



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

GASIFICACIÓN POR PLASMA DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS PARA PRODUCIR HIDRÓGENO

Autor: Francisco Montijano del Diego

Director: Julio Montes Ponce de León

Madrid

Septiembre 2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título Gasificación por plasma de los residuos orgánicos para producir hidrógeno en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2021/2022 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

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

Fdo.: Francisco Montijano del Diego

Fecha: 08/09/2022



Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Julio Montes Ponce de León

Fecha: 07/09/2022





GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

GASIFICACIÓN POR PLASMA DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS PARA PRODUCIR HIDRÓGENO

Autor: Francisco Montijano del Diego

Director: Julio Montes Ponce de León

Madrid

Septiembre 2022

GASIFICACIÓN POR PLASMA DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS PARA PRODUCIR HIDRÓGENO

Autor: Montijano del Diego, Francisco.

Director: Montes Ponce de León, Julio.

Entidad colaborativa: ICAI-Universidad Pontificia de Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

En la actualidad, el sistema eléctrico español se encuentra en entredicho debido a una serie de problemas que hacen que el funcionamiento de este no sea el óptimo.

Por un lado, el exponencial aumento de la población, así como la industrialización llevada a cabo en las últimas décadas, ha desembocado en un gran aumento de la generación de residuos, siendo los residuos sólidos urbanos, los agrícolas y los forestales, los casos de especial interés en este proyecto. Esto ha desembocado en una acumulación masiva de estos residuos en lugares como los vertederos controlados. Esta técnica de tratamiento de residuos se trata de la más común a la hora de gestionar los residuos en España. No obstante, las emisiones de gases contaminantes provenientes de los residuos, así como la alta peligrosidad de los lixiviados hacen que la utilización de los vertederos se esté poniendo en duda desde hace unos años. Tanto es así, que desde la Unión Europea han sido aprobadas una serie de medidas mediante las cuales se regula el uso de los vertederos controlados, estableciendo que un máximo del 10% de la basura podrá acabar en vertederos a partir de 2030.

Por otro lado, el hecho de que en España se haya hecho una gran apuesta por fuentes de generación renovables no gestionables, como es el caso de la eólica y fotovoltaica, hace que la red eléctrica española tenga una importante falta de sostenibilidad, debido a la aleatoriedad y lo impredecibles que son estas fuentes. Por ello, la búsqueda de nuevas fuentes de energía renovables, así como de un sistema de reserva que permitan seguir la curva de demanda de una forma gestionable y rápida, es de gran importancia.

Consecuentemente, en este proyecto se plantea la gasificación por plasma y la posterior utilización del gas producido en un ciclo Rankine, como solución a ambos problemas. De esta forma, se podría reducir la masa de residuos depositados en los vertederos controlados, en acorde a las medidas impulsadas por la Unión Europea, además de ser una opción de generación renovable de energía, sin contaminación a la atmósfera, y gestionable.

La gasificación por plasma se trata de un proceso térmico mediante el cual se produce la disociación completa de la materia orgánica. Esta total disociación se produce gracias a la acción del plasma, considerado el cuarto estado de la materia. Este es un gas ionizado a muy alta temperatura, pudiendo alcanzar los 15.000°C. Por un lado, los componentes orgánicos se convierten en un gas rico en hidrógeno, llamado gas de síntesis o “syngas”. A su vez, los componentes inorgánicos se funden y producen una lava que una vez enfriada pasa a ser un producto vítreo inerte que puede ser usado como material de construcción.

Es un proceso ecológicamente limpio en el que no se genera ningún subproducto tóxico. Primero, la materia no es quemada. Esta es descompuesta en varios elementos, siendo estos principalmente el hidrógeno, el monóxido de carbono y el agua. Y segundo, no quedan subelementos tóxicos tras el proceso, ya que todo el alquitrán, partículas carbonizadas y dioxinas quedan destruidas. Esto se debe a la alta temperatura a la que se trabaja en el proceso y al largo tiempo que se dejan los residuos en el gasificador.

Finalmente, como aplicación práctica del proceso, se va a proceder a diseñar una planta de gasificación por plasma, y el posterior aprovechamiento del gas de síntesis producido en un central de ciclo combinado. Como localización se ha elegido Campanillas, situada en Málaga. Esto se debe a tres razones principales. En primer lugar, se encuentra muy próxima al centro de Málaga, la cual es un gran núcleo urbano. Se trata de algo primordial ya que se asegura un gran flujo de residuos. Por otro lado, en la misma ciudad de Campanillas ya hay actualmente en funcionamiento una central de ciclo combinado. Esto hace que los gastos de transporte del gas de síntesis producido sean mucho más bajos que si la central se encontrase en otra ciudad. Y por último, aunque no menos importante, la ciudad de Málaga se encuentra conectada a la red de gaseoductos de España. Esto hace que la inyección del gas generado en la red sea mucho más fácil.

Durante el proyecto, se ha considerado un tratamiento en la central de Campanillas de 89.100 toneladas de residuos sólidos urbanos y 12.825 toneladas de residuos forestales anuales, es decir, un total de 101.925 toneladas al año. Tras el proceso de gasificación por plasma, se ha calculado una producción de energía total de 21,1 MW, aunque para ser más conservadores se va a considerar una producción de 17,5 MW.

Una vez generado el gas de síntesis, se ha considerado que dos tercios de este ha sido utilizado en un ciclo Rankine, en la central de ciclo combinado de Campanillas mencionada anteriormente. El otro tercio es vendido a la red de gas de España a un precio de 0,031 €/Kwh, que ha sido fijado en acorde al precio de sus principales competidores, siendo de nuevo algo conservadores al establecerlo.

Tras realizar un estudio económico del proyecto, que se podrá ver en profundidad en el capítulo 7, se ha obtenido un beneficio neto actual de 11.509.995€. Realizando el flujo de caja cada año desde la inversión inicial, se obtiene que ésta se recuperaría a los 10,63 años. Finalmente, mediante el cálculo del parámetro ROI se ha obtenido que se trata de una inversión rentable para el inversor. No obstante, el consumidor también sale beneficiado debido a la reducción de coste del gas.

PLASMA GASIFICATION OF THE ORGANIC WASTE TO PRODUCE HYDROGEN

Author: Montijano del Diego, Francisco.

Supervisor: Montes Ponce de León, Julio.

Collaborating Entity: ICAI-Universidad Pontificia de Comillas

ABSTRACT

At present, the Spanish electricity system is in question due to a series of problems that make its operation less than optimal.

On the one hand, the exponential increase in the population, as well as the industrialization carried out in recent decades, has led to a large increase in the generation of waste, with solid urban, agricultural and forestry waste being the cases of special interest in this project. This has led to a massive accumulation of this waste in places such as controlled landfills. This waste treatment technique is the most common one of managing waste in Spain. However, the emissions of polluting gases from waste, as well as the high risk of leachate, have caused the use of landfills to be questioned for a few years. Consequently, that the European union has approved a series of measures by which the use of controlled landfills is regulated, establishing that a maximum of 10% of the garbage may end up in landfills as of 2030.

On the other hand, the fact that Spain has made a large commitment to non-manageable renewable generation sources, such as wind and photovoltaic, means that the Spanish electricity grid has a significant lack of sustainability, due to the randomness and how unpredictable these sources are. For this reason, the search for new renewable energy sources, as well as a reserve system that allows the demand curve to be followed in a manageable and rapid way, is of great importance.

Consequently, this project proposes plasma gasification and the subsequent use of the gas produced in a Rankine cycle, as a solution to both problems. In this way, the mass of waste deposited in controlled landfills could be reduced, in accordance with the measures

promoted by the European Union, in addition to being an option for renewable energy generation, without pollution to the atmosphere, and manageable.

Plasma gasification is a thermal process by which the complete dissociation of organic matter occurs. This total dissociation is produced thanks to the action of plasma, considered the fourth state of matter. This is an ionized gas at a very high temperature, and can reach 15,000°C. On the one hand, the organic components are converted into a gas rich in hydrogen, called synthesis gas or "syngas". In turn, the inorganic components melt and produce a lava that, once cooled, becomes an inert vitreous product that can be used as a construction material.

It is an ecologically clean process in which no toxic by-product is generated. First, matter is not burned. This is broken down into various elements, these being mainly hydrogen, carbon monoxide and water. And second, there are no toxic sub-elements left after the process, as all the tar, carbon particles and dioxins are destroyed. This is due to the high temperature used in the process and the long time the residues are left in the gasifier.

Finally, as a practical application of the process, a plasma gasification plant will be designed, and the subsequent use of the synthesis gas produced in a combined cycle plant. Campanillas, located in Malaga, has been chosen as the location. This is due to three main reasons. In the first place, it is very close to the center of Malaga, which is a large urban area. This is essential since it ensures a large flow of waste. On the other hand, in the same city of Campanillas there is already a combined cycle plant in operation. This means that the costs of transporting the synthesis gas produced are much lower than if the plant were in another city. And last but not least, the city of Malaga is connected to the Spanish gas pipeline network. This makes the injection of the generated gas into the network much easier.

During the project, a treatment at the Campanillas plant of 89,100 tons of solid urban waste and 12,825 tons of forest waste per year has been considered, that is, a total of 101,925 tons per year. After the plasma gasification process, a total energy production of 21.1 MW has been calculated, although to be more conservative, a production of 17.5 MW will be considered.

Once the synthesis gas has been generated, it has been considered that two thirds of it has been used in a Rankine cycle, in the aforementioned Campanillas combined cycle power

plant. the other third is sold to the Spanish gas network at a price of €0.031/kwh, which has been set in accordance with the price of its main competitors, again being somewhat conservative when establishing it.

After carrying out an economic study of the project, which can be seen in depth in chapter 7, a current net profit of €11,509,995 has been obtained. Performing the cash flow each year from the initial investment, it is obtained that it would be recovered after 10.63 years. Finally, by calculating the ROI parameter, it has been obtained that it is a profitable investment for the investor. However, the consumer also benefits due to the reduction in the cost of gas.

Índice de la memoria

Índice de la memoria	7
Índice de ilustraciones	10
Índice de tablas	11
Capítulo 1: INTRODUCCIÓN	12
<i>MOTIVACIÓN DEL PROYECTO</i>	12
<i>OBJETIVOS</i>	16
<i>ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS ODS</i>	17
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	18
<i>LAS MICRORREDES INTELIGENTES</i>	18
<i>ECONOMÍA CIRCULAR</i>	20
Introducción	20
Medidas unión europea	22
CAPÍTULO 3: La valoración energética de los residuos	24
<i>RESIDUOS</i>	24
Definición	24
Clasificación de residuos	25
<i>Valoración energética de los residuos</i>	28
Definición	28
Vertederos controlados	30
Incineración.....	32
Pirólisis	34
Digestión anaeróbica.....	35
Gasificación	37
CAPÍTULO 4: Gasificación por plasma	40
<i>Introducción</i>	40

<i>El plasma</i>	41
<i>Proceso</i>	44
Etapa 1: Alimentación	44
Etapa 2: Disociación	45
Etapa 3: Enfriamiento.....	47
Etapa 4: Filtrado de gases	48
Etapa 5: Neutralización	53
<i>Elementos de la planta</i>	54
Vasija	54
Antorcha de plasma	55
Generador de corriente eléctrica.....	57
Sistema de control	57
Sistema de refrigeración	58
Sistema de gas de trabajo	59
Sistema de descarga del material vitrificado	60
Gas de síntesis	60
<i>Ciclo combinado: Ciclo Rankine</i>	62
CAPÍTULO 5: Pilas de combustible y almacenamiento de hidrógeno	68
<i>Introducción</i>	68
<i>Principio de funcionamiento</i>	69
<i>Rendimiento</i>	70
<i>Comportamiento real</i>	71
<i>Tipos de pilas de combustible</i>	72
Pila de combustible de Membrana de intercambio protónico (PEM).....	73
Pila de combustible Alcalina (AFC)	74
Pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC).....	75
Pila de combustible de carbonatos fundidos (MFCF).....	76
Pila de combustible de óxidos sólidos (SOFC)	77
<i>Elección de pila para el proceso de gasificación por plasma</i>	78

<i>Almacenamiento de hidrógeno</i>	79
Gas a presión.....	80
Almacenamiento en estado líquido	81
Almacenamiento en estado sólido.....	82
Capítulo 6: Diseño de la planta de Campanillas	84
<i>Localización de la planta</i>	84
<i>Territorio y residuos disponibles</i>	85
Residuos sólidos urbanos.....	85
Residuos forestales	87
Residuos agrícolas.....	89
Recapitulación de residuos	90
Dimensionamiento de la planta	90
<i>Los ciclos combinados en España</i>	91
<i>La central de ciclo combinado de Campanillas</i>	93
CAPÍTULO 7: Estudio económico	94
<i>Inversión inicial</i>	94
<i>Costes de operación (OPEX)</i>	95
<i>Flujo de caja</i>	100
<i>Recuperación de la inversión</i>	109
BIBLIOGRAFIA:	111

Índice de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1. ESQUEMA MICRORRED INTELIGENTE. FUENTE: FUNDACIÓN ENERGÍA	18
ILUSTRACIÓN 2. CICLO ECONOMÍA CIRCULAR. FUENTE: EDUCACIÓN ECOLEC.....	21
ILUSTRACIÓN 3. RESIDUOS DEPOSITADOS AL AIRE LIBRE. FUENTE: ECOLOGÍA VERDE	25
ILUSTRACIÓN 4. TONELADAS DE RESIDUOS GENERADAS EN ESPAÑA SEGÚN LA ACTIVIDAD (2017). ELABORACIÓN PROPIA. FUENTE: INE, EUROPA PRESS.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ILUSTRACIÓN 5. ESQUEMA DE UN VERTEDERO. FUENTE: WIKIPEDIA.....	32
ILUSTRACIÓN 6. LOS CUATRO ESTADOS DE LA MATERIA Y SUS RELACIONES. FUENTE: RESEARCH GATE	41
ILUSTRACIÓN 7. PROCESO DE CASCADA EN LA IONIZACIÓN DE UN ÁTOMO. FUENTE: CLASSICISTRANIERI.....	43
ILUSTRACIÓN 8. ETAPAS EN EL PROCESO DE GASIFICACIÓN POR PLASMA. FUENTE: TFG ALMUDENA VALENCIANO	44
ILUSTRACIÓN 9. DISOCIACIÓN DE UN ÁTOMO. FUENTE: FUNDACIONENERGIA	46
ILUSTRACIÓN 10. ESQUEMA DE UN SISTEMA DE MOJADO SCRUBBER. FUENTE: ENERGY EDUCATION	52
ILUSTRACIÓN 11. ESQUEMA DE LA VASIJA DEL GASIFICADOR DE PLASMA. FUENTE: CURRICULUM NACIONAL, MINEDUC.....	55
ILUSTRACIÓN 12. COMPOSICIÓN DEL GAS DE SÍNTESIS EN FUNCIÓN DE LOS RESIDUOS TRATADOS. FUENTE: DIQUIMA	62
ILUSTRACIÓN 13. CICLO RANKINE. FUENTE: MCGRAW-HILL	63
ILUSTRACIÓN 14. CURVA DE POLARIZACIÓN. FUENTE: WIKIPEDIA.....	72
ILUSTRACIÓN 15. SISTEMA DE POTENCIA DE 100W BASADO EN TECNOLOGÍA MFCE, DISEÑADO POR LA ARMADA ESTADOUNIDENSE EN 1966. FUENTE: FUEL CELL PROJECT	77
ILUSTRACIÓN 16. CICLO LINDE FUENTE: RESEARCHGATE.....	81
ILUSTRACIÓN 17. ESTRUCTURA TANQUE DE HIDRÓGENO. FUENTE: H2CHILE	82
ILUSTRACIÓN 18. TONELADAS DE RSU GENERADAS EN MÁLAGA (2004-2012). FUENTE: STATIC.OMAU-MALAGA... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
ILUSTRACIÓN 19. RSU GENERADOS POR PERSONA SEGÚN EL AÑO. FUENTE: STATIC.OMAU-MALAGA ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
ILUSTRACIÓN 20. RESIDUOS AGRÍCOLAS GENERADOS EN CADA PROVINCIA DE ANDALUCÍA. FUENTE: FAG Y MAG	89
ILUSTRACIÓN 21. ESTRUCTURA DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA EN ESPAÑA. FUENTE: DIARIORENOVABLES	92
ILUSTRACIÓN 22. RESPONSABLES EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO (2019). FUENTE: EL PERIÓDICO DE LA ENERGÍA, 2014	92

