



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS DE REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS
PARA GENERAR HIDRÓGENO EN LA CIUDAD DE
CÓRDOBA

Autor: Ignacio Ruiz-Badanelli Medina
Director: Julio Montes Ponce de León

Madrid
Agosto de 2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
"Análisis de reutilización de residuos para generar hidrógeno en
la ciudad de Córdoba"

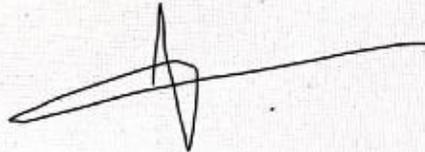
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2021/22es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

I

Fdo.: Ignacio Ruiz-Badanelli Medina

Fecha: 24/ 08/ 2022



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Julio Montes Ponce de León Fecha

Fecha://

ANÁLISIS DE REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS PARA GENERAR HIDRÓGENO EN LA CIUDAD DE CÓRDOBA

Autor: Ignacio Ruiz-Badanelli Medina

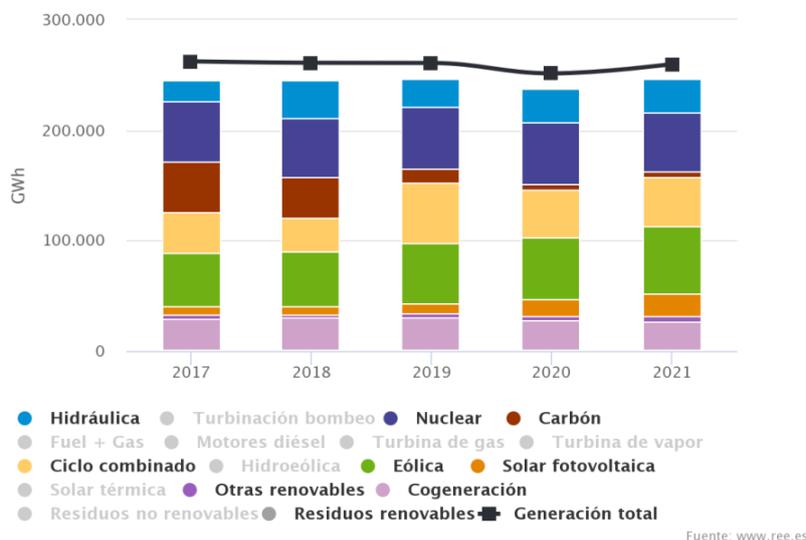
Director: Julio Montes Ponce de León

Universidad Pontificia de Comillas. ICAI

RESUMEN DEL PROYECTO

El proyecto que se presenta a continuación se muestra como una solución a una serie de problemas de alta importancia en la sociedad actual. Esta sociedad, llamada coloquialmente como estado de bienestar, está basada en un modelo económico y energético insostenible si se tiene que depender de las fuentes energéticas de las que se depende hoy en día. Esta situación ha dado lugar a una crisis que abarca no solo la faceta económica, sino también la energética, sanitaria y social.

En la actualidad, en España, nuestro sistema de abastecimiento eléctrico depende en su mayoría o de fuentes poco accesibles, y por consiguiente caras, o de fuentes ineficientes.



Las regulaciones respecto a las emisiones de gases contaminantes o al uso de elementos radiactivos ha llevado al país a depender de fuentes renovables muy poco gestionables como pueden ser la solar o la eólica, las cuales no solo dependen de las condiciones meteorológicas cambiantes, sino que debido a su alto costo de inversión también dependen de subsidios estatales los cuales lo único que logran es el encarecer aún más los precios eléctricos.

Es por ello que para este proyecto se va a presentar una forma de generación basada en la gasificación por plasma, la cual no produce emisiones directas al medio ambiente, ya sea de líquidos o gases, y da como producto de su operación un gas combustible altamente calorífico y con una amplia variedad de aplicaciones.

A diferencia de otras formas renovables de generación, esta tecnología depende únicamente de una materia prima tan abundante como el aire que nos rodea, los residuos sólidos. Teniendo en cuenta que el ciudadano promedio español genera en torno a los 500 kg de residuos anualmente, se estaría hablando de que en España anualmente se producen más de 20 millones de toneladas de este elemento. Esta situación genera numerosos problemas, ya que se está hablando de productos cuya degeneración puede producir gases tóxicos y contaminantes. Es por ello que durante las últimas décadas se ha optado por la solución fácil, la deposición en vertederos “controlados”. Estos, a pesar de ser muy numerosos a lo largo del país, se encuentran en un estado de abarrotamiento, dando lugar a que comiencen a aparecer depósitos no controlados aún más contaminantes. Dada esta situación, organizaciones de todo el mundo han comenzado a reducir el número y hasta prohibir estas instalaciones.

No solo se está hablando de un problema de salud, sino también de espacio.

Este proyecto no solo se centra en la recogida urbanística, sino que también tiene en cuenta las zonas agrícolas y forestales, donde la materia útil producida es aún mayor a la mencionada anteriormente, y la acumulación de esta cuenta con el peligro de favorecer la aparición de incendios o plagas entre otros.

De entre las distintas ciudades españolas se ha elegido Córdoba, la cual cuenta con una de las mayores poblaciones del país, así como una actividad agraria muy amplia. Para este se ha estimado una recolecta de unas 300.000 toneladas anuales de residuos aprovechables.

Para la puesta en marcha de este proyecto, como ya se mencionó previamente, se va a emplear la gasificación por plasma. Esta tecnología se basa en el tratamiento de la materia a muy altas temperaturas a través de la creación de un ambiente ionizado el cual permita llegar a condiciones térmicas límite. Esta gasificación cuenta con una serie de etapas concretas:



Este sistema se ha diseñado de la forma más eficiente posible, incluyendo un sistema de aprovechamiento de pérdidas caloríficas a través de un ciclo Rankine. Tras cada una de estas etapas se obtiene un gas sintético de alta concentración en hidrógeno -en torno al 50%- el cual es apto para su uso como combustible. Para el diseño de este proyecto en la ciudad elegida, se ha estimado un flujo constante de unos 35.000 kg de este gas a la hora, lo cual corresponde a unos 3.000 kg de hidrógeno.

Este elemento cuenta con la ventaja de ser muy flexible en lo que a usos respecta. Teniendo en cuenta los principales focos de demanda renovable de la ciudad, se ha estimado que el mejor uso de este elemento sería a través de algún elemento estacionario, con el fin de ser enfocado en los sectores residenciales e industriales. Debido a esto se ha optado por elegir como tecnología las pilas de combustible, las cuales cuentan con una gran eficiencia, velocidad de funcionamiento, y prácticamente no generan emisiones.

Una vez seleccionado el modelo de producción y la tecnología de transformación de este hidrógeno en electricidad se ha procedido a estimar el peso económico y el posible resultado de su actividad durante una vida útil de 25 años. En la siguiente tabla se muestra un resumen final de los costes de inversión y explotación totales de la planta.

Proceso	Inversión inicial (M€)	Costes de explotación anual (M€)	Costes de amortización anual (M€)	Producción anual (GWh)
Gasificación	65	9,16	4,62	-
Ciclo Rankine	6,5	0,163	0,46	16,16
Pilas de combustible	250	5,45	17,74	365
Total	321,5	14,73	22,82	381,16

Finalmente, se ha estudiado la viabilidad económica del proyecto, teniendo en cuenta las posibles ganancias que se podrían generar a partir de esta producción y contrastándola con los costes totales. Este estudio muestra una recuperación de capital del 100% tras los primeros 19 años de actividad, y beneficio neto de entorno a los 60 millones tras la vida útil de la central.

Tras estos cálculos queda demostrado como la gasificación por plasma puede llegar a ser una forma de generación rentable, faltándole aún un amplio rango de mejora e investigación.

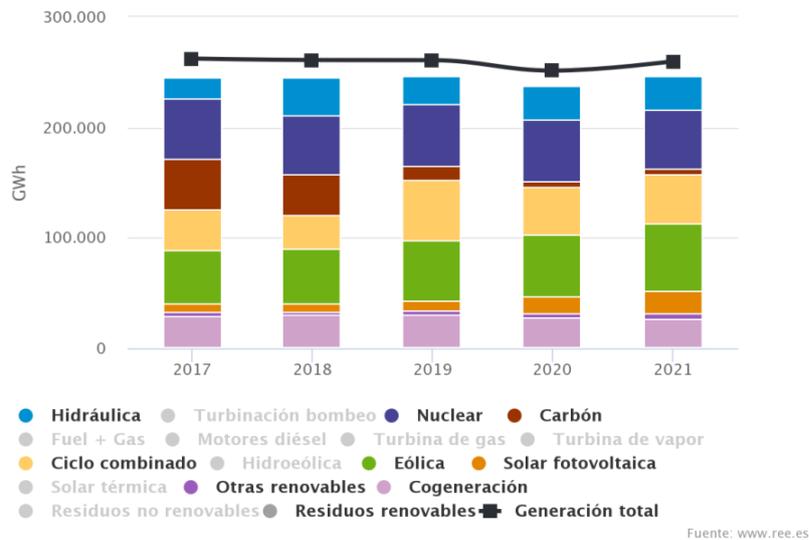
ANALYSIS OF WASTE REUSE TO GENERATE HYDROGEN IN THE CITY OF CÓRDOBA

Author: Ignacio Ruiz-Badanelli Medina
Director: Julio Montes Ponce de León
Pontifical University of Comillas. ICAI

PROJECT SUMMARY

The project presented below is shown as a solution to a series of problems of high importance in today's society. This society, colloquially called the welfare state, is based on an economic and energy model that is unsustainable if it has to depend on the energy sources on which it depends today. This situation has given rise to a crisis that encompasses not only the economic, but also the energy, health and social facets.

At present, in Spain, our electricity supply system depends for the most part either on sources that are not very accessible, and therefore expensive, or on inefficient sources.



Regulations regarding emissions of polluting gases or the use of radioactive elements have led the country to depend on renewable sources that are not very manageable, such as solar or wind power, which not only depend on changing weather conditions, but due to their high investment cost also depend on state subsidies, which only make electricity prices even more expensive.

That is why for this project we will present a form of generation based on plasma gasification, which does not produce direct emissions to the environment, either liquids or gases, and gives as a product of its operation a highly calorific fuel gas with a wide variety of applications.

Unlike other renewable forms of generation, this technology depends only on a raw material as abundant as the air around us, solid waste. Taking into account that the average Spanish citizen generates around 500 kg of waste annually, we would be talking about more than 20 million tons of this element being produced annually in Spain. This situation generates numerous problems, since we are talking about products whose degeneration can produce toxic and polluting gases. That is why during the last decades the easy solution has been chosen, the deposition in "controlled" landfills. These, in spite of being very numerous throughout the country, are in a state of overcrowding, giving rise to the appearance of even more polluting uncontrolled deposits. Given this situation, organizations around the world have begun to reduce the number and even ban these facilities.

This is not only a health issue, but also a space issue.

This project not only focuses on urban collection, but also takes into account agricultural and forestry areas, where the useful matter produced is even greater than that mentioned above, and the accumulation of this has the danger of favoring the appearance of fires or pests among others.

From among the different Spanish cities, Cordoba has been chosen, which has one of the largest populations in the country, as well as a very large agricultural activity. It has been estimated that 300,000 tons of usable waste will be collected annually.

For the implementation of this project, as previously mentioned, plasma gasification will be used. This technology is based on the treatment of the material at very high temperatures through the creation of an ionized environment which allows reaching thermal limit conditions. This gasification has a series of specific stages:



This system has been designed in the most efficient way possible, including a system to take advantage of heat losses through a Rankine cycle. After each of these stages, a synthetic gas with a high concentration of hydrogen -around 50%- is obtained, which is suitable for use as fuel. For the design of this project in the chosen city, a constant flow of about 35,000 kg of this gas per hour has been estimated, which corresponds to about 3,000 kg of hydrogen.

This element has the advantage of being very flexible in terms of uses. Taking into account the main sources of renewable demand in the city, it has been estimated that the best use of this element would be through some stationary element, in order to be focused on the residential and industrial sectors. For this reason, fuel cells have been chosen as the technology of choice, as they are highly efficient, have a high operating speed and generate practically no emissions.

Once the production model and the technology for transforming this hydrogen into electricity have been selected, the economic weight and the possible results of its activity during a useful life of 25 years have been estimated. The following table shows a final summary of the total investment and operating costs of the plant.

Proceso	Inversión inicial (M€)	Costes de explotación anual (M€)	Costes de amortización anual (M€)	Producción anual (GWh)
Gasificación	65	9,16	4,62	-
Ciclo Rankine	6,5	0,163	0,46	16,16
Pilas de combustible	250	5,45	17,74	365
Total	321,5	14,73	22,82	381,16

Finally, the economic viability of the project has been studied, taking into account the possible profits that could be generated from this production and contrasting it with the total costs. This study shows a capital recovery of 100% after the first 19 years of activity, and a net profit of around 60 million after the useful life of the plant.

These calculations demonstrate how plasma gasification can become a profitable form of generation, although it still lacks a wide range of improvement and research.

ÍNDICE DE CONTENIDO

PARTE I: MEMORIA	15
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	17
1 OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN	17
2 ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE -ODS-	18
CAPÍTULO 2: ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ENERGÉTICO-ECONÓMICA ACTUAL	21
1 ENERGÍA Y ECONOMÍA EN ESPAÑA	21
2 ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN RENOVABLE INSTALADA EN LA PROVINCIA	23
2.1 Cogeneración	25
2.2 Biogás	25
2.3 Biomasa (eléctrica)	26
2.4 Biomasa (térmica)	27
2.5 Hidroeléctrica	28
2.6 Termosolar	29
2.7 Fotovoltaica	30
2.8 Conclusión	30
3 FUENTES DE CONSUMO Y DEMANDA	31
CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO: LA GASIFICACIÓN POR PLASMA	33
1 INTRODUCCIÓN	33
2 RESIDUOS ORGÁNICOS: METODOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO	33
2.1 Tratamientos biológicos	33
2.2 Tratamientos térmicos	35
Incineración	35
Pirólisis	35
Gasificación	36
Gasificación por Plasma	37
3 EL PLASMA	37
Fotoionización	38
Descarga de corriente eléctrica	39
4 TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN. CENTRAL DE GASIFICACIÓN POR PLASMA	39
4.1 Sistema de plasma tradicional o de reactor autotérmico	39
4.2 Sistema de plasma mixto o de reactor alotérmico	40
4.3 Sistema de plasma directo	41
5 SISTEMA DE CONVERSIÓN DE PLASMA DIRECTO	41
5.1 Proceso sistema gasificación por plasma	42
Etapa 1: Alimentación	42
Etapa 2: Disociación e ionización	43
Etapa 3: Enfriamiento	45
Etapa 4: Filtro	45
Etapa 5: Neutralización	46
5.2 Principales componentes de la planta	47
Vasija	47

Antorcha de plasma	47
Sistemas de alimentación y extracción	48
Sistema de control del proceso	49
6 PRINCIPALES FUENTES DE RECURSOS ORGÁNICOS	49
6.1 RSU de la ciudad de Córdoba	49
6.2 Residuos forestales	52
6.3 Residuos agrícolas	52
6.4 Resumen total de residuos	53
7 DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA	54
7.1 Balance energético	54
7.2 Recuperación de calor: Ciclo Rankine	56
7.3 Caldera de recuperación e intercambio de calor	57
Turbina	57
Condensador	58
Bomba	59
Energía total del ciclo	59
7.4 Calor cedido para el secado de residuos	60
7.5 Producción final de hidrógeno	61
8 LOCALIZACIÓN DE LA CENTRAL	62
CAPÍTULO 4. GAS DE SÍNTESIS. HIDRÓGENO: ALMACENAMIENTO Y SERVICIO	65
1 GAS DE SÍNTESIS	65
2 APLICACIONES DEL HIDRÓGENO. PILAS DE COMBUSTIBLE	67
2.1 Principio de funcionamiento	68
2.2 Tipos de pilas de combustible	69
Pila de combustible de membrana polimérica (PEMFC)	70
Pilas de combustible alcalino (AFC)	71
Pilas de ácido fosfórico (PAFC)	72
2.3 Elección de la tecnología de pila	73
3 ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO	73
3.1 Almacenamiento de gas a presión	74
3.2 Almacenamiento de hidrógeno líquido	74
3.3 Almacenamiento en hidruros metálicos	74
4 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA Y CONCLUSIONES ENERGÉTICAS	75
PARTE II: ANÁLISIS ECONÓMICO	77
<hr/>	
CAPÍTULO 1: ANÁLISIS ECONÓMICO COMPLETO DE LA INSTALACIÓN	79
1 INVERSIÓN INICIAL	79
2 COSTES DE EXPLOTACIÓN	80
2.1 Central de gasificación	80
2.2 Ciclo Rankine	81
2.3 Pilas de combustible	81
2.4 Costes de transporte	82
3 RESUMEN COSTES DE INVERSIÓN Y EXPLOTACIÓN	83

CAPÍTULO 2: RENTABILIDAD DE LA PLANTA	85
CAPÍTULO 3: CONCLUSIONES ECONÓMICAS	89
PARTE III: ANEXOS	91
<hr/>	
ANEXO A: DETALLE SUPERFICIE CULTIVADA EN ANDALUCÍA [12]	93
ANEXO B: LISTADO DE PODERES CALORÍFICOS INFERIORES (PCI)	99
ANEXO C: CATÁLOGO PILA PEM MARCA BALLARD	105
REFERENCIAS	107
BIBLIOGRAFÍA	108

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1: Evolución del "Mix de Generación" en España [1].....	21
Imagen 2: Área del recinto de Montalbán [3].....	26
Imagen 3: Sistema eléctrico íbero de la zona [1].....	27
Imagen 4: Agua embalsada en la provincia de Córdoba [AEME22]	29
Imagen 5: Demanda energética mensual en Andalucía [1]	31
Imagen 6: Usos del gas combustible [GUER16].....	36
Imagen 7: Representación de los 4 estados de la materia [4]	38
Imagen 8: Esquema reactor autotérmico 1 [GUER16].....	40
Imagen 9: Esquema vasija reactor alotérmico [GUER16]	41
Imagen 10: Etapas del sistema de gasificación por plasma [8]	42
Imagen 11: Estados de las partículas en función de la temperatura [VALE15]	44
Imagen 12: Ejemplo de distintas formas de vitrificado [9]	45
Imagen 13: Esquema antorchas de plasma a)no transferida y b)transferida [GUER16].	48
Imagen 14: Superficie forestal pública por provincia en Andalucía [12].....	52
Imagen 15: Esquema representativo del ciclo Rankine [VALE15]	56
Imagen 16: Mapa agrario de la provincia de Córdoba	62
Imagen 17: Composición del syngas en función de los residuos orgánicos de entrada [16].....	66
Imagen 18:Esquema de funcionamiento de una pila de combustible PEM [14].....	68
Imagen 19:Esquema de pila PEMFC [14]	70
Imagen 20: Esquema de pila AFC [14]	71
Imagen 21: Esquema de pila PAFC.....	72
Imagen 22: Evolución del precio de mercado de la luz [18].....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Generación por tecnologías en Andalucía (GWh) [AAE_22].....	24
Tabla 2: Resumen centrales de generación de localización cercana a la ciudad de Córdoba [2].....	24
Tabla 3: Resumen centrales de cogeneración [2]	25
Tabla 4: Resumen centrales de biogás [2]	25
Tabla 5: Resumen centrales de biomasa eléctrica [2].....	26
Tabla 6: Resumen centrales de biogás térmico	27
Tabla 7: Resumen centrales de generación hidroeléctrica [2]	28
Tabla 8: Resumen centrales termosolares [2]	29
Tabla 9: Resumen centrales fotovoltaicas [2].....	30
Tabla 10: Consumo en ktep de energía renovable final por sectores [AAE_22]	31
Tabla 11: Procedencia de los residuos urbanos en toneladas y por año [10]	50
Tabla 12: Destino de los RSU gestionados por SADECO [10]	50
Tabla 13: Residuos rurales gestionados por EPREMASA [11]	51
Tabla 14: Estimación del rendimiento de los residuos de producción por hectáreas [2]	53
Tabla 15: Resumen total de residuos	53
Tabla 16: Condiciones de trabajo de la caldera	57
Tabla 17: Condiciones de trabajo de la turbina	58
Tabla 18: Condiciones de trabajo del condensador	58
Tabla 19: Condiciones de trabajo de la bomba.....	59
Tabla 20: Composición del gas de síntesis bruto [VALE15]	61
Tabla 21: Composición final syngas [2].....	65
Tabla 22: Comparación de los principales tipos de pilas de combustible [14]	69
Tabla 23: Costes generales de operación y mantenimiento de la instalación	80
Tabla 24: Costes salariales anuales	80
Tabla 25: Costes y generación para el año 0	83
Tabla 26: Evolución de los costes durante el periodo de vida útil [VALE15]	83
Tabla 27: Balance total de la planta de gasificación durante su vida útil.....	86

PARTE I: MEMORIA

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1 OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN

Este proyecto tiene como objetivo principal el estudiar si mediante la reutilización de restos orgánicos y recursos naturales es posible reducir los precios e incluso abastecer a una ciudad como Córdoba, aportando así una fuente de energía segura, eficiente y constante, pudiendo así suplir a las fuentes contaminantes de las que tanto dependemos actualmente.

Para alcanzar este fin, se van a analizar y seguir los siguientes pasos:

- Profundizar en la situación energética y económica actual, enfocando en la provincia de Córdoba. Se repasarán los distintos mercados energéticos de la zona y el rendimiento de los relacionados con fuentes renovables.
- Recopilación de datos de generación y demanda y análisis de la fluctuación de estos a lo largo del año.
- Análisis de funcionamiento de la técnica usada y descripción de la planta. Repaso de los beneficios y posibles desventajas o problemáticas que esta pueda suponer sobre la zona/localidad en la que se establezca.
- Estudio de la incorporación de la técnica al mercado y cómo afectaría esta tanto a la distribución del “mix de generación” como a los precios.
- Estudio económico teniendo en cuenta los posibles costes de instalación y mantenimiento. Se estimará la vida útil de la planta y el potencial en beneficios de cara a futuras inversiones.

El planteamiento y motivación de este proyecto se basa en el poder solventar varios problemas de una sentada. Se empleará como materia prima un elemento abundante y mal gestionado como son los residuos orgánicos, a partir de los cuales se podrá generar energía mediante un proceso limpio mejorando la situación actual energética y económica.

