente en la planta de ciclo combinado Bahía de Algeciras. La planta se inauguró en 1970, siendo inicialmente una planta que se componía de dos grupos térmicos de fuel-gas, hasta que se reconvirtió en 2011 y ahora opera completamente a gas natural. Actualmente pertenece al 100% a la compañía Repsol.

En cuanto a sus características técnicas, la planta de CC Bahía de Algeciras cuenta con una potencia máxima instalada de 821 MW, conseguida por dos grupos de 400MW y un único grupo de cogeneración de 270 MW. La operan 45 trabajadores y como combustible utiliza gas natural.

En la siguiente gráfica, se puede observar la generación eléctrica de las centrales térmicas de Andalucía:

Centrales	Tipo	Potencia MW	Energía (GWh)		
			2018	2019	% 19/18
Puentenuevo 3	Carbón	300	908	490	-46,0
Litoral de Almería	Carbón	1.120	6.953	1.747	-74,9
Los Barrios	Carbón	570	3.009	637	-78,8
San Roque 1	Ciclo combinado	390	1.325	1.434	8,2
San Roque 2	Ciclo combinado	402	259	404	56,0
Arcos 1	Ciclo combinado	389	270	792	193,1
Arcos 2	Ciclo combinado	373	151	697	362,5
Arcos 3	Ciclo combinado	823	1.182	2.889	144,5
Palos 1	Ciclo combinado	387	0	13	-
Palos 2	Ciclo combinado	389	230	15	-93,5
Palos 3	Ciclo combinado	391	-4	-4	-
Campo de Gibraltar 1	Ciclo combinado	393	-1	-3	-
Campo de Gibraltar 2	Ciclo combinado	388	-4	1.450	-
Colón 4	Ciclo combinado	391	109	328	201,4
Algeciras 3 CC	Ciclo combinado	821	562	3.342	495,0
Málaga 1 CC	Ciclo combinado	416	2.185	1.584	-27,5
Andalucía		7.941	17.134	15.816	-7,7

Tabla 3: Generación eléctrica a partir de fuentes térmicas de Andalucía (REE, 2020)

La central de estudio es Algeciras 3 CC en la tabla, la cual generó 3.342 GWh en 2019, multiplicando por 5 la generación de 2018, y lo que significa un grado de utilización de la planta del 49%, un valor muy elevado en comparación con la media española, que se encuentra en torno al 20%.

Es interesante analizar el impacto que tiene el proyecto en las emisiones de CO₂ de la central de ciclo combinado, uno de los objetivos del proyecto.

Se ha obtenido (ver apartado 8.3 flujos de caja) que la producción de syngas de la planta de gasificación por plasma es de 11988,58 Nm³/h, lo que equivale a 105.019.960 Nm³/año. Por otra parte, la central de ciclo combinado Bahía de Algeciras tuvo un consumo anual de gas natural de 487.441.781 Nm³/año (PRTR, 2021). De esta manera, suponiendo que el 50% del gas de síntesis producido en la planta se destina a la central de ciclo combinado, se puede obtener el porcentaje del consumo de combustible de la planta que supondrá el gas de síntesis:

$$\text{Syngas destinado a la CCC} = 105.019.960 \frac{\text{Nm}^3}{\text{año}} * 50\% = 52.509.980 \frac{\text{Nm}^3}{\text{año}}$$

$$\text{Porcentaje syngas en CCC} = \frac{487.441.781 - 52.509.980}{487.441.781} * 100\% = 10,77\%$$

Esto implica que el 10,77% del combustible no renovable sería sustituido por el gas de síntesis bajo en emisiones de CO₂, reduciendo las emisiones de la planta, teniendo en cuenta la composición del gas de síntesis (Adi Sesotvo, 2019), entorno a un 8%. De esta forma, conociendo que la central de ciclo combinado Bahía de Algeciras produjo en 2020 1.040.000.000 kg de CO₂, se dejarían de emitir 83.200.000 kg de CO₂ anuales.