Índice de tablas

TABLA 1. COMPOSICIÓN GAS DE SÍNTESIS A LA SALIDA DE LA VASIA	53
TABLA 2. CONDICIONES A LA ENTRADA Y SALIDA DEL CONDENSADOR (ELABORACIÓN PROPIA)	64
TABLA 3. CONDICIONES A LA ENTRADA Y SALIDA DE LA TURBINA (ELABORACIÓN PROPIA)	65
TABLA 4. TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE (ELABORACIÓN PROPIA)	73
TABLA 5. BIOMASA FORESTAL DISPONIBLE EN CADA PROVINCIA DE ANDALUCÍA. FUENTE: CONSEJERÍA MEDIO AMBIENTE, JUNTA DE ANDALUCÍA, 2006	88
TABLA 6. INVERSIÓN INICIAL REALIZADA EN LA PLANTA (ELABORACIÓN PROPIA)	95
TABLA 7. COSTES DE OPERACIÓN OPEX (1) (ELABORACIÓN PROPIA)	96
TABLA 8. COSTES DE OPERACIÓN OPEX (2) (ELABORACIÓN PROPIA)	97
TABLA 9. COSTES DE OPERACIÓN OPEX (3) (ELABORACIÓN PROPIA)	97
TABLA 10. COSTES DE OPERACIÓN OPEX (4) (ELABORACIÓN PROPIA)	98
TABLA 11. COSTES DE OPERACIÓN OPEX (5) (ELABORACIÓN PROPIA)	98
TABLA 12. COSTES DE OPERACIÓN OPEX (6) (ELABORACIÓN PROPIA)	99
TABLA 13. FLUJO DE CAJA ANUAL MEDIO (ELABORACIÓN PROPIA)	100
TABLA 14. FLUJO DE CAJA CADA AÑO (1) (ELABORACIÓN PROPIA)	101
TABLA 15. FLUJO DE CAJA CADA AÑO (2) (ELABORACIÓN PROPIA)	102
TABLA 16. FLUJO DE CAJA CADA AÑO (3) (ELABORACIÓN PROPIA)	103
TABLA 17. FLUJO DE CAJA CADA AÑO (4) (ELABORACIÓN PROPIA)	104
TABLA 18. FLUJO DE CAJA CADA AÑO (5) (ELABORACIÓN PROPIA)	105
TABLA 19. FLUJO DE CAJA CADA AÑO (6) (ELABORACIÓN PROPIA)	106

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Actualmente la generación de electricidad en España está basada en un modelo centralizado, en el que la energía es generada en grandes plantas alejadas de los centros de consumo. El principal problema que esto conlleva son las pérdidas que se tienen en la red (cercanas al 15%) debido a la necesidad de transportar la electricidad cientos de kilómetros hasta el punto de demanda. El hecho de que el actual sistema se base en la producción masiva de electricidad en ciertos puntos para después distribuirla, se debe principalmente a factores económicos, ambientales y de seguridad, que hacen que las grandes instalaciones se sitúen cerca de donde se encuentran los recursos energéticos. Durante las últimas décadas, se ha intentado encontrar una alternativa en la que el ser humano fuese capaz de generar y consumir su propia energía en puntos cercanos. Durante muchísimos años no se ha obtenido una solución rentable. Sin embargo, a día de hoy se puede decir que esa solución se ha encontrado y que la generación distribuida es una realidad.

La generación distribuida consiste en la generación de energía mediante muchas fuentes de generación instaladas cerca de los puntos de demanda. Se basa en la cooperación entre esta generación a pequeña escala y la generación de centrales convencionales. Uno de los puntos más favorables de este sistema es que la generación distribuida implica el uso de las energías renovables, ayudando así a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Es aquí donde aparece el concepto de microrred inteligente, en el que se entrará en profundidad más adelante.

Por otro lado, la necesidad de producir energía eléctrica a partir de fuentes renovables, sumándole el gran interés por la cogeneración y el objetivo de reducir la cantidad de residuos que se encuentran en territorio español, ha provocado que en España se produzca un gran desarrollo de las tecnologías de producción eléctrica a partir de estas fuentes, especialmente la eólica y la fotovoltaica. Esto se debe a lo que conocemos por régimen especial, una serie de políticas impulsadas por el Estado con el objetivo de

promover estas tecnologías. De esta forma, el sistema eléctrico español está organizado en dos grupos de generación:

- El régimen ordinario. Consta de todas las centrales cuya potencia instalada es igual o mayor a 50 MW. Las tecnologías que se ven englobadas en este régimen son los ciclos combinados de gas, las centrales convencionales de carbón y fuel-oil, las centrales nucleares y las grandes centrales hidroeléctricas con una potencia mayor a 50 MW.
- El régimen especial. Consecuentemente, está formado por las unidades de producción con una potencia instalada menor de 50 MW. Este grupo lo componen el resto de tecnologías, englobando principalmente las fuentes de energías renovables como por ejemplo la fotovoltaica, eólica, termosolar, además de la cogeneración y las pequeñas centrales hidroeléctricas.

El régimen especial ha contado con gran prioridad respecto al régimen ordinario en los últimos años. Se ha visto favorecido mediante inversiones para la implementación de las fuentes renovables, así como primas que han provocado que el precio que paga el ciudadano por la electricidad no se corresponda con el coste de generación real. Tanto es así, que actualmente sólo el 30% del precio corresponde al coste de generación, mientras que el 70% restante es fruto de esas primas e impuestos. Todo esto se ha visto reflejado en un encarecimiento excesivo de la factura de la luz, que ha hecho que España pase de ser uno de los países más baratos a nivel de coste de electricidad, a ser uno de los más caros de Europa.

Al mismo tiempo, el hecho de que se haya priorizado la implantación de energías renovables no gestionables como la fotovoltaica y la eólica, llegando incluso a colocar a España en segundo lugar de Europa en capacidad eólica total (28,2 GW) y siendo una de las máximas exponentes a nivel fotovoltaico, conlleva ciertos problemas para el sistema eléctrico español. Se tratan de tecnologías muy aleatorias e impredecibles que sólo producen energía cuando el recurso está disponible. Y aquí reside el principal problema, que el recurso no siempre está disponible. Su tan alta dependencia de las condiciones atmosféricas, provocan una muy baja gestionabilidad de las energías, que conllevan a una falta de seguridad de abastecimiento, y hace que su integración en la red eléctrica

no sea fácil. Como respaldo de estas energías, es necesaria la existencia de suficientes mecanismos de almacenaje u otras fuentes de generación gestionables, como pueden ser las convencionales, que permitan cubrir los periodos de baja producción y evitar así posibles apagones en la red. Esta necesidad de almacenamiento y equipos de apoyo hacen que aumenten aún más los costes de electricidad.

Por otro lado, la gestión de los residuos es otro de los aspectos que tiene gran margen de mejora en España. El rápido e incesable crecimiento de la población, sumado a la industrialización llevada a cabo en las últimas décadas, ha provocado que la producción de residuos se multiplique de forma exponencial y no parece que vaya a parar. En 2019, último año del que se tiene información, en España se generaban cerca de 476 kg de residuos por persona al año, sumando un total de más de 22.5 millones de toneladas entre toda la población. Se trata de una muy alta cantidad de residuos que podrían ser una gran fuente de energía pero que, a día de hoy, prácticamente no está siendo aprovechada.

En España, los vertederos controlados se sitúan como la técnica más común para gestionar los residuos producidos. En 2019, España se colocaba como el quinto país de Europa con más proporción de residuos urbanos que acaban depositados en los vertederos, alcanzando los 257 kg de residuos urbanos por persona, mientras que la media europea se encontraba en 119 kg. Del total de residuos generados en España, un 53,9% fueron a parar a vertederos y un 38,9% fue reciclado, mientras que un 7,2% fue incinerado. Sin embargo, las emisiones de gases contaminantes provenientes de los residuos, así como la alta peligrosidad de los lixiviados hacen que la utilización de los vertederos se esté poniendo en duda desde hace unos años. Tanto es así, que desde la Unión Europea han sido aprobadas una serie de medidas mediante las cuales se regula el uso de los vertederos controlados, estableciendo que un máximo del 10% de la basura podrá acabar en vertederos a partir de 2030.

Esta solo es una de las muchas medidas aprobadas por la Unión Europea para modernizar la política y gestión de los residuos, cuyos objetivos son la prevención en la generación de estos, fomentar el reciclaje y la reutilización, optimización y mayor control de la eliminación definitiva, reducción del traslado de los residuos y mejora en

los instrumentos de gestión de residuos. Todos estos objetivos se ven reflejados en lo que se conoce como Economía Circular. Esta se presenta como un sistema de aprovechamiento de los recursos donde el objetivo es alargar lo máximo posible la vida útil de los elementos, mediante su reciclaje y posterior reutilización, para minimizar la producción de nuevos elementos. Además, la Economía Circular prioriza el uso de materiales biodegradables en la mayor medida de los posible a la hora de fabricar nuevos bienes, para que una vez su vida útil llegue a su fin, puedan volver a la naturaleza sin causar daños medioambientales.

Además, la comunidad europea manifiesta la importancia que tiene aprovechar energéticamente la biomasa para generar energía, cosa que en España no se está llevando a cabo. En España se producen cada año gran cantidad de residuos biomásicos provenientes de la ganadería, la agricultura y la industria forestal entre otros, que se están depositando sin obtener ningún tipo de beneficio.

Por todo esto, es necesaria la implantación de una nueva tecnología para la eliminación de ese gran número de residuos depositados en los vertederos. Esa tecnología ha de ser más eficiente y económica que estos, y se trata de la gasificación por plasma, objetivo principal de estudio en este proyecto. La gasificación por plasma, técnica emergente y con un gran potencial en la valoración energética de los residuos urbanos, consiste en la eliminación por completo de los residuos entrantes al proceso, obteniendo por parte de la materia orgánica un gas de síntesis rico en hidrógeno que se aprovechará para la generación de energía eléctrica, y por parte de la inorgánica un material vitrificado que puede ser aprovechado posteriormente como material de construcción.

Algunas ventajas de la gasificación por plasma respecto a otras tecnologías de valoración de los residuos son: la gran variedad de residuos que admite el proceso incluso aunque no se sepa la composición exacta de los mismos, proporciona una eliminación segura e irreversible de residuos peligrosos, las emisiones atmosféricas son bajas, es un método de valoración energética que genera mercancías de valor y cumple requisitos ambientales incluso más estrictos que los legales, entre otras ventajas que se estudiarán en profundidad más adelante.

Por todo esto, este proyecto tiene como motivación evaluar la viabilidad de la valoración energética de residuos mediante gasificación por plasma, así como su integración en un ciclo combinado para producir energía eléctrica. Es considerada una de las opciones más prometedoras para solventar tanto el problema de la gestión de residuos a la que se enfrenta actualmente la sociedad, como para compensar la no gestionabilidad de las tecnologías instaladas en España.

OBJETIVOS

En este proyecto se tiene como principal objetivo estudiar la obtención de hidrógeno a través del proceso de gasificación por plasma. Por otro lado, también será estudiada la viabilidad de usar ese hidrógeno en sustitución del gas natural en los ciclos combinados para producir electricidad. Como objetivos del proyecto se tienen los siguientes:

- Se analizarán los residuos, así como los diferentes tipos y su situación en España.
- Serán estudiadas las diferentes técnicas de valoración de residuos, detallando las características de cada uno y valorando sus distintas consideraciones medioambientales y energéticas.
- Se estudiará en profundidad del proceso de gasificación por plasma y la obtención de hidrógeno a través de este.
- Se justificará el uso de la gasificación por plasma frente al resto de técnicas de valoración energética de residuos.
- Se estudiará la implantación de un ciclo combinado integrado a la planta gasificadora para producir electricidad mediante el hidrógeno generado.
- Serán analizadas otras formas de aprovechar el hidrógeno producido, como son las pilas de combustible, estudiando los distintos tipos que existen en la actualidad, así como las distintas formas de almacenamiento de hidrógeno.
- Se diseñará una planta de gasificación por plasma para aprovechar los recursos biomásicos, eligiendo una localización en específico.
- Se estudiarán el número de residuos disponibles que serán tratados en la planta, tras una serie de hipótesis de trabajo.
- Se obtendrá el total de energía generada por la planta, así como el volumen de gas de síntesis obtenido para vender.

- Se realizará un estudio económico que permita conocer si la inversión realizada en la planta de gasificación por plasma es rentable o no.

ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS ODS

A raíz de la situación que se está dando hoy en día en nuestro planeta Tierra, en 2015 se lanzó desde la ONU un plan a seguir para calmar las desigualdades existentes. Esto ha quedado reflejado así en lo que se conoce como Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Durante el proyecto que va a ser descrito a continuación, uno de los puntos a destacar es el fiel seguimiento que se hace de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, siendo algo de gran importancia durante su ejecución. Por un lado, durante la gasificación por plasma, al tratarse los residuos a tan alta temperatura, no se producen dioxinas y furanos como ocurre en otras formas de valoración de los residuos, como es el caso de la incineración. De esta forma, se estaría siguiendo un proceso que no contamina, de acuerdo con las medidas impulsadas desde la Unión Europea. De esta forma, al no contaminar, también se ayuda a reducir la emisión de gases de efecto invernadero, siendo esto algo de vital importancia para lograr un mundo sostenible.

Si por otro lado, analizamos el proyecto desde un punto más social y humano, la reducción de estos gases contaminantes, sumado a la reducción del uso de los vertederos controlados, concluye en una considerable mejora a nivel de salud para la sociedad. Esto ocurre ya que en los vertederos, se producen unas emisiones perjudiciales, así como la posible contaminación de las aguas subterráneas.

Además, el hecho de que se aprovechen los residuos para producir energía supondría un incentivo para que hubiese una mejora a nivel de reciclaje por parte de la sociedad. Esto, de nuevo, iría de la mano con lo que se exige desde la Unión Europea, ese cambio que se está impulsando hacia una economía circular.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

LAS MICRORREDES INTELIGENTES

El sistema eléctrico español hoy en día cuenta con ciertas ineficiencias que provocan que la gestión de la electricidad no sea la mejor posible. Tal y como se ha comentado anteriormente, uno de los grandes problemas que surgen son las grandes distancias entre los puntos de generación de la electricidad y los puntos de consumo. Por otro lado, el hecho de que las redes convencionales sean tan dependientes de los combustibles fósiles, además de lo poco gestionables y accesibles que son las energías eólicas y fotovoltaicas en España, conducen a la idea de que es necesario un cambio en el sistema. Los sistemas de distribución de energía eléctrica con los que se cuenta en la actualidad necesitan desarrollarse, de tal manera que sean capaces de brindar un servicio continuo y de la mejor calidad posible, es decir, que no haya interrupciones en la red. En los últimos años, el interés creciente por la generación de electricidad de carácter renovable y de forma descentralizada ha desembocado en la búsqueda constante de alternativas, y es aquí donde aparece el concepto de las redes inteligentes de pequeño tamaño: las microrredes.