Para lograr estos objetivos se realizará una investigación exhaustiva a lo largo de cuatro meses, donde se tratará de obtener información haciendo uso de referencias oficiales y datos facilitados por la REE (Red Eléctrica Española) y el gobierno de Córdoba. También se aplicarán los conocimientos de eléctrica, energética, estadística y economía aprendidas a lo largo de la carrera, para dar una mayor veracidad a los datos concluyentes del proyecto.

2 Alineación del proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible -ODS-

A continuación, se hará un repaso de los distintos objetivos ODS [AGNU15] con los cuales este proyecto está concienciado, analizando en qué medida afectará a estos a corto o largo plazo.

1.- Erradicar la pobreza en todas sus formas en todo el mundo

Este proyecto se presenta como una posible solución a largo plazo de cara a la recuperación económica de España en términos de precios y demanda energética. Con ello se mejorará la situación de multitud de familias que se encuentran en problemas a la hora de pagar las facturas del hogar.

2.- Garantizar el acceso a una energía asequible, segura sostenible y moderna

El principal objetivo de este proyecto es el desarrollar un método barato, limpio y novedoso como opción distinta al conjunto de tecnologías que conforman el actual mix de generación en nuestro país.

3.- Fomentar el crecimiento económico y el trabajo eficiente y sostenible

Se analizará que efecto en la economía tendrá esta tecnología, así como el número de empleos que se podrían generar en todos los ámbitos, desde las labores más básicas hasta las más técnicas.

4.- Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación

Como ya se ha mencionado anteriormente, este proyecto se basa en analizar la creación de una industria nueva de infraestructuras que se dediquen a crear energía limpia a partir de elementos orgánicos desechables.

5.- Reducir las desigualdades en y entre los países

En este trabajo se presenta una forma de obtener energía a través de una materia prima accesible para todo el mundo y en todos los lugares, los residuos orgánicos. Esto facilitará a los países menos desarrollados el poder acceder a esta por su propia mano.

6.- Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles

Las ciudades, con la ayuda del plasma y las tecnologías a presentar, estarán siendo provistas de energías cada vez más limpias, y al mismo tiempo, se hará uso de las basuras sobrantes que se encuentran en los depósitos controlados, reduciendo la emisión de gases contaminantes.

7.- Tomar medidas para combatir el cambio climático

Este proyecto no solo se enfoca en la esfera económica, sino que también está dirigido a combatir el cambio climático de igual forma.

Capítulo 2: ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ENERGÉTICO-ECONÓMICA ACTUAL

1 ENERGÍA Y ECONOMÍA EN ESPAÑA

A lo largo de los últimos años, debido a la alta dependencia energética de España frente a la importación de combustibles fósiles como el carbón o el gas natural, y la subida de precios o limitación del uso de estos, los últimos gobiernos se han visto en la necesidad de incentivar la puesta en marcha, uso y desarrollo de fuentes renovables como forma principal de generación de energía a nivel nacional, como pueden ser la hidráulica, fotovoltaica y eólica. Para ello se le han otorgado subvenciones con el objetivo de facilitar a estas competir con el resto de las tecnologías del mercado del “mix de generación”, ofreciéndoles así una rentabilidad razonable -estas son poco eficientes debido a su alto coste de fabricación y manutención-.

Esto ha supuesto que las compañías eléctricas se hayan visto obligadas a comprar la producción a un precio superior al de mercado.

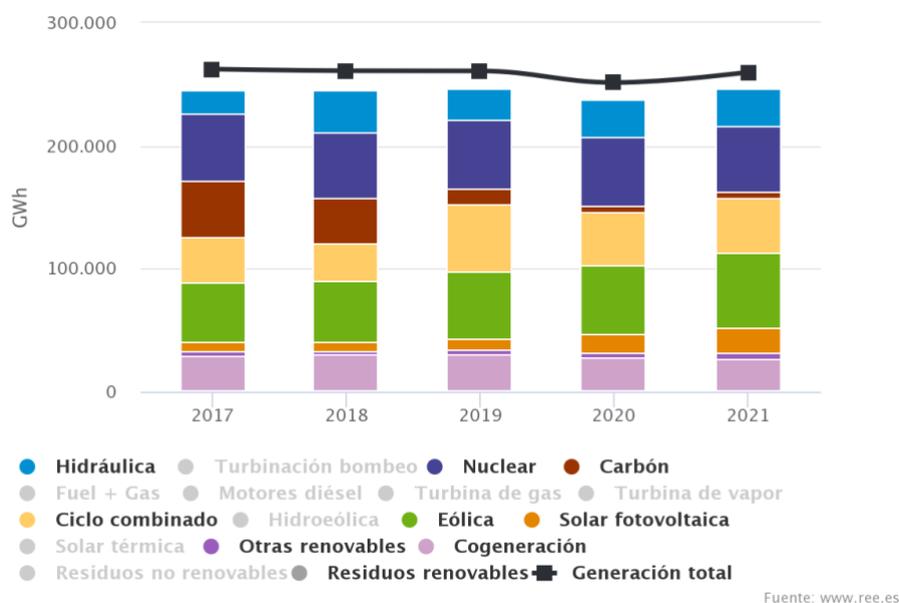


Imagen 1: Evolución del "Mix de Generación" en España [1]

El principal problema de estas tecnologías -en concreto la eólica y fotovoltaica- es el origen no controlado de su “materia prima”, ya que depende altamente de las condiciones meteorológicas, por lo cual estas solo pueden estar destinadas a zonas con circunstancias muy concretas. Esto conlleva a que dependamos en gran medida de una producción poco gestionable donde las fuentes naturales son aprovechadas un muy bajo

porcentaje del tiempo útil total de funcionamiento de estas tecnologías, haciendo así muy difícil el poder amortizar las instalaciones a medio/corto plazo. Debido a ello, el abastecer a una alta proporción de la población a través de estas supone un objetivo casi inalcanzable.

Una de las posibles soluciones ante este problema es apostar por las nucleares, cabiendo destacar su alta aportación a este “mix de generación” la cual, pese a ser limpia (no da lugar a gas alguno de efecto invernadero) y siendo una de las más relevantes en términos de energía útil, ha sido fuertemente rechazada a lo largo de los últimos años debido a los peligros que los residuos radiactivos producidos por esta pueden ocasionar. Esta supone actualmente casi la cuarta parte del total de la energía generada en el país, y se ve como una de las mejores opciones complementarias para alcanzar un modelo limpio, eficiente y sostenible.

Ante esta situación resulta imprescindible incorporar nuevas formas de generación que sean constantes, limpias y fiables. El proyecto a presentar en este trabajo se basa en el manejo de biomasa para la obtención de hidrógeno mediante reformado de plasma y su posterior uso como fuente energética. Esta biomasa se obtendría a partir de residuos orgánicos desechados en zonas urbanas y terrenos agrícolas.

Actualmente existe un problema con la gestión de residuos ya que estos, muy abundantes, son mayoritariamente trasladados a vertederos controlados (existiendo en España más de un centenar) donde son retenidos bajo tierra resultando de este proceso un conjunto de gases y líquidos nocivos (lixiviados) cuyo destino final es la biosfera.

En lo que a economía y precios respecta, a lo largo de los últimos años nuestro país se ha visto afectado por una de las mayores crisis energéticas hasta la fecha, dando lugar a sucesivas subidas de precio en muchos de los mercados existentes. En el caso de la luz, este ha llegado a superar récords históricos a lo largo de sucesivos meses. Para hacernos una idea, el precio del MWh en el pasado mes de diciembre estaba en 252 € siendo su correspondiente valor para ese mismo mes del año anterior de 49 € (2), es decir, estamos hablando de un incremento de más del 500%

Este desorbitado aumento se ha visto acrecentado por diversos motivos, tanto a escala global como nacional.

Entre los motivos más importantes están:

- Tensionamiento de los precios: la crisis pandémica ha dado lugar a una contracción y posterior recuperación de la demanda de energía, ocasionando así un importante desbarajuste de los precios.
- Efecto de la proliferación de centrales de origen renovable, cuyo coste de generación es mayor, provocando la subida de precios.
- Endurecimiento de las medidas climáticas de la Unión Europea, incrementando los costes de los derechos de emisión de CO₂.

- Mayor coste del gas natural, combustible fósil comúnmente utilizado en la actualidad como sustituto del carbón debido a su alto poder calorífico y su baja generación de residuos durante la combustión del mismo.
- El aumento de precios también es debido a una reducción en la producción, caída en las reservas y la alta demanda de países, en su mayoría asiáticos.

Atendiendo a esta situación, y ante la necesidad de implementar cambios en la gestión energética, se va a presentar este proyecto para así estudiar su viabilidad, enfocando su aplicación en una localidad grande y con avanzadas tecnologías de producción renovable como es Córdoba, que cuenta con más de 300 000 habitantes y una de las políticas más limpias y eficientes de España, llegando a producir hasta dos tercios de su potencia total generada mediante fuentes renovables.

2 ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN RENOVABLE INSTALADA EN LA PROVINCIA

Córdoba, debido a su posición geográfica céntrica, ejerce de núcleo neurálgico de muchas infraestructuras andaluzas, haciendo de pilar para vías de transporte tanto eléctrico como de productos derivados del petróleo.

En este caso, para estudiar la conveniencia de trabajar con residuos, se va a hacer un estudio de la situación actual energética de la región. Esta se caracteriza por contar con una amplia variedad de tecnologías de generación, destacando entre ellas las de origen solar y la transformación de biomasa. [5]

	Biomasa	Hidráulica	Eólica	Oceanotérmica	Termosolar	Solar FV	Total generación eléctrica
Almería	0,0	30,8	808,1	0,0	0,0	380,6	1.219,6
Cádiz	4,4	4,4	2.863,5	0,0	293,5	246,3	3.412,2
Córdoba	586,3	88,1	0,0	0,0	592,0	480,0	1.746,4
Granada	0,7	116,9	814,6	0,0	429,8	180,8	1.542,6
Huelva	748,6	10,5	552,0	25,4	0,0	265,0	1.601,4
Jaén	260,4	142,6	21,2	0,0	0,0	181,0	605,2
Málaga	169,7	117,0	1.355,9	0,0	0,0	96,6	1.739,2

Sevilla	67,3	50,6	343,2	0,0	883,0	1.876,2	3.220,3
Andalucía	1.837,4	560,8	6.758,6	25,4	2.198,3	3.706,4	15.086,9

Tabla 1: Generación por tecnologías en Andalucía (GWh) [AAE_22]

Observando la Tabla 1 adjunta podemos ver como en Córdoba el aprovechamiento solar supone más del 60% del total producido en la provincia. Esto, como ya comentamos, puede ser causante de futuros problemas de abastecimiento debido al origen no gestionable de su fuente, la cual está sujeta a horarios muy estrechos y variantes a lo largo del año.

El 40% restante depende casi en su totalidad del sistema de renovación de materia orgánica para la producción de biomasa, es por ello que el objetivo de este trabajo sea el potenciar este sector (el cual ya cuenta con un alto alcance de evolución y mejora) y ofrecer un respaldo energético seguro y renovable como principal alternativa a las opciones meteorológico-dependientes que tanto dominan el panorama energético actual.

Esta provincia cuenta con una amplia variedad de infraestructuras energéticas, destacando el elevado número de centrales dedicadas al suministro de calor.

Origen de generación	potencia instalada (MW)	nº centrales
Cogeneración	54,87	8
Biogás	3,05	2
Biomasa (eléctrica)	81,14	8
Biomasa (térmica)	399,52	4712
Hidroeléctrica	118,46	15
Termosolar	299,8	6
Fotovoltaicas (>10MW)	142,07	4

Tabla 2: Resumen centrales de generación de localización cercana a la ciudad de Córdoba [2]

En esta tabla se puede ver de nuevo como en la región existe un predominio de fuentes de biomasa y solares, no obstante, junto con la cogeneración y las hidroeléctricas se conforma una red auto complementaria, no dependiendo al completo de un único origen de producción.

Haciendo uso de los datos facilitados por la Agencia Andaluza de la Energía [AAE_22] se va a realizar un estudio de las distintas formas de generación renovables instaladas en la región de Córdoba. Debido a la escasez de datos oficiales de este último año se va a tomar como referencia los últimos accesibles pertenecientes al 2020.

2.1 Cogeneración

De entre las 8 instalaciones existentes en la provincia se van a incluir en el estudio aquellas localizadas a una distancia razonable de la ciudad en cuestión, quedándonos dos instalaciones.

Nombre	Municipio	Distancia (Km)	Potencia (MW)
CIATESA	Montilla	45	0,8
Hospital Reina Sofía	Córdoba	-	2,56

Tabla 3: Resumen centrales de cogeneración [2]

Como podemos observar en la Tabla 3 las cifras de potencia son muy escasas, y en su mayoría de carácter privado.

Estas se basan en la obtención simultánea de energía eléctrica y energía térmica útil, y en el caso del emplazamiento sanitario ejerce funciones de medidas precautorias en caso de fallo en el sistema de transformación principal.

2.2 Biogás

En el caso de la generación por biogás, el volumen completo de producción de energía se encuentra situado en dos centrales, ambas cercanas a la capital de provincia.

Nombre	Municipio	Distancia (km)	Potencia (MW)
EDAR Golondrina	Córdoba	-	0,5
Vertedero de Montalbán	Montalbán	45	2,55

Tabla 4: Resumen centrales de biogás [2]

Esta tecnología, pese a no ser muy eficiente en términos de potencia, hace uso de un recurso muy abundante como son los residuos orgánicos, el cual permite ser aprovechado de diversas maneras. En el caso del biogás, en ambas localizaciones se dan distintos procesos. En el caso de la EDAR, esta producción de biogás se da como tratamiento secundario durante la depuración de aguas residuales haciendo uso de la decantación de partículas biodegradables contenidas en el agua.

La segunda instalación se trata de un complejo medioambiental, coloquialmente llamado vertedero, el cual cuenta con un área de vertido de 65.000 m^2 y capacidad de hasta 880.000 m^3 . Como ya comentamos anteriormente este tipo de instalaciones se encuentran obsoletas debido su negativo balance medioambiental (lixiviados, contaminación del aire, costes de mantenimiento, etc). Aún así, se puede observar mayor capacidad de potencia que en el caso de la EDAR.



Imagen 2: Área del recinto de Montalbán [3]

2.3 Biomasa (eléctrica)

Para este caso se van a contar todas las instalaciones que cuenten con incorporación directa a la red de transporte eléctrica.

Nombre	Municipio	Potencia (MW)
Agroenergética de Baena	Baena	25
Bioenergética Egabrense	Cabra	8
Severaes	Cañete de las torres	0,1
Bioenergía Santamaría	Lucena	14,3
Biomasa Puente Genil	Puente Genil	9,82

Tabla 5: Resumen centrales de biomasa eléctrica [2]

A continuación, se va a adjuntar un mapa con las distintas líneas de transporte de la zona. Este será utilizado como referencia a la hora de situar las distintas instalaciones para los siguientes apartados, con el objetivo de ubicar estos respecto al sistema íbero y tomar una referencia eléctrica de la distancia entre la capital a estudiar y estas.



Imagen 3: Sistema eléctrico ibero de la zona [1]

Este tipo de industria es una de las más dominantes de la región, representando el 29,6% [6] de la potencia total de biomasa eléctrica de Andalucía. Esto es debido a la abundancia y fácil accesibilidad de materia prima proveniente del sector agrónomo como por ejemplo el olivar, entre otros.

2.4 Biomasa (térmica)

Haciendo uso de los recursos orgánicos tan accesibles de la zona, la provincia de Córdoba se ha enfocado en la potenciación del sector térmico, incentivado por las características fisicoquímicas tan favorables de subproductos derivados del cultivo como pueden ser los huesos de aceituna y cáscaras de frutos secos, que cuentan con un alto poder calorífico y baja humedad.

Atendiendo a esta situación el número de centrales de origen térmico ha crecido exponencialmente durante los últimos años, en su mayoría concentradas en el sector residencial (calefacción y producción de agua caliente) dándose también aplicaciones industriales y otros servicios.

Sector	nº instalaciones	Porcentaje (%)
Residencial	4.364	92,6
Industrial	282	6
Servicios	61	1,3
Primario	5	0,1

Tabla 6: Resumen centrales de biogás térmico

También cabe destacar la producción de pellets, producto totalmente natural fabricado a partir de madera y comúnmente usado para calefacción y calderas. Este sector cuenta con cuatro instalaciones funcionales distribuidas a lo largo de la provincia, llegando a producir 28,8 ktep por año.

2.5 Hidroeléctrica

Esta forma de generación cobra también cierta importancia en el panorama energético de la provincia favorecido por la cercanía de fuentes como son el río Guadalquivir, cuyo curso principal atraviesa la capital, junto con otros embalses y presas.

La tabla adjunta muestra los distintos tipos de centrales existentes teniendo en cuenta la proximidad a la capital en cuestión o su accesibilidad al sistema de transporte eléctrico Andaluz y el origen de su fuente cinética:

Central	Localidad	Distancia (Km)	Origen Cinético	Potencia (MW)
Guadalmellato	Adamuz	31	Embalse	5,12
La Breña II	Almodovar del río	32	Embalse	34,1
El Carpio	El Carpio	32	Embalse	8,4
Alcolea	Córboba	12	Río	2,6
C.H. El Arenal	Córboba	-	Río	2,8
San Rafael de Navallana	Córboba	21	Embalse	4,24
Villafranca	Córboba	29	Río	4,34
El Arenoso	Montoro	47	Pantano	12,19
La Isabela	Montoro	49	Río	1,8
La Vega	Montoro	57	Río	1,92
Puente Nuevo	Villaviciosa de Córdoba	39	Embalse	2,4

Tabla 7: Resumen centrales de generación hidroeléctrica [2]

Contando con la cercanía del Guadalquivir, esta provincia dispone de una de las capacidades volumétricas de embalse más grandes de España, llegando esta a los 3.255 hm³ -1 hm³ = 1.000.000 m³- solamente superada por las regiones extremeñas y de Salamanca.

Es importante mencionar que muchos de estos embalses se encuentran bajo mínimos, dándose una tendencia generalizada de escasez debido a la falta de lluvias, sumado al clima caluroso característico de la zona. En la siguiente gráfica se puede observar claramente como la tendencia anual de agua embalsada ha ido reduciéndose de forma notable no solo con respecto a la media de los últimos 10 años, sino también respecto a los previos.

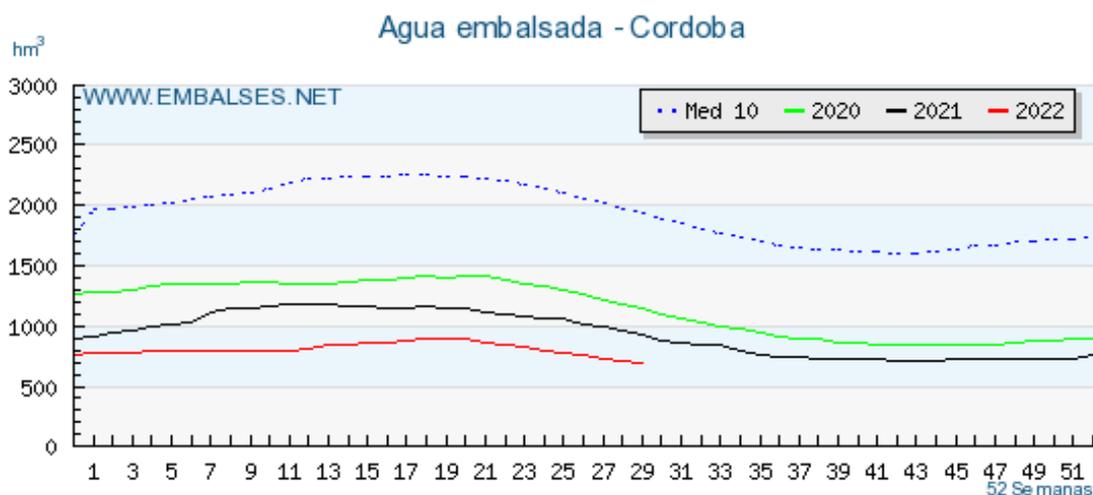


Imagen 4: Agua embalsada en la provincia de Córdoba [AEME22]

Esta reducción no solo es debido al clima, sino que también estos embalses se están viendo presionados por altas demandas provenientes del regadío y en menor medida influenciados por intereses de especulación con el precio de la energía, dándose desembalses desmedidos.

2.6 Termosolar

La siguiente tabla muestra las distintas instalaciones activas en la zona, filtrando solamente aquellas que se encuentran conectadas de forma directa a la red de transporte eléctrico.

Central	Localidad	Distancia (Km)	Potencia (MW)
Palma del Río I	Palma del Río	69	50
Palma del Río II	Palma del Río	69	50
Soluz Guzmán	Palma del Río	69	49,9
La Africana	Fuente Palmera	49	49,9
Solacor UNO	El Carpio	32	50
Solacor DOS	El Carpio	32	50

Tabla 8: Resumen centrales termosolares [2]

Este tipo de tecnologías son las más eficientes de la provincia, debido principalmente al alto tiempo de incidencia solar útil recibido (uno de los mayores de la península). Es por ello que estas instalaciones, basadas en el aprovechamiento de la energía térmica solar para la transformación de esta en movimiento de fluido en forma de vapor, son muy numerosas y predominantes en las zonas interiores de Andalucía y Castilla la Mancha.

2.7 Fotovoltaica

Como ya se mencionó previamente, esta zona de Andalucía se aprovecha de unas condiciones meteorológicas favorables para este tipo de actividades. La siguiente tabla muestra las distintas instalaciones activas actualmente.

Central	Localidad	Distancia (Km)	Potencia (MW)
PF Gamonarejo 1	Posadas	41	36,4
PF Gamonarejo 2	Posadas	41	10,4
El Salobral Hive	Espejo	37	45,46
PSFV Palma del Río	Palma del Río	69	49,81

Tabla 9: Resumen centrales fotovoltaicas [2]

Este tipo de proyectos se encuentran en pleno crecimiento en la actualidad existiendo numerosos programas para la puesta en marcha de recintos de generación con altos presupuestos e inversiones.