7.4 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Ciudades y comunidades sostenibles: Uno de los objetivos de este proyecto es tratar los residuos urbanos de forma que no contaminen, sustituyendo los vertederos controlados, de acuerdo con las directrices de la unión europea. Otros procesos de tratamiento de residuos como la incineración o gasificación a temperaturas inferiores generan residuos tóxicos (dioxinas y furanos). Por otro lado, el plasma desintegra las moléculas orgánicas a una temperatura tan elevada que las moléculas se desintegran e impide la formación de compuestos contaminantes, resultando en un proceso que no contamina, y cuyos compuestos inorgánicos forman un vitrificado inerte.

Acción por el clima: La reducción de gases contaminantes y de efecto invernadero es clave para la sostenibilidad del planeta, y una parte importante es generada al quemar los residuos urbanos. El tratamiento por gasificación por plasma es el menos contaminante, ya que elimina completamente los residuos sin crear componentes secundarios nocivos.

Salud y bienestar: Uno de los principales problemas que este trabajo trata de mejorar es eliminar la contaminación derivada de los vertederos controlados y los incendios forestales. Estos emanan a lo largo de su proceso gases nocivos para los humanos, pero sobretodo su mayor riesgo es la contaminación de aguas subterráneas, ya que al descomponerse los componentes orgánicos se acumulan en forma líquida y de ocurrir un derrame o filtración puede llegar a los acuíferos que se utilizan para suplir el agua de una comunidad. De hecho, dada sus malas características medioambientales, la Agenda 2030 establece que, para entonces, los residuos tratados en vertederos controlados no deberán superar el 10% de los residuos recogidos. El tratamiento mediante gasificación por plasma no contamina de ninguna forma porque disocia las moléculas, y debido a las temperaturas que se alcanzan, no permite que se formen compuestos contaminantes. Por ello, se ha optado por esta tecnología que, además, puede aprovechar la energía de los residuos.

Vida de ecosistemas terrestres. Al tener un potencial para generar energía en las plantas de gasificación por plasma, se incentivará a reciclar y recoger todos los residuos orgánicos posibles de bosques o cualquier otra fuente de biomasa, acondicionando así los ecosistemas, evitando posibles incendios y otros desastres naturales como la muerte de animales por ingesta de basura.

Energía asequible y no contaminante: El hidrógeno obtenido a partir de la gasificación por plasma es una fuente de energía muy limpia, que contribuye a solucionar el problema de la contaminación en los núcleos urbanos, y se establece como una forma de energía que no contamina. Además, su incorporación al gas natural disminuirá la dependencia de España al gas extranjero y el precio de la energía generada en ciclos combinados y otros sistemas que utilicen el gas natural será menor.

III. Financiación del proyecto

8. Estudio económico de la tecnología de gasificación por plasma

La planta de tratamiento de residuos se divide en dos etapas claramente diferenciadas:

- Gasificación por plasma de los residuos.
- Ciclo Rankine para la utilización del calor proveniente del syngas.

En los siguientes apartados se estudiará económicamente cada uno de los procesos:

En este proyecto de la ciudad de Algeciras se espera recoger unas 86.000 toneladas de residuos anuales, lo que equivale a 234,7 toneladas tratadas diariamente, considerando el funcionamiento continuado las 8760 horas del año.

En este apartado se obtendrá el precio al que se pretende vender el gas de síntesis, así como la cantidad a generar y las ganancias que se pueden conseguir por su venta. Además, se calcularán los costes de inversión y de explotación totales de la planta.

Para la elaboración del análisis económico, se han de presentar ciertos supuestos:

- Se establece una vida útil del proyecto de 30 años.
- La inversión se entregará íntegramente el primer año.

La construcción de la planta de gasificación será adjudicada a una EPC (Engineering, Procurement and Construction), de manera que será esta empresa la que se encargue de elaborar el diseño de las instalaciones, así como los suministros necesarios y la propia construcción de estas.

8.1 Inversión Inicial: CAPEX

La inversión inicial consta de aquellas partes necesarias para comenzar a operar la planta de gasificación. Esta incluye todos los elementos del reactor (vasija, antorchas de plasma, sistema de control centralizado, sistema almacenamiento y recogida de residuos, tanques para el almacenamiento del hidrógeno, etc.).