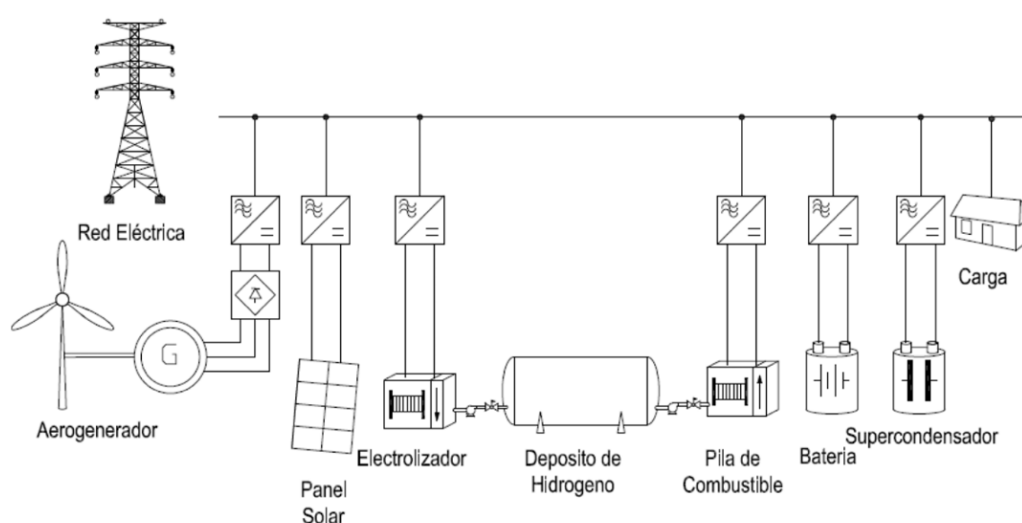


Ilustración 1. Esquema microrred inteligente. Fuente: Fundación Energía

Una microrred inteligente es un sistema de generación eléctrica bidireccional, que mediante el uso de tecnología digital e integrando los distintos recursos de origen renovable localizados cerca de una zona de consumo, es capaz de abastecer a la misma. Además, cuentan con sistemas de almacenamiento de energía y sistemas de generación gestionable. El objetivo de su implantación es ahorrar energía, reducir costes y aumentar la fiabilidad.

Las microrredes inteligentes son un claro ejemplo de la transición que se está produciendo tanto a nivel nacional como a nivel mundial en el ámbito de la generación eléctrica. Se está produciendo un proceso de descentralización en el que se está tratando de dejar atrás los tradicionales sistemas de generación, muy gestionables, con gran potencia, altamente dependientes de los combustibles fósiles y conectados de forma centralizada, para evolucionar hacia un sistema descentralizado, no contaminante y basado en la generación de origen renovable. Es decir, se está pasando de una producción masiva de energía en pocos puntos clave, a una producción de electricidad más distribuida y cercana.

Mediante la implantación de este tipo de redes se debe asegurar un sistema energético sostenible y eficiente, con seguridad de suministro y unas pérdidas mucho inferiores debido a la reducción de la distancia de transporte de la electricidad. Además, los usuarios que forman parte de la microrred ven su comportamiento y acciones integrados de forma eficiente en el sistema.

Un factor importante de las microrredes es que todas las tecnologías de generación renovable pueden ser implementadas en las microrredes, siempre y cuando se asegure la calidad y confiabilidad de la red, además de que los precios deben ser competitivos en comparación a los medios de generación convencionales. No obstante, las fuentes de energía no renovables también pueden verse integradas en la red. Todo esto hace que las microrredes sean una forma de generación muy limpia, ayudando a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Una de las grandes ventajas de las microrredes es que, a pesar de en muchas ocasiones estar conectadas a la red eléctrica, pueden funcionar por sí solas, aisladas de la red general. Es decir, si la red general experimenta algún tipo de avería o sufre un corte, la microrred es capaz de seguir generando electricidad. En otras palabras, la microrred es autosuficiente. Por lo tanto, el consumidor se convierte en autogenerador de energía,

pudiendo en muchas de las ocasiones y dependiendo de la regulación del país, verter el exceso de energía generada por la red. Es decir, la microrred puede incluso adquirir un papel de servicio auxiliar que facilite la vuelta a la normalidad de la red general en caso de incidencias. Por ello, es fundamental una buena gestión de la generación de la propia microrred que permita una alta capacidad de reacción ante las demandas de la zona afectada, haciendo que esta sea siempre segura.

Por otro lado, hay que destacar el hecho de que las microrredes sean inteligentes o *smart*. Es una tendencia que cada vez está más presente en nuestro día a día, incluso en muchos dispositivos que hoy por hoy tenemos en casa, y que también se está viendo aprovechada por la generación de energía. Debido al uso de distintas tecnologías y a una interconexión constante, las microrredes pueden analizar en todo momento la energía que se requiere en su zona de trabajo. Como consecuencia, la oferta puede adecuarse a la demanda de forma exacta, con una generación y administración optimizada, evitando las grandes desigualdades que se producen habitualmente en la curva de generación-demanda de electricidad y que provocan pérdidas considerables.

Todo este clima de trabajo hace que las microrredes, debido al gran desarrollo al que se están viendo sometidas, están llamadas a tener un importantísimo papel en un futuro a corto plazo. No solo son útiles para optimizar la generación de energía, hacerla llegar a zonas de difícil acceso, o aumentar la fiabilidad y seguridad del servicio, sino que también son una pieza fundamental en un futuro más sostenible.

ECONOMÍA CIRCULAR

Introducción

La economía circular consiste en un sistema económico y social, que establece un nuevo modelo de producción y consumo de bienes y servicios, garantizando un crecimiento sostenible. El objetivo es seguir produciendo todo tipo de bienes, mientras se reduce el consumo y derroche de materias primas, agua y fuentes de energía.

Está claro que cualquier método de fabricación conlleva un precio a pagar, a nivel medioambiental. Eso es algo que no se puede evitar. No obstante, sí se puede minimizar, siendo este uno de los objetivos principales de la economía circular. Para ello, ésta fomenta optimizar el uso de los materiales, reciclándolos o dándoles una nueva vida, alargando de esta forma la vida útil de los recursos. Es decir, se busca alargar al máximo

el ciclo de vida de los productos. Esta idea viene extrapolada de la propia naturaleza, donde absolutamente todo tiene su propio valor y es aprovechable. De esta forma, todo se mantiene en equilibrio y se puede afirmar que progreso y sostenibilidad van de la mano.

En la práctica, todo esto se resume en reducir la cantidad de residuos al mínimo. De esta forma, cuando cierto material no pueda seguir siendo utilizado como tal, se intentará dentro de lo posible que sus materiales se mantengan en uso dentro de la economía, siendo utilizados repetidamente, creando así un valor añadido.



Ilustración 2. Ciclo economía circular. Fuente: Educación Ecolec

Todo esto es completamente opuesto a lo que se conoce por economía lineal. Esta se viene aplicando a lo largo de toda la historia y consiste en extraer, producir, consumir y tirar, sistema que precisa de gran cantidad de materiales y fuentes de energía a bajo precio y de fácil acceso. Con el ritmo de consumo acelerado que tenemos en la actualidad, se trata de un modelo muy poco sostenible y con un futuro pésimo para el planeta tierra.

Existe un gran número de argumentos a favor de avanzar hacia la economía circular. Vivimos en un mundo en el que la población crece de forma exponencial. Consecuentemente, la demanda de bienes también sufre un gran crecimiento. Todo lo contrario ocurre con los recursos. Hoy en día hay escasez de estos, muchas materias

primas de vital importancia son limitadas. Es por ello que, alargar al máximo la vida de estas materias primas es algo fundamental. Por otro lado, a nivel climatológico todo esto también tiene una gran relevancia. El continuo trabajo para obtener, y más tarde procesar las materias primas, acarrea una serie de graves consecuencias a nivel medioambiental, aumentando el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero. Actualmente, la producción de bienes que utilizamos en nuestro día a día contribuye en un 45% de la emisión total de dióxido de carbono a la atmósfera. Se trata de un problema que se puede minimizar mediante un uso más inteligente de las materias primas, así como con nuevas tecnologías a la hora de tratar la materia, tema que se tratará en profundidad más adelante.

Medidas unión europea

Se dice que si se sigue extrayendo y consumiendo materia prima al ritmo con el que se hace en la actualidad, en el año 2050 se necesitará de tres planetas tierra para satisfacer nuestras necesidades. Es por ello fundamental que para ese año, nos encontremos envueltos en una economía totalmente circular. Para ello, la Unión Europea ya ha tomado una serie de medidas en los últimos años. En Marzo de 2022 propuso lo que se conoce por Plan de Acción de Economía circular. Todas las medidas recogidas en este plan promueven el uso de productos más sostenibles, preparar a la gente para una transición ecológica, establecer una nueva estrategia para lograr una industria textil sostenible, etc.

Para lograr que los productos sean más sostenibles, han sido impulsadas varias iniciativas por parte de la Unión Europea. Por un lado, propone ampliar la normativa y directrices de diseño ecológico también a productos que no estén relacionados con el ámbito energético. Por otro lado, otra de las medidas tomadas es la creación de pasaportes digitales para los productos. De esta forma, se tendrá en todo momento acceso a información que sea importante acerca del producto durante toda la vida útil del mismo.

Para dar el salto de verdad hacia una completa circularidad de la economía, ésta se debe aplicar a todos los niveles de la cadena de valor, siendo importantes cada uno de ellos, desde que se extrae la materia prima, hasta que llega en forma de producto a la población. La Unión Europea distingue siete apartados fundamentales para lograr este objetivo:

- Textiles. Ya que hoy en día sólo un 1% de las materias primas utilizadas en la industria textil proviene de materiales reciclados, la Unión Europea ha establecido un plan con el objetivo de que para 2030 se garantice que todos los productos textiles comercializados tengan una larga vida útil, y además, sean reciclables. Preferiblemente estos deben estar producidos por materia prima reciclada.
- Plásticos. El objetivo es reducir progresivamente, llegando a eliminar por completo, el uso de microplásticos.
- Electrónica y tecnologías informáticas. Los dispositivos electrónicos están siendo desechados a un ritmo muy alto y que crece incontroladamente. Se propone desde la Unión Europea un cambio en este ámbito, con la reutilización y la durabilidad como pilares principales.
- Vehículos y baterías. Se exige que todas las baterías dejen de lado todo lo posible al carbono, sustituyéndolo por otros combustibles más limpios como por ejemplo el hidrógeno.
- Alimentos y agua. Desde la Unión Europea se quiere reducir el desperdicio de alimentos a un máximo del 10% para el 2030, es decir, una reducción del 50% respecto a los niveles actuales. Para lograr estos objetivos, los países deberán de dar incentivos a la población a cambio de recoger los alimentos no vendidos y distribuirlos.
- Embalaje. El objetivo es que para el año 2030 todos los embalajes utilizados puedan ser reutilizados o reciclados.
- Gestión de residuos.

En cuanto a la gestión de residuos, en 2018 el Parlamento Europeo impulsó una serie de medidas a favor del reciclaje y en contra de los vertederos. Para 2025, el 55% de los residuos urbanos (que procedan de casas y empresas) deberá ser reciclado, y en 2035, el 65%. Respecto a los vertederos, se ha establecido que sólo un 10% de los residuos podrán acabar en ellos.

CAPÍTULO 3: La valoración energética de los residuos

RESIDUOS

Definición

Se trata de los desechos producidos en el día a día, de los cuales hay que desprenderse ya que tras haber cumplido su función, han perdido su valor o utilidad. En todos los sectores en los que se ve involucrada la actividad humana se generan residuos.

Siempre se ha relacionado el concepto de residuo con el de basura, ya que ambos son desechos producidos por el ser humano. Antiguamente siempre se ha considerado a los residuos como algo que hay que eliminar, ya que ha perdido su utilidad o su valor económico. No obstante, desde hace ya bastantes años, y debido a los problemas que han surgido con el paso del tiempo respecto al medioambiente y la sostenibilidad, se ha producido un cambio de mentalidad, en favor del reciclaje, con un gran avance en los últimos años.

Es por ello que hoy en día, la reutilización y reciclaje de los residuos, así como otras técnicas para aprovecharlos energéticamente, se presentan como algo fundamental desde un punto de vista medioambiental, social y económico. Pero la importancia otorgada a estas técnicas no está enfocada sólo en el futuro, sino que para el presente también es algo primordial.



Ilustración 3. Residuos depositados al aire libre. Fuente: Ecología verde

Clasificación de residuos

Los residuos pueden ser clasificados según su origen y su composición.

- En función de su origen encontramos los siguientes: Urbanos, industriales, de construcción, hospitalarios, radioactivos, mineros y biorresiduales.
- En función de su composición se tienen los siguientes tipos: residuos orgánicos y residuos inorgánicos. No obstante, se puede añadir un tipo más que consiste básicamente en una mezcla de ambos.

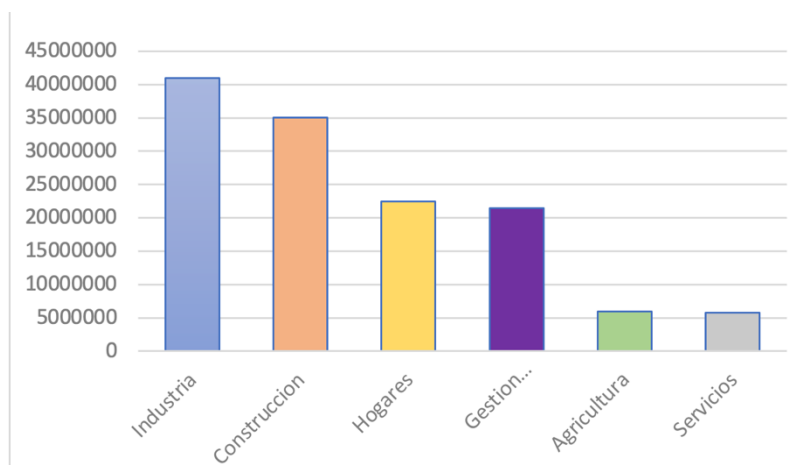


Ilustración 4. Toneladas de residuos generadas en España según la actividad (2017). Elaboración propia. Fuente: INE, Europa Press

Como se puede observar en la tabla anterior, en España las actividades que más toneladas de residuos generaron en 2017 son la industrial, la construcción y la doméstica. En primer lugar, la actividad industrial aportó alrededor de 38440 miles de toneladas. Después le sigue la construcción, que generó aproximadamente 35850 miles de toneladas. Y en tercer lugar se encuentra la actividad doméstica, en la que se generaron alrededor de 21900 miles de toneladas. A continuación, se van a tratar por separado los residuos sólidos urbanos, los agrícolas y los forestales.

Residuos sólidos urbanos

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son la basura, deshechos o desperdicios producidos en las diferentes áreas de las ciudades, ya sea en el núcleo urbano o en sus zonas de influencia. Se conoce a los RSU por ser los generados durante las actividades domésticas. No obstante, se incluye también dentro de este grupo a los residuos generados en industrias. Generalmente, este tipo de residuos se considera no peligroso. No obstante, pueden llegar a ser muy contaminantes para el ecosistema.

Los residuos sólidos urbanos están compuestos por:

- Residuos orgánicos
- Materiales inorgánicos: plástico, metales y vidrio.
- Papel y cartón.
- Madera
- Textiles

En el caso de España, los residuos sólidos urbanos se encuentran regulados a través de la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados, y a través del Plan Nacional Integrado de Residuos.

En cuanto a su producción, en España ha habido un importante crecimiento a lo largo de los años. Tanto es así, que entre 1990 y 2007 se produjo un aumento del 96% de residuos urbanos generados. Esto se debe a varias razones. Por un lado, no se han cumplido debidamente algunos de las medidas establecidas en los planes de residuos nombrados anteriormente. Por otro lado, el número de habitantes en España ha sufrido en las últimas décadas un crecimiento grandísimo, y por último, España figura en lo más alto de la lista de destinos turísticos de la Unión Europea, lo cual también provoca que durante los meses de vacaciones se produzca una inmensa llegada de turistas, con su consecuente producción de residuos.