Ejemplos de estos son los de los términos municipales de El Carpio, Cabra y La Dehesilla, sumando una inversión total de unos 200 millones de euros y una potencia pico de hasta 484 MWp

2.8 Conclusión

Tal y como se ha mencionado anteriormente, esta región en cuanto a generación eléctrica depende principalmente de dos sectores: la energía solar, la cual se apoya en tecnologías limpias, pero poco eficientes y difíciles de amortizar a corto-medio plazo, y la proveniente de fuentes de biomasa.

El principal impedimento de esta focalización en la generación renovable es que se precisa un amplio rango de métodos de generación para así no ser tan vulnerable frente a la no disponibilidad de alguna de ellas.

Para Córdoba esta situación no se puede considerar muy favorable ya que no ofrece buena flexibilidad frente a posibles problemas de producción eléctrica. Es por ello que resultaría conveniente incentivar formas de generación más fiables, como pueden ser las provenientes de la biomasa, las cuales ya están muy bien establecidas en la zona y en pleno crecimiento.

3 FUENTES DE CONSUMO Y DEMANDA

Una vez repasadas las distintas formas de generación, para este apartado se van a analizar los datos de consumo y demanda a partir de ciertos criterios, a través de los datos facilitados por la AAE, enfocando estos en los usos dados a las energías renovables dentro de distintos sectores.

Esta información es de vital importancia ya que cada sector se apoya en mayor o menor medida en distintas formas de energía.

	Industria	Transporte	Primario	Servicios	Residencial	Total Otros
Córdoba	53,5	25,8	0,6	5,0	34,9	40,5
Andalucía	219,0	269,5	12,2	87,5	256,2	356,0

Tabla 10: Consumo en ktep de energía renovable final por sectores [AAE_22]

En el caso de Córdoba vemos como las renovables están más dirigidas hacia la industria y el sector residencial. Esto implica que para este proyecto interese más una forma de generación estacionaria, indicada para grandes establecimientos o incorporación eléctrica directa a la red.

También es de suma importancia ver que meses del año concentran la mayor masa de demanda. Para ello, debido a la falta de datos recopilados de la ciudad de Córdoba), se va a analizar la evolución de la demanda en Andalucía, donde el comportamiento climático es semejante al de nuestra ciudad, caracterizado por la influencia del mediterráneo con las cuatro estaciones bien definidas.

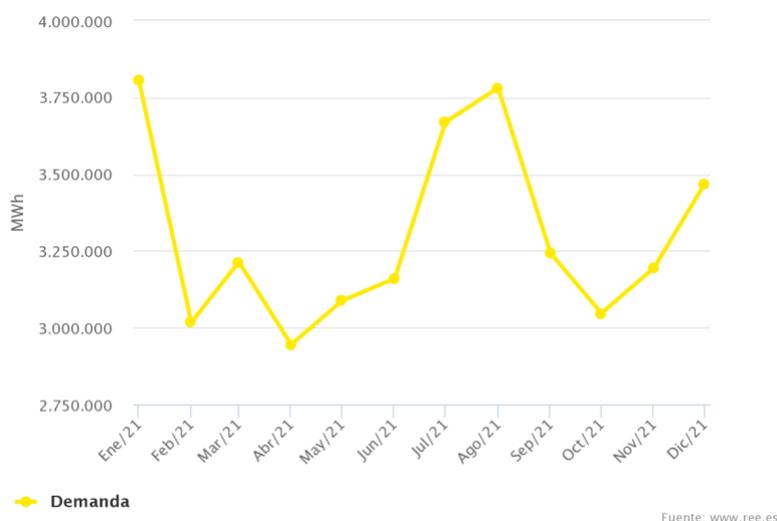


Imagen 5: Demanda energética mensual en Andalucía [1]

Como se muestra en la Imagen 4, los picos de demanda se concentran en los meses de invierno y verano, meses en los cuales la generación renovable se puede ver alterada debido a los factores climáticos característicos de cada fecha. Ejemplo de esto es la baja eficiencia en la producción hidráulica en los meses de verano producido por la reducción de los niveles de agua tanto en embalses como en vías fluviales, y la baja eficiencia de la producción fotovoltaica durante los meses de invierno.

Capítulo 3. SISTEMAS DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO: LA GASIFICACIÓN POR PLASMA

1 INTRODUCCIÓN

Como ya se ha manifestado anteriormente, para dar solución a estos problemas planteados de la forma más económica y eficiente, hay que hacer uso de tecnologías que dependan de recursos renovables, gestionables y numerosos, para así poder suplir a las técnicas de generación convencionales en caso de necesidad.

Todo esto, junto con la creciente problemática relacionada con la gestión de los RSU - Residuos Sólidos Urbanos- debido al incesante aumento poblacional y de los núcleos urbanos, hace aún más evidente la conveniencia de dar uso a esos más de 160 millones de kilogramos de residuos que se producen únicamente en la ciudad de Córdoba -según el INE los españoles generamos en torno a los 500 kg de RSU al año-, siendo muchos de ellos, sino en su mayoría, de origen orgánico.

Es por ello que varios países del mundo ya han comenzado a desarrollar nuevas formas de reutilizar estos recursos de distintas maneras dependiendo del uso que se le quiera dar al vector energético obtenido. Este proyecto, a pesar de realizar un repaso general, se va a centrar principalmente en uno de los últimos y más novedosos métodos: La gasificación por plasma.

2 RESIDUOS ORGÁNICOS: METODOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO

Como paso previo al análisis del método de gasificación por plasma se va a realizar un breve resumen de algunas de las técnicas y procesos existentes en la actualidad relacionadas con el tratamiento y reciclaje de residuos orgánicos, así como su situación actual tanto en España como en la ciudad tratada en este trabajo.

2.1 Tratamientos biológicos

2.1.1 Compostaje

El compostaje es una técnica basada en la degradación directa de la materia mediante un proceso de descomposición, obteniendo un producto denominado compost.

Este producto tiene ciertas características que lo hacen apto para ser empleado como abono o como sustituto de fertilizantes químicos mejorando ampliamente la calidad nutricional de los suelos cultivables.

Debido a la simpleza del proceso (cualquier persona puede llevarlo a cabo) resulta difícil saber cuántos centros de compostaje existen en España en la actualidad, siendo esta una práctica muy extendida y utilizada.

2.1.2 Digestión anaerobia

Es un proceso de origen natural que, al igual que en el compostaje, hace uso de materia orgánica (principalmente la proveniente de industrias agroalimentarias, ganaderas o urbanas), solo que en este caso se produce en ausencia de oxígeno.

En los biodigestores se refuerza y potencia el proceso biológico y químico de digestión para alcanzar la máxima eficiencia, siendo el producto resultante un biogás constituido principalmente por dióxido de carbono y metano.

El biogás, compuesto aproximadamente por un 65% de metano, es más tarde purificado con el fin de obtener un combustible con propiedades similares al gas natural, eliminando gran parte del CO₂ contenido en este. El resultado de este tratamiento es un biometano de composición muy semejante a la de los gases provenientes de fuentes fósiles.

Este, pese a ser renovable tiene ciertas desventajas: una baja eficiencia del proceso de obtención, daños que se pueden provocar sobre motores debido a impurezas, emisiones de CO₂ en bajas cantidades y su alto precio en los casos de producción a baja escala.

De entre los distintos países europeos España se encuentra a la cola en términos de número de instalaciones a gran escala operativas, contando solo con dos situadas en la comunidad de Madrid, frente a las 230 de Alemania o 130 de Francia. [EBA_20]

2.1.3 Vertederos controlados

Son instalaciones con un funcionamiento parecido a los biodigestores, solo que estos suelen ser grandes depósitos subterráneos o superficiales de corta vida útil. En estos se da una impermeabilización del suelo (normalmente suele ser completa) así como sistemas de canalización de lixiviados y del biogás obtenido.

Es un proceso más lento y bruto que el de los biodigestores, pero también más barato, un punto intermedio entre el vertido y reciclado. Esto supone una mayor exposición al medio ambiente y un impacto negativo en muchos sentidos.

Es por ello que organizaciones como la Unión Europea están tratando de reducir y controlar la producción y acumulación de residuos incentivando un modelo de economía más circular, minimizando el número y tamaño de los vertederos.

España cuenta con aproximadamente 180 vertederos destinados a la retención de residuos orgánicos, existiendo en la provincia de Córdoba dos instalaciones principales dedicadas a esto, que son el vertedero de Montalbán y la EDAR Golondrina.

El principal problema de estos vertederos es la existencia de un alto número de depósitos ilegales, en su mayoría superficiales y muy cercanos a núcleos de población los cuales no disponen de control alguno generando olores y contaminantes.

2.2 Tratamientos térmicos

2.2.1 Incineración

Este proceso está basado en una combustión a altas temperaturas cuyo objetivo final es una reducción de peso y volumen de los residuos. Además de esta reducción, tras el proceso de incineración se obtienen gases de combustión (como CO₂, O₂ y H₂O, junto con N₂ así como otros gases ácidos) y restos sólidos resultantes del proceso térmico como pueden ser cenizas o escorias inertes reutilizables. [MITE22]

La principal ventaja de este recurso de valorización es que ofrece la posibilidad de aprovechamiento del calor residual resultante de la combustión para calefacciones o como generador de vapor para usos industriales o de productor eléctrico.

A pesar de ello, la Unión Europea ha estado los últimos años aplicando numerosas restricciones y protocolos a esta actividad debido al peligro que puede suponer para el medio ambiente la mala práctica del mismo. El cumplimiento de estas supone un gran gasto en términos de evitar la emisión de gases nocivos y metales pesados a la atmósfera.

En España en la actualidad existen un total de 11 plantas incineradoras, ninguna de ellas situada en la región planeada en este proyecto.

2.2.2 Pirólisis

Este segundo proceso térmico está basado en una descomposición por tratamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, no produciéndose en ningún momento ninguna reacción de combustión. Se dan variaciones químicas y estructurales de la materia de forma simultánea.

De este tratamiento se obtienen varios subproductos: gas sintético (compuesto básico de CO, CO₂, H₂ Y CH₄), residuos líquidos en forma de hidrocarburos y residuos sólidos formados por elementos no combustibles. Todos estos son reutilizables para la obtención de energía, ya sea a través de ciclos de vapor o combustibles.

Esta técnica no se da de forma muy extendida, ya que, pese a ser considerada una técnica de revalorización, esta genera ciertos gases de efecto invernadero y sustancias tóxicas provenientes de plásticos u otros elementos. En nuestro país esta técnica se emplea principalmente en la destrucción y aprovechamiento de los NFU (Neumáticos Fuera de Uso).

2.2.3 Gasificación

La gasificación es un proceso térmico en el que se dan una serie de reacciones en presencia de un agente gasificante (oxígeno, vapor de agua, hidrógeno...) con el fin de transformar la materia prima, pudiendo ser esta muy variada, en un gas combustible sintético. La calidad de este gas depende tanto del material a usar como del agente gasificante, siendo este de mejor calidad en cuanto mayor es el poder calorífico del agente.

Se trabaja a temperaturas superiores a la pirólisis (en torno a los 800 °C) dándose una combustión controlada, obteniéndose unos subproductos semejantes. Su principal diferencia radica en las limitaciones a la hora de tratar y seleccionar la materia prima a usar en esta última, ofreciéndose una mayor flexibilidad en la gasificación en lo que a residuos respecta.

Este método también tiene como ventaja el conjunto de usos que se le puede dar al gas combustible resultante, pudiendo ser empleado tanto en ciclos termodinámicos, así como también en forma de gas combustible.

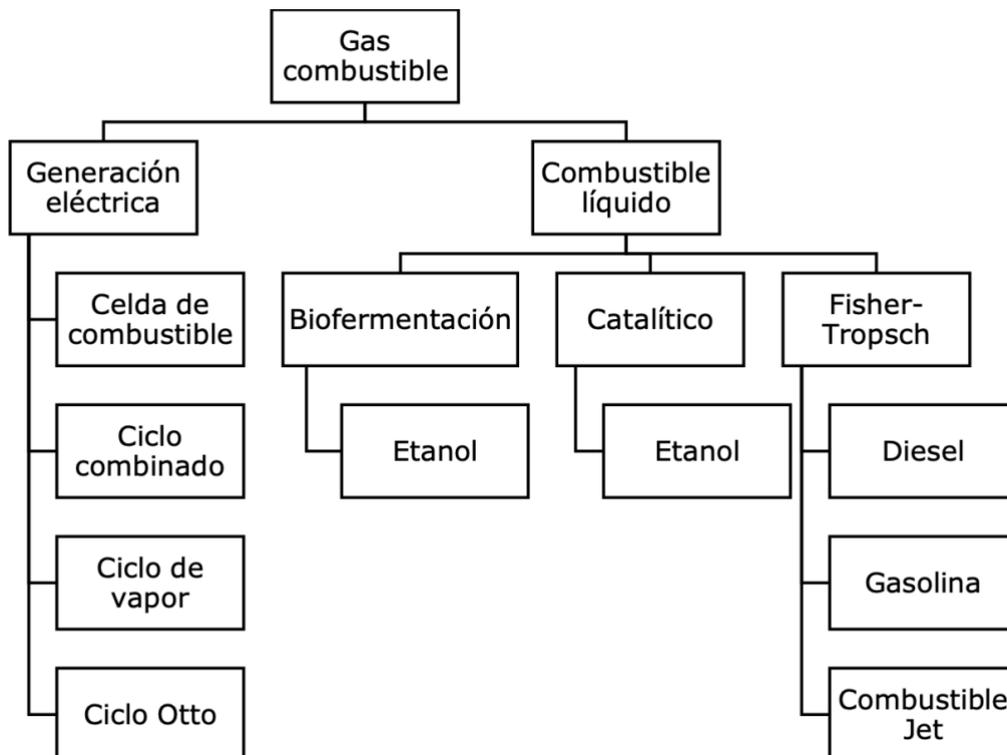


Imagen 6: Usos del gas combustible [GUER16]

2.2.4 Gasificación por Plasma

Para este proceso, debido a la actuación del plasma, se observan temperaturas muy superiores a las empleadas en las tecnologías anteriormente mencionadas, llegando a alcanzar los 15.000 °C. En estas condiciones de trabajo se consigue una disociación completa de la estructura molecular de la materia, obteniendo, así como productos finales un gas sintético -syngas- puro altamente calorífico (CO, H₂ y CH) y residuos sólidos formados principalmente por materiales no inflamables en forma de escoria, resultados muy similares al proceso convencional de gasificación.

La falta de oxígeno en este proceso garantiza una producción de gas libre de toxinas. Esto, junto con la presurización negativa de la cámara de plasma evitando así fugas de gases y partículas, garantiza un proceso ecológicamente limpio.

De entre todas estas técnicas la más versátil y la que se adecúa en mejor medida a la situación climática y económica actual es la gasificación por plasma, ya que permite trabajar con una amplia variedad de residuos sin necesidad de tratamientos previos, ofrece una regularidad de generación que se mantiene durante todo el año, pudiendo variar el ritmo de producción según se requiera, y todo esto de una forma limpia y ecosostenible. Dándose todas estas condiciones, solo haría falta estudiar la rentabilidad económica del mismo y ver si se situaría por delante de las energías renovables preponderantes en la actualidad.

3 EL PLASMA

El plasma es la denominación física que se le da al cuarto estado de la materia donde una determinada parte de las partículas están ionizadas eléctricamente dándole al plasma características altamente conductoras. Este se puede caracterizar principalmente a partir del grado de ionización y la densidad; el grado de ionización indica la fracción de átomos que han ganado o perdido electrones, y la densidad esta referida a la densidad total de electrones por unidad de volumen.

En esta situación las partículas se encuentran en un estado fluido similar al gaseoso.

El estado plasmático es el más abundante en el universo. Algunos ejemplos en los que se da este son las estrellas, los rayos, las auroras boreales, los televisores con pantalla de plasma o incluso en los tubos fluorescentes.

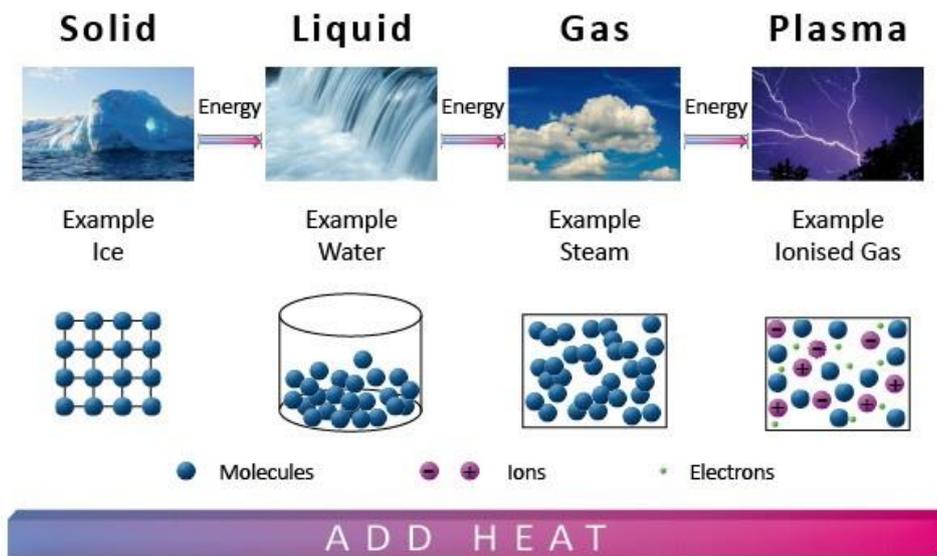


Imagen 7: Representación de los 4 estados de la materia [4]

La condición plasmática se puede alcanzar de varias formas: calentamiento de un gas a altas temperaturas, aplicando fuertes campos electromagnéticos o incluso a través de un generador de microondas. Con esto se logra el exceso o deficiencia de electrones respecto a el estado neutro del átomo, provocando un estado de desequilibrio y alta conductividad.

A pesar de este desequilibrio, la carga total del plasma suele ser aproximadamente cero. Cada carga en desequilibrio reacciona con los campos creados por el resto de las partículas que conforman el plasma.

Dentro de las posibles formas de generación de plasma, los medios más comúnmente utilizados son:

Fotoionización

Este proceso se basa en la generación de iones a partir del impacto de un fotón sobre un átomo, provocando así el desprendimiento de un electrón. Este fotón suele cargar con una mayor energía que la correspondiente a la energía de ionización del átomo. Las probabilidades de obtener un ion durante este intercambio de energía dependen de la sección transversal de la fotoionización, la cual depende directamente de la energía que lleve el fotón a incidir.

Descarga de corriente eléctrica

Para obtener plasma mediante esta técnica es necesario someter a un gas dieléctrico (tipo de gas aislante polarizable) a un cierto voltaje haciéndole pasar una corriente eléctrica a través de él. Estas condiciones hacen que las cargas negativas del material se dirijan hacia el ánodo, y las cargas positivas situadas en el núcleo hacia el ánodo, y, dependiendo del voltaje aplicado, se produce la ionización siempre que se supere el límite de rigidez dieléctrica.

Dentro de esta técnica existen varios tipos dependiendo de la naturaleza de la corriente empleada (alterna AC o continua DC), la presión a la que se encuentre el gas o de si el proceso es térmico o no.

Para este trabajo se seleccionará corriente continua debido a su mejor estabilidad, control y menor uso de electrodos, y a presión negativa, evitando así fugas de posibles gases o partículas.

El equipo o la maquinaria donde se producen todas las reacciones requeridas para el proceso de gasificación por plasma se le denomina “reactor”. En el reactor es donde se aplican todos los medios de control como la geometría, presión y temperaturas entre otros. Este suele venir dividido en distintos depósitos o recipientes, cada uno dedicado a una labor distinta dentro del ciclo total.

4 TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN. CENTRAL DE GASIFICACIÓN POR PLASMA

Las distintas tecnologías existentes se pueden resumir principalmente en tres tipos:

4.1 Sistema de plasma tradicional o de reactor autotérmico

Los residuos son previamente tratados mediante gasificación por combustión parcial, obteniendo un gas combustible junto con otros restos líquidos o sólidos en forma de cenizas y alquitranes. Mas tarde estos dos subproductos son tratados térmicamente mediante antorchas de plasma, obteniendo a la salida un gas limpio libre de impurezas y un vitrificado completo del resto de escoria sobrante.

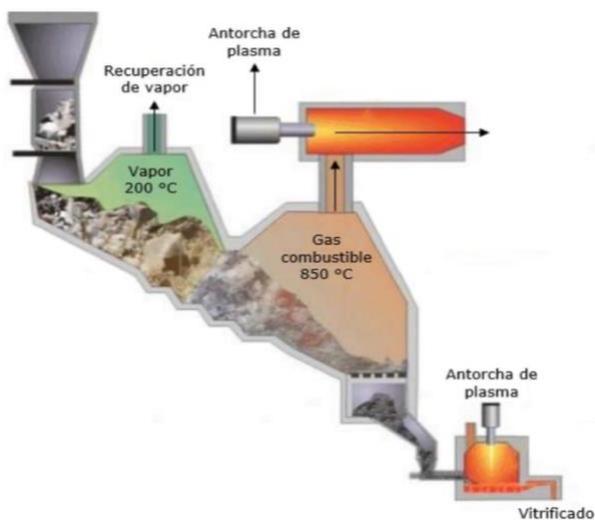


Imagen 8: Esquema reactor autotérmico 1 [GUER16]

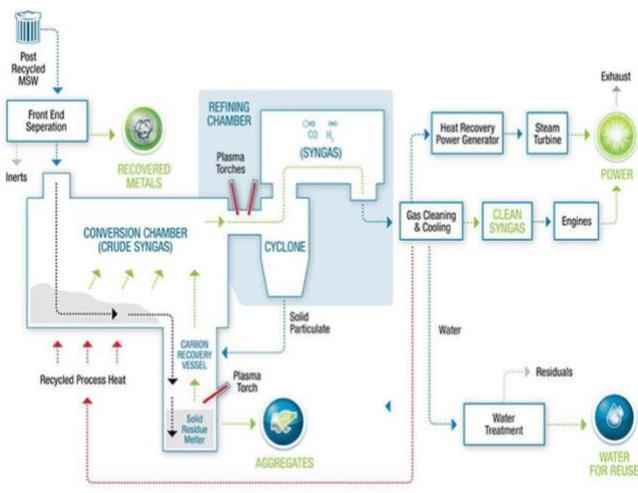


Imagen 8: Esquema reactor autotérmico 2 [7]

Este tipo de instalaciones tienen la ventaja de que requieren unas antorchas de tamaño reducido respecto a las empleadas en las otras técnicas. La principal inconveniencia de esto es la obtención de un gas sintético con alto contenido de nitrógeno, cuyo PCI es muy reducido, lo que requiere unas etapas de filtrado mayores a la salida de la central.