Para la obtención de los datos económicos, se han recopilado datos de los trabajos de fin de grado de Enrique Iber y Antonio García, y del trabajo de fin de master de Almudena Valenciano.

INVERSIÓN EN:	CAPEX (€)
GASIFICACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS	69.550.000
ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO	17.000.000
CICLO RANKINE	7.500.000
TOTAL	94.050.000

Tabla 4: Inversión inicial (Elaboración Propia)

La inversión en el proceso de gasificación por plasma se ha obtenido fijándose los datos del trabajo de Antonio García, 2021, dimensionando los datos para la planta de gasificación de este proyecto. Se obtiene la cuantía de 94.050.000€, que se devolverá en 30 años, resultando en una amortización anual que deberá tener en cuenta los intereses de la inversión, los cuales se estiman sean del 6,5%. De este modo, se puede obtener la amortización anual como:

$$f_a = 0,065 * \frac{(1 + 0,065)^{30}}{(1 + 0,065)^{30} - 1} = 0,0766$$

$$A = f_a * Inv = 0,0766 * 94.050.000 = 7.202.108 \text{ €}$$

:

8.2 Costes de operación: OPEX

Otra parte fundamental para el análisis económico de un proyecto es el OPEX (OPERational EXpenditure), esto es, los costes por el propio funcionamiento de la planta. Se tendrán en cuenta el proceso de gasificación por plasma, el almacenamiento del hidrógeno y el ciclo Rankine.

OPEX / Año	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7
Recogida de residuos(Tn)	85670	85671	85672	85673	85674	85675	85676
Prod. Energía ciclo Rankine (MWh)	3281,88557	3281,88557	3281,88557	3281,88557	3281,88557	3281,88557	3281,88557
Producción de H2 (MWh)	80770	80770	80770	80770	80770	80770	80770
FTE operarios	20	20	20	20	20	20	20
FTE jefes de planta	5	5	5	5	5	5	5
Factor de rotura de equipos	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
Factor de O&M	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Mantenimiento equipos gasificación							
Productos químicos	231309	231311,7	231314,4	231317,1	231319,8	231322,5	231325,2
Electrodos	128505	128506,5	128508	128509,5	128511	128512,5	128514
Antorchas	128505	128506,5	128508	128509,5	128511	128512,5	128514
Costes O&M Ciclo Rankine (€)	157530,507	157530,507	157530,507	157530,507	157530,507	157530,507	157530,507
Nóminas: Operarios (€)	306000	306000	306000	306000	306000	306000	306000
Nóminas: jefes de planta (€)	121500	121500	121500	121500	121500	121500	121500
TOTAL	1243071,39	1243078,09	1243084,79	1243091,49	1243098,19	1243104,89	1243111,59

Tabla 5: OPEX 1(Elaboración Propia)

OPEX / Año	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10	AÑO 11	AÑO 12	AÑO 13	AÑO 14	AÑO 15
Recogida de residuos(Tn)	85677	85678	85679	85680	85681	85670	85670	85670
Prod. Energía ciclo Rankine (MWh)	3281,88557	3281,88557	3281,88557	3281,88557	3281,88557	3281,88557	3281,88557	3281,8
Producción de H2 (MWh)	80770	80770	80770	80770	80770	80770	80770	80770
FTE operarios	20	20	20	20	20	20	20	20
FTE jefes de planta	5	5	5	5	5	5	5	5
Factor de rotura de equipos	30%	30%	30%	65%	65%	65%	65%	65%
Factor de O&M	80%	80%	80%	90%	90%	90%	90%	90%
Mantenimiento equipos gasificación								
Productos químicos	231327,9	231330,6	231333,3	501228	501233,85	501169,5	501169,5	501169,5
Electrodos	128515,5	128517	128518,5	278460	278463,25	278427,5	278427,5	278427,5
Antorchas	128515,5	128517	128518,5	278460	278463,25	278427,5	278427,5	278427,5
Costes O&M Ciclo Rankine (€)	157530,507	157530,507	157530,507	177221,821	177221,821	177221,821	177221,821	177221,8
Nóminas: Operarios (€)	306000	306000	306000	306000	306000	306000	306000	306000
Nóminas: jefes de planta (€)	121500	121500	121500	121500	121500	121500	121500	121500
TOTAL	1243118,29	1243124,99	1243131,69	1832601,71	1832615,06	1832468,21	1832468,21	1832468,2