No obstante, desde hace ya 5 años, se ha empezado a estabilizar la producción de residuos, no sólo en España, sino a nivel europeo. Esto se debe a todas las medidas impulsadas por la Unión Europea comentadas anteriormente.

En 2019, último año del que se tiene información, en España se generaban cerca de 476 kg de residuos por persona al año, sumando un total de más de 22.5 millones de toneladas

entre toda la población. Del total de residuos urbanos, 36% eran materia orgánica, 20% eran envases comerciales, 12% era plástico, 8% eran envases domésticos y el 7% era vidrio.

Residuos agrícolas

Se conoce por residuos agrícolas a los residuos provenientes de cultivos leñosos o herbáceos, además de los producidos en actividades de estos sectores. Se obtienen de los restos de los cultivos y de las limpiezas hechas en el campo para evitar incendios o plagas. Por lo tanto, se puede decir que los residuos agrícolas son generados en entornos naturales. Además, también se puede incluir en este grupo a los residuos que provienen de la industria agroalimentaria, como por ejemplo la producción de aceite de oliva.

Estos pueden encontrarse en estado sólido, como por ejemplo la leña, o en estado líquido, ya que tras las actividades agropecuarias quedan algunos líquidos residuales, como los purines.

Los residuos agrícolas están caracterizados por la estacionalidad, tanto en el momento de su producción como en el de su retirada. Deben ser retirados lo antes posible para que no interfieran con otras actividades agrícolas, además de para evitar que se puedan producir incendios.

La gestión de los residuos agrícolas requiere de gran atención. Si los residuos son quemados sin ningún tipo de control, se producirá una gran emisión de gases tóxicos. Si en vez de ser quemados, se dejan abandonados, pueden provocar que insectos y roedores acudan a estos y se formen plagas. Además, hay ciertos residuos que pueden llegar a contaminar suelos y aguas. Es por todo ello que, los residuos agrícolas necesitan ser gestionados de forma correcta, ya que de lo contrario, pueden acumularse y hacer que se deteriore el entorno progresivamente, suponiendo un problema tanto a nivel medioambiental, como a nivel de higiene pública.

En España se produce alrededor de 27 millones de toneladas de residuos agrícolas. Respecto del total, la poda de árboles frutales representa más del 57% de los residuos producidos. Por otro lado, más del 35% de los residuos agrícolas se tratan de residuos de los cultivos cereales. De estos residuos de cultivo de cereales, el 42% se deben al cultivo de cebada, un 24% es por el cultivo de trigo, y un 23% por el de maíz.

Residuos forestales

Los residuos forestales son los que provienen de la vegetación no gestionada por el hombre con el objetivo de obtener un beneficio económico. El monte y los árboles componen una fuente de dinero de la que proceden gran cantidad de residuos, como ramas, serrín, cortezas, etc. Durante muchos años, los residuos forestales eran la fuente de energía con más importancia en los hogares, y años después, en las industrias. No obstante, con el paso de los años y la aparición de otras fuentes de energía de fácil uso y bajo coste, como es el caso del gas butano, los residuos forestales han quedado desplazados. Como se han ido dejando de usar, se han acumulando cada vez más, llegando incluso a provocar grandes incendios.

En España se generan alrededor de 5 millones de toneladas de residuos forestales anualmente. Estos residuos se producen principalmente durante la obtención de madera y limpieza de los montes. No obstante, dentro de los residuos forestales, hay unos que se conocen como potenciales. Estos son los que se producen durante trabajos forestales de limpieza y cuidado del monte, como por ejemplo para controlar el crecimiento de las plantas. Por lo tanto, si se incluyen los residuos potenciales que se obtendrían si se limpiase cada 10 años el monte, la cifra de residuos forestales producidos llegaría casi a los 15 millones de toneladas.

Valoración energética de los residuos

Definición

Se conoce por valoración energética de los residuos al proceso mediante el cual, los residuos que no pueden ser reciclados, son sometidos a distintos tipos de tratamientos, con el objetivo de reducir su volumen y generar energía que se encuentra contenida en estos para su uso doméstico o industrial. Muchas de las veces esta energía puede ser comparable con la proveniente de los combustibles convencionales.

Aunque la mayoría de residuos pueden llegar a ser reciclables, siendo esta además la opción más conveniente, la valoración energética de los residuos se presenta como una más que interesante alternativa para aquellos residuos que no pueden ser reutilizados, existiendo además la posibilidad de generar esta energía de una forma limpia y sostenible.

Mediante la valoración energética se pueden llevar a cabo dos objetivos. Por un lado, se trata de una forma eficiente de gestionar los residuos, consiguiendo reducir el volumen de los que se encuentran en los vertederos sin poder ser reciclados. De esta forma además se siguen las pautas impulsadas por la Unión Europea de acabar de forma progresiva con los vertederos, mediante lo que se conoce por Economía Circular, de la que se hablará más adelante. Y por otro lado, la valoración energética de los residuos sirve como fuente de generación energética renovable, sostenible y con un nivel de eficacia comparable al de las tecnologías convencionales.

La valoración energética no sólo conlleva ventajas desde un punto de vista energético. Esta representa una serie de beneficios para el ámbito medioambiental, económico y social.

A **nivel medioambiental**, se puede hablar de las siguientes ventajas:

- Disminución de los residuos acumulados en vertederos, optimizando así la gestión de estos.
- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Mediante la valoración energética se trabaja y se potencia opciones de generación de energía alternativas, con niveles de contaminación mucho más bajos que las convencionales y además, renovables.

A **nivel económico**, se presentan los siguientes beneficios:

- Posibilidad de reducir la dependencia energética con el exterior. Por ejemplo en el caso de España, la cual no cuenta con grandes fuentes de energía convencionales, la valoración energética de los residuos se presenta como una gran opción de reducir esa dependencia que se tiene con el resto de países.
- Los precios de producción de energía mediante este método son más bajos que los de la producción convencional, conllevando a un ahorro considerable.
- Generación de nuevos puestos de trabajo. A nivel de España, a día de hoy ya se han generado muchos puestos de trabajo, que en caso de desarrollo de este campo, podrían verse aumentados de gran forma.

Y por último, a **nivel social** también conlleva una serie de beneficios:

- Es una forma de garantizar la existencia de suministros de energía para la generaciones del futuro.
- Ayuda en la búsqueda de un mundo más limpio y con menores niveles de contaminación.

La obtención de energía a partir de los residuos se puede se llevar a cabo a través de diferentes métodos. Estos son algunos de los que destacan en la actualidad:

- Vertederos.
- Incineración.
- Pirólisis.
- Digestión anaeróbica.
- Gasificación.
- Gasificación por plasma.

Vertederos controlados

Se conocen por vertederos controlados a los lugares destinados a la deposición de residuos, que se encuentran regulados legalmente mediante una serie de medidas que afectan a su explotación, control, vigilancia, clausura y postclausura. Se tratan de depósitos que cuentan con una total impermeabilización del suelo, además de una canalización de los lixiviados, evitando el paso de estos al subsuelo para que no contaminen las aguas subterráneas, y un sistema de tuberías que recoge el gas formado en el interior del vertedero, pudiendo incluso aprovechar su energía posteriormente.

Según la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados, en la actualidad está terminantemente prohibido la deposición de residuos de forma no controlada en toda España.

La función principal de este tipo de vertederos es eliminar los residuos más complejos de modo que se minimice o incluso se haga desaparecer los efectos negativos sobre el medioambiente. Aunque es cierto que los residuos vertidos no son aprovechables, se consigue que se degrade la materia orgánica, haciendo posible aprovechar los gases generados a partir de esta, además de la posibilidad de volver a utilizar el territorio en futuro.

En los vertederos controlados, se degradan biológicamente los residuos orgánicos que se van eliminando, produciéndose una generación de lo que se conoce como “gas de vertedero”. Este está compuesto principalmente por metano (25-50%), dióxido de carbono (20-40%), nitrógeno (4-15%) y otros compuestos en menor medida como vapor de agua o ácido sulfhídrico. La generación incontrolada de este gas puede conllevar a una serie de problemas como: incendios, toxicidad, malos olores, peligros para la fauna, peligros para la vegetación, etc.

Se han establecido a través del Real Decreto 646/2020 una serie de requisitos de obligado cumplimiento para los vertederos controlados:

- Es fundamental que los residuos puedan alcanzar las aguas subterráneas o superficiales. Además, las aguas que se encuentren ya contaminadas deberán ser tratadas, así como los lixiviados.
- Se debe impedir la contaminación del suelo. Esto se logrará a través de una barrera geológica y de un revestimiento situado debajo de los residuos. Además, es obligatorio una recogida y un tratamiento seguro de los lixiviados.
- Es obligatorio el control de la emisión de los gases de vertedero. Estos deben ser tratados y posteriormente, aprovechados.
- Se requiere la deposición de los residuos de una forma en la que se evite por completo cualquier tipo de desplazamiento, otorgando así estabilidad a la estructura.

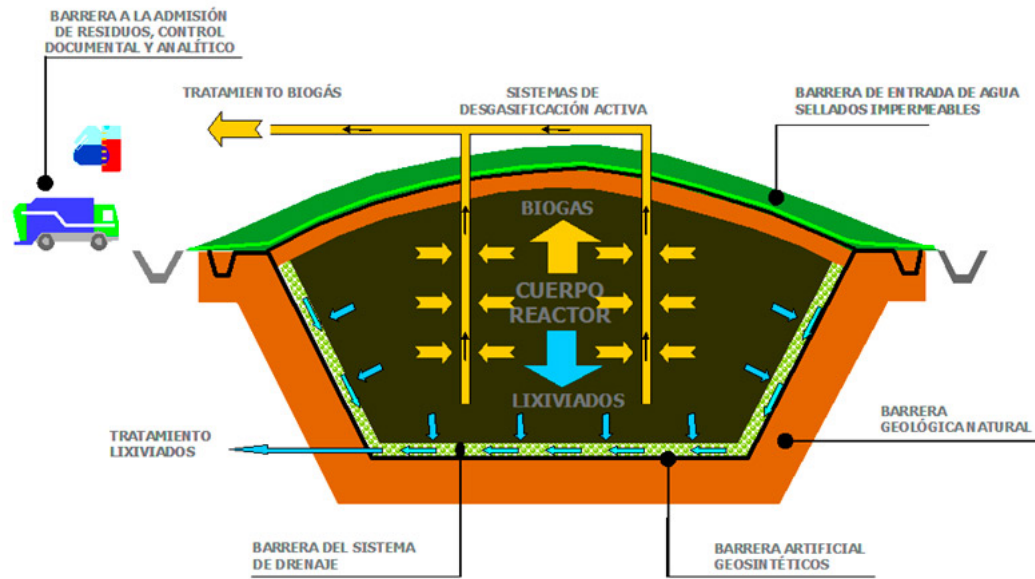


Ilustración 5. Esquema de un vertedero. Fuente: Wikipedia

Existen muchas otras medidas para el control de los vertederos, pero esto no termina con la fase de explotación. Una vez son clausurados, cosa que ocurre cuando las autoridades hacen una inspección del lugar y evalúen todos los documentos que demuestren el control del vertedero, es obligatorio continuar con el mantenimiento del vertedero durante un mínimo de 30 años.

Como se ha comentado anteriormente, desde la Unión Europea se han impulsado una serie de medidas para acabar con los vertederos. Estas leyes limitan la deposición de residuos en vertederos a un 10% como máximo, para 2035. En España, el vertedero controlado es la técnica más recurrida en cuanto a tratamiento de residuos, yendo a parar a estos más de la mitad del total de residuos. No obstante, se encuentra lejos de otros países Europeos como Malta (92%), Grecia (82%) o Chipre (81%).

Incineración

La incineración es otra técnica de valoración energética de los residuos mediante la cual se produce una transformación de la parte orgánica de estos en materiales inertes y gases, a través de una combustión controlada. Durante el proceso se desprende mucho calor que ha de ser aprovechado.

Como objetivos principales del proceso se tiene por un lado reducir el volumen y el peso de los residuos entrantes, y por otro lado su aprovechamiento energético. Respecto al primero, generalmente se produce una reducción del 90% respecto del volumen original, así como un 75% del peso.

Hay una serie de parámetros con gran importancia dentro de este proceso:

- Materiales volátiles: Se trata de la parte combustible de los residuos.
- Humedad: Además de reducir notoriamente el poder calorífico del combustible, la combustión no se produce si el material se encuentra húmedo.
- Cenizas: Tienen que ser retiradas y eliminadas tras el proceso. Un gran número de cenizas hace disminuir el poder calorífico del material.
- Composición elemental: Conociéndola se puede realizar una evaluación de los posibles gases contaminantes tras el proceso.

La incineración se trata de un proceso el cual tiene varias ventajas. En primer lugar, y como se ha comentado anteriormente, se produce una alta reducción del volumen de los residuos, alrededor de un 90% en concreto. Además, permite el aprovechamiento energético de los mismos. Por otro lado, las emisiones de gas metano son mucho menores que las que se emiten en los vertederos controlados. Y por último, los materiales pesados quedan fijados en las escorias como sales estables. Por otro lado, las cenizas o bien quedan depositadas en espacios destinados exclusivamente a ellas, o bien pueden ser vitrificadas y tratadas con plasma, tecnología que se estudiará a continuación.

Sin embargo, la incineración no se trata de un proceso de sólo ventajas. Por un lado, la incineración supone un gran desincentivo para el reciclaje. Muchos materiales como plásticos, cartones o papeles, que pueden ser reciclados, acaban siendo incinerados debido a su alta capacidad calorífica. Además, al producirse la combustión de los residuos, se genera un gran número de cenizas. Estas son peligrosas y deben ser depositadas en lugares especiales para ellas, donde estén debidamente controladas. Por otro lado, la cadena trófica puede quedar contaminada tras el proceso, pudiendo quedar algunas sustancias acumuladas. Y por último, aunque no menos importante, se produce una gran emisión de gases contaminantes, debiendo ser tratados. Entre estos contaminantes, se pueden destacar los siguientes:

- Partículas. Están principalmente compuestas por ceniza, aunque pueden contener también metales pesados, dioxinas y furanos. Para su tratamiento se cuenta con varias técnicas. Entre ellas están los ciclones, los precipitadores electrostáticos y los filtros de manga. Serán estudiados más adelante en profundidad.
- Gases ácidos. Si se produce la oxidación de elementos como Cl, F y S, y más tarde reaccionan con el agua, pudiendo ocasionar la lluvia ácida. Para solucionar el problema se puede recurrir al uso de depuradoras.
- Metales pesados. Los materiales más dados a encontrarse, y que además, son más difíciles de tratar son el mercurio y el cadmio. Como se ha comentado anteriormente pueden quedarse en las cenizas, o bien pueden evaporarse quedando en el ambiente.
- Dioxinas y furanos. Se dan cuando la combustión no se ha realizado correctamente, es decir, está incompleta. Esto ocurre cuando las condiciones de trabajo no son las adecuadas para el proceso. Pueden ser evitados si la combustión se produce a más de 700°C.

Actualmente, la incineración es muy utilizada en países como Alemania, Suiza, Japón, etc. Generalmente se trata de una tecnología que resulta muy interesante para, por ejemplo, aprovechar ese calor que se desprende durante la combustión y utilizarlo como método de calefacción. No obstante, si lo que se busca es el aprovechamiento del calor para producir electricidad, esta opción no resulta muy apropiada ya que los tiempos de arranque son muy altos.

Pirólisis

La pirólisis se trata de un proceso mediante el cual se degradan térmicamente los residuos en ausencia de oxígeno. Esta degradación se produce debido a las altas temperaturas a las que se someten los materiales, es decir, son descompuestos por el calor, sin que se produzca combustión.