4.2 Sistema de plasma mixto o de reactor alotérmico

El proceso de combustión de los residuos es realizado en su totalidad a través de las antorchas de plasma, es por ello que no se producen en ningún momento restos de ceniza o alquitranes y el gas combustible obtenido es sintético y sin impurezas. La principal ventaja de este proceso es que permite la transformación de una amplia gama de residuos, ya que el método tradicional, al depender de un proceso de gasificación estándar, este no puede hacerse cargo de los productos no combustibles a su temperatura de trabajo.

El reactor empleado para este proceso es denominado vasija. Esta será más tarde desarrollada.

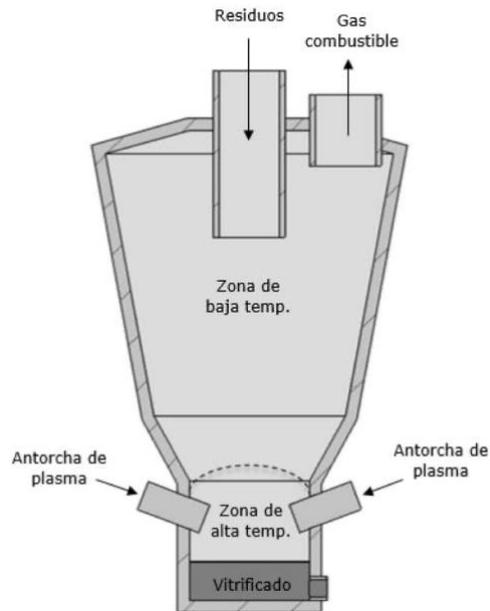


Imagen 9: Esquema vasija reactor alotérmico [GUER16]

4.3 Sistema de plasma directo

Este va a ser el sistema elegido para el proyecto. Este consta de varias etapas sucesivas contando con la ventaja de incluir sistemas de recuperación térmica que hacen a este modelo más económico y eficiente.

5 SISTEMA DE CONVERSIÓN DE PLASMA DIRECTO

Esta técnica junto con las mencionadas anteriormente cuenta con un conjunto de etapas independientes entre sí y con un amplio control con el fin de cumplir con las distintas regulaciones medioambientales consiguiendo simultáneamente un máximo rendimiento energético y económico.

Este modelo se ha obtenido a partir de un proyecto de fin de grado del repositorio de la universidad de Comillas, que a su vez ha sido facilitado por la empresa llamada Materiales Renovados. [VALE15] [8]



Imagen 10: Etapas del sistema de gasificación por plasma [8]

5.1 Proceso sistema gasificación por plasma

Etapa 1: Alimentación

En esta primera etapa se introducen los distintos residuos a nuestro sistema. La configuración de esta puede depender tanto del tipo de residuos, de su cantidad, así como también puede influir en el rendimiento del proceso.

En general la alimentación se da de forma automática, ya sea a través de pistones neumáticos, trituradoras o cintas transportadoras.

Aunque no es necesario, a la materia prima entrante se le pueden aplicar ciertos tratamientos con el fin de facilitar el proceso de transformación y transporte, permitiendo a su vez obtener una mayor eficiencia energética. Estos tratamientos tienen el como objetivo común de reducir tanto el volumen como el peso de estos residuos.

Ejemplos de estos son:

- Reducción de volumen: mediante trituradoras o molinillos. Esto permite hacer a la mezcla más manipulable.
- Clasificación y separación: el separar los residuos por tipo u origen hace al residuo más uniforme lo que facilita luego la ausencia de reacciones internas dentro de la mezcla, y una composición del gas de síntesis constante. Esta separación se puede hacer de forma bruta a través de desbastado (rejas de distinta separación), de forma magnética o visual.

- Compactación: incremento en la densidad de los residuos y reducción del volumen. Al incrementar la cantidad de materia entrante en la cámara de plasma se aumenta la velocidad y eficiencia del sistema, así como la facilidad de transporte de estos. Un ejemplo de esto son los pellets mencionados previamente.
- Deshidratación: al reducir la humedad de los residuos se minimiza el volumen de estos y se facilita el proceso posterior de pirólisis y gasificación. Esta fase permite reutilizar el calor producido en el sistema para llevarla a cabo.

Tras esto la materia se encuentra en condiciones ideales para su introducción en el sistema y su posterior tratamiento.

Junto con esto es necesario introducir en esta fase previa a la gasificación los agentes gasificantes necesarios para la creación del syngas así como el gas plasmógeno requerido en las antorchas para la producción de plasma.

Etapa 2: Disociación e ionización

En esta etapa se da la transformación de la materia introducida. Este proceso ocurre en la vasija, depósito encargado de que la materia alcance las altas temperaturas requeridas para la gasificación, así como de la separación del gas sintético y de los restos vitrificados sobrantes.

Los átomos que conforman a la materia introducida, una vez el ambiente haya alcanzado en torno a los 2.000 °C, comienzan a vibrar provocando el desprendimiento de los electrones que conforman las capas exteriores del átomo, creando así un gas ionizado o plasma.

Este estado o movimiento de los átomos tiene varias etapas partiendo desde la temperatura ambiente hasta alcanzar la temperatura de ionización, como viene representado en la siguiente imagen.

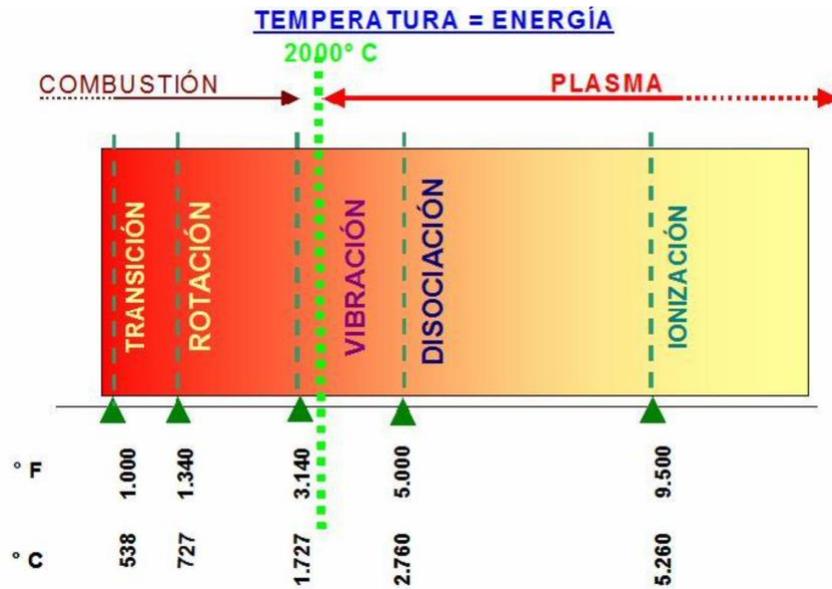


Imagen 11: Estados de las partículas en función de la temperatura [VALE15]

Una vez alcanzada la temperatura de disociación molecular, en la vasija se producen las siguientes reacciones térmicas sobre la materia:

- Cracking térmico: las moléculas del compuesto original se quiebran formándose compuestos más simples, como pueden ser algunos hidrocarburos y moléculas de hidrógeno
- Oxidación parcial: introducción controlada de oxígeno en la cámara de combustión con el objetivo de transformar las moléculas de C en compuestos gaseosos de CO más manejables. Esta oxidación se realiza de forma controlada ya que un exceso de oxígeno puede propiciar la aparición de CO₂ y H₂O, siendo estos elementos de bajo PCI.
- Reformación: transformación de los elementos no eficientes de nuestro compuesto en moléculas de CO e H₂.

Una vez finalizados estos procesos el gas de síntesis es extraído de la vasija para ser posteriormente tratado en las siguientes etapas.

Los residuos sólidos inorgánicos no gasificados se depositan en un recipiente inferior de la vasija para ser posteriormente tratados en forma de vitrificados. Debido a que el proceso es realizado a muy altas temperaturas, estos restos cuentan con una baja cantidad de lixiviados, lo que hace a este un elemento muy estable para ser utilizado como relleno sanitario (en vertederos) o para la construcción.

Las características físicas de estos vitrificados dependen tanto de la velocidad y forma del proceso de gasificación como de los tiempos y estilo de enfriado, pudiendo estos ser empleados tanto de material de construcción como de aislantes o absorbentes.



Figura 3.21: (a) Vitrificado enfriado al aire libre. (b) Nódulos de metal. (c) Vitrificado con agua. (d) Vitrificado lana mineral.

Imagen 12: Ejemplo de distintas formas de vitrificado [9]

Aun pudiendo ser estos vitrificados reutilizados de distintas maneras, en nuestro sistema se ha incluido un recipiente inferior el cual contiene arena rica en silicio fundida debido a las altas temperaturas. Esta arena logra mezclarse con los restos metálicos o tóxicos no orgánicos creando un compuesto inocuo y no lixiviable de fácil manejo y volumen reducido, el cual no supone ningún problema para la salud, pudiendo este ser más tarde utilizado o almacenado.

Etapa 3: Enfriamiento

El gas de síntesis resultante de la gasificación es extraído de la cámara a muy alta temperatura (en torno a los 1.000 °C), y este ha de ser enfriado con el fin de proteger el resto de los equipos de las etapas posteriores, así como para evitar posibles futuras reacciones entre los componentes de este gas. Esta etapa cuenta con la ventaja de que este calor que es extraído del gas puede ser aprovechado tanto para el proceso de pretratamiento de los residuos sólidos de entrada, así como para la producción de vapor y su posterior uso en ciclos de generación.

Etapa 4: Filtro

El principal objetivo de esta cuarta etapa es la purificación del gas de salida eliminando los compuestos que reducen la calidad de este.

Existe una amplia variedad de filtros, dependiendo el uso de estos de la naturaleza, tamaño y el nivel de concentración de las partículas que se pretenda filtrar. Ejemplos de estos son los filtros porosos, de carbón activo, electromagnéticos o los separadores por gravedad.

En el caso de nuestra instalación se va a emplear un filtro denominado ciclón, el cual funciona a través de la aplicación de fuerzas de inercia y centrífugas. El principio básico de este filtro se basa en aplicar una fuerza centrífuga al gas, forzándolo a realizar una trayectoria helicoidal. A partir de este movimiento y gracias al diseño interior del depósito del ciclón, las partículas más pesadas se dirigen hacia la parte inferior, mientras que el gas limpio libre de partículas se dirige hacia la parte superior.

El tamaño de estos depende del nivel de carga al que se le vaya a someter.

La principal ventaja de esta tecnología es su bajo coste, ya que la propia instalación no requiere de una inversión muy alta, sus gastos de mantenimiento son bajos y carece de piezas móviles internas que puedan sufrir algún tipo de daño o fallo.

Sin embargo, este método es efectivo para partículas de tamaño relativamente grandes, a partir de las 5-10 μm de diámetro.

Aun contando con este filtro, si se observa que las condiciones del gas de salida no son las buscadas, o que los requerimientos químicos del gas son inefectivos, existe la posibilidad de incluir filtrados secundarios a la salida de este ciclón como pueden ser los electrostáticos o los de carbón activo, muy efectivos para la retención de partículas de menor tamaño, aunque este último va a ser aplicado en la etapa final.

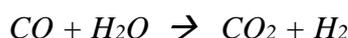
Etapa 5: Neutralización

Esta etapa final tiene como objetivo eliminar los ácidos formados por la reacción entre los átomos de hidrógeno y los halógenos restantes en la mezcla. Para ello se somete al gas a una ducha de agua básica neutralizando a los halogenuros, obteniendo como residuo del proceso agua salina. Tras esto un filtro de carbón activo es aplicado.

Una vez finalizado este proceso de cinco etapas se obtiene como producto un syngas limpio y a temperatura ambiente. Este se compone principalmente de CO (70%), dióxido de carbono, hidrógeno y nitrógeno (aproximadamente un 5% en volumen de cada uno de estos). La fracción restante de compuesto la componen moléculas de H₂O y metano junto a otros.

El exceso de CO respecto del hidrógeno, junto con la presencia de dióxido de carbono, ha de ser tratado si se desea obtener un gas combustible más eficiente y aprovechable. Para ello, tras la etapa de neutralizado se llevan a cabo dos tratamientos:

- Reacción de desplazamiento del gas de agua (wáter-gas shift reaction): con este proceso se logra aumentar la concentración en hidrógeno del gas de síntesis. Se hace reaccionar las moléculas de CO con vapor de agua a través de ciertos catalizadores, obteniendo hidrógeno y dióxido de carbono en menor medida.



Esto produciría un aumento en la densidad de CO₂ que habría que reducir.

- Método CAC (Captura y Almacenamiento del Carbono): son métodos que a una escala industrial permiten reducir casi en su totalidad las emisiones de dióxido de carbono. Uno de los muchos métodos existente en la actualidad es el empleo de aminas para el atrapamiento de estas moléculas.

5.2 Principales componentes de la planta

Vasija

La vasija es el elemento principal de este sistema. Es la cámara encargada de la contención de una atmósfera plasmática y de la posterior disociación de las partículas introducidas en esta.

Consta de dos partes, cuerpo y tapa, los cuales han de estar correctamente sellados para evitar posibles fugas. Para ello, también, el recipiente se encontrará a presiones negativas. Este cuerpo, en el interior, contará con una capa de aislante térmico, evitando así pérdidas de calor hacia el exterior, protegiendo a su vez al cuerpo de este de las altas temperaturas.

La Imagen 9 muestra el esquema básico de esta vasija, con sus ranuras principales para la disposición de las antorchas, así como las salidas y entradas de los fluidos tratados. Para la extracción de los subproductos obtenidos se puede dar el gas y vitrificado por separado o su salida conjunta del sistema.

Antorcha de plasma

Las antorchas de plasma son las encargadas de producir el plasma artificialmente mediante descarga de arco eléctrico a presión atmosférica. Estas dan lugar a un plasma térmico de alta potencia pudiendo alcanzarse temperaturas de hasta 15.000 °C.

A grandes rasgos existen dos tipos:

- Antorcha transferida: uno de los electrodos se sitúa fuera de la antorcha, en algún punto de la vasija. Este produce unos arcos más largos y localizados. El electrodo interno a la antorcha deberá de ser sustituido periódicamente.
- Antorcha no transferida: ambos electrodos se sitúan en la antorcha. Es una tecnología menos potente, empleada principalmente para vaporizar y calentar sólidos.

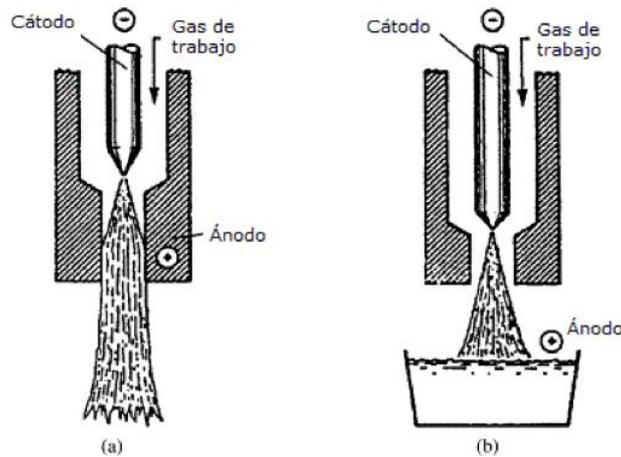


Imagen 13: Esquema antorchas de plasma a)no transferida y b)transferida [GUER16]

El plasma es provocado por la ionización del gas de trabajo situado en el espacio entre los electrodos.

Para la instalación planteada se empleará una antorcha de arco no transferido alimentado mediante corriente continua, ya que se adecúa en mayor medida a las condiciones requeridas para nuestro proyecto.

Sistemas de alimentación y extracción

La instalación deberá contar con distintos sistemas de alimentación y extracción controlables. Estos se encargan de proveer al sistema de materia orgánica, gas combustible, y fluido refrigerante en todo momento, así como de transportar los subproductos obtenidos a sus convenientes zonas de almacenaje. Cada uno de estos sistemas será configurado conforme a los requerimientos de cada etapa.

- Sistema de alimentación: se tomará control sobre la velocidad de entrada de la materia prima a nuestro sistema. Dependiendo del volumen y condiciones de los residuos a tratar se emplearán distintos mecanismos, siendo el tornillo sinfín el seleccionado tanto para la alimentación como para la extracción de materia.
- Circuito de refrigeración: intercambiador continuo agua-agua así como un sistema secundario con el fin de mantener el fluido refrigerante principal a temperatura constante.
- Sistema de gas de trabajo: en este caso nuestro gas plasmógeno será aire ambiente, opción más barata que otros gases puros como el O_2 o el H_2 . Este será inyectado bajo ciertas condiciones de presión y velocidad.
- Gas de síntesis: este, una vez enfriado, será extraído mediante un ventilador soplante controlado. Nos permitirá controlar la presión del interior de la vasija.

Sistema de control del proceso

Este será el encargado de controlar y variar a tiempo real los parámetros de operación de cada uno de los elementos automatizados que conformen la instalación.

Realizará estas labores a través de un control lógico programable de lazo cerrado, monitorizando las condiciones del gas y restos a la salida por si posteriormente es necesario realizar ajustes en algún punto de la cadena.

6 PRINCIPALES FUENTES DE RECURSOS ORGÁNICOS

A continuación, se va a realizar un estudio aproximado de la cantidad de residuos aprovechables que se podrían obtener en la ciudad de Córdoba y sus alrededores para ser posteriormente tratados en la planta anteriormente descrita. Esta materia prima a utilizar comprendería la obtenida en las regiones urbanas, las agrícolas y las forestales, entre otros.

Para los residuos urbanos se va a emplear únicamente lo generado en la ciudad de Córdoba y para el resto se analizará la accesibilidad de los distintos focos de producción de estos residuos.

6.1 RSU de la ciudad de Córdoba

Para la obtención de los datos de RSU se ha hecho uso de los datos públicamente facilitados por SADECO. Esta es la empresa encargada del saneamiento, limpieza y todo lo relacionado con la manutención del espacio público de la ciudad de Córdoba.

La siguiente figura muestra una tabla con los datos anuales de las recogidas totales realizadas en la ciudad en cuestión.

Procedencia	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Recogida SADECO	152.858	153.270	160.291	159.664	156.951	165.647
Domiciliaria	150.633	150.742	157.658	157.235	154.019	161.833
- Materia Orgánica	78.146	77.673	75.217	73.051	70.004	71.364
- Ecoaparques	13.528	13.328	13.861	13.620	13.188	15.991
- Envases e Inertes	50.021	51.536	57.091	57.094	57.216	59.267
- Vidrio	2.443	2.416	3.101	3.631	3.630	3.790
- Papel-Cartón	6.240	5.396	7.957	9.296	9.435	9.696
- Enseres a domicilio	78	185	215	259	252	386
- RAEE	177	208	216	284	284	314
- Pilas y Acumuladores eléctricos					10	7
- Restos de poda (*)						1.017
Limpieza Viaria	2.209	2.497	2.615	2.411	2.916	3.797
Animales (*)	16	31	18	18	16	17
Recogida externa	51.763	62.156	72.961	70.240	58.605	60.152
Industriales y asimilables	15.987	17.101	24.534	18.234	18.178	18.043
Industriales y asimilables RCD	3.504	7.892	8.461	13.777	4.553	7.718
Lodos EDAR	32.272	37.163	39.966	38.229	35.874	34.392
Total general	204.621	215.426	233.252	229.904	215.556	225.799

Tabla 11: Procedencia de los residuos urbanos en toneladas y por año [10]

En torno a las 220.000 toneladas de RSU son producidos cada año únicamente en la ciudad de Córdoba. Esta se caracteriza por ser una de las ciudades más limpias del país entre otras cosas debido al alto porcentaje de residuos que terminan siendo reciclados. Es por ello por lo que para el estudio teórico de la central no se va a contar con el acceso a la totalidad del mercado de esta materia prima, ya que en la actualidad existen muchas empresas que están haciendo uso de ella con fines energéticos o económicos.

A continuación, se adjunta una imagen que muestra los principales destinos de estos residuos para el año 2020:

Año 2020	Reciclaje	Compost.	Cremación	Vertedero	Rechazos	TOTAL
Envases e Inertes	14.379.195	-	-	-	42.836.503	57.215.698
Vidrio	3.630.320	-	-	-	-	3.630.320
Papel-Cartón	9.435.010	-	-	-	-	9.435.010
Materia Orgánica	-	32.438.146	-	-	37.565.675	70.003.821
Escombros Ecoaparques	6.090.370	-	-	-	-	6.090.370
Textiles Ecoaparques	95.768	-	-	-	-	95.768
Maderas Ecoaparques	1.259.842	-	-	-	-	1.259.842
Aceites Ecoaparques	11.555	-	-	-	-	11.555
Metales ecoaparques	128.140	-	-	-	-	128.140
Enseres Ecoaparques	1.057.420	-	-	-	-	1.057.420
Poda Ecoaparques	-	549.220	-	-	-	549.220
Limpieza Viaria Ecoaparques	-	-	-	-	3.995.940	3.995.940
Escombros externos	4.526.947	-	-	-	25.800	4.552.747
Cadáveres de animales	-	-	15.165	-	-	15.165
Cenizas	-	-	-	-	865	865
Limpieza Viaria	-	-	-	-	2.916.379	2.916.379
Industriales y asimilables (foráneos)	14.200	7.391.788	-	-	10.771.989	18.177.977
Lodos EDAR	-	3.937.240	-	-	31.936.610	35.873.850
RAEE	283.940	-	-	-	-	283.940
Enseres	48.563	-	-	-	203.497	252.060
Pilas	10.320	-	-	-	-	10.320
TOTAL	40.971.590	44.316.394	15.165	130.253.258	215.556.407	

Tabla 12: Destino de los RSU gestionados por SADECO [10]

Como se puede observar en la Imagen 14, aproximadamente el 40% de la recogida de los RSU ya son destinados a actividades de reciclaje entre otros. Para estos, se supondrá un acceso a largo plazo del 30% de su producción total.

En lo que a los vertederos controlados respecta, conociendo de su actual situación respecto a la normativa europea y la opinión pública, se supondrá un acceso al total de sus fuentes de abastecimiento

Sumando ambas cantidades se llegaría a una cantidad anual de 155.839,65 toneladas.