Tabla 6: OPEX 2(Elaboración Propia)

OPEX / Año	AÑO 16	AÑO 17	AÑO 18	AÑO 19	AÑO 20	AÑO 21	AÑO 22	AÑO 23
Recogida de residuos(Tn)	85670	85670	85670	85670	85670	85670	85670	85670
Prod. Energía ciclo Rankine (MWh)	3281,8	3281,8	3281,8	3281,8	3281,8	3281,8	3281,8	3281,8
Producción de H2 (MWh)	80770	80770	80770	80770	80770	80770	80770	80770
FTE operarios	20	20	20	20	20	20	20	20
FTE jefes de planta	5	5	5	5	5	5	5	5
Factor de rotura de equipos	65%	65%	65%	65%	65%	100%	100%	100%
Factor de O&M	90%	90%	90%	90%	90%	100%	100%	100%
Mantenimiento equipos gasificación								
Productos químicos	501169,5	501169,5	501169,5	501169,5	501169,5	771030	771030	771030
Electrodos	278427,5	278427,5	278427,5	278427,5	278427,5	428350	428350	428350
Antorchas	278427,5	278427,5	278427,5	278427,5	278427,5	428350	428350	428350
Costes O&M Ciclo Rankine (€)	177221,8	177221,821	177221,821	177221,821	177221,821	196913,134	196913,134	196913,1
Nóminas: Operarios (€)	306000	306000	306000	306000	306000	306000	306000	306000
Nóminas: jefes de planta (€)	121500	121500	121500	121500	121500	121500	121500	121500
TOTAL	1832468,21	1832468,21	1832468,21	1832468,21	1832468,21	2421865,02	2421865,02	2421865,02

Tabla 7: OPEX 3 (Elaboración Propia)

OPEX / Año	AÑO 24	AÑO 25	AÑO 26	AÑO 27	AÑO 28	AÑO 29	AÑO 30	TOTAL
Recogida de residuos(Tn)	85670	85670	85670	85670	85670	85670	85670	2570166
Prod. Energía ciclo Rankine (MWh)	3281,8	3281,8	3281,8	3281,8	3281,8	3281,8	3281,8	98456,5672
Producción de H2 (MWh)	80770	80770	80770	80770	80770	80770	80770	2423100
FTE operarios	20	20	20	20	20	20	20	
FTE jefes de planta	5	5	5	5	5	5	5	
Factor de rotura de equipos	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Factor de O&M	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Mantenimiento equipos gasificación								
Productos químicos	771030	771030	771030	771030	771030	771030	771030	15035329,4
Electrodos	428350	428350	428350	428350	428350	428350	428350	8352960,75
Antorchas	428350	428350	428350	428350	428350	428350	428350	8352960,75
Costes O&M Ciclo Rankine (€)	196913,1	196913,1	196913,1	196913,1	196913,1	196913,1	196913,1	
Nóminas: Operarios (€)	306000	306000	306000	306000	306000	306000	306000	
Nóminas: jefes de planta (€)	121500	121500	121500	121500	121500	121500	121500	
TOTAL	2421865,02							

Tabla 8: OPEX 4 (Elaboración Propia)

Para los costes de operación del sistema de gasificación por plasma, se han recogido los datos ofrecidos en el trabajo de fin de master de Almudena Valenciano, 2015. Se han recopilado en la siguiente tabla a modo de resumen:

OPERACIÓN	€/TN
PRODUCTOS QUÍMICOS	9
ELECTRODOS	5
MANTENIMIENTO REFRACTARIO Y ANTORCHAS	5
MANTENIMIENTO GENERAL	6

Tabla 9: Costes por tonelada de operar la planta de gasificación por plasma (Elaboración Propia)

Para los costes del ciclo Rankine, se ha elegido un precio en base a los KWh generados por el ciclo. Este ha sido de 75 €/KWh. Además, se ha añadido un factor que modela la probabilidad en el tiempo de utilizar los servicios de mantenimiento y operación, reflejando la mayor probabilidad de necesitar mantenimiento conforme pasa el tiempo.