En el caso de la pirólisis, no se generan furanos ni dioxinas como ocurría en la incineración. Durante el proceso, debido a las altas temperaturas a las que se someten los residuos, los enlaces de las moléculas entrantes se rompen, dando lugar a partículas más pequeñas. Por otro lado, y como el resto de métodos de tratamiento de residuos, se

produce una gran reducción de volumen de los residuos entrantes, además de reducir también la producción de residuo estéril. Otra de las ventajas frente a la incineración, es que el control del aire y de la contaminación es mucho más fácil en el caso de la pirólisis.

A través de la pirólisis se pueden obtener productos secundarios de gran utilidad en ámbitos como por ejemplo, el de la tecnología. Después del proceso, siempre se generan gases sólidos, como es el caso del carbón, líquidos, metano, hidrógeno, monóxido de carbono, etc. Además, existe un caso especial, conocido como pirólisis extrema, en el que como residuo sólo queda carbono. Por ello se conoce como carbonización.

Uno de los grandes alicientes de esta tecnología es el gran futuro que tiene en cuanto a la generación de biocombustibles. Se trata de un proceso tan rentable y ecológicamente tan limpio, que cada vez se están desarrollando más y más tecnologías que tienen como base la pirólisis, como por ejemplo la pirólisis flash y la pirólisis rápida. Por un lado, la pirólisis flash consiste en someter a los residuos a un calentamiento muy rápido (en ausencia de oxígeno), para luego condensar rápidamente los gases generados. De esta forma se obtiene tanto carbón con un gran poder combustible. Por otro lado, la pirólisis rápida se trata de un proceso mediante el que, a través de una serie de reacciones termoquímicas, se transforman los residuos energéticamente pobres en bio-oil con gran poder combustible.

Sin embargo, uno de los mayores inconvenientes que se presentan aquí, es el hecho de que haya que tratar los residuos previamente. Esto hace que los costes del proceso aumenten frente a otras tecnologías similares como la de gasificación por plasma.

Digestión anaeróbica

La digestión anaerobia, también conocida como biometanización, consiste en un proceso biológico mediante el cual gracias a la acción de unos determinados microorganismos, se produce la degradación de la biomasa en ausencia de oxígeno.

Como resultado se obtiene una mezcla de gases, constituida principalmente por metano (70%) y dióxido de carbono (29%), conocida como biogás. Además de estos dos, contiene otros gases en pequeñas proporciones como por ejemplo: hidrógeno, amoníaco, vapor de agua, ácido sulfhídrico, etc. Esta mezcla de gases poder ser utilizada posteriormente tanto a nivel industrial para la generación de calor, como para la generación de energía

eléctrica. Además, existe la posibilidad de purificar la mezcla mediante una serie de procesos, obteniéndose biometano. Este puede ser utilizado en las redes de gas natural, siendo el biometano un gas con características muy similares al gas natural fósil, pero siendo renovable.

Por otro lado, también se obtiene una suspensión acuosa, conocida como digestato, en la que se encuentra la fracción de residuos que no ha podido ser degradada o que no ha podido ser degradada al completo, además de los restos orgánicos restantes en la biomasa. Contiene además grandes cantidades de elementos minerales como el nitrógeno o fósforo, siendo así de gran interés para su utilización como fertilizantes.

El proceso de la digestión anaeróbica se puede dividir en dos fases:

- Primera fase. La materia orgánica, una vez se encuentra acumulada en algún tipo de medio acuoso y en unas adecuadas condiciones para el proceso, hace que empiecen a actuar los microorganismos aeróbicos, que intentan alimentarse de ella. Durante esta etapa, todo el oxígeno existente en el medio acuoso es consumido.
- Segunda fase. Una vez no queda más oxígeno, comienza el desarrollo de los microorganismos, los cuales empiezan a degradar la materia orgánica de los residuos. En primer lugar la materia se descompone en compuestos más sencillos, que acaban convirtiéndose en ácidos grasos volátiles. Más tarde, los llamados microorganismos metanogénicos, consumen estos ácidos grasos y generan metano y dióxido de carbono. Todo esto ocurre a la misma vez en un reactor o en un biodigestor anaeróbico.

Este método permite realizar una muy buena gestión de los residuos orgánicos, y transformarlos en productos de gran utilidad y económicamente atractivos. Asimismo, su consumición energética es muy baja, siendo sólo de un 10%, destinada al crecimiento de los microorganismos del proceso. Además, del total de energía contenida en la mezcla de gases generada en el proceso, hasta un 90% puede ser transformada en biogás.

La digestión anaeróbica presenta un gran número de beneficios. Por un lado permite la generación de forma renovable, de energía en forma de biogás, además del digestato, que como ya se ha comentado anteriormente, también es muy interesante como fertilizante. Debido a que durante el proceso se capturan todas las emisiones de metano que acabarían

en la atmósfera, se está contribuyendo a una reducción en la emisión de gases de efecto invernadero. Además, el nitrógeno contenido en el digestato es de fácil absorción para las plantas, en comparación con otras fuentes, por lo que permite un crecimiento de productos agrícolas más rápido. Y por último, y no menos importante, mediante el uso de esta técnica se cumple con la normativa internacional impulsada por la Unión Europea en cuanto al tratamiento de residuos.

Gasificación

Introducción

Se conoce por gasificación al proceso termodinámico mediante el cual a un sólido o líquido se le aporta suficiente energía para producir su disociación molecular. Como productos se obtienen un gas sintético o *syngas*, de bajo poder calorífico, y una lava fundida que una vez enfriada pasa a ser un producto vítreo inerte que puede ser usado como agregado de forma totalmente segura. El proceso es llevado a cabo en un gasificador y en presencia de una atmósfera con un bajo nivel de oxígeno.

La materia prima entrante al gasificador puede ser muy variada, admitiendo residuos sólidos urbanos, agrícolas, aceites pesados, biomasa, residuos de refinerías, etc. Es decir, este proceso es capaz de convertir productos de poco valor en productos con un valor más alto. No obstante, la composición química del gas de síntesis resultante varía en función del tipo de residuo.

El proceso consta de un agente gasificante, el cual es un gas (o mezcla de gases) encargado de aportar energía para que se produzcan las reacciones. Dependiendo de este gas, el poder calorífico del gas de síntesis resultante varía de la siguiente forma:

- Aire como gasificante: el gas generado tiene un poder calorífico inferior al 25% del que tiene el gas natural.
- Oxígeno como gasificante: el gas de síntesis consta de un poder calorífico entre el 25% y el 40% del que tiene el gas natural. Además, la calidad del gas de síntesis en este caso es mayor que en el caso del aire.
- Vapor de agua como gasificante: el gas resultante contiene unos niveles de hidrógeno y monóxido de carbono mayores que en los otros casos.
- Hidrógeno como gasificante: el poder calorífico del gas de síntesis es alto y se puede utilizar en las mismas aplicaciones que el gas natural.

La gasificación no se trata de un proceso desarrollado en los últimos años, sino que se empezó a estudiar en el siglo XIX. Ha sido un recurso común en periodos en los que no se contaba con suficiente combustible, ya que permite convertir sólidos en gases que pueden ser utilizados en turbinas, calderas y motores de combustión interna. Sin embargo, no ha sido utilizado hasta recientemente para procesar los residuos sólidos urbanos, siendo esta una de las aplicaciones de más interés, ya que permite cumplir la iniciativa promulgada por la Unión Europea, reducir la cantidad de residuos sólidos urbanos depositados en los vertederos.

La gasificación tradicional se produce a temperaturas inferiores a los 1750°C, dejando tras el proceso diferentes residuos como cenizas y escoria. No obstante, cuando la temperatura con la que se trabaja el residuo entrante es mayor, esos residuos son eliminados. Es el caso de la gasificación por plasma, que será estudiada en profundidad más adelante.

Tipos de gasificación según el gasificador

Dependiendo del tipo de gasificador encontramos dos tipos de tecnologías principales:

- De lecho móvil. Este tipo de gasificadores constan de un lecho sobre el que los residuos introducidos se mueven de forma lenta por el efecto de la gravedad, mientras se produce la gasificación. A su vez, se pueden subdividir en dos:
 - *Updraft* o contracorriente. El gasificante es introducido por la parte inferior, mientras que los residuos se introducen por la parte superior y caen por efecto de la gravedad. Es considerado el tipo de gasificador más simple.
 - *Downdraft* o corrientes paralelas. Tanto el gasificante como los residuos son introducidos por la parte superior del gasificador. El gas resultante es extraído por la parte inferior.
- De lecho fluidizado. La temperatura es uniforme en todo el lecho, siendo esta entre 675°C y 925°C. El gasificante se encarga de mantener en suspensión al combustible, hasta que este es gasificado y convertido en cenizas. Estas son transportadas por la corriente de gas de síntesis. Al igual que los gasificadores de lecho móvil, los de lecho fluidizado también se pueden subdividir en dos:

- Burbujeante. La velocidad del fluido es baja y mayormente las partículas sólidas permanecen en el lecho. Alrededor de un 10% de estas tienen que ser recuperadas en el ciclón.
- Circulante. La velocidad a la que circula el fluido es mayor que en el anterior caso y se produce un gran arrastre de las partículas que se encuentran en el lecho.

Etapas

El proceso de gasificación puede verse dividido en 4 etapas:

- 1) **Calentamiento.** La temperatura del proceso aumenta hasta los 100°C. El agua que contiene la biomasa se evapora y provoca el secado de esta.
- 2) **Pirólisis.** Esta es una etapa en la que también se absorbe calor, pero principalmente lo que ocurre es la disociación de las moléculas grandes formando otras más pequeñas, que debido a la temperatura a la que se está trabajando, se encuentran en estado gaseoso y se unen a la corriente del agente gasificante proveniente de la cuarta etapa.
- 3) **Reducción.** Se combinan el vapor de agua producido en la etapa de calentamiento con el dióxido de carbono arrastrado por el gasificante desde la cuarta etapa.
- 4) **Oxidación.** Se produce la oxidación de la parte más pesada de la biomasa (carbonosa) al entrar en contacto con el gasificante. Por último, los gases calientes tras las distintas reacciones evaporan el agua contenida en la biomasa, volviendo a la etapa 1.

CAPÍTULO 4: Gasificación por plasma

Introducción

Se trata de un proceso térmico mediante el cual se produce la disociación completa de la materia orgánica. Durante el proceso, se crea un campo eléctrico radiante que permite que se alcancen altas temperaturas (alrededor de 5000°C) y sea posible la disociación molecular. Por un lado, los componentes orgánicos se convierten en un gas rico en hidrógeno, llamado gas de síntesis o “syngas”. A su vez, los componentes inorgánicos se funden y producen una lava que una vez enfriada pasa a ser un producto vítreo inerte que puede ser usado como agregado de forma totalmente segura.

El plasma es creado en la antorcha de plasma, uno de los elementos fundamentales de este proceso, mediante una descarga de arco eléctrico a presión atmosférica, produciendo plasma térmico de alta potencia y temperatura, pudiendo alcanzar entre los 5.000°C y los 10.000°C. Como ha sido mencionado anteriormente, el plasma es un gran conductor tanto eléctrico como térmico. Esto es algo de gran relevancia en el proceso ya que permite el traspaso de energía desde el arco al gas que va entrando. El plasma generado se encuentra en los extremos del arco producido anteriormente por la antorcha. Una vez el plasma se aleja del arco, este pierde su estado de ionización y volverá a su estado original, es decir, volverá a ser neutro.

Es un proceso ecológicamente limpio en el que no se genera ningún subproducto tóxico. Primero, la materia no es quemada. Esta se descompone en distintos elementos, siendo estos principalmente el hidrógeno, el monóxido de carbono y el agua. Y segundo, no quedan subelementos tóxicos tras el proceso, ya que todo el alquitrán, partículas carbonizadas y dioxinas quedan destruidas. Esto se debe a la alta temperatura a la que se trabaja en el proceso y al largo tiempo que se dejan los residuos en el gasificador.

El gas de síntesis obtenido debe someterse a un proceso de limpieza ya que contiene ciertas partículas no deseadas como por ejemplo mercurio, azufre y metales pesados. Una vez limpio, se hará pasar el gas por un Ciclo Rankine. Primero, se reduce la temperatura del gas y paralelamente, se aprovecha dicho calor desprendido para producir vapor

sobrecalentado. Finalmente, ese vapor de agua hará funcionar una turbina, generando así energía eléctrica.

En conclusión, cuando hacemos referencia a la gasificación por plasma, hablamos de uno de los métodos más efectivos y medioambientalmente amigables para el tratamiento de residuos sólidos y utilización de energía.

El plasma

Se conoce por plasma a un gas ionizado a alta temperatura, pudiendo alcanzar los 15000°C. Se trata de un gas con electrones libres que es capaz de conducir corriente y se ve altamente influido por los campos magnéticos. Al comportarse de forma diferente a los tres estados naturales de la materia, sólido, líquido y gaseoso, se le denomina cuarto estado de la materia.

Los cuatro estados de la materia quedan distinguidos principalmente por la fuerza de los enlaces entre sus partículas, y más aún, por el equilibrio entre la energía térmica de sus moléculas y la fuerza de sus enlaces. De esta forma, cuando a un sólido o líquido se le aplica energía, la energía térmica de sus moléculas aumenta hasta superar la energía potencial de enlace de estas, provocando un cambio de fase. Sin embargo, cuando se trata de un gas no se produce un cambio de fase si se habla estrictamente en el sentido de la termodinámica. Si se sigue aumentando la temperatura del gas, llega un punto en el que se supera la energía de enlace molecular, provocando que las moléculas queden disociadas en átomos que, a una alta temperatura, las colisiones entre estos provocan el desprendimiento de electrones que dan lugar a un gas ionizado o plasma.

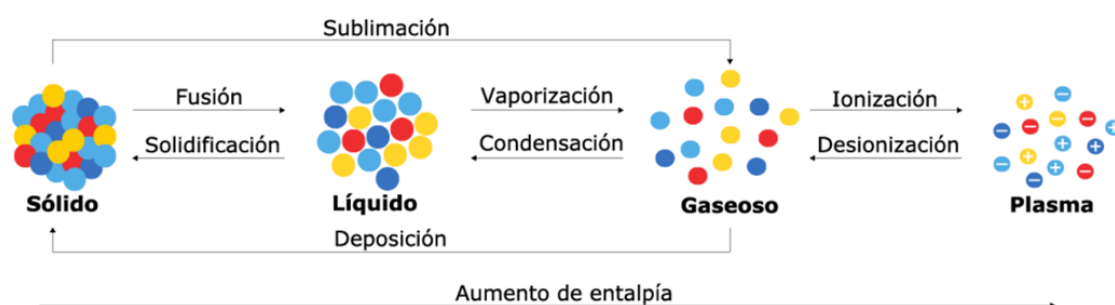


Ilustración 6. Los cuatro estados de la materia y sus relaciones. Fuente: Research Gate

El comportamiento del plasma depende del grado de ionización del gas, es decir, la proporción de átomos que ha perdido un electrón. Si por ejemplo el gas a analizar tiene muy pocos electrones libres por unidad de volumen, es decir, baja densidad de plasma, se seguirá comportando como un gas. En cambio, cuando el gas alcanza un grado de ionización de al menos 1%, éste desarrolla nuevas características y ahora sí se estará hablando de plasma. La principal diferencia entre el gas y el plasma es la alta conductividad de este último, además de una respuesta elevada a los campos magnéticos.

El plasma se puede encontrar en dos estados generales, en equilibrio y en no equilibrio. El estado de equilibrio se refiere a la igualdad entre la temperatura de los electrones, iones y átomos neutros. Al plasma en equilibrio también se le conoce como plasma térmico. Este cuenta con un alto grado de ionización y posee un gran contenido energético. Esto último se debe a que sus iones y átomos conforman la mayor parte de la masa del gas y además se encuentran a alta temperatura. Por el contrario, cuando se habla de no equilibrio se refiere a la variedad entre la temperatura de los electrones, iones y átomos neutros, siendo generalmente la temperatura de los electrones bastante mayor que la del resto. Al plasma de no equilibrio también se le conoce por plasma no térmico.