Para las zonas rurales y pueblos de la provincia, la empresa encargada de la recogida y almacenamiento de los desechos es EPREMASA. La siguiente tabla muestra el recuento de la gestión global de los residuos municipales.

		AÑO 2021	AÑO 2020	Variación
Residuos Municipales Gestionados CCM de Montalbán	Líneas de fracción orgánica y de envases, más Planta de tratamiento de enseres	190.194	192.380	-1,14%
Otros Residuos Municipales Gestionados	Papel cartón y vidrio recogido selectivamente, más Materiales proced.de Puntos Limpios (madera, papel, RAEE, RTP,s y restos de poda)	13.319	11.391	16,93%
	TOTAL RRMM Gestionados	203.513	203.772	-0,13%
	Toneladas Recuperadas	30.622	24.440	25,29%
	% Recuperadas	15,05%	11,99%	25,45%
	Poblaciones atendidas	457.278	459.532	-0,49%
	kg/hab/día generados	1,219	1,215	0,37%
	kg/hab/día recuperados	0,183	0,146	25,91%

Tabla 13:Residuos rurales gestionados por EPREMASA [11]

En las zonas rurales y pueblos se puede observar como el nivel de reciclaje es menor respecto a la actividad dada en la capital. Aun así, cabe destacar un aumento del 25% respecto al año anterior en este campo.

Estas cantidades supondrían un total de 172.891 toneladas de residuos no recuperados. A pesar de existir la posibilidad de contar con estas cantidades para el proyecto planteado, al formar parte estos datos de recogidas externas a la ciudad de Córdoba, se va a suponer la posibilidad de acceso al 20% de ellas ya que esto encarecería los gastos de transporte y recogida. Esto supondría un total de 34.578,2 toneladas.

El total de RSU obtenido al año, suponiendo que el 65% de los residuos son tratables mediante plasma, sería de 123.771,6 toneladas

6.2 Residuos forestales

La región de Córdoba, junto con su masa forestal, se ha visto peligrosamente amenazada debido a la acción humana y la existencia de numerosos incendios a lo largo de los últimos años.

Fruto de toda esta actividad se generan cuantiosas cantidades de restos de ramas, trocos y hojas, las cuales favorecen aún más la aparición y propagación de nuevos incendios.

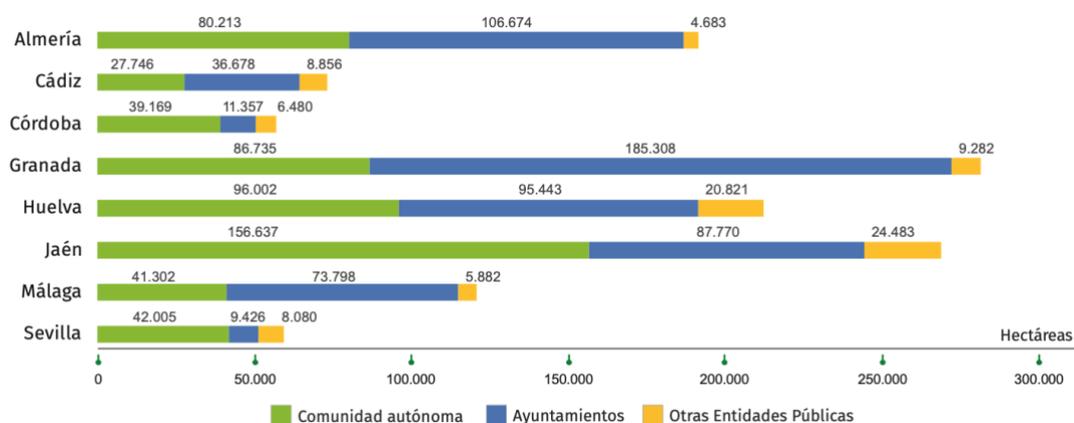


Imagen 14: Superficie forestal pública por provincia en Andalucía [12]

La provincia de Córdoba cuenta en la actualidad con un total de 73.280 hectáreas de terreno forestal público. Esta cantidad equivaldría a una producción anual de 23.000 toneladas de materia seca. Esta aproximación ha sido realizada a partir de la información recabada de uno de los trabajos disponibles en el repositorio de comillas. [VALE15]

Debido a la falta de información y exactitud de los cálculos anteriores, no se considerarán estos datos a la hora de llevar a cabo el diseño de la planta de gasificación.

6.3 Residuos agrícolas

A estos pertenece todo residuo proveniente de cultivos de cualquier tipo. La región de Córdoba, y en general Andalucía, está caracterizada por ser una de las mayores de término de terreno aprovechado para cultivos. Dentro de su amplio rango de cultivo, esta provincia produce principalmente cultivos herbáceos como cereales o algodón, así como otros cultivos leñosos como pueden ser el olivar y viñedos en menor medida. Se supondrá una periodicidad cíclica anual para cada cultivo.

Para facilitar cálculos, de estos se van a tomar como principales los cereales y el olivo, contando ambos con una superficie de producción de más de 100.000 hectáreas, como se puede observar en el Anexo A. A partir de la superficie cultivada se va a estimar la producción en toneladas de cada una, obteniendo mediante una aproximación la cantidad de residuos generados en el procesado de estos.

Cultivo	Superficie (ha)	Producción (Tn)	Rendimiento (Tn/ha)
Olivar	306.534	427.996	1.5
Cereal	127.047	201.166	1.6

Tabla 14: Estimación del rendimiento de los residuos de producción por hectáreas [2]

Esto supondría un total de 630.000 toneladas de biomasa producida anualmente. De este total, se supondrá un acceso a corto plazo al 30%, debido a posibles contratos con empresas externas para la compra de los residuos, quedando 189.000 toneladas de biomasa accesible para la producción de gas combustible.

6.4 Resumen total de residuos

A partir de las aproximaciones realizadas y supuesto la obtención parcial de los residuos disponibles se ha llegado a una cifra de 312.771,6 toneladas anuales de material tratable mediante plasma. Esto supone una carga diaria de 850 toneladas. Mas tarde se dimensionará la central en función de esta cifra.

Haciendo uso de la información disponible en el Anexo B y observando los valores de PCI de los distintos residuos se estimará un valor medio de esta potencia de entorno a las 3500 kcal/kg.

Biomasa Total (Tn)	312.771,6
RSU	40%
Olivar y cereal	60%
Energía Calorífica Total (Gca/año)	1.094.700,6

Tabla 15: Resumen total de residuos

Cabe destacar que, en el modelo planteado, la mayor parte del peso de producción de biomasa recaería sobre los RSU recogidos, ya que como se mencionó anteriormente, este se mantiene constante con pequeñas variaciones dependiendo del lugar y la estación

del año. En cambio, la producción agraria es estacional, dándose altos picos de producción de materia en los meses de recogida.

Esta situación presentaría dos escenarios:

- Se produce un pico importante de la actividad de la instalación durante los meses de recolección, llegando incluso a desecharse altas cantidades de biomasa útil. No hay necesidad de almacenamiento, ahorrando costes de pretratamiento de la materia.
- Se almacenan los restos orgánicos agrarios mediante un tratamiento de deshidratación y compresión, evitando así su rápida descomposición. Implica mayor coste. En estas condiciones la central contaría con un sistema de reserva seguro.

7 DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA

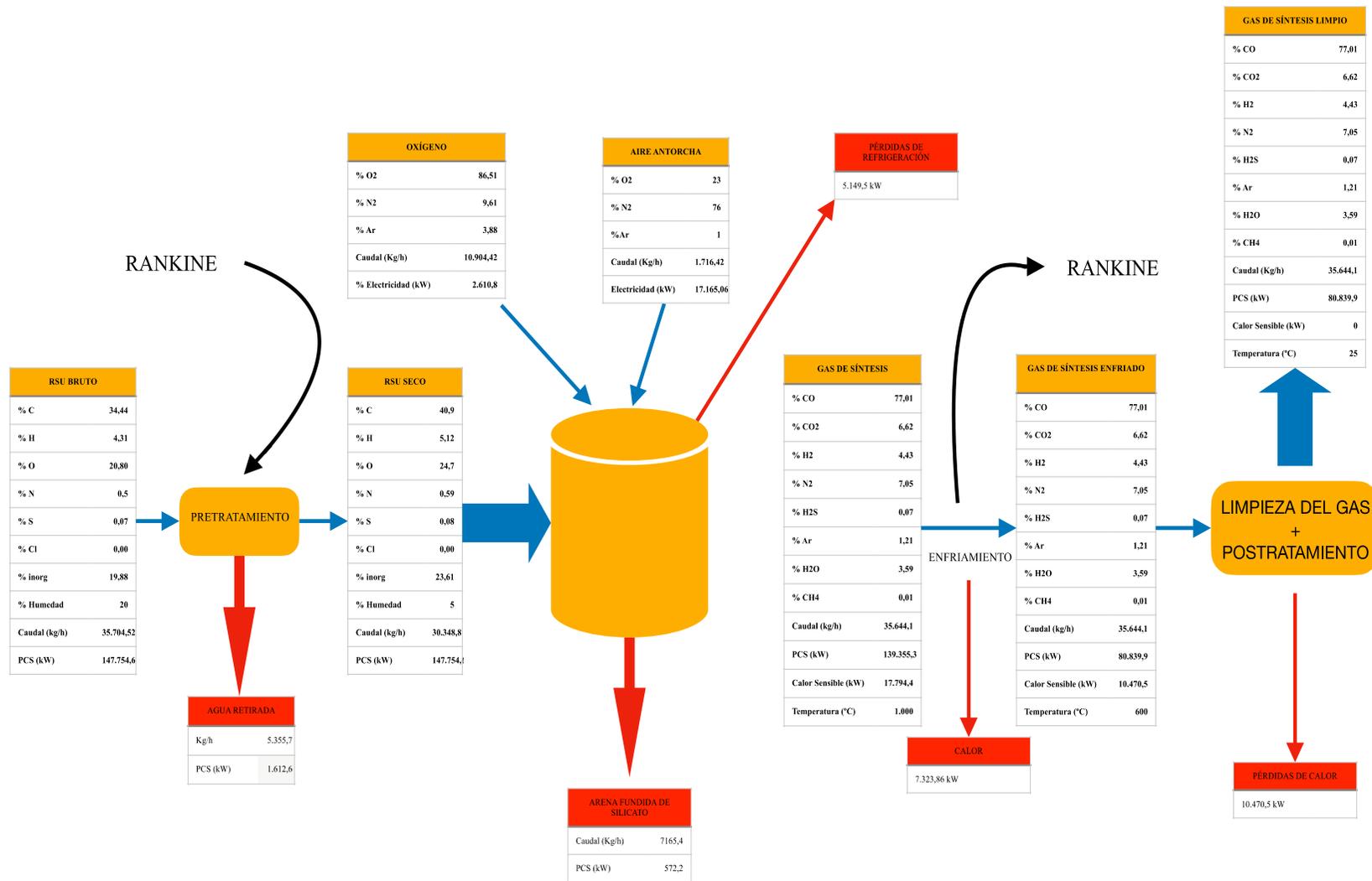
A partir de las aproximaciones de residuos realizadas se estima una entrada de materia de 850 toneladas diarias. Es por ello por lo que se dimensionará la planta para una entrada de 500 toneladas, dejando un margen en caso de necesidad de una mayor producción. Como ya se mencionó anteriormente, esta planta contará con un abastecimiento constante de RSU, así como de acceso al almacenamiento de los residuos correspondientes a la biomasa generada en los sectores forestales y agrarios, permitiendo esto cierta flexibilidad y regularidad a la hora de mantener los ritmos de producción a lo largo del año.

El principal objetivo del dimensionamiento no es el de diseñar las máquinas y sistemas que conforman esta cadena, ya que esto se puede realizar a posteriori, sino estudiar la conveniencia energética y el balance final del ejercicio.

Teniendo en cuenta esto y los elementos que componen la central, se va a estimar el balance energético total de la misma. Para ello se ha hecho uso tanto de los datos facilitados por la empresa Materiales Renovados como del trabajo de Almudena Valenciano López.

7.1 Balance energético

Se va a analizar cada una de las etapas que conforman el sistema de gasificación por plasma tanto desde un punto de vista energético como de intercambios másicos. Tras esto se analizará cada uno de los tramos donde se dan intercambios de energía, así como el resultado final de producción de gas combustible.



7.2 Recuperación de calor: Ciclo Rankine

Previamente al limpiado y filtrado del gas de síntesis, este, que es extraído a muy altas temperaturas, ha de ser enfriado, evitando así problemas de degeneración en los sistemas de conexión y puntos intermedios. Para hacer al sistema más eficiente, como se comentó anteriormente, esta alta energía almacenada en el gas en forma de calor va a ser aprovechada mediante su intercambio a otro fluido externo al sistema de producción.

Este intercambio de calor se va a realizar mediante un conducto exterior, produciéndose un contacto indirecto por contraflujo. Este flujo de calor tendrá dos funciones principalmente:

- Generación eléctrica mediante turbina para su posterior uso en el propio sistema, como puede ser la alimentación eléctrica de los sistemas motrices o de las antorchas.
- Aportación calorífica para el pretratamiento de los residuos de entrada.

A continuación, se muestra un esquema simplificado de este ciclo:

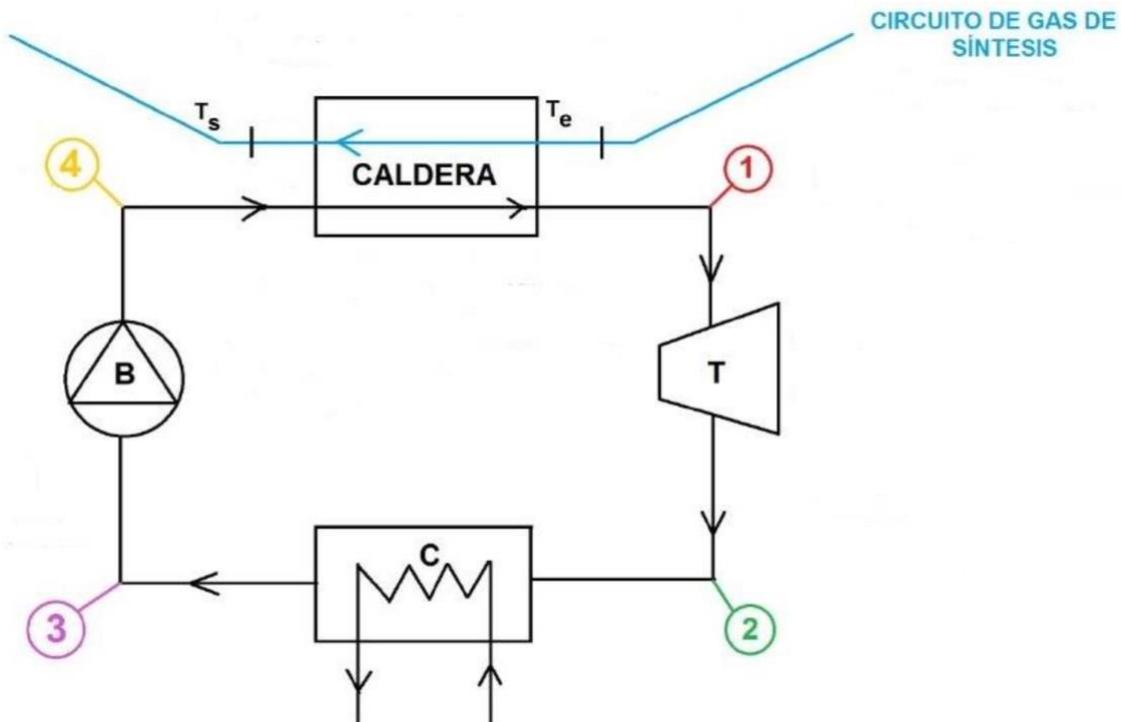


Imagen 15: Esquema representativo del ciclo Rankine [VALE15]

Cada una de las partes de este ciclo cumple con unas labores distintas.

7.3 Caldera de recuperación e intercambio de calor

En esta zona se da el intercambio de calor entre dos fluidos a través de dos circuitos independientes, el gas de síntesis extraído de la vasija, y un fluido en forma de agua-vapor. Estos se relacionarán mediante un contraflujo con el fin de maximizar el intercambio.

En cuanto al circuito del syngas, este entra en el intercambiador a 1000 °C y deja este a 600 °C ya enfriado. Para facilitar cálculos, se supondrá que el vapor de agua deja esta zona a la misma temperatura que el syngas, a 600 °C. Todo esto a una presión de unos 40 bar aproximadamente.

En la siguiente tabla se muestran las condiciones del agua a lo largo de la caldera, obtenidos a partir de los valores nominales de funcionamiento de las calderas en ciclos Rankine, así como de las tablas de propiedades del agua:

Punto	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
1	50	600	3.666,5
4	50	41,6	178,8

Tabla 16: Condiciones de trabajo de la caldera

El calor intercambiado en este proceso es aproximadamente de 7.323,86 kW. Teniendo en cuenta un rendimiento por pérdidas del 90%, obtendríamos:

$$Q_{final} = 7.323,86 * 0,9 = 6.591,5 \text{ kW}$$

Para estas condiciones tendríamos un flujo másico de:

$$\dot{m} = \frac{Q_{cedido}}{(h1 - h4)} = 1,8899 \frac{kg}{seg} = 6,8 \text{ Tn/hora}$$

Esta sería la cantidad de agua de entrada al resto de elementos del ciclo.

Turbina

El vapor sobrecalentado extraído de la caldera es directamente dirigido a la turbina. El alto contenido energético de este vapor en forma de presión es transformado en un movimiento de giro de las aspas del generador debido a su expansión isentrópica. Esto

se traduce en generación eléctrica. Este tramo corresponde con el situado entre los puntos 1 y 2 del esquema.

Tomando 0,08 bares como presión de salida tendríamos:

Punto	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
1	50	600	3.666,8
2	0,08	41,5	2.576,2

Tabla 17: Condiciones de trabajo de la turbina

A partir de estos datos se puede obtener el trabajo producido en la turbina, suponiendo un rendimiento total del 90%:

$$W_T = \eta * \dot{m} * (h_1 - h_2) = 0,9 * 1,8899 * (3.666,8 - 2.576,2) = 1.855,012 \text{ kW}$$

Condensador

En este tramo se da una segunda transmisión de calor a presión constante. Situado entre los puntos 2 y 3, este tramo corresponde con la zona de secado de los residuos introducidos en el sistema.

Junto con la reducción de la entalpía también se produce un cambio de estado de vapor a líquido saturado del fluido, el cual posteriormente ha de ser introducido en la bomba.

Punto	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
2	0,08	41,51	2576,2
3	0,08	41,51	173,84

Tabla 18: Condiciones de trabajo del condensador

En este tramo se produciría de nuevo un intercambio de calor, esta vez entre los residuos y el conducto de agua.

$$Q_{cedido} = \eta * \dot{m} * (h_2 - h_3) = 4.086,2 \text{ kW}$$

Bomba

En esta tercera etapa se da una compresión isoentrópica del líquido con el fin de llevar al fluido a la presión de la caldera. Este proceso supone un consumo extra de potencia.

La siguiente tabla muestra las condiciones del fluido a la entrada y salida de este elemento:

Punto	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
3	0,08	41,51	173,84
4	50	41,56	178,8

Tabla 19: Condiciones de trabajo de la bomba

La potencia consumida en esta bomba se calcula como:

$$W_{bomba} = \frac{\dot{m} * (h_4 - h_3)}{\eta} = 10,42 \text{ kW}$$

Estos cálculos se han realizado suponiendo un rendimiento del motor del 90%.

Energía total del ciclo

Este valor equivale al total generado por la turbina menos el consumo producido por la bomba, la cual será alimentada directamente desde la turbina. Quedándonos finalmente:

$$W_{neta} = W_{turbina} - W_{bomba} = 1.844,6 \text{ kW}$$

Se puede observar como el ciclo, de los 7.323,86 kW perdidos durante el enfriamiento del gas, es capaz de generar eléctricamente 1.844,6 kW, esto supone una recuperación del 25 % aproximadamente.

Suponiendo que la central se encuentra activa a lo largo del año, esto supondría una generación total de 16.158,7 MW, cantidad que sería empleada para la alimentación de otras partes de la central, su almacenaje, reutilización o incluso venta.

7.4 Calor cedido para el secado de residuos

Como parte previa a la introducción de los residuos, estos han de ser deshumidificados entre otros procesos, facilitando así la gasificación de los mismos. Para ello se va a hacer uso de esta energía extraída durante el enfriamiento del gas de síntesis con el fin de reducir este contenido acuoso en torno a un 15%.

La siguiente fórmula muestra el calor requerido para obtener esta reducción:

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

Siendo \dot{m}_{vapor} la cantidad total de agua que se desea eliminar y L_{agua} el calor latente del agua, que representa la cantidad de energía que es necesaria para llegar a un cambio de fase.

Tomando $L_{\text{agua}} = 2.255 \text{ kJ/kg}$ y $\dot{m}_{\text{vapor}} = (20\% - 5\%) * 35.704,5 = 5.355,68 \text{ kg/h}$ tendríamos:

$$Q_{\text{secado}} = 2.255 * 5.355,68 = 12.077.047,13 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 3.354,73 \text{ kW}$$

Por lo que para el secado de los residuos se requerirán 3.354,73 kW. Esta cantidad será tomada a partir del calor absorbido en el condensador, el cual como se vio anteriormente es capaz de producir hasta 4.086,2 kW, luego el sistema planteado sería capaz de encargarse de esta reducción de forma directa sin necesidad de ningún aporte exterior de energía.

Como conclusión podemos observar como este ciclo Rankine cumple con tres funciones principales: absorción del calor desperdiciado durante el enfriamiento del gas de síntesis; la transformación de este calor en energía eléctrica aprovechable ya sea dentro del propio sistema o para algún otro elemento exterior; aprovechamiento del calor sobrante del ciclo para el pretratamiento de los residuos que se vayan a introducir al sistema. Estos principios hacen de esta planta de gasificación un sistema enormemente más eficiente, ahorrando una alta cantidad anual de costes en electricidad y energía.

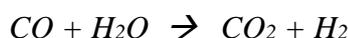
7.5 Producción final de hidrógeno

Una vez finalizadas las distintas etapas que componen a esta central, se obtiene un gas de síntesis limpio y filtrado, compuesto principalmente por monóxido de carbono junto con otros compuestos como son el hidrógeno y dióxido de carbono entre otros. Es por ello que para mejorar la calidad de este gas se precisa de unas etapas posteriores cuyo fin es el de aumentar la cantidad de hidrógeno, haciendo así a este combustible más potente en términos caloríficos. A esto se le denomina reacciones shift las cuales se encargan de transformar químicamente las moléculas de CO en H₂.