En cuanto a los costes de personal de la planta, se ha establecido que se contratarán 25 empleados, de los cuales veinte serán operarios y cinco serán jefes de la planta, trabajando 8 horas. Se ha establecido un salario neto de 17.000€ anuales para los operarios, y de 27.000€ para los jefes.

8.3 Flujos de caja

Es necesario la elaboración de un presupuesto anual para presentar el proyecto a los inversores, para que puedan conocer con la información relevante las garantías del proyecto para la devolución de su inversión. Por ello, se ha realizado una estimación realista de los flujos de caja, los cuales se han recopilado en la tabla mostrada a continuación:

FLUJOS DE CAJA			
	Tn/año	€/Tn	€/año
RSU	58.000	55,77	3.234.600
Res. Biomásicos	28.000	55	1.540.000
Venta Gas Síntesis			24.572.700
Ingresos Totales			29.347.300
OPEX medio anual			
			1.832.500
EBITDA			27.514.800
Amortización anual (prorrateada al año 1)			
			7.202.100
EBIT			20.312.700
Intereses			
			6.113.250
EBT			14.199.450
Impuestos sobre beneficios (25%)			
			3.549.800
Beneficio neto anual			10.649.600

Tabla 10: Flujos de caja (Elaboración Propia)

Posteriormente, se analizará la rentabilidad de la inversión, para comprender si los resultados obtenidos en el flujo de caja son suficientes o no para la viabilidad del proyecto.

A continuación, se desglosan los ingresos de la planta:

Contrato de gestión de recogida de residuos:

Para el correcto funcionamiento de la planta, se necesita una fuente de residuos continua a lo largo del año de residuos urbanos y forestales, por lo que es necesario llegar a un acuerdo con el Ayuntamiento de Algeciras a largo plazo para la gestión de los residuos de la ciudad. Se ha de pactar un precio para la gestión de los residuos, el cual se basará en el actual precio impuesto por el Ayuntamiento.

En cuanto a los residuos sólidos urbanos, se estipula, según datos del B.O.P de Cádiz de 2020, un precio de 46,09€/Tn, IVA excluido, por lo que se ofertará un precio de 55,77€/Tn incluyendo el IVA del 21%. En la ciudad de Algeciras se recogen 58.000 toneladas métricas de RSU anuales, por lo que el proyecto se ha dimensionado para poder garantizar el tratamiento de esas cantidades, teniendo en cuenta un posible incremento de la generación de RSU del 5%. Con estos datos, se opera para conseguir los ingresos anuales por la recogida de RSU:

$$\text{Ingresos RSU} = 58.000 \frac{\text{Tn}}{\text{año}} * 55,77 \frac{\text{€}}{\text{Tn}} = 3.234.596 \text{ €}$$

A su vez, la planta está diseñada para el tratamiento de 28.000 toneladas de residuos biomásicos, esencialmente forestales, obtenidos en los meses entre abril y septiembre, momento en el que se realizan las campañas más importantes de acondicionamiento del Parque Natural de los Alcornocales, almacenando los residuos de forma que puedan suplir, junto a los RSU, de forma continua a la planta durante el año. Se estima que la gestión de residuos forestales tenga un precio de unos 55 €/Tn. De esta forma queda:

$$\text{Ingresos R. Biomasicos} = 28.000 \frac{\text{Tn}}{\text{año}} * 55 \frac{\text{€}}{\text{Tn}} = 1.540.000 \text{ €}$$

Ingresos por la venta del gas de síntesis

El mayor montante de ingresos será debido a la venta del gas de síntesis para la generación eléctrica en la central de ciclo combinado y el verter el excedente a la red de gas nacional. A la hora de establecer un precio para el gas de síntesis, se ha de relacionar al precio del gas natural o el petróleo, siendo sus principales competencias. Para elegir un precio al que ofertar el syngas, primero se ha de calcular la cantidad que se producirá en la planta:

La planta de gasificación del proyecto se espera que trate 85.670 toneladas al año, que equivalen a 9.780 Kg/h. La empresa Open Ms establece que por cada 550 Kg/h de biomasa se consigue 1MW de potencia (Plantas Catalíticas de Biomasa Para Generación Eléctrica y Térmica, n.d.). Por todo ello, cumpliendo las expectativas de recogida de residuos se obtendrían 17,78 MW. Aun así, para ser prudentes, se estimará una generación de 14 MW. Además, se ha de considerar los rendimientos del ciclo Rankine, el cual se considera del 35%, lo que significa que se genera gas de síntesis equivalente a 35 MWh (Antonio García, 2021), equivalentes a 126.000 MJ/h.

Se ha de calcular la cantidad de energía que se puede conseguir a partir del syngas, teniendo en cuenta su composición (Adi Sesotyo, 2019):

$$PCI_{\text{syngas}} = 48,34\% * PCI_{H_2} + 30,94\% CO + 18,06\% H_2O + 0,74\%CO_2 + 0,61N_2 = 10,51 \frac{Mj}{Nm^3}$$

$$PCI_{CO} = 11,51 MJ/ Nm^3 ; PCI_{CO_2} \approx 0 ; PCI_{H_2} = 10,78 MJ Nm^3 ; PCIN_2 \approx 0 ; PCI_{H_2O} = 9,63 MJ/ Nm^3$$

Una vez se tiene el PCI del gas de síntesis, y conociendo la potencia objetivo generada en la planta, teniendo en cuenta los rendimientos del ciclo Rankine y las pérdidas de calor en la turbina y el condensador, se ha obtenido el volumen de gas de síntesis que se produce:

$$Vol. Syngas = \frac{126.000 \text{ Mj/h}}{10,51 \text{ MJ/Nm}^3} = 11.988,58 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

De esta forma, se puede conocer el volumen de gas de síntesis obtenido por cada tonelada:

$$Ratio \frac{\text{syngas}}{\text{residuos}} = \frac{11.988.58 \text{ Mj/h}}{9,78 \text{ Tn/h}} = 1.225.8 \text{ Nm}^3/\text{Tn}$$

Habiendo calculado el syngas y sus características concretas, se puede hacer una propuesta de los ingresos por vender el syngas a la central de ciclo combinado y la red de gas natural nacional. Se va a considerar que 2/3 del syngas puede ser aprovechado como gas natural, dejando una generación de 9561 kWh/Tn. Por otro lado, el precio del gas está disparado, el cual ha llegado a casi duplicar el precio del Kwh con respecto a 2021, llegando a los 0,045€/kWh, debido a la situación de crisis mundial por la guerra en Ucrania y la inflación. Las previsiones no apuntan a una pronta relajación del precio de este, pero por prudencia se tomará un valor de 0,03€/kWh, pues además uno de los objetivos del proyecto es hacer frente al elevado precio del gas impuesto por los países que poseen su producción.

$$Ingresos Syngas = 85670 \text{ Tn} * 0,03 \frac{\text{€}}{\text{Kwh}} * 9561 \frac{\text{kWh}}{\text{Tn}} = 24.572.726\text{€}$$

8.4 Retorno de la inversión

Para conocer concretamente el momento en el que se devuelve la inversión y se comienza a generar rentabilidad al proyecto, se utilizará el llamado payback, que mediante una interpolación lineal obtiene la fecha exacta. Para ello se debe conocer en qué momento el proyecto comienza a ser rentable, realizando un flujo de cajas.