Para ionizar un gas es necesario aplicar una corriente eléctrica a un gas dieléctrico. Esta crea una diferencia de potencial que, junto a la presencia del campo eléctrico producido, hace que los electrones sean atraídos hacia el ánodo, así como los núcleos hacia el cátodo. Conforme aumenta el voltaje, el material queda polarizado por encima de su límite dieléctrico, también conocido como punto de ruptura dieléctrica, a partir del cual comienza la ionización. Se comienza así un proceso de cascada en el que el primer impacto de un electrón con un átomo neutro genera un ion y un par de electrones, que vuelven a impactar con átomos neutros generando más iones y más electrones, provocando así la ionización del gas.

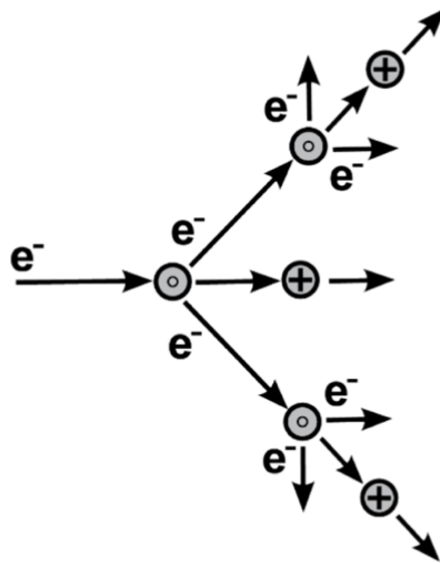


Ilustración 7. Proceso de cascada en la ionización de un átomo. Fuente: Classicistranieri

Aunque en el día a día lo más común es interactuar con sustancias en estado líquido, sólido o gaseoso, el plasma conforma más del 99% de todo lo que hay en el universo. Esto se debe a que fenómenos naturales como las estrellas, incluido el Sol, son enormes aglomeraciones de plasma. Si se habla en específico sobre el Sol, el plasma varía en función del nivel en el que nos encontremos. Por ejemplo, el plasma más denso y a más alta temperatura se encuentra en el núcleo. A medida que nos alejamos del centro, la densidad del plasma disminuye.

Pero no solo encontramos plasma en las estrellas, sino que en la Tierra también lo podemos encontrar. Principalmente en la ionosfera. Esta se encuentra entre los 80 km y los 90 km de altitud, y se trata de la parte de la atmósfera que está permanentemente en estado de ionización, debido a la fotoionización provocada por la radiación solar. Los gases en esta zona son tan tenues que es posible encontrarse electrones libres e iones positivos. Consecuentemente, la ionosfera tiene características de gas plasma.

Por último, hay otros fenómenos naturales compuestos por plasma como son los rayos, nebulosas, vientos solares o auroras boreales. Además, desde hace años se está implementando en diferentes aplicaciones tecnológicas como las pantallas de televisión,

tubos fluorescentes, lámparas de plasma o soldaduras de arco eléctrico.

Proceso



Ilustración 8. Etapas en el proceso de Gasificación por Plasma. Fuente: TFG Almudena Valenciano

Etapa 1: Alimentación

En esta etapa nos encontramos con un sistema de alimentación, mediante el cual se introducirán los residuos a tratar en el reactor y el gas que permitirá generar plasma.

Dentro de esta etapa, nos encontramos con una serie de procesos que, aunque no son rigurosamente necesarios, son muy útiles para mejorar la eficiencia del proceso:

- **Reducción del tamaño:** mediante este proceso se busca la reducción del volumen de los residuos y la uniformidad de estos, consiguiendo así que sean más manejables y fáciles de introducir en el reactor. Además, de esta forma también se aumenta el peso específico de los residuos.
- **Separación:** aunque mediante la reducción del tamaño ya se había conseguido una cierta uniformidad de los residuos, si estos son separados se logra que lo sean aún más. Se trata de un paso importante ya que, mediante la introducción de un compuesto uniforme en el reactor, aumenta la calidad del proceso y se obtiene un gas de síntesis sin variaciones en su composición. Para ejecutar esta acción, se podrán utilizar separadores balísticos, magnéticos u ópticos.

- **Compactación:** el objetivo de este proceso es aumentar la densidad de los residuos que se van a introducir en el reactor, para así optimizar tanto el transporte como el almacenamiento de estos.
- **Reducción de humedad:** reduciendo la humedad de los residuos entrantes a la vasija, se consigue mejorar el rendimiento del proceso. Para ello, se aprovechará el calor desprendido por el gas de síntesis saliente de la vasija, llegando a reducir la humedad de los residuos de un 20% a un 5% aproximadamente.
- **Alimentación:** los residuos se introducen al reactor de forma continua a través de una línea. Es necesario un sistema de control encargado de regular el ritmo de entrada de los residuos al reactor. Además, con motivo de generar el plasma y así lograr la disociación de los residuos, se ha de alimentar el reactor con ciertos gases:
 - Oxígeno: se introduce oxígeno en el reactor para crear así el medio oxidante.
 - Gas plasmógeno: gas con el que se alimentan las antorchas que van a generar el plasma. Pueden ser utilizados distintos gases, como helio, aire, etc. No obstante, es el aire el más común debido a la relación rendimiento-precio que se obtiene tras su uso

Etapas 2: Disociación

Durante la etapa de disociación, llevada a cabo en la vasija de plasma, se produce la ruptura de los enlaces moleculares de los residuos introducidos en el reactor. Esto ocurre gracias a las altas temperaturas que se alcanzan en esta etapa. Por consiguiente, se requiere un arco eléctrico para que se produzca la disociación de las partículas. Gracias a la diferencia de potencial existente entre los electrodos de la antorcha de plasma, conectada a un generador de corriente continua, se obtiene ese arco eléctrico.

Estas altas temperaturas permitirán una disociación definitiva e irreversible de las estructuras moleculares en sus compuestos básicos, resultando en una reducción volumétrica de los residuos introducidos del orden de 300:1.

Debido al aumento progresivo de temperatura generado por el arco eléctrico, se pueden diferenciar distintas etapas como se puede observar en la siguiente imagen:

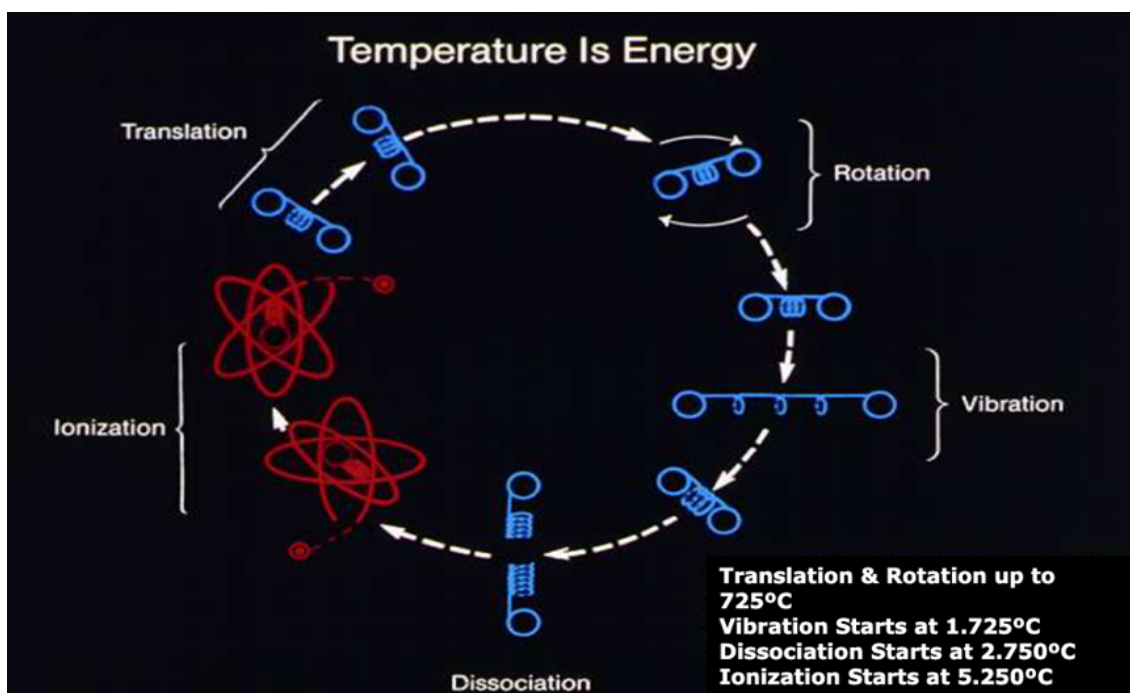


Ilustración 9. Disociación de un átomo. Fuente: FundacionEnergia

Como se puede apreciar, alrededor de los 700°C se produce la traslación y rotación de las partículas. A continuación, cuando se alcanzan aproximadamente los 1700°C comienza la fase de vibración. Después, a partir de los 2750°C, ocurre la disociación. Finalmente se produce la ionización de las partículas alrededor de los 5250°C. El resultado son partículas e iones excitados, las cuales conforman el estado de plasma deseado. Cabe destacar que para generar el plasma, se requiere de un medio oxidante que facilite la ionización de las partículas. Este oxidante puede ser aire, oxígeno o aire enriquecido con oxígeno. Para plantas de gran capacidad, es recomendable el uso de oxígeno puro o al menos, de aire enriquecido con oxígeno en lugar de sólo aire, ya que así se aumenta el poder calorífico del gas de síntesis.

Durante esta etapa se llevan a cabo una serie de procesos térmicos:

- Cracking térmico: se trata de la disociación de las moléculas complejas en moléculas más ligeras formando gases de hidrocarburos e hidrógeno.
- Oxidación parcial: se produce la formación de monóxido de carbono, además de pequeñas cantidades de dióxido de carbono y agua. Estos últimos tienen lógicamente efectos negativos sobre el valor calorífico del

gas de síntesis resultante. Por lo tanto, es esencial controlar la entrada de oxígeno en el reactor.

- **Reformación:** se combinan los elementos obtenidos formando nuevas moléculas. Algunas de estas combinaciones son las de carbono y agua produciendo monóxido de carbono e hidrógeno, o la de dióxido de carbono y carbono dando lugar a monóxido de carbono.

Por otro lado, en todo momento el suelo de la vasija se encontrará recubierto de arena fundida, debido a las altas temperaturas, con una composición rica en silicio. Por un lado, los compuestos peligrosamente peligrosos como los materiales pesados, quedarán atrapados en la red cristalina formada en el fondo de la vasija, mientras que el resto de elementos inorgánicos disociados reaccionarán con el silicio fundido. El resultado será una especie de lava volcánica que, tras ser enfriada, formará un vidrio basáltico inerte. Se trata de un material totalmente inocuo, no tóxico y no lixiable.

Etapa 3: Enfriamiento

El objetivo de esta etapa es reducir la temperatura del gas de síntesis a la salida de la vasija, que se encuentra aproximadamente a 1000°C. Esto se realiza con el propósito de evitar que los equipos utilizados durante el proceso queden dañados. El enfriamiento del gas permitirá aprovechar el calor obtenido tanto para reducir la humedad de los residuos en la etapa de alimentación, como para ser utilizado en un ciclo Rankine produciendo vapor y, tras hacerlo pasar por una turbina, generar electricidad.

Para enfriar el gas se cuentan con varias opciones. Comúnmente se recurre a los intercambiadores de agua o de aire. Otra opción son los *quench systems*, que se trata de un sistema que inyecta aguas abajo una corriente de agua o del mismo gas a baja temperatura.

Esta etapa de enfriamiento la podemos dividir en tres subetapas:

- 1) Se reduce la temperatura desde los 1000°C hasta aproximadamente 745°C. Esta reducción se realiza a través de un intercambiador de aire.
- 2) A continuación, se reducirá de nuevo la temperatura desde esos 745°C hasta unos 484°C. En este caso, la reducción de temperatura será llevada a cabo mediante un

intercambiador de agua. A este intercambiador le entrará vapor saturado, proveniente de la tercera subetapa de enfriamiento, y saldrá vapor sobrecalentado.

- 3) Finalmente, mediante el intercambiador de agua mencionado anteriormente, se reducirá la temperatura del agua hasta los 265°C.

Etapa 4: Filtrado de gases

Aunque el gas de síntesis que se obtiene a la salida de la vasija esté compuesto mayoritariamente de hidrógeno y monóxido de carbono, también se puede encontrar en cantidades mucho inferiores otros elementos que empeoran la calidad del gas. Consecuentemente, para intentar obtener el gas con la mayor calidad posible, es recomendable someter al gas a un proceso de filtrado y purificación. Además, el hecho de que el gas arrastre partículas sólidas que pueden causar erosión y abrasión en los equipos del sistema, también incita a realizar ese filtrado. Y finalmente, desde un punto de vista medioambiental, al eliminar todas esas partículas que permanecen en el gas, se evita la emisión de posibles contaminantes en una combustión posterior del gas de síntesis. Eso sí, al tratarse de un proceso de gasificación y no de combustión, la gran parte de partículas tóxicas y cenizas se quedan en el residuo inerte, permitiendo que la filtración de las partículas sólidas sea mucho más fácil.

Para llevar a cabo este proceso existen varios métodos que se pueden llevar a cabo. A continuación, se van a describir algunos de ellos.

Ciclón

Es uno de los sistemas de separación mecánica más populares. Destaca por su rendimiento, siendo este ampliamente mejor que el de las cámaras de impacto o las cámaras de separación. No obstante, los electrofiltros son otra opción con un rendimiento muy alto, llegando a ser de un 99% para partículas menores de 10 µm. Sin embargo, su precio es muy elevado.

Entre sus principales ventajas destaca la sencillez de su estructura, la ausencia de partes móviles y la casi inexistente exigencia de mantenimiento. Además, otra gran ventaja es que basa su funcionamiento en la fuerza centrífuga, permitiendo que se pueda trabajar a una velocidad mayor y que sea más efectiva la separación de las partículas.

El ciclón está formado por un cilindro vertical con fondo cónico que cuenta con una entrada tangencial generalmente rectangular. La tecnología del ciclón se basa en la diferencia de densidad existente entre las partículas sólidas y las gaseosas de la corriente entrante. Las partículas deben ser lanzadas dentro de un gran embudo contra las paredes del ciclón, lugar donde el aire fluye helicoidalmente de forma descendente. Las partículas grandes, y consecuentemente más densas, tienen demasiada inercia por lo que no pueden seguir las curvas de la pared ciclónica, por lo que chocan y caen por acción de la gravedad a la parte más baja del ciclón, donde serán recogidas en un colector situado en la base cónica para más tarde ser retiradas.

La eficacia de este sistema depende de la geometría del ciclón, así como de su flujo volumétrico, siendo en este caso el gas de síntesis. Mediante ambas características queda definido el punto de corte del ciclón. Se trata del tamaño al cual las partículas serán retiradas del gas entrante con un 50% de eficiencia. Por encima de este tamaño, serán retiradas con mayor eficiencia, y viceversa. Generalmente, el ciclón es un sistema de eliminación de partículas muy eficaz, a excepción de corrientes de gases con alto contenido en partículas con un diámetro inferior a los 10 μm . Por otro lado, cuando las partículas son muy grandes, superando los 200 μm , es más recomendable utilizar sedimentadores por gravedad o sedimentadores por inercia.

Filtro de mangas

Un filtro de mangas se trata de un dispositivo destinado a la separación de partículas sólidas en suspensión de una corriente de gas. La función del filtro es recoger las partículas mediante un tejido. Los filtros de mangas recogen partículas entre los 2 μm y los 30 μm de diámetro. No obstante, lo normal es no contar con medios para filtrar partículas tan pequeñas. Es por ello que el funcionamiento efectivo de este tipo de filtros comienza cuando ya se han recogido cierto número de partículas, ayudando estas a recoger a las más pequeñas.