SYNGAS	
% CO	77,6
% CO ₂	6,67
% H ₂	4,46
% N ₂	7,11
% H ₂ S	0,00
% Ar	1,22
% H ₂ O	2,93
% CH ₄	0,01

Tabla 20: Composición del gas de síntesis bruto [VALE15]

La reacción shift mencionada anteriormente es la siguiente:



Siguiendo las relaciones estequiométricas de esta reacción se podría calcular cuánto hidrógeno se obtendría al añadir agua al CO contenido en la mezcla. Es importante mencionar que durante estas reacciones no suele transformarse la totalidad del CO en H₂, quedando un sobrante de aproximadamente el 30% de este.

$$\dot{m}_{H_2,shift} = \frac{\dot{m}_{CO}}{MM_{CO}} * MM_{H_2} = \frac{77,6 - 30}{100} * 35.704,52 \frac{kg}{h} * 2 = 1.213,52 \frac{kg}{h}$$

Sumando a esta cantidad la obtenida originalmente durante la gasificación obtendríamos:

$$\dot{m}_{H_2,total} = \dot{m}_{H_2,initial} + \dot{m}_{H_2,shift} = \frac{4,46}{100} * 35.704,52 + 1.213,52 = 2.805,94 \frac{kg}{h}$$

Por lo que sabemos que a partir de un volumen de entrada de 35.704,5 kg/h de residuos orgánicos obtendríamos un total de 2.805,94 kg/h de hidrógeno.

8 LOCALIZACIÓN DE LA CENTRAL

Para la disposición de la planta se va a tener en cuenta la cercanía de esta a las zonas principales de abastecimiento de materia orgánica, así como de la red eléctrica para su conexión directa en caso de que sea necesario.

Como se ha visto previamente, se depende casi a partes iguales del abastecimiento tanto de los RSU como de los correspondientes al sector agrario. Es por ello que se buscará un área central.

En la siguiente imagen se muestra la distribución agraria en la zona sur de España, con un sombreado en la provincia de Córdoba. Esta información ha sido obtenida a través de la página web del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación

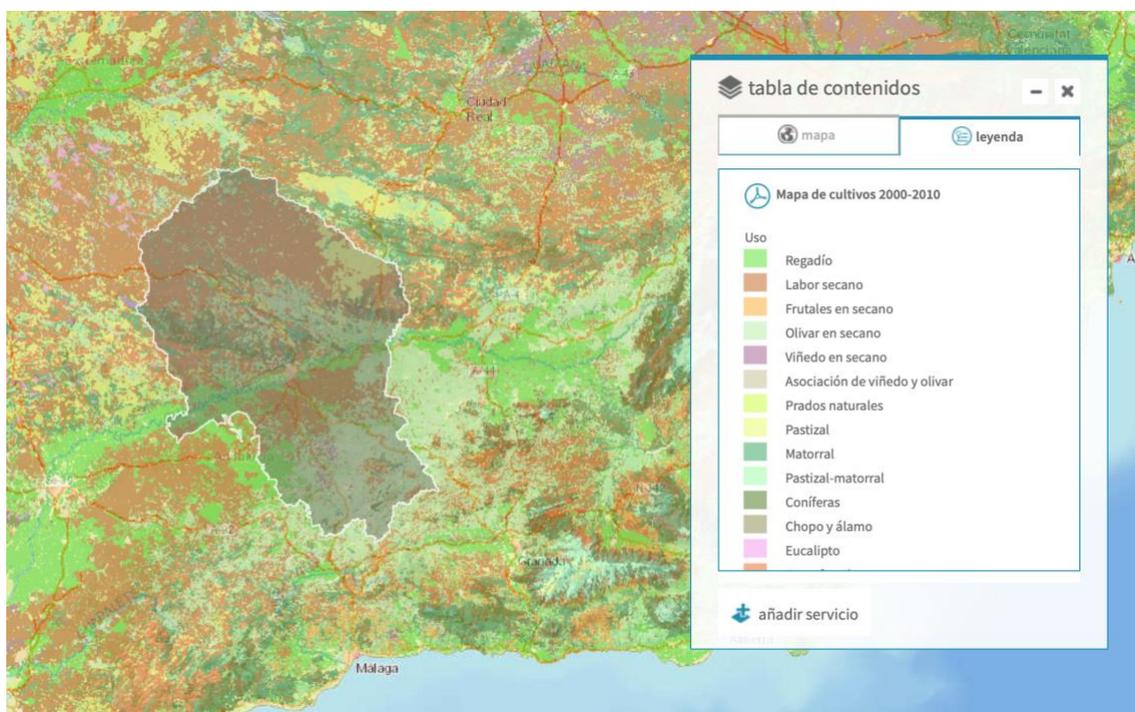


Imagen 16: Mapa agrario de la provincia de Córdoba

Como se puede observar en la Imagen 16, las zonas de interés se encuentran tanto en la zona central de la provincia (ciudad de Córdoba) como la región subbética de la provincia donde se concentra toda la producción de olivar, principal fuente de residuos a emplear en este proyecto.

Es por ello que la localización de la planta se debe dar en algún punto intermedio entre estas dos zonas.

Teniendo en cuenta la disposición de la red de transporte eléctrico mostrado en la Imagen 3, se ha decidido situar la central en algún punto cercano al municipio de Espejo, localizado en la comarca de la Campiña Este-Guadajoz.

Tomando este punto, las distancias de transporte medias se reducen al mínimo, siendo estas de un máximo de 35 km.

Capítulo 4. GAS DE SÍNTESIS. HIDRÓGENO: ALMACENAMIENTO Y SERVICIO

1 GAS DE SÍNTESIS

El gas de síntesis o syngas es el producto resultado de la combustión de la materia orgánica. Este se compone principalmente de hidrógeno y monóxido de carbono, suponiendo estos el 80% de la mezcla.

Para este trabajo, una vez realizadas las distintas etapas de limpiado y filtrado, así como las reacciones de desplazamiento del gas agua y atrapado y retirado del CO₂, se obtendría la siguiente composición aproximada.

SYNGAS	
% H ₂	53,6
% CO	32,4
% N ₂	10,4
% CO ₂	2,7
% H ₂ S	0,00
% Ar	0,9
% H ₂ O	0
% CH ₄	0,01

Tabla 21: Composición final syngas [2]

La proporción de hidrógeno en la mezcla se podría aumentar hasta un 80% mediante técnicas más intensivas de retirada de impurezas y otros compuestos perjudiciales para el gas. Esto afectaría a los costes de producción.

La principal ventaja de esta técnica se basa en que independientemente de los residuos de entrada, la composición se mantiene constante, con distribuciones similares de sus componentes principales. Esto permite un ahorro importante a la hora de preseleccionar y dividir la materia de entrada, ya que el resultado de la actividad no se ve variado por esto.

En la siguiente imagen se muestra la composición de distintos gases de síntesis según el origen de los residuos de entrada:

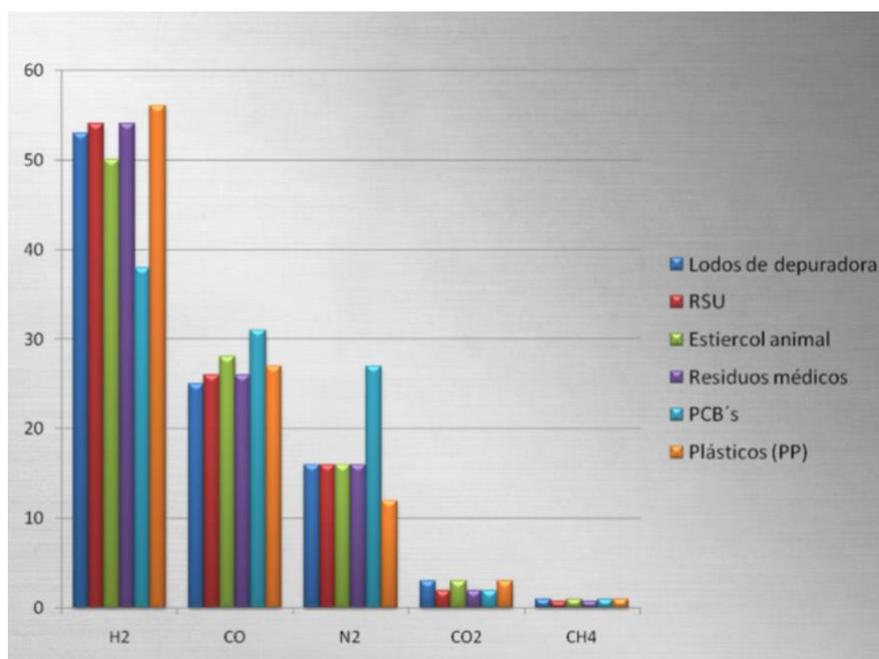


Imagen 17: Composición del syngas en función de los residuos orgánicos de entrada [16]

Como se puede apreciar, la composición de este gas combustible se mantiene relativamente constante independientemente de los residuos de entrada.

Una vez obtenido este gas combustible, existen una amplia variedad de usos que se le puede dar a este, principalmente debido al alto poder calorífico que este puede tener. A continuación, se va a calcular de forma aproximada el valor de este PCI a partir de los datos facilitados por el Departamento de Energía de IDAE [13].

$$PCI_{syngas} = 1,61 \left(\frac{kWh}{Nm^3} \right) * \frac{3,6 MJ}{kWh} * \frac{1 Nm^3}{0,08989 kg} = 64,48 \frac{MJ}{kg} = 64.478,8 \frac{MJ}{Tn}$$

Este valor es significativamente inferior que por ejemplo el PCI correspondiente al gas natural (de unos 430 MJ/Tn) o del hidrógeno puro (150 MJ/Tn), pero cuenta con la ventaja de provenir de fuentes muy fácilmente accesibles, constantes y renovables.

Algunos de los usos que se le pueden dar a este gas son:

Inyección a la red de gas natural

El syngas obtenido es compatible para su mezcla con el gas natural. Se produciría una reducción del poder calorífico de este, con la ventaja de que se reduciría la dependencia que existe en la actualidad a la importación de este, afectando positivamente a los precios de la luz actuales.

Generador a partir de combustión

Empleo del gas como combustible para la producción eléctrica a partir del uso de un motor, el cual transforme la energía térmica del gas en energía mecánica, para posteriormente transformar esta en potencia eléctrica.

La elección del motor ha de ser muy concreta ya que cualquier impureza del gas puede llevar al fallo en la combustión o el funcionamiento del generador. Es por ello que el motor debe de estar adaptado a el uso del syngas. Un motor de encendido por chispa sería el más ideal, ya que este no requerirá modificaciones, las cuales pueden reducir el rendimiento de este. [AUGU18]

Turbina

Se basa en incluir al gas en un ciclo de vapor, ya sea Rankine o Brayton, para la generación eléctrica. El funcionamiento básico de esta tecnología, ya presentada anteriormente, se basa en el aprovechamiento de la expansión del gas tras su ignición para transformar la energía de este en movimiento mecánico de una turbina.

Este método es menos eficiente que el funcionamiento del motor de combustión, aunque sigue resultando útil para cierto tipo de circunstancias.

Pilas de combustible

Las pilas de combustible son unos dispositivos electroquímicos los cuales transforman la energía química en energía eléctrica a través de ciertas reacciones. Este elemento será el elegido para dar uso al gas combustible obtenido, ya que, como se verá en el siguiente apartado, este cuenta con las características más eficientes, y es el que se adecua en mejor medida a los sectores más dependientes de las energías renovables, que como se vio anteriormente, son la industria y los transportes.

2 APLICACIONES DEL HIDRÓGENO. PILAS DE COMBUSTIBLE

Las pilas de combustible son el elemento que mejor se puede adecuar a la planta de gasificación planteada. No solo son de alta fiabilidad y de rápida actuación, sino que también son sistemas con emisiones casi nulas de gases contaminantes. Tienen un amplio rango de aplicaciones, desde usos portátiles en pequeños dispositivos electrónicos como para sistemas estacionarios de calefacción, generadores de potencia o incluso en movilidad en vehículos de todo tipo. Esta flexibilidad y comodidad en sus usos lo hace perfecto para este proyecto.

2.1 Principio de funcionamiento

Como ya se comentó previamente, es un dispositivo basado en la transformación de la energía química contenida en el gas combustible en energía eléctrica. Esta reacción se basa en una primera oxidación y una posterior reducción del hidrógeno dentro del dispositivos.

Para llevar a cabo estas reacciones hacen falta dos elementos gaseosos; un gas combustible, en este caso hidrógeno, y un elemento oxidante, siendo el oxígeno el elegido para esta función. Todos estos procesos se dan gracias a la existencia de un ánodo (carga negativa) y un cátodo (carga positiva), así como un electrolito central cuya función es de aislante eléctrico, conductor de protones y separador de las distintas reacciones que están teniendo lugar. En la siguiente imagen se puede ver un esquema simplificado del proceso:

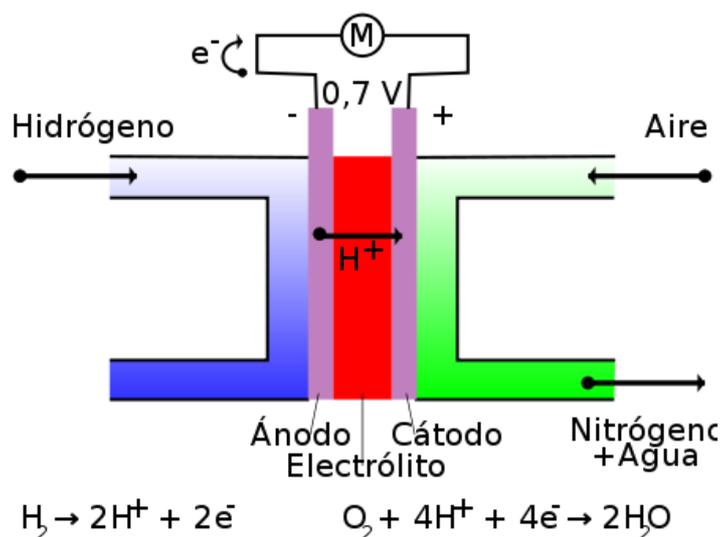


Imagen 18: Esquema de funcionamiento de una pila de combustible PEM [14]

Como podemos ver en la imagen superior, en la primera etapa se produce la disociación del hidrógeno en electrones y protones. Los electrones de esta zona viajan hasta el cátodo a través de un circuito eléctrico, generando la corriente eléctrica buscada, mientras que los protones lo hacen a través del electrolito. En el cátodo estos protones reaccionan con el agente oxidante y los electrones dando lugar a los productos, en este caso agua.

Debido a la relativa lentitud de estas reacciones, se suelen emplear los propios electrodos como catalizadores facilitando las reacciones químicas o acelerando la propia transferencia de protones y electrones.

También es importante mencionar que esta membrana intermedia ha de estar en ciertas condiciones para su correcto funcionamiento. Estas han de estar humidificadas para facilitar la conductividad protónica. Para lograr esto se suele humidificar el gas combustible previamente.

2.2 Tipos de pilas de combustible

Existen numerosos tipos de pilas de combustible. Estas se pueden clasificar según varias características:

- Forma de combinación y tipos de combustibles y oxidantes
- Naturaleza del electrolito a emplear
- Temperatura del proceso
- Aplicabilidad
- Tipo de catalizador
- Eficiencia del proceso

A continuación, se presenta a modo de resumen una tabla con los principales tipos de pilas de combustible y sus características básicas:

Tipo	Electrolito	Catalizador	Temperatura	Eficiencia	Usos Principales
Alcalinas	Hidróxido de potasio en agua	metales no preciosos	105-245 °C	60-70 %	Uso militar y espacial
Metanol	polímero sólido	Platino	50-120 °C	10-30 %	Aplicaciones de pequeño tamaño
Carbonato fundido	carbonatos alcalinos sobre una matriz cerámica	material de los electrodos (no platino)	650 °C	45-60 %	Aplicaciones estacionarias y de cogeneración
Ácido fosfórico	Ácido fosfórico líquido	platino sobre base de carbono	180-205 °C	35-55 %	Aplicaciones estacionarias y en vehículos
Membrana de intercambio protónico	polímero sólido	Platino	80-95 °C	30-60 %	Transporte, aplicaciones estacionarias y telecomunicaciones
Óxido sólido	Óxido de circonio con itrio	material de los electrodos (no platino)	800-1000 °C	50-65 %	Trasporte, aplicaciones estacionarias y cogeneración

Tabla 22: Comparación de los principales tipos de pilas de combustible [14]

De todas estas, las pilas más eficientes y que mejor se adecúan a las condiciones de trabajo de este proyecto debido a su aplicabilidad, eficiencia y temperaturas de operación bajas son:

- Pilas de membrana de intercambio protónico
- Pilas alcalinas
- Pilas de ácido fosfórico

En el apartado siguiente se va realizar una comparación exhaustiva entre estos tres tipos con el fin de seleccionar el tipo de pila más ajustable

Pila de combustible de membrana polimérica (PEMFC)

Estas pilas de electrolito polimérico son adaptables para su uso con distintos tipos de combustibles, como el hidrógeno, metanol u otros combustibles reformados. Como oxidante permite el uso de aire ambiente, haciéndolo muy económico.

También ofrece una alta variabilidad tanto en términos de potencia como de tamaño, es por ello por lo que puede ser empleada en un alto rango de aplicaciones distintas.

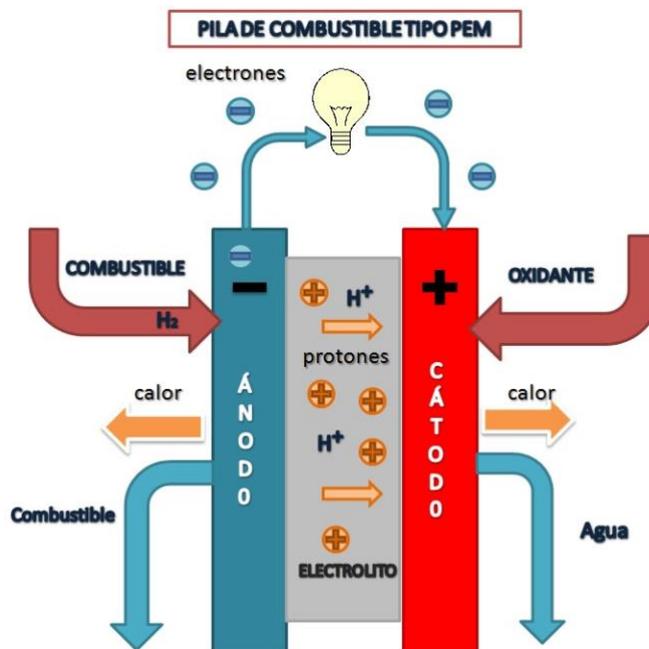


Imagen 19: Esquema de pila PEMFC [14]

Gracias a su reducida temperatura de operación, esta permite alcanzar el estado de intercambio electroquímico en breves periodos de tiempo, dando lugar a arranques rápidos. Estas temperaturas también favorecen un desgaste interno menor.

La principal desventaja de esta pila es debida a su catalizador, el cual, siendo altamente costoso, es sensible a las impurezas contenidas en el gas combustible, como puede ser la presencia a bajas concentración de monóxido de carbono entre otros.

Pilas de combustible alcalino (AFC)

Estas pilas fueron unas de las primeras en comercializarse y usarse comúnmente. Estas fueron las empleadas por ejemplo en las misiones del proyecto Apollo entre otros.

Como carburante requieren tanto hidrógeno como oxígeno puro, ya que la presencia de elementos como el CO_2 o CO en la mezcla pueden reaccionar con su electrolito de KOH formando carbonato potásico, el cual es un fuerte reductor de la potencia y eficiencia de la pila. Esto supondría una intensiva limpieza tanto del gas de síntesis como del gas oxidante de entrada, suponiendo un aumento importante en los costes.

Esta pila tiene la principal ventaja de su bajo coste de materiales, ya que su catalizador puede estar formado por una amplia gama de metales, baratos y de alto rendimiento. Otra ventaja que mencionar es su amplio rango de temperaturas de trabajo, a pesar de que su funcionamiento nominal se encuentra en los $150\text{ }^\circ\text{C}$, estas pueden reducir su funcionamiento hasta los $30\text{ }^\circ\text{C}$ aproximadamente, reduciendo considerablemente el desgaste de estas.

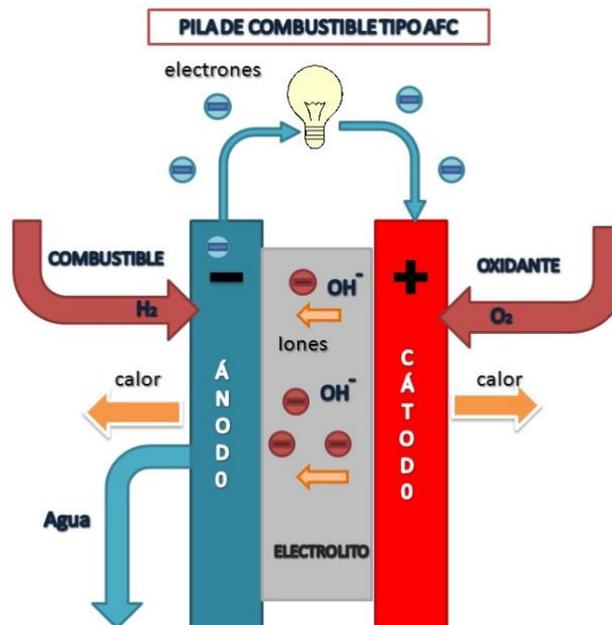


Imagen 20: Esquema de pila AFC [14]

Pilas de ácido fosfórico (PAFC)

Estas, como su propio nombre indican, emplean ácido fosfórico líquido como electrolito, y cuentan con la ventaja de poder usar como combustible tanto hidrocarburos como biogás combustible sin necesidad de contar mezclas puras de gases concretos.

Entre sus principales desventajas están el alto coste de su catalizador, su elevado rango de temperaturas de funcionamiento, y por consiguiente, cuenta con un arranque lento respecto de los otros dos tipos presentados.