Como se puede apreciar en la siguiente tabla, sacada de una sección del flujo de cajas, a partir del año 9 el proyecto comienza a ser rentable:

	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9
Flujo de caja operativo	11.101.446	11.101.446	11.101.446	11.101.446	11.101.446	11.101.446
Flujo de caja acumulado	-49.644.214	-38.542.768	-27.441.321	-16.339.875	-5.238.428	5.863.018

Tabla 11: Extracto del flujo de cajas (Elaboración propia)

De esta forma, se obtiene el siguiente payback:

Parámetros:

a: Periodo anterior al de retorno de la inversión

b: Sumatorio de los flujos de caja hasta el periodo "a"

FC: Valor del flujo de caja del año en el que se recupera la inversión

$$\text{Payback} = a + \frac{\text{Inversión} - b}{FC}$$

$$\text{Payback} = 9 + \frac{94.050.000 - 88.811.572}{11.101.446} = 9,47 \text{ años}$$

Otro parámetro interesante para los inversores es el denominado ROI, con el que se puede analizar la capacidad de la inversión para obtener rentabilidad, tomando valores positivos para aquellos casos rentables, y negativos para aquellas inversiones infructuosas. El cálculo se realiza dividiendo el beneficio antes de impuestos entre el montante total de la inversión efectuada:

$$ROI = \frac{14.199.450}{94.050.000} * 100 \% = 15,1\%$$

Tal y como se puede ver, 15,1% es un valor que indica una inversión altamente rentable.

Bibliografía

Acciona. (n.d.). *Recuperación energética de los residuos sólidos urbanos*.

Adi Sesotyo, *Plasma gasification modeling of municipal solid waste from Jatibarang*

Landfill in Semarang, Indonesia: analyzing its performance parameters for

energy potential. (2019, enero). Recopilado el 18 de Junio de 2021 de la página

web:

https://www.researchgate.net/publication/336849590_Plasma_gasification_modeling_of_municipal_solid_waste_from_Jatibarang_Landfill_in_Semarang_Indonesia_analyzing_its_performance_parameters_for_energy_potential

Agencia andaluza de la energía. (2020, abril). *LA BIOENERGIA EN ANDALUCÍA*.

https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/3_2_0068_20_LA_BIOENERGIA_EN_ANDALUCIA.PDF

Agencia de Gestión Agraria y Pesquera de Andalucía. (2014, septiembre).

Caracterización agraria del territorio de la Oficina Comarcal Agraria “Campo de Gibraltar”, provincia de Cádiz.

https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/estudios_informes/16/06/1101_OCA_Campo%20de%20Gibraltar.pdf

Agenda Urbana Algeciras 2030. (s. f.). *Dimensión ambiental*.

https://www.agendaurbanaalgeciras.es/wp-content/uploads/DA_OK_compressed.pdf

Agro Waste. (s. f.). *Pirólisis*. <https://silo.tips/download/los-gases-combustibles-pueden-servir-para-accionar-motores-diesel-para-producir>

Ariema. (s. f.). *Almacenamiento de hidrógeno*. Ariema.com. Recuperado 16 de mayo de 2022, de <https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2>

Banco Mundial de Datos. (s. f.). *Producción de electricidad a partir de carbón (% del total)*.
<https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.COAL.ZS?end=2015&start=1960&view=chart>

Consejería de Medio Ambiente. (2006). *Plan Integrado de Aprovechamiento de la Biomasa Forestal*.

Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. (2017, septiembre).
DECRETO 150/2017. (Pag 126)

Diputación de Cádiz. (s. f.). *Instalaciones de eliminación y tratamiento de residuos*.
Gobierno Abierto: Diputación de Cádiz. Recuperado 12 de mayo de 2022, de
<https://datosabiertos.dipucadiz.es/resource/?ds=vertederos&id=ed7c355e-a003-472b-bb9a-ab03e8d16fcc&ft=CSV>

Diputación Provincial de Cádiz. (2022, junio). *B.O.P. DE CADIZ* (N.º 114).

https://www.bopcadiz.es/export/sites/default/boletines_pdf/2020/06_junio/BOP_114_18-06-20.pdf

Enagas. (2021). *Informe Anual*.

Flavio Millán, J. (2017, septiembre). *MAQUINAS Y EQUIPOS TÉRMICOS II*.

<http://maquinasyequipostermicos02.blogspot.com/2017/09/unidad-i-ciclos-de-vapor.html>

García, A. (2021, junio). *Trabajo de Fin de Grado: RECUPERACIÓN ENERGÉTICA SOSTENIBLE DE RESIDUOS BIOMÁSICOS AGRÍCOLAS, FORESTALES Y URBANOS*.