Este tipo de filtros cuentan con un conjunto de bolsas con forma de manga, que pueden ser de fibra sintética o natural y que están situados sobre unos soportes para tener estabilidad y solidez. Además, para poder dar dirección al flujo de gas, los filtros de mangas cuentan con unos paneles. Por otro lado, es también necesaria la presencia de

equipamiento para la limpieza de las mangas, así como una tolva que permita recoger las partículas recolectadas.

Para que la recogida de partículas se realice de forma eficaz, se precisa de un ventilador que mueva el gas. De esta forma, el gas chocará con los paneles mencionados anteriormente, dividiéndose así en varias corrientes con una dirección deseada. De esta forma, las partículas de mayor diámetro caerán al fondo de la tolva, mientras que las más pequeñas quedarán atrapadas en la superficie del tejido una vez el gas atraviese las mangas. Estas partículas que se van acumulando en las mangas forman lo que se conoce por torta filtrante. Esta torta se va haciendo más y más grande conforme pasa el proceso, por lo que se precisa de una limpieza de las mangas de forma periódica para que la velocidad del proceso no se vea perjudicada, así como su eficiencia. Cuando la torta está ya formada, la eficiencia de este sistema de filtrado es de un 99.9% aproximadamente.

Sin embargo, este sistema cuenta con una serie de restricciones que obligan a tener cuidado con su utilización. Esas restricciones tienen que ver con la temperatura, ya que las mangas cuentan con una temperatura máxima de trabajo. Es por ello que, al trabajar durante todo el proceso a altas temperaturas, hay que tener especial cuidado. Si las mangas están hechas de fibras naturales, estas pueden aguantar alrededor de los 90°C, mientras que otro tipo de fibras más novedosas compuestas de materiales sintéticos y vidrios pueden aguantar entre 230°C y 250°C.

Torres de absorción

En este sistema de limpieza se pone en contacto el flujo de gas con un líquido, conocido como absorbente o disolvente. Este líquido puede disolver más de un disolvente del flujo de gas, llamados solutos, mediante transferencia de materia del gas al líquido. También existe el proceso inverso, denominado como desorción o *stripping*, en el que el soluto pasa de la corriente líquida a la de gas. Si el disolvente es acuoso, también se conoce como scrubber, sistema que se entrará en profundidad a continuación. Se pueden encontrar dos tipos de absorción:

- Absorción física: el agua u otro tipo de hidrocarburos son utilizados como disolventes, sin ningún tipo de reacción química.
- Absorción química: la velocidad a la que se absorbe el soluto aumenta gracias a una reacción química dada en la fase líquida.

En este sistema, el disolvente que se utiliza es uno de los agentes más influyentes del proceso. Comúnmente son utilizados el agua o los aceites hidrocarbonados. A la hora de elegir el disolvente, hay que prestar especial atención ya que esto marca la eficiencia del proceso y que las pérdidas puedan reducirse lo máximo posible.

La tecnología de las torres de absorción consiste en una corriente de gas circulando en contracorriente con el líquido dentro de la torre. Debido a la diferencia de presiones entre entrada y salida de la torre, el gas asciende. Se produce un contacto entre ambas fases, provocando una transferencia del soluto de la fase gaseosa a la líquida. Se prefiere que el contacto entre ambas fases sea máximo, así como que el tiempo de contacto, para que la transferencia de soluto de una fase a otra sea la máxima posible. Para que el proceso de absorción sea óptimo se precisa de ciertas condiciones de trabajo, como que la presión de operación de la columna sea alta, así como que la temperatura no sea muy elevada. No obstante, como el tema de la refrigeración y la compresión pueden llegar a aumentar mucho los costes de operación, se suele trabajar a la presión de alimentación y a temperatura ambiente. Todo lo contrario ocurre en el proceso de desorción o *stripping* mencionado anteriormente, en el que se recomienda que la temperatura sea alta y la presión baja. De nuevo, aparece el tema económico como inconveniente, ya que el mantenimiento de una columna a vacío es costoso. Es por ello que se suele optar por trabajar con una presión un poco por encima de la atmosférica y sin que la temperatura exceda ciertos valores en los que se produzcan reacciones químicas no deseadas.

Volviendo al caso específico del sistema Scrubber, este se encarga de capturar el gas y someterlo a una ducha básica, es decir, se neutralizan los componentes contaminantes mediante el uso de un líquido. Este líquido puede ser agua, un reactivo químico o incluso una combinación de ambos, dependiendo de los contaminantes que se quieran eliminar. Por ejemplo, los derivados del nitrógeno pueden ser eliminados en un medio ácido, mientras que los derivados del azufre tienden a ser absorbidos en un medio oxidante. Como subproducto se obtiene agua salada, quedando depositada en el fondo del dispositivo.

Tras la actuación del Scrubber, el gas debe pasar por un filtro de alta eficiencia HEPA (High efficiency particle arresting). Estos filtros, también conocidos como filtros absolutos, son un sistema de retención de partículas volátiles presentes en el aire. Los

compuestos contaminantes quedan atrapados en unas fibras de grosor muy pequeño y que están colocadas de forma aleatoria, formando una especie de malla.

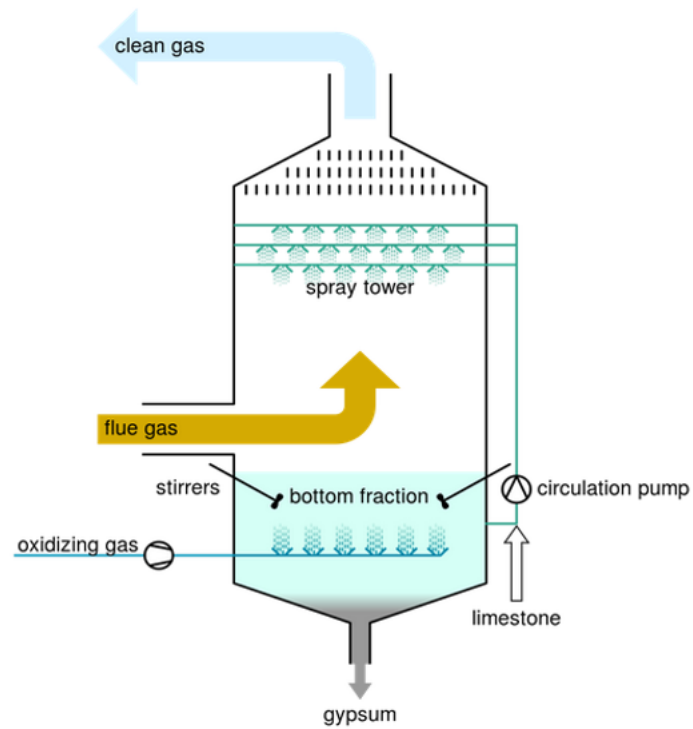


Ilustración 10. Esquema de un sistema de mojado Scrubber. Fuente: Energy Education

Etapa 5: Neutralización

Tras la etapa anterior, se obtiene como resultado un gas de síntesis libre de compuestos halogenados y sulfuros con la siguiente composición:

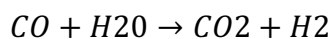
GAS DE SÍNTESIS	
%CO	77,6
%N ₂	7,11
%CO ₂	6,67
%H ₂	4,46
%H ₂ O	2,93
%Ar	1,22
%CH ₄	0,01
%H ₂ S	0

Tabla 1. Composición gas de síntesis a la salida de la vasija. Fuente: TFG Almudena Valenciano

Debido a que la composición de monóxido de carbono es muy alta frente a la de hidrógeno y a que el dióxido de carbono existente en el gas de síntesis quiere ser eliminado, se va a someter al gas a una serie de procesos: reacción Shift y captura y secuestro de CO₂.

Reacción Shift

También conocida como reacción de desplazamiento del gas de agua, describe la reacción del monóxido de carbono y el vapor de agua para generar dióxido de carbono e hidrógeno. El objetivo es aumentar la composición de hidrógeno en el gas de síntesis mediante la eliminación del monóxido de carbono. La reacción es la siguiente:



Captura y secuestro de CO₂

Con este proceso se busca la eliminación del dióxido de carbono y trasladarlo a un sitio donde pueda ser almacenado de forma aislada durante un largo tiempo. Hoy en día, hay tecnologías que son capaces de capturar hasta un 90% del dióxido de carbono que se procesa. No obstante, su implantación implica entre un 10% y un 40% de consumo de energía adicional, provocando un considerable aumento en el coste total.

Hay opciones con menor consumo de energía y consecuentemente, más viables desde un punto económico, como es el caso de pasar por un baño solvente de ánimas al gas de síntesis, opción que se considera más adecuada en el caso de este proyecto.

Elementos de la planta

Vasija

La vasija, también conocida como reactor, es el lugar en el que se produce la disociación de los residuos orgánicos entrantes en el proceso. Consta de dos partes: la tapa de acero inoxidable y el cuerpo. Es fundamental que el sellado entre ambas partes sea correcto. Por ello, para que el proceso sea más simple y no haya fugas del gas de síntesis durante la alimentación del reactor, se trabajará a presión negativa creada para hacer posible la extracción.

Como salida del reactor hay dos opciones. Por un lado, puede haber sólo una salida por la que salgan todos los productos. Y por otro lado, puede haber dos salidas, una para el gas de síntesis y otra para el material vitrificado obtenido de la materia inorgánica. De una forma o de otra, debido al diseño de la vasija el residuo no puede salir sin atravesar la zona de plasma.

Debido a las altas temperaturas con las que se opera en la vasija, esta requiere de una capa aislante que recubre sus paredes para que así quede protegida. Además, la capa de aislante, generalmente de material refractario, conseguirá que se mantenga la temperatura de trabajo por encima de la temperatura de condensación de los gases ácidos, evitando así su presencia en el gas de síntesis.

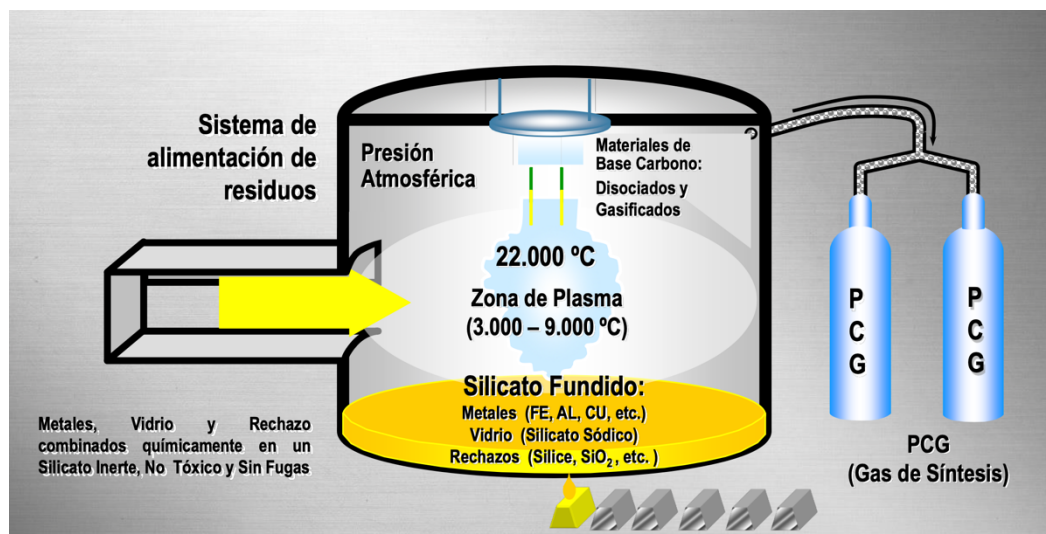


Ilustración 11. Esquema de la vasija del gasificador de plasma. Fuente: Curriculum Nacional, mineduc

Antorcha de plasma

Las antorchas, mediante descarga de arco eléctrico a presión atmosférica, producen un plasma térmico de alta temperatura y potencia, pudiendo alcanzar entre los 5.000 y los 10.000°C. Se puede trabajar tanto con AC como con DC, siendo preferida esta última ya que presenta mayor estabilidad, menor consumo eléctrico, menor desgaste refractario y permite un mejor control. Están formadas por dos electrodos, cátodo y ánodo, y en función de la disposición de estos se distinguen dos tipos:

- De arco transferido. Uno de los electrodos se encuentra situado fuera de la antorcha, siendo generalmente el material conductor a tratar. El arco es formado fuera de la antorcha, permitiendo la formación de arcos más largos.
- De arco no transferido. Ambos electrodos se encuentran en la misma antorcha, es decir, los electrodos están dentro del cuerpo o la carcasa de la antorcha en sí.

Una de las ventajas de las antorchas de arco transferido es que el arco eléctrico es formado fuera del cuerpo refrigerado por agua, evitando así pérdidas en forma de calor, como ocurre en el caso de las antorchas de arco no transferido, en donde la eficiencia térmica-eléctrica puede incluso llegar a bajar hasta un 50%. Otra ventaja de las antorchas de arco transferido es que pueden ser utilizadas en una configuración de antorcha doble, en donde

una es catódica y la otra anódica, por lo que cuentan con el beneficio de una antorcha simple y además permiten el uso de antorchas no conductoras. No obstante, se trata de un tipo de configuraciones un poco raras y que tienen más sentido en otro tipo de aplicaciones, como por ejemplo el corte de precisión de un material. Por lo tanto, en el ámbito de la gasificación por plasma se trabajará con el sistema de antorcha simple.

El arco eléctrico es generado en el espacio existente entre los dos electrodos. Es aquí por donde circula el gas plasmógeno, siendo generalmente aire comprimido. Una vez el generador está preparado, la descarga del arco inicia mediante una chispa entre los electrodos. Se produce la interacción de la corriente eléctrica con el campo magnético creado por las espiras de las bobinas magnéticas que se encuentran en ambos electrodos.

Estas bobinas son encargadas de rotar el arco para mejorar la transferencia de calor, alcanzando una velocidad alrededor de los 950 rev/s. Esta alta velocidad de rotación del arco sumada a la entrada de gas en el proceso hace que se logre una transferencia de calor notable entre el arco y el gas, consiguiendo que se alcance una excelente interacción entre ambos y una óptima eficiencia térmica.

Existen varios proveedores de antorchas de plasma, así como distintas potencias, yendo estas desde los 5kW hasta los 10.000 kW. En cuanto a la eficacia de las antorchas, que se trata del porcentaje de potencia del arco que sale de la antorcha y entra al proceso, suelen ir del 70 al 90%. Respecto al diseño y configuración de las antorchas, vienen dados por cada caso específico en el que nos encontremos, teniéndose que adaptar a las condiciones del proceso en cuestión.

Hoy en día, las antorchas de plasma son cada vez más utilizadas, y entre sus principales aplicaciones encontramos las siguientes:

- **Metalurgia:** Las antorchas son usadas durante el fundido y refundido de metales. También en metalurgia extractiva.
- **Corte y soldadura:** Muy común en la actualidad el uso del plasma de arco eléctrico en este ámbito. Ejemplos de esto tenemos la soldadura TIG, MIG y de arco sumergido.
- **Densificación y compactación:** Existen ciertas técnicas en este campo para la densificación de ciertos materiales. Ejemplos: esferización y sinterización por plasma.

- Deposición de revestimientos y películas: Existen varias técnicas como la atomización por plasma y la deposición química o física de vapor por plasma.
- Síntesis de polvos finos: Con una técnica muy similar a la de deposición química, se puede someter al vapor a un rápido enfriamiento para lograr la nucleación de las partículas, siendo posible la producción de polvos finos.
- División de compuestos en materiales elementales: La alta temperatura que alcanza el plasma hace que los enlaces intermoleculares de los compuestos se rompan, dando lugar a elementos más básicos. Esta es la técnica en la que se basa la gasificación por plasma, objetivo de este proyecto.

Además, las antorchas de plasma requieren el uso de ciertos equipos accesorios como son: un generador de corriente eléctrica, un sistema de control, un sistema de refrigeración, un sistema de gas de trabajo y un sistema de descarga del material vitrificado. Todos estos elementos se tratarán a continuación.