Debido a la naturaleza de sus electrodos y catalizador, estas pilas son de gran tamaño, y suelen ser aplicadas en establecimientos de forma estacionaria, aunque también se les está consiguiendo dar usos en el automovilismo en los últimos años.

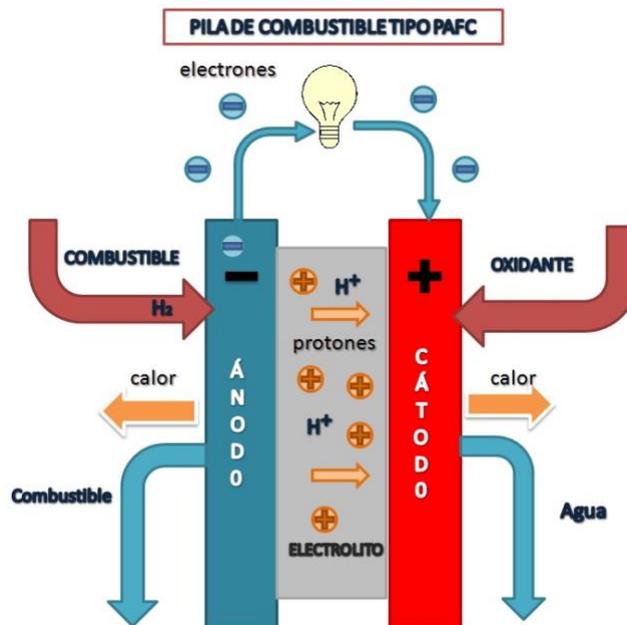


Imagen 21: Esquema de pila PAFC

Como se puede observar en la Imagen 20, el funcionamiento de esta pila es similar al de las pilas PEM, solo que dada la naturaleza del electrolito y los electrodos, la temperatura requerida para alcanzar el estado de reacción es superior, como ya se comentó anteriormente.

2.3 Elección de la tecnología de pila

La pila seleccionada, teniendo en cuenta los principales focos de menada, debe ser apta para usos estacionarios, más enfocados en aplicaciones residenciales e industriales. Estas deben ofrecer una alta potencia, un rendimiento aceptable y que su tiempo de arranque no sea excesivamente lento. Junto con esto, la pila deberá poder aceptar gases combustibles con cierto contenido en impurezas y otros gases que puedan ser dañinos para el sistema, ya que como se ha analizado previamente, el gas de síntesis obtenido no es 100% hidrógeno puro.

Teniendo en cuenta estas condiciones, para este proyecto se ha seleccionado como tecnología de aprovechamiento principal del syngas a las pilas PEMFC, ya que estas, pese a ser difícil de optimizar, estas ofrecen un arranque rápido con temperaturas bajas de funcionamiento, y son sencillas de construir, operando en condiciones poco exigentes de espacio, presión y temperatura. [LOPE15]

Para el estudio teórico de ensayos de utilización se va a hacer uso de la pila comercializada por la marca Ballard, que cuenta con módulos de 1MW y flujo de hidrógeno de 63 kg/h. Este modelo se ha tomado como ejemplo a partir del proyecto de Almudena Valenciano López, pudiendo ser sustituido por cualquier otro con características similares.

3 ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO

Para este proyecto no solo es importante el estudio de la generación de gas combustible, sino que también hay que tener en cuenta las formas de posible almacenaje de este combustible en caso de una sobreproducción o haga falta algún tipo de gestión concreta de la generación energética. Es por ello que a continuación se van a presentar los distintos medios actuales existentes de almacenaje de hidrógeno.

Es importante tener en cuenta que las condiciones de funcionamiento de estos sistemas pueden variar según la proporción de gases que se encuentren en la mezcla una vez finalizados los post-tratamientos convenientes. Los valores que se dan corresponden a una mezcla prácticamente pura de hidrógeno o de alto contenido.

Entre las distintas formas de almacenaje se dan:

- Gas a presión
- Forma líquida
- Hidruros metálicos
- Carbón. Grafito, nanofibras, lechos de carbón molecular...
- Forma de compuestos químicos. NH₃, tolueno...
- Zeolitas

De entre todas estas técnicas, solo las tres primeras cuentan con la suficiente fiabilidad y rendimiento como para ser utilizados a gran escala y de forma continua.

3.1 Almacenamiento de gas a presión

Es una de las técnicas más difundidas de almacenaje gaseoso. Para ello se comprime el gas en un rango de presiones de 300-700 bar, permitiendo luego el traslado de estas botellas.

Con el fin de reducir el peso de las botellas, durante los últimos años se ha estado ensayando con modelos poliméricos como sustitutos del acero, los cuales cuentan con características físicas semejantes siendo más manejables y con seguridad muy pareja.

Este sistema cuenta con la desventaja del alto coste energético de la compresión de este hidrógeno.

3.2 Almacenamiento de hidrógeno líquido

Para este sistema es necesario llevar al hidrógeno por debajo de su temperatura de ebullición, siendo esta a presión atmosférica de $-252,76\text{ }^{\circ}\text{C}$. Debido a esto es necesario mantener al hidrógeno en unas condiciones muy concretas de presión y temperatura, suponiendo esto altos costes de manutención.

“Aquí radica el principal inconveniente de almacenar y manipular el gas licuado en estas condiciones. El consumo energético teórico según el ciclo de Carnot del proceso de licuefacción es de 3.3 kWh/kg de H_2 . En la práctica, para grandes instalaciones, este consumo ronda los 10 kWh/kg , lo que supone casi un 30% del contenido energético del hidrógeno” [POZO19]

Este método es comúnmente usado en la industria aeroespacial.

3.3 Almacenamiento en hidruros metálicos

Se basa en el principio de combinar ciertos compuestos metálicos con el hidrógeno a través de reacciones reversibles. Estos metales cuentan con la capacidad de formar enlaces covalentes muy sensibles a la temperatura.

Para lograr estas condiciones es necesario someter al metal a presiones muy altas en presencia del hidrógeno, forzando así la formación de estos enlaces.

Es preciso que el hidruro metálico a emplear cumpla con varios requisitos para poder ser utilizado como sistema de almacenamiento:

- Debe ser fácilmente formado y descompuesto

- La cinética de las reacciones sea lo suficientemente rápida
- A de poseer suficiente tolerancia a impurezas contenidas en el gas

Este método de almacenamiento es uno de los más seguros y económicos, permitiendo una alta variedad de aplicaciones diferentes. Existen una amplia gama de tanques de almacenaje, pudiendo estos llegar a retener hasta 10.000 litros de hidrógeno.

Para el proyecto planteado se va a elegir el método de almacenamiento sólido del hidrógeno, puesto que este es el más flexible, seguro y económico de los tres.

4 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA Y CONCLUSIONES ENERGÉTICAS

Para los cálculos de energéticos se va a partir del valor de consumo medio diario en la provincia de Córdoba que fue de entorno a los 500 MW en hora punta. A partir de las pilas de combustible seleccionadas de 1 MW se requerirían de estas en torno a las 550 en pleno funcionamiento para cumplir con estas condiciones.

La central, con los cálculos realizados anteriormente, contaría con una entrada diaria de unas 850 toneladas de residuos. Esto supone una producción a la hora de en torno a los 2.800 kg de hidrógeno. A través de esto se podrían alimentar las siguientes pilas de 1 MW, sabiendo que cuentan con un 40% de rendimiento:

$$1.626 * \frac{0,4}{63} \cong 18 \text{ pilas}$$

Esto indica que a partir de nuestra planta se podrían alimentar de forma continua 10 pilas de 1MW, lo que supone solo un 4% de la demanda total.

El sistema de pilas se va a configurar para poder llegar a satisfacer el 25% de la demanda media diaria de la provincia sin necesidad de pender de otras fuentes de generación, es por ello que se requeriría de al menos unas 125 pilas de combustible de 1 MW listas para ser alimentadas de combustible previamente almacenado.

Para ello se procederá a calcular el consumo de almacenaje de nuestro sistema elegido, suponiendo que cada depósito puede retener hasta 8.000 litros de hidrógeno, que suponen 560 kg de hidrógeno. Para producir 125 MW/h en la planta harían falta:

$$125 * \frac{\frac{63kg}{h}}{0,4} * 24 = 19.687,5 \text{ kg de hidrógeno}$$

$$\frac{39.375}{560} = 35,16 \cong 36 \text{ unidades de } 8.000 \text{ litros}$$

Observando los datos obtenidos se puede concluir que el modelo de generación planteado es rentable en términos energéticos ya que este tendría la capacidad, gracias a su volumen de producción, de suplir a otras formas de producción menos efectivas que se encuentren en la actualidad participando en el mix de generación.

PARTE II: ANÁLISIS ECONÓMICO

Capítulo 1: ANÁLISIS ECONÓMICO COMPLETO DE LA INSTALACIÓN

Para este capítulo se va a estudiar lo planteado hasta ahora desde un punto de vista económico, teniendo en cuenta cada una de las etapas que la conforman. Estas etapas son las de recogida, transformación, reutilización y posterior tratamiento del producto obtenido, comparando estas cifras con las ganancias estimadas que se podrían obtener. Junto con esto se contabilizarán los costes de inversión, operación y mantenimiento.

Algunos puntos a tener en cuenta previo al desarrollo de este capítulo son:

- Se considerará una vida útil general de 25 años. Este periodo será el considerado para la amortización de la inversión inicial.
- Para la inversión inicial se considerará el año cero
- Para los cálculos se tendrá en cuenta un IPC del 2%, teniendo en cuenta la situación actual energética y económica y la inflación que esto supone en todos los campos. Junto con esto se considerará una reducción tras los primeros 5 años de producción al 1 % debido a una posible curva de aprendizaje.

Para analizar todo este movimiento de masas, gases y residuos se va a hacer uso de la información facilitada por Materiales Renovados, así como el proyecto de fin de grado de Almudena Valenciano.[8][VALE15]

1 INVERSIÓN INICIAL

Este apartado viene referido a los distintos costes de instalación de todas las tecnologías que conforman el sistema de gasificación.

Teniendo en cuenta los proyectos ya mencionados y las dimensiones de producción de nuestra planta, se va a considerar una inversión inicial de 65 millones de euros, amortizables para un plazo de 25 años correspondiente con la vida útil de la instalación. Considerando un interés sobre el capital invertido del 5% obtendríamos que la amortización anual sería:

$$A = C_I * \frac{i * (1 + i)^T}{(1 + i)^T - 1} = 4,62 \text{ M€ anuales}$$

C_I = Coste de inversión inicial en M€

i = interés sobre el capital invertido

T = periodo de amortización en años

2 COSTES DE EXPLOTACIÓN

2.1 Central de gasificación

A continuación, se van a calcular los distintos costes que son requeridos a la hora de realizar esta explotación, teniendo en cuenta tanto los costes de operación como los de personal. Para estos últimos se va a asumir un total de 20 operarios, así como 5 jefes de planta.

Como masa de entrada se tomará la calculada previamente, de 312.772 Tn/año

Operación y Mantenimiento	€/Tn	Tn	TOTAL (€)
Productos químicos	9	312.772	2.814.948
Electrodos	5	312.772	1.563.860
Mantenimiento Refractario y antorchas	6	312.772	1.876.632
Mantenimiento general	7	312.772	2.189.404
Total	-	-	8.444.844

Tabla 23: Costes generales de operación y manutención de la instalación

Costes de personal	Salario anual por persona (€)	Personas	TOTAL (€)
Operarios	24.000	20	480.000
Jefe de planta	48.000	5	240.000
Total	-	-	720.000

Tabla 24: Costes salariales anuales

Todo esto supondría unos costes anuales de 9.164.844 €, que, viéndose afectado por el IPC y esta reducción posterior tras el primer lustro, obteniendo finalmente un coste medio anual de 10,73 M€

2.2 Ciclo Rankine

Para el estudio de esta etapa del sistema, se ha de tener en cuenta junto con los costes de explotación y operación de este, las posibles ganancias generadas por el mismo, para calcular así las ganancias o pérdidas netas producidas en este sector.

Así como se hizo anteriormente, a partir de la información facilitada por los proyectos ya mencionado, así como por la empresa Aventum [16], se va a aproximar la inversión de esta al 10 % de la inversión inicial, suponiendo esto, un total de 6,5 M€.

La amortización anual, imponiendo un interés sobre el capital invertido del 5 %, es la siguiente:

$$A = C_I * \frac{i * (1 + i)^T}{(1 + i)^T - 1} = 0,46 \text{ M€ anuales}$$

Costes de explotación

A partir de la información recaudada de empresas como Aventum y Materiales Renovados, se ha llegado a la conclusión de que los costes de explotación de este ciclo son de entorno al 2,5 % de la inversión inicial, cifra representativa de las dimensiones y del nivel de producción llevado a cabo. Aplicándole el 2 % de IPC y la consiguiente reducción del 10 % obtendríamos unos costes medios anuales de explotación de 0,19 M€.

2.3 Pilas de combustible

Este es el elemento más importante de todo el sistema, ya que no solo es el encargado de la distribución y producción de energía a partir del gas obtenido, sino que también es el encargado de aportar gestionabilidad en caso de sobreproducción o necesidad de almacenamiento del mismo. Es por ello que sea el que más costos implique, teniendo en cuenta también que es el sector con el que menos desarrollo cuenta.

A partir de la información recauda se ha estimado que la inversión requerida por cada equipo de generación de 1MW es de entorno a los 2 M€, contando esta cantidad con los precios de fabricación, transporte e instalación. Teniendo en cuenta que la planta, como se vio previamente, cuenta con 125 pilas de combustible, esto implicaría una inversión de 250 M€.

La amortización a lo largo de la vida útil de esta inversión, aplicando un 5 % de interés sobre lo invertido es:

$$A = C_I * \frac{i * (1 + i)^T}{(1 + i)^T - 1} = 17,74 \text{ M€}$$

Costes de producción

Estos costes corresponden a todo lo relacionado con la operación, mantenimiento y otros gastos variables que puedan acarrear estos.

Los gastos relacionados con la explotación de las pilas de combustible alcanzan los 14,92 € por MWh producido. A partir de los datos de generación de hidrógeno se puede estimar el número de horas de funcionamiento de estas tecnologías, ya que al día se producen un total de 67.342,56 kg de hidrógeno, lo que corresponde a un total de 538,74 kg de hidrógeno destinado a cada una de las 125 pilas instaladas. Sabiendo que cada pila de 1 MW consume 63 kg/h, con la cantidad disponible de hidrógeno se podría tener al total de pilas trabajando durante aproximadamente 8 horas diarias a pleno funcionamiento.

Estas condiciones de trabajo supondrían una producción de 1000 MWh diarios de generación, lo que supone anualmente un total de 365 GWh.

A partir de estos datos se puede obtener el coste anual de explotación, que ascendería a los 5.445.800 €. Esta cantidad, viéndose afectada por el IPC, los movimientos consiguientes, resultaría en un total de 6,38 M€.

2.4 Costes de transporte

Debido al alto flujo de materia de entrada al sistema, se va a analizar si el coste de transporte es comparable a los valores de inversión dados por las tecnologías que conforman la central.

Para este estudio, teniendo en cuenta la posible localización de la planta, se va a suponer una distancia media de transporte de 40 km, y una carga por cada camión de 25 toneladas, suponiendo estos de tres ejes.

Sabiendo que al día han de llegar aproximadamente 850 toneladas:

$$\frac{850}{25} = 34 \text{ camiones}$$

Se tendría a un total de 34 camiones al día haciendo al menos 40 km. El precio por kilómetro del transporte de mercancía mediante camión de tres ejes es de entorno a 1 €, luego el total quedaría:

$$34 * 30 = 1360 \frac{\text{€}}{\text{día}} = 496.400 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Se puede ver como esta cantidad es a tener en cuenta. Se añadirá al estudio de forma externa a la planta en sí.

3 RESUMEN COSTES DE INVERSIÓN Y EXPLOTACIÓN

A continuación, se va a reunir en una tabla el conjunto de los costes anuales de cada uno de los principales procesos de esta instalación, todo esto para el año 1.

Proceso	Inversión inicial (M€)	Costes de explotación anual (M€)	Costes de amortización anual (M€)	Producción anual (GWh)
Gasificación	65	9,16	4,62	-
Ciclo Rankine	6,5	0,163	0,46	16,16
Pilas de combustible	250	5,45	17,74	365
Total	321,5	14,73	22,82	381,16

Tabla 25: Costes y generación para el año 0

Estos datos se han de extrapolar para los siguientes 25 años, teniendo en cuenta los índices de fluctuación económica mencionados anteriormente. Este resultado se muestra la siguiente tabla:

	Año 1	Año 5	Año 10	Año 15	Año 20	Año 25
Explotación (M€)	14,73	15,94	16,76	17,62	18,51	19,45
Amortización (M€)	22,82	22,82	22,82	22,82	22,82	22,82
Electricidad producida (GWh)	381,16	381,16	381,16	381,16	381,16	381,16
Coste (€/kWh)	0,0985	0,102	0,104	0,106	0,1084	0,111

Tabla 26: Evolución de los costes durante el periodo de vida útil [VALE15]

Capítulo 2: RENTABILIDAD DE LA PLANTA

Con el fin de hacer este proyecto viable para posibles inversores, se va a analizar la posible rentabilidad que se le puede dar a este proyecto. Se van a comparar las cifras de costes en € y en €/kWh frente a los precios de mercado, obteniendo el beneficio acumulado que se obtiene a lo largo de la vida útil de la instalación.

Para resumir, se cuenta con un gasto inicial en forma de inversión de 691 M€. Junto con esto se tiene un número de gastos correspondientes a la explotación y producción del producto objetivo. Estos van variando en función del IPC y su movimiento. También se contabilizarán los costes debido a el transporte de los residuos hasta la planta.

Frente a esto se considerarán como ingresos la venta de esta producción energética, también afectado por el IPC y las tasas ofrecidas por parte de las diputaciones provinciales a cambio de la recogida de residuos. Esta tasa en la provincia de Córdoba es de entorno a los 30 por tonelada, dependiendo del origen y localización de estos.

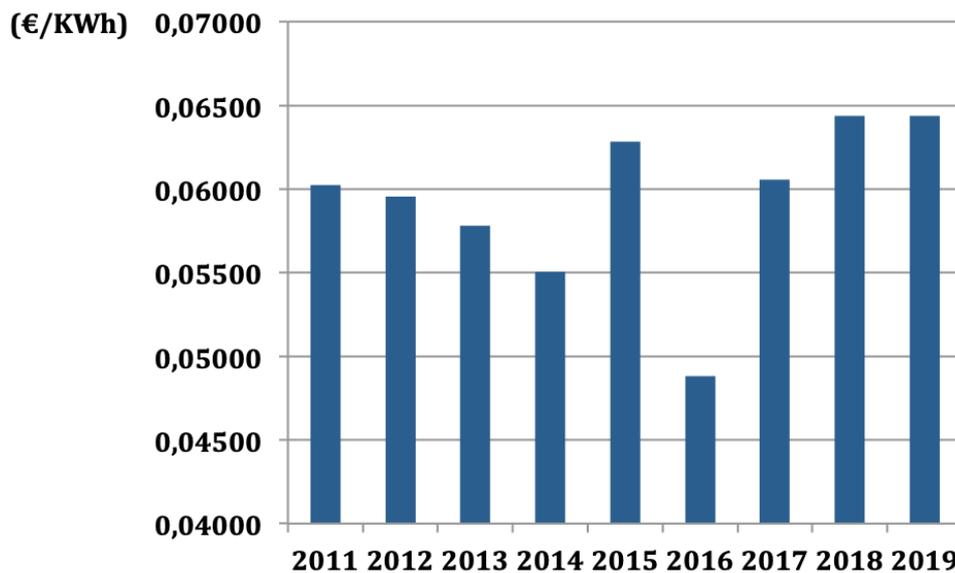


Imagen 22: Evolución del precio de mercado de la luz [18]

Como se mencionó anteriormente, al haberse usado datos de costes de explotación del año 2015, se va a tomar el precio de la luz de ese año, que en este caso es de entorno a los 0,0625 €/kWh.

Año	Gastos	Ingresos	Beneficio	Beneficio Acumulado
0	312,5	0,00	-312,50	-312,50
1	15,23	29,27	14,04	-298,46
2	15,52	29,66	14,14	-284,32
3	15,82	30,07	14,25	-270,07
4	16,13	30,48	14,35	-255,72
5	16,44	30,90	14,46	-241,26
6	16,60	31,12	14,52	-226,74
7	16,76	31,34	14,58	-212,16
8	16,92	31,56	14,63	-197,53
9	17,09	31,78	14,69	-182,84
10	17,25	32,00	14,75	-168,09
11	17,42	32,23	14,81	-153,28
12	17,59	32,46	14,87	-138,42
13	17,76	32,69	14,93	-123,49
14	17,93	32,92	14,99	-108,50
15	18,11	33,16	15,05	-93,46
16	18,28	33,39	15,11	-78,35
17	18,46	33,63	15,17	-63,18
18	18,64	33,88	15,23	-47,94
19	18,82	34,12	15,30	-32,65
20	19,01	34,37	15,36	-17,28
21	19,19	34,62	15,43	-1,86
22	19,38	34,87	15,49	13,64
23	19,57	35,13	15,56	29,19
24	19,76	35,38	15,62	44,82
25	19,95	35,64	15,69	60,51

Tabla 27: Balance total de la planta de gasificación durante su vida útil

Se puede observar en la Tabla 26 como a partir del año 21 se empiezan a dar beneficios. Aún con esta información, para finalizar el cálculo de la rentabilidad, se van a estudiar ciertos índices económicos indicativos de la viabilidad del proyecto.

El primer índice por calcular es el Valor Actual Neto, o VAN, el cual indica la rentabilidad de cierto movimiento de cajas originados por una inversión. Viene dado por la siguiente expresión:

$$VAN = Co + \frac{Q1}{(1+i)^1} + \dots + \frac{Qn}{(1+i)^n} = -39,12$$

Co: Valor de la inversión inicial
n: número de movimientos, en este caso 25
Qn: pagos recibidos en el año n
i: tipo de interés de la inversión, 2,5%

Se puede ver como este primer indicador, al ser negativo, nos dice que el proyecto no es económicamente viable. Esto es debido a que el ritmo de beneficios anual no compensa el peso de la inversión inicial del año cero, pese a obtenerse beneficios positivos al final de la actividad total.