Garrido, S. G. (s. f.). *Turbinas de GAS*. Centrales térmicas de ciclo combinados.

Recuperado 3 de junio de 2022, de

<http://www.cicloscombinados.com/index.php/articulos/articulos-avanzados/turbinas-de-gas/turbinas-de-gas>

Gobierno de España. (2009). *Estadísticas Anuario 2009*.

https://www.mapa.gob.es/estadistica/pags/anuario/2009/AE_2009_12.pdf

Gobierno de España. (2021). *Distribución superficie en Andalucía*.

https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/andalucia_tcm30-584041.pdf

Grupos Bravo. (s. f.). *¿Cómo es la refrigeración por AGUA en los grupos electrógenos?*

GruposBravo.com. Recuperado 20 de mayo de 2022, de

<https://gruposbravo.com/blog/como-es-la-refrigeracion-por-agua-en-los-grupos-electrogenos--b38.html>

Iber, E. (2022, agosto). *Trabajo de Fin de Grado: ESTUDIO DE UNA MICRORRED INTELIGENTE EN LA CIUDAD DE CIUDAD REAL.*

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007, abril). *Biomasa: Gasificación.*

https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10737_biomasa_gasificacion_07_d2adcf3b.pdf

IES Valle del Saja. (2014, octubre). *Pilas de combustible: ¿sustituto energético también para pequeños dispositivos electrónicos?* <http://www.fqsaja.com/?p=8253>

Junta de Andalucía. (2021, abril). *Plan Integral de Residuos de Andalucía. Hacia una Economía Circular en el Horizonte 2030.* https://www.aborgase.com/wp-content/uploads/2021/09/PIRec_2030_Definitivo_compressed.pdf

Naturgy. (2021, junio). *El sector eléctrico español en números: Informe 2020.*
Fundación Naturgy.

PRTR. (2021). *Informe detallado CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO*

BAHÍA DE ALGECIRAS / PRTR España. PRTR-es. Recuperado 21 de mayo de 2022, de https://prtr-es.es/informes/fichacomplejo.aspx?Id_Complejo=7419

Recharge News. (2021, junio). *World's largest «green hydrogen» offtake deal signed in California by waste-to-H2 start-up*. <https://www.rechargenews.com/energy-transition/worlds-largest-green-hydrogen-offtake-deal-signed-in-california-by-waste-to-h2-start-up/2-1-1020363>

Red Eléctrica de España. (2022, enero). *El sistema eléctrico español*.

https://www.ree.es/sites/default/files/publication/2022/03/downloadable/Avance_ISE_2021.pdf

Ruiz García, A. I. (s. f.). *Depósitos de Residuos Sólidos Urbanos e Inertes*.

Sedigas. (2021). *Informe anual 2020 El gas en España*.

<https://www.sedigas.es/informeanual/2020/wp-content/uploads/2021/05/INFORME-ANUAL-2020.pdf>

Sener. (2022). *SENER takes part in the first green hydrogen plant in Amorebieta*.

Recuperado 2 de junio de 2022, de <https://www.energy.sener/press-releases/the-first-green-hydrogen-plant-that-maximizes-the-use-of-existing-infrastructure-in-spain-will-start-operations-in-amorebieta-in-2022>

Surminas. (2019, diciembre). *INFORME SOBRE PRODUCCIÓN Y GESTIÓN DE RESIDUOS NO PELIGROSOS EN ANDALUCÍA AÑO 2018 DATOS DEFINITIVOS.*

<https://surminas.org/webs/default/media/Alegaciones/Informe%20PyG%20RnoP%202018.pdf>

Tersa. (s. f.). *Valorización energética de residuos municipales.* Tersa.cat. Recuperado 21 de mayo de 2022, de <https://www.tersa.cat/es-es/valoritzacio-residus/valoritzacio-energetica/>

Valenciano López, A. (2015). Trabajo Fin de Máster: *Estudio de una microrred inteligente en la ciudad de Huesca.*