El TIR o Tasa Interna de Retorno, índice muy relacionado con el VAN, es calculado a partir de los datos de la Tabla 26, da un valor de 1,4%, valor inferior al tipo de interés de la inversión de 2,5%, lo cual segunda el resultado dado por el VAN, indicando que el proyecto no es rentable en durante el periodo dado.

Otro indicador interesante de calcular es el WACC, o Weighted Average Cost of Capital. Este nos mide el precio medio entre la inversión y la financiación, y ha de contrastarse con el valor calculado previamente de TIR.

Primero se ha de calcular el retorno a inversión a partir de la formula dada por el modelo CAMP:

$$KE = RF + \beta * (RM - RF) = 7,5\%$$

KE: tasa de oportunidad, tasa de retorno
RF: rendimiento del bono español a 10 años, 1,83%
 β : correlación mercado-empresarial, 0,87
RM: retorno del Ibex35, del 8%

Teniendo este se procederá a calcular el WACC:

$$WACC = \frac{E}{E + D} * KE + \frac{D}{D + E} * KD(1 - T) = 3,6 \%$$

E: es el equity, 8.120 M€
D: es el valor de la deuda, 20.150 M€
KE: retorno a inversión, 7,5%
KD: coste de la deuda, 3%
T: tasa de impuestos, del 30%

Comparando el valor de WACC con el del TIR calculado se puede volver a comprobar que el proyecto no es rentable, dándose una diferencia entre ambos parámetros de entorno al 2%.

Capítulo 3: CONCLUSIONES ECONÓMICAS

Se puede observar a partir de los resultados finales como, a pesar de obtener beneficios, el proyecto no resulta rentable debido al lento retorno de capital respecto a la contundente inversión inicial.

Es importante recalcar que este proyecto no se ha presentado como una oportunidad de negocio o de enriquecimiento, sino como una forma de resolver unos problemas que se están dando en la actualidad, de forma sostenible y económicamente “viable”.

El principal objetivo de este proyecto era dar uso a un exceso de miles de toneladas de residuos contaminantes, de forma que se puedan aprovechar energéticamente, logrando generar más electricidad de ellos que lo que cuesta su propio tratamiento. Este objetivo se ha cumplido correctamente, aun contando con un análisis altamente teórico y aproximado. No cabe duda de que existen cantidad de posibles vías para hacer todo este proceso aún más eficiente, logrando así unas cuantías de fiabilidad económicas mucho mayores a las obtenidas en este estudio.

Únicamente teniendo en cuenta los resultados obtenidos en este estudio se puede concluir que este es un proyecto solamente apto para su aplicación por parte de los gobiernos debido a su poca rentabilidad. Pero, considerando su amplio rango de mejora y naturaleza ecosostenible, se podría contar con ayudas y subvenciones que ayudasen a rebajar el peso de las distintas inversiones, causante principal de la baja rentabilidad de este.

PARTE III: ANEXOS

Anexo A: Detalle superficie cultivada en Andalucía [12]

RESUMEN PROVINCIAL POR GRUPO DE CULTIVO (Ha.)
2019

CEREALES PARA GRANO. 2019

	SECANO				REGADÍO				TOTAL SECANO Y REGADÍO
	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	
ALMERÍA	15.585			15.585	743			743	16.328
CÁDIZ	92.894			92.894	15.137			15.137	108.031
CÓRDOBA	127.047			127.047	18.092			18.092	145.139
GRANADA	68.036	38	331	68.405	11.115	329	340	11.784	80.189
HUELVA	23.020			23.020	2.236			2.236	25.256
JAÉN	17.401			17.401	3.866			3.866	21.267
MÁLAGA	36.486			36.486	5.122			5.122	41.608
SEVILLA	176.186			176.186	71.739			71.739	247.925
ANDALUCÍA	556.655	38	331	557.024	128.050	329	340	128.719	685.743

QUINOA

	SECANO				REGADÍO				TOTAL SECANO Y REGADÍO
	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	
ALMERÍA									
CÁDIZ	125			125	162			162	287
CÓRDOBA	1.059			1.059	683			683	1.742
GRANADA									
HUELVA									
JAÉN									
MÁLAGA	9			9	61			61	70
SEVILLA	1.410			1.410	2.260			2.260	3.670
Andalucía	2.603			2.603	3.166			3.166	5.769

LEGUMINOSAS PARA GRANO

	SECANO				REGADÍO				TOTAL SECANO Y REGADÍO
	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	
ALMERÍA	390			390	34			34	424
CÁDIZ	9.253			9.253	720			720	9.973
CÓRDOBA	11.801			11.801	1.616			1.616	13.417
GRANADA	4.087		5	4.092	819		5	824	4.916
HUELVA	2.093			2.093	387			387	2.480
JAÉN	730			730	214			214	944
MÁLAGA	8.479			8.479	833			833	9.312
SEVILLA	24.270			24.270	2.765			2.765	27.035
ANDALUCÍA	61.103		5	61.108	7.388		5	7.393	68.501

TUBÉRCULOS CONSUMO HUMANO

	SECANO				REGADÍO				TOTAL SECANO Y REGADÍO
	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	
ALMERÍA					529			529	529
CÁDIZ	190			190	3.550			3.550	3.740
CÓRDOBA	19			19	586			586	605
GRANADA	13			13	623	7		630	643
HUELVA					505			505	505
JAÉN					102			102	102
MÁLAGA					921			921	921
SEVILLA					5.200			5.200	5.200
ANDALUCÍA	222			222	12.016	7		12.023	12.245

CULTIVOS INDUSTRIALES

	SECANO				REGADÍO				TOTAL SECANO Y REGADÍO
	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	
ALMERÍA	163			163	53			53	216
CÁDIZ	53.112			53.112	20.487			20.487	73.599
CÓRDOBA	28.103			28.103	10.085			10.085	38.188
GRANADA	1.205			1.205	304			304	1.509
HUELVA	14.224			14.224	1.333			1.333	15.557
JAÉN	379			379	5.098			5.098	5.477
MÁLAGA	3.167			3.167	647			647	3.814
SEVILLA	98.114			98.114	59.119			59.119	157.233
ANDALUCÍA	198.467			198.467	97.126			97.126	295.593

FLORES Y PLANTAS ORNAMENTALES

	SECANO				REGADÍO				TOTAL SECANO Y REGADÍO
	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	
ALMERÍA					286	14		300	300
CÁDIZ					260			260	260
CÓRDOBA					57			57	57
GRANADA					108			108	108
HUELVA	0			0	55			55	55
JAÉN					8			8	8
MÁLAGA					122			122	122
SEVILLA					98			98	98
ANDALUCÍA	0			0	994	14		1.008	1.008

CULTIVOS FORRAJEROS

	SECANO				REGADÍO				TOTAL SECANO Y REGADÍO
	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	
ALMERÍA	1.339			1.339	217			217	1.556
CÁDIZ	8.754			8.754	3.534			3.534	12.288
CÓRDOBA	2.950			2.950	1.344			1.344	4.294
GRANADA	1.392			1.392	2.782	147	2	2.931	4.323
HUELVA	3.674			3.674	501			501	4.175
JAÉN	1.399			1.399	1.053			1.053	2.452
MÁLAGA	4.859			4.859	1.113			1.113	5.972
SEVILLA	11.296			11.296	5.723			5.723	17.019
ANDALUCÍA	35.663			35.663	16.267	147	2	16.416	52.079

HORTALIZAS

	SECANO				REGADÍO				TOTAL SECANO Y REGADÍO
	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	
ALMERÍA					41.843	17.418		59.261	59.261
CÁDIZ	766			766	8.033			8.033	8.799
CÓRDOBA	190			190	3.979			3.979	4.169
GRANADA	1.940	1		1.941	15.549	4.163	12	19.724	21.665
HUELVA					8.137			8.137	8.137
JAÉN	529			529	1.280			1.280	1.809
MÁLAGA	441			441	6.802			6.802	7.243
SEVILLA					14.348			14.348	14.348
ANDALUCÍA	3.866	1		3.867	99.971	21.581	12	121.564	125.431

TOTAL CULTIVOS HERBÁCEOS

	SECANO				REGADÍO				TOTAL SECANO Y REGADÍO
	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	
ALMERÍA	17.477			17.477	43.705	17.432		61.137	78.614
CÁDIZ	164.969			164.969	51.721			51.721	216.690
CÓRDOBA	170.110			170.110	35.759			35.759	205.869
GRANADA	76.673	39	336	77.048	31.300	4.646	359	36.305	113.353
HUELVA	43.011			43.011	13.154			13.154	56.165
JAÉN	20.438			20.438	11.621			11.621	32.059
MÁLAGA	53.432			53.432	15.560			15.560	68.992
SEVILLA	309.866			309.866	158.992			158.992	468.858
ANDALUCÍA	855.976	39	336	856.351	361.812	22.078	359	384.249	1.240.600

CITRICOS

	SECANO				REGADÍO				TOTAL SECANO Y REGADÍO
	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	
ALMERÍA					9.170			9.170	9.170
CÁDIZ					2.881			2.881	2.881
CÓRDOBA					11.961			11.961	11.961
GRANADA					802			802	802
HUELVA					20.576			20.576	20.576
JAÉN									
MÁLAGA					10.915			10.915	10.915
SEVILLA					28.858			28.858	28.858
ANDALUCÍA					85.163			85.163	85.163

FRUTALES

	SECANO				REGADÍO				TOTAL SECANO Y REGADÍO
	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	
ALMERÍA	55.369			55.369	2.717			2.717	58.086
CÁDIZ	1.362			1.362	1.549			1.549	2.911
CÓRDOBA	2.813			2.813	5.504			5.504	8.317
GRANADA	106.250			106.250	18.325			18.325	124.575
HUELVA	5.941			5.941	10.341			10.341	16.282
JAÉN	5.550			5.550	2.163			2.163	7.713
MÁLAGA	22.239			22.239	13.578			13.578	35.817
SEVILLA	3.287			3.287	12.212			12.212	15.499
ANDALUCÍA	202.811			202.811	66.389			66.389	269.200

VIÑEDO

	SECANO				REGADÍO				TOTAL SECANO Y REGADÍO
	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	
ALMERÍA	1.016			1.016	247			247	1.263
CÁDIZ	9.398			9.398	538			538	9.936
CÓRDOBA	5.110		137	5.247	460			460	5.707
GRANADA	2.673			2.673	747			747	3.420
HUELVA	3.426			3.426	99			99	3.525
JAÉN	289			289	43			43	332
MÁLAGA	4.032			4.032	120			120	4.152
SEVILLA	299			299	250			250	549
ANDALUCÍA	26.243		137	26.380	2.504			2.504	28.884

OLIVAR

	SECANO				REGADÍO				TOTAL SECANO Y REGADÍO
	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	
ALMERÍA	7.156			7.156	14.568			14.568	21.724
CÁDIZ	25.380			25.380	3.690			3.690	29.070
CÓRDOBA	306.534			306.534	58.364			58.364	364.898
GRANADA	143.050			143.050	60.107			60.107	203.157
HUELVA	29.360			29.360	6.295			6.295	35.655
JAÉN	354.550			354.550	232.371			232.371	586.921
MÁLAGA	124.123			124.123	14.389			14.389	138.512
SEVILLA	186.360			186.360	66.918			66.918	253.278
ANDALUCÍA	1.176.513			1.176.513	456.702			456.702	1.633.215

OTROS CULTIVOS LEÑOSOS

	SECANO				REGADÍO				TOTAL SECANO Y REGADÍO
	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	
ALMERÍA	17			17	27			27	44
CÁDIZ	433			433	82			82	515
CÓRDOBA									
GRANADA	209			209	11			11	220
HUELVA	741			741	97			97	838
JAÉN	2			2					2
MÁLAGA	909			909	1			1	910
SEVILLA	46			46	2			2	48
ANDALUCÍA	2.357			2.357	220			220	2.577

VIVEROS

	SECANO				REGADÍO				TOTAL SECANO Y REGADÍO
	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	
ALMERÍA					65			65	65
CÁDIZ	2			2	22			22	24
CÓRDOBA									
GRANADA	19			19	174			174	193
HUELVA					6			6	6
JAÉN	9			9	22			22	31
MÁLAGA	12			12	7			7	19
SEVILLA	109			109	233			233	342
ANDALUCÍA	151			151	529			529	680

TOTAL CULTIVOS LEÑOSOS

	SECANO				REGADÍO				TOTAL SECANO Y REGADÍO
	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	Ocupación principal	Ocupaciones posteriores	Ocupaciones asociadas	TOTAL	
ALMERÍA	63.558			63.558	26.794			26.794	90.352
CÁDIZ	36.575			36.575	8.762			8.762	45.337
CÓRDOBA	314.457		137	314.594	76.289			76.289	390.883
GRANADA	252.201			252.201	80.166			80.166	332.367
HUELVA	39.468			39.468	37.414			37.414	76.882
JAÉN	360.400			360.400	234.599			234.599	594.999
MÁLAGA	151.315			151.315	39.010			39.010	190.325
SEVILLA	190.101			190.101	108.473			108.473	298.574
ANDALUCÍA	1.408.075		137	1.408.212	611.507			611.507	2.019.719

Anexo B: Listado de Poderes Caloríficos Inferiores (PCI)

Tabla 1: Poderes caloríficos inferiores de las principales fuentes energéticas

Tipo de combustible		PCI (MJ/t)	PCI (kWh/ kg)	PCI (kcal/ kg)
Petróleo y productos petrolíferos	Petróleo Bruto	42.300	11,75 0	10.11 0
	Materias primas de refinería	43.000	11,94 4	10.27 7
	GLP	47.300	13,13 9	11.30 5
	Propano	47.300	13,13 9	11.30 5
	Butano	47.300	13,13 9	11.30 5
	Queroseno aviación	44.100	12,25 0	10.54 0
	Otros querosenos	43.800	12,16 7	10.46 8
	Gasolina	44.300	12,30 6	10.58 8
	Gasolina aviación	44.300	12,30 6	10.58 8
	Gasóleo/Diesel	43.000	11,94 4	10.27 7
	Fuelóleo	40.400	11,22 2	9.656
	Alquitrán	40.200	11,16 7	9.608
	Nafta	44.500	12,36 1	10.63 6
	Lubricantes	40.200	11,16 7	9.608
Coque de petróleo	32.500	9,028	7.768	
Gases	GNL	44.200	12,27 8	10.56 4
	Gas natural	48.000	13,33 3	11.47 2
	Metano	50.000	13,88 9	11.95 0
	Etano	46.400	12,88 9	11.09 0
	Gas de refinería	49.500	13,75 0	11.83 1
	Gas de coquería	38.700	10,75 0	9.250
	Gas de alto horno	2.470	0,686	590

	Biogases en general	50.400	14,00 0	12.04 6
	Biogás pobre	50.400	14,00 0	12.04 6
	Biogás de vertedero	50.400	14,00 0	12.04 6
	Biogás de depuradora	50.400	14,00 0	12.04 6
Carbones	Antracita eléctrica	20.620	5,728	4.928
	Antracita industrial	24.740	6,872	5.913
	Antracita otros sectores de consumo final	26.450	7,347	6.322
	Hulla eléctrica	23.000	6,389	5.497
	Hulla coquizable	29.100	8,083	6.955
	Hulla altos hornos	26.050	7,236	6.226
	Hulla industrial	23.960	6,656	5.727
	Hulla otros sectores de consumo final	27.100	7,528	6.477
	Carbón subbituminoso	13.410	3,725	3.205
	Coque de coquería	27.342	7,595	6.535
	Alquitrán de hulla	36.843	10,23 4	8.806
	Biomasa	Biomasa en general	14.160	3,933
Leña y ramas		15.910	4,419	3.803
Leñas tallares		10.467	2,908	2.502
Leñas de podas		10.467	2,908	2.502
Leñas de olivos y cultivos agrícolas		10.467	2,908	2.502
Serrines y virutas		15.826	4,396	3.783
Cortezas		15.282	4,245	3.652
Astilla de pino triturada (Humedad <20%)		15.105	4,196	3.610
Residuos de poda		15.701	4,361	3.753
Otros residuos forestales		13.858	3,850	3.312
Biomasa de la industria forestal		14.641	4,067	3.499
Biomasa agrícola		12.560	3,489	3.002
Sarmientos de vid		13.733	3,815	3.282
Ramilla de uva		12.351	3,431	2.952
Hueso de aceituna		16.161	4,489	3.863
Orujillo		15.826	4,396	3.783
Orujo de uva		13.565	3,768	3.242
Cáscara de frutos secos		15.533	4,315	3.712
Cáscara de cereales	13.188	3,663	3.152	

	Cáscara de almendra (Humedad <20%)	15.944	4,429	3.811
	Paja de cereales	13.230	3,675	3.162
	Zuro de maíz (Humedad <25%)	16.280	4,522	3.891
	Otros residuos agrícolas	13.858	3,850	3.312
	Poso de café	27.214	7,560	6.504
	Marro de café	25.121	6,978	6.004
	Residuo molienda de café	8.164	2,268	1.951
	Pellets en general	16.496	4,582	3.943
	Pellet de madera (Humedad <15%)	18.084	5,023	4.322
	Carbón vegetal	32.006	8,891	7.650
	Biocarburantes y biocombustibles líquidos	Bioetanol	27.000	7,500
Biodiesel		38.032	10,564	9.090
Otros biocombustibles líquidos		37.152	10,320	8.880

Tabla 2: Poderes caloríficos inferiores de los principales residuos

Tipo de residuo		PCI (MJ/t)	PCI (kWh/kg)	PCI (kcal/kg)
CDR – RSU	Fracción no degradable	18.187	5,052	4.347
	Fracción degradable	9.889	2,747	2.364
Neumáticos	Fracción no degradable	31.079	8,633	7.428
	Fracción degradable	42.203	11,723	10.087
De vehículos fuera de uso	Fracción no degradable	48.910	13,586	11.690
	Fracción degradable	29.015	8,060	6.935
Textil, calzado, artículos de piel	Fracción no degradable	38.192	10,609	9.128
	Fracción degradable	18.514	5,143	4.425
Plásticos	Fracción no degradable	32.799	9,111	7.839
Residuos líquidos de hidrocarburo	Fracción no degradable	34.298	9,527	8.197
Residuos sólidos de hidrocarburos	Fracción no degradable	13.507	3,752	3.228
Serrín impregnado o madera tratada	Fracción degradable	25.087	6,969	5.996
Residuos orgánicos fermentables	Fracción degradable	5.514	1,532	1.318
Lejías negras	Fracción degradable	12.560	3,489	3.002
Papel y cartón	Fracción degradable	19.050	5,292	4.553
Envases compuestos	Fracción no degradable	32.799	9,111	7.839
Madera y artículos derivados	Fracción degradable	15.445	4,290	3.691
Muebles	Fracción degradable	16.747	4,652	4.003
Residuos domésticos especiales	Fracción no degradable	16.312	4,531	3.899
Celulosa sanitaria	Fracción degradable	13.909	3,863	3.324

Anexo C: Catálogo pila PEM marca Ballard

BALLARD[®]

SMARTER SOLUTIONS FOR A CLEAN ENERGY FUTURE

ClearGen[™]

SPECIFICATION SHEET



✦ Distributed Generation - 1MW

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

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

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

Please contact us for product availability and pricing.

✦ PRODUCT SPECIFICATIONS

Type:	PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell generator	
Performance:	Net Power	1 MW
	Efficiency	40% (± 2%) ¹
	Output voltage	380 – 480 V AC
	Output frequency	50 – 60 Hz
Physical Characteristics:	Fuel Cell Module:	
	Dimensions (H x W x L)	2.9 x 2.4 x 9 meters (x2)
	Weight	<40,000 kg
	Electrical Module:	
Dimensions (H x W x L)	2.9 x 2.4 x 6.3 meters	
Weight	15,000 kg	
Fuel:	Hydrogen	>98% ²
	Fuel consumption	63 kg/hr (700 m ³ /hour)
	Available heat:	
Output heat load	>950 kWt ³	
Available water temperature	60 - 65°C	
Emissions:	Noise	<80db @ 7 M
	Pollutants	Zero emissions (no GHG or local air pollutants)

1. At beginning of life (HHV).

2. Ballard can work with customer to provide customized fuel purification system.

3. System interface cooling flow rate and rejection temperature to be determined.



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

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

Referencias

- [1] Página web oficial de la Red Eléctrica Española
- [2] Elaboración propia
- [3] Google Earth
- [4] José María Jiménez Coronado, Introducción a la Física de Plasmas
- [5] Página web oficial de la Agencia Andaluza de la Energía
- [6] Artículo del periódico El Día de Córdoba, <https://www.eldiadecordoba.es>
- [7] Plasco energy group
- [8] Empresa Materiales Renovados
- [9] U.S Science & Technology Corporation
- [10] SADECO, “Informe de verificación independiente del estado de información no financiera de saneamientos de Córdoba”, <https://www.sadeco.es>
- [11] EPREMASA, “Cuentas anuales del 2021 e informe de gestión”
- [12] Consejería Andaluza de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible
- [13] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
- [15] <https://www.ballard.com>
- [16] Aventure, Tratamiento de residuos mediante sistema convertidor de plasma, <https://www.comillas.edu/documentos/catedras/crm/report15/mesaI-moreno.pdf>
- [17] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, <https://sig.mapama.gob.es/siga/>
- [18] Statista, <https://es.statista.com>

Bibliografía

- [AGNU15] Asamblea General de las Naciones Unidas, “Agenda 2030”. Nueva York. Septiembre 2015.
- [AEME22] Agencia Estatal de Meteorología Española, Ministerio para la Transición Ecológica, 2022
- [EBA_20] European Biogas Association, European Biomethane Map, 2020
- [MITE22] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Vicepresidencia Tercera del Gobierno, “Valorización energética/Tratamientos Térmicos”
- [GUER16] Guerra Rosales N. A, “Generación eléctrica mediante gasificación por plasma de residuos sólidos municipales”, Chile 2016
- [VALE15] Proyecto de fin de Grado de Almudena Valenciano López, “Estudio de una Microred inteligente en la ciudad de Huesca”, junio de 2015
- [AUGU18] Proyecto de fin de Grado de Edgardo Augusto Atoche, “Estudio de factibilidad e un sistema moto-generator empleando gasificación de biomasa”, agosto 2018
- [LOPE15] Proyecto de fin de Grado de Adrián López Salas, “Estudio eléctrico de pilas de combustible tipo PEM”, junio 2015
- [POZO19] “Almacenamiento de hidrógeno”, Rubén Pozo Vaquero, julio 2019