Generador de corriente eléctrica

Requerido para alimentar a la antorcha de plasma. Esta se conecta al generador mediante un tiristor que suministra corriente continua. El sistema dispone de elementos de seguridad como un interruptor aislado. Para su correcto y seguro funcionamiento también es necesaria la inclusión de un transformador con refrigeración de agua o aire.

Sistema de control

El sistema de control se basa en un PLC o controlador lógico programable, diseñado para trabajar con múltiples señales de entrada y salida. Entre sus características destaca el amplio rango de temperaturas con las que permite trabajar, la inmunidad al ruido eléctrico y la resistencia a la vibración y el impacto. Se trata de un sistema de tiempo real, es decir, los resultados de salida deben ser dados respecto a unas condiciones de entrada dentro de un tiempo concreto. En caso contrario, no se obtendría el resultado deseado.

Dentro de sus principales funciones destacan:

- Regulación del ritmo de alimentación del reactor. El sistema de control se encargará de analizar en todo momento la velocidad con la que se alimenta el

reactor con el objetivo de mantenerse en todo momento en el valor óptimo. Esto se aplica tanto a la alimentación de los residuos como al gas plasmógeno.

- Monitorizar la composición del gas. Se realiza una monitorización en continuo del gas de síntesis para asegurar su composición.
- Controlar el generador de corriente de la antorcha.
- Regular la potencia de los solenoides.
- Controlar que el agua de refrigeración esté disponible siempre que se necesite para que los equipos no se vean dañados.
- Relés de protección.

El control se lleva a cabo a través de la unidad central de proceso o CPU, y las interfaces de entrada y salida. La interfaz de entrada capta las señales que provienen de los elementos captadores y las traslada a la CPU. Una vez procesadas estas señales, la interfaz de salida administra la potencia necesaria para comandar el actuador.

Además, los relés de protección que encontramos implantados en el sistema establecen una serie de condiciones para la fuente de corriente. Así, aseguran ciertos valores para los diversos parámetros, como la potencia de los solenoides, el ritmo de alimentación al reactor, etc.

También cabe destacar la existencia de alarmas encargadas de proteger el generador de corriente y el resto de equipos en caso de fallo en el sistema.

Sistema de refrigeración

Con motivo de proteger los equipos ante las altas temperaturas alcanzadas durante el proceso, se requiere un sistema de refrigeración para la antorcha. Es por ello que se requiere de agua desionizada a alta presión para lograr un flujo de alta velocidad que facilite una correcta transferencia de calor entre los distintos componentes de la antorcha y el fluido.

Aunque lo normal es pensar que la mayor fuente de calor en el sistema sería la propia antorcha de plasma, son los cables de alimentación de la antorcha los que desprenden más calor. Se trata de cables metálicos trenzados y flexibles que se encuentran dentro de las mangueras de refrigeración conectadas al cuerpo de la antorcha de plasma. A través de

los cables circula una gran intensidad de corriente eléctrica en una sección transversal bastante pequeña, por lo que generan constantemente mucho calor que puede derretir las mangueras. Por otro lado, dentro del cuerpo de la antorcha, el electrodo es una gran fuente de calor por lo que es necesario regular su temperatura.

Para evitar que se derritan los componentes, se hace circular un líquido refrigerante por la parte posterior del electrodo. El líquido será bombeado desde un depósito a una presión relativamente alta. De esta forma se podrá mantener el caudal requerido a través de los pequeños pasillos y huecos de la antorcha, además de las mangueras mencionadas anteriormente.

Uno de los inconvenientes que surgen durante el proceso es que el líquido refrigerante, al circular en un ciclo cerrado, se va calentando cada vez más hasta que deja de enfriar. Para ello se requiere un enfriador. Es por ello que el sistema consta de una bomba, encargada de alcanzar la presión requerida en el circuito, y un intercambiador de calor que permita reducir la temperatura del agente refrigerador. Este intercambiador de calor es recomendable que tenga una capacidad máxima de disipación de alrededor del 25% de la potencia total de la antorcha.

El sistema de refrigeración también cuenta con un tanque de almacenamiento, un filtro y un sistema de desionización. Además, como es posible que en algún momento el sistema de refrigeración falle, es necesaria la existencia de una fuente que suministre agua en caso de emergencia, siendo requerido al menos un 10% del agua total necesaria por la antorcha.

Sistema de gas de trabajo

Mediante este sistema se genera el gas plasmógeno, es decir, el gas introducido en la antorcha para producir el arco eléctrico. El proceso admite una gran variedad de gases. Pueden utilizarse gases oxidantes, reductores o inertes. Entre las opciones más comunes se encuentran el argón, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, aire e incluso mezclas. Generalmente, para la gasificación por plasma se suele utilizar el aire ya que económicamente es la mejor opción. Su inyección al reactor, como se ha comentado anteriormente, es regulada por el sistema de control y se produce a una presión entre 6 y 7 bares. La tasa de entrada depende de las características del proceso y de los residuos que se vayan a tratar. El sistema además debe incluir un filtro de partículas, una válvula

que permita la regulación del flujo, y sensores de presión y temperatura que permitan al sistema de control conocer el estado del proceso en todo momento.

Sistema de descarga del material vitrificado

A la hora de descargar el material vitrificado, esto se puede hacer de dos formas:

- Mediante un sistema de extracción mecánico. Generalmente se trata de un tornillo sinfín y la extracción se realiza de forma continua.
- Extracción lateral por cargas con inclinación. A diferencia del caso anterior, este sistema de extracción no es continuo. Generalmente, es el método más utilizado ya que las porciones de material vitrificado producidas son pequeñas y no se requiere su descarga de forma constante.

Una vez el vitrificado ha sido extraído, este puede adoptar distintas formas y características en función del proceso de enfriamiento al que es sometido. A continuación se van a comentar algunas de las opciones:

- Si el material se enfría al aire libre se forman rocas vidriosas de color negro. Puede ser utilizado como recubrimiento (similar al asfalto) o, tras ser moldeado, como material de construcción.
- Si el material es enfriado en agua, forma un vitrificado similar a la arena y que permite la fácil obtención de nódulos de metal.
- Si el material es enfriado con aire comprimido o se utiliza un sistema centrífugo una vez está fundido, se formará lana mineral, la cual tiene diferentes funciones útiles como la de absorbente, aislante, sustrato para cultivos hidropónicos, etc. Destacar que hay empresas fabricantes que dedican su producción exclusivamente a la lana mineral, como es el caso de la Compañía industrial El Volcán S.A. (Chile)

Gas de síntesis

El gas de síntesis o syngas es un combustible gaseoso compuesto mayoritariamente de hidrógeno y monóxido de carbono, alrededor de un 80% del total del gas, además de otros gases en cantidades menores como nitrógeno, dióxido de carbono, agua o metano. Es obtenido tras someter a altas temperaturas sustancias ricas en carbono como hulla, carbón,

nafta o la biomasa, de especial interés en este proyecto. El gas de síntesis es utilizado como intermediario en industrias químicas y biorrefinerías y consta de gran variedad de usos. Puede ser convertido en olefinas, alcanos, compuestos oxigenados, y alcoholes como el etanol. Todos ellos pueden ser mezclados o ser utilizados directamente como combustible. También puede ser utilizado para producir compuestos químicos como amoníaco y metanol, para producir vapor, pero uno de los usos más interesantes y motivo de estudio de este trabajo es la capacidad de generar electricidad, que se puede lograr a través de centrales de ciclo combinado con gasificación integrada.

A la hora de producir el gas de síntesis existen distintos métodos. Por un lado, están los que utilizan los combustibles fósiles y por otro, los que aprovechan los residuos que contienen carbono, es decir, la biomasa. Debido a la inquietante disminución de combustibles fósiles a nivel mundial y la contaminación que producen, cobran gran interés de estudio las nuevas tecnologías que sustituyen estos combustibles por el aprovechamiento de residuos y con un impacto ambiental mucho menor. Es aquí en donde entra en juego la gasificación por plasma de la biomasa.

Una de las características a destacar del gas de síntesis es que su composición permanece prácticamente constante independientemente del tipo de residuo tratado. Esto hace que esta tecnología sea una de las preferidas a la hora de tratar residuos debido a su gran versatilidad. En la gráfica siguiente se puede observar lo mencionado anteriormente, la composición del gas de síntesis prácticamente no cambia con la composición de los residuos de entrada. Eso sí, el volumen de gas obtenido sí que se ve afectado por el residuo entrante.

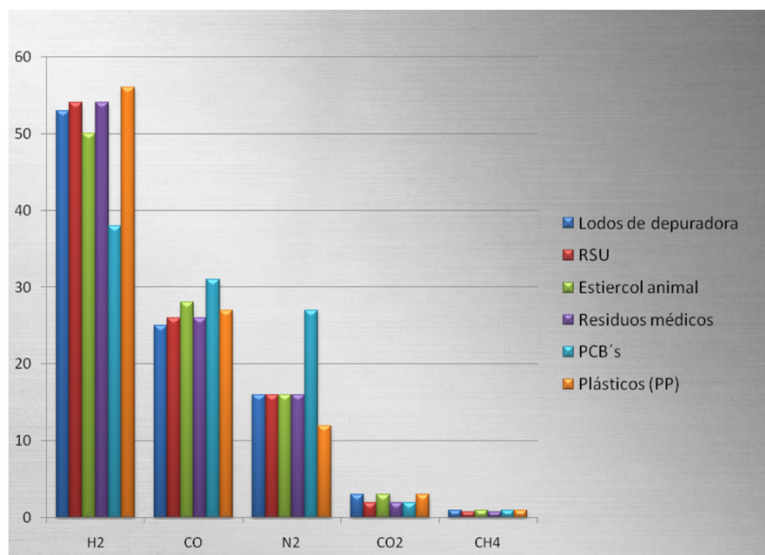


Ilustración 12. Composición del gas de síntesis en función de los residuos tratados. Fuente: Diquima

Ciclo combinado: Ciclo Rankine

Ya que el gas de síntesis a la salida de la vasija se encuentra a una temperatura alrededor de 1000°C, este debe ser enfriado antes de los procesos de limpieza y neutralización comentados anteriormente. Para realizar este enfriamiento se precisa de un intercambiador de calor, en el que debido a la alta temperatura del gas, se cede calor que será aprovechado para que el rendimiento del proceso sea mayor. Por lo tanto, la implantación de un ciclo combinado previo a los procesos de limpieza del gas de síntesis será la opción más interesante a tratar.

El ciclo combinado contará con los siguientes elementos:

- Bomba.
- Caldera de recuperación de calor.
- Turbina de vapor.
- Condensador.

A continuación, se tiene el esquema del ciclo con el que se va a trabajar:

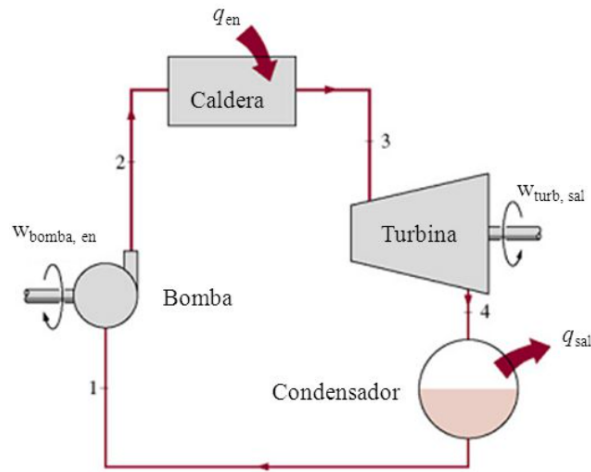


Ilustración 13. Ciclo Rankine. Fuente: McGraw-Hill

En primer lugar, se puede empezar comentando el condensador. Es el encargado de reducir la entalpía del agua, provocando el cambio de estado de vapor a agua líquida, produciéndose una liberación de calor que será utilizado para reducir la humedad de los residuos entrantes de un 20% a un 5%. Este proceso del condensador es equivalente al que se produce en la caldera, pero en vez de ceder el calor entre el gas de síntesis y el agua, es el agua el que se lo cede a los residuos. El calor cedido lo podemos calcular de la siguiente forma:

$$Q_{condensador} = \dot{m} * (h_{entrada-2} - h_{salida-3})$$

El calor necesario para reducir la humedad de los residuos hasta el 5%, puede ser calculado mediante la siguiente fórmula:

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

En la anterior expresión, L_{agua} es el calor latente del agua. Por otro lado, $\dot{m}_{reducir}$ consiste en el gasto másico de la humedad de los residuos que ha de ser eliminada. Como ya se sabe, se ha de reducir en un 15%. Por otro otro lado, el flujo de residuos a tratar es de 11635 kg/hr y el calor latente del agua es 2260 kJ/kg. Por lo tanto, el calor necesario es:

$$Q_{humedad} = 0,15 * 11635 \frac{kg}{hr} * \frac{1hr}{3600s} * 2260 \frac{kJ}{kg} = 1100 kW$$

Esa reducción sólo se conseguirá si y solo si $Q_{condensador}$ es mayor que $Q_{humedad}$. Por lo tanto:

$$1100 kW < Q_{cond} * \eta_{cond} = \dot{m}_{total} * (h_{e_{cond}} - h_{s_{cond}})$$

En el condensador, el agua pasa de ser vapor saturado a líquido saturado, por lo que mediante las tablas de propiedades se puede obtener presión y temperatura a la entrada y salida:

Punto	Temperatura	Presión (bar)	Entalpía (kJ/kg)
Entrada	41,51	0,08	2576,2
Salida	41,51	0,08	173,84

Tabla 2. Condiciones a la entrada y salida del condensador (Elaboración propia)

Se obtiene que $\dot{m}_{total} > 0.49$ kg/s, por lo que por comodidad se va a trabajar con 0.5 kg/s, que es igual a 1800 kg/hr. Con este gasto másico mínimo, será posible reducir la humedad de los residuos entrantes ese 15%.

A continuación, se tiene la bomba. Esta recibe agua en estado líquido y sale agua líquida comprimida a 50 bar. En ella se producirá una compresión isentrópica del agua y ajustará la presión de esta a la de operación del intercambiador de calor. Esta bomba consumirá trabajo que podrá ser incluso suministrado por la misma energía generada anteriormente en la turbina. El trabajo consumido se calcula de la siguiente forma:

$$\dot{W}_{bomba} = v_{entrada} * (P_{salida} - P_{entrada}) = 5,03 \frac{kJ}{kg}$$

$$W_{bomba} = 5,03 \frac{kJ}{kg} * 0,5 \frac{kg}{s} = 2,5 kW$$

Considerando de nuevo que el rendimiento del equipo es de un 90%, se tiene que:

$$W_{bomba} = 2,8 kW$$

Como se puede observar, la caldera del ciclo, que básicamente es un intercambiador de calor, cuenta con dos circuitos. Por un lado, se tiene el del gas de síntesis, que proviene de la salida de la vasija. Y por otro, se tiene el circuito del agua. En el del gas de síntesis,

se producirá un enfriamiento de este, entrando a 1000°C y saliendo a 600°C aproximadamente. Este calor cedido, será absorbido en el circuito del agua, provocando que ésta pase de ser un líquido comprimido a ser vapor sobrecalentado. Se puede calcular de la siguiente forma:

$$Q = \dot{m}_{total} \times C_p \times \Delta T$$

El gasto másico será el de los residuos entrantes en la planta, mientras que el calor específico será el del CO debido a que es el 77% del gas saliente de la vasija. El agua saldrá de la caldera aproximadamente a 600°C, al igual que el gas de síntesis. Como se puede apreciar en el sentido de las flechas del esquema, el agua y el gas van en sentidos contrarios, con el objetivo de que la transferencia de calor se produzca de una forma óptima.

$$Q = 11635 \frac{kg}{hr} * 1,04 \frac{kJ}{kg K} * (1273 - 823)K = 5.545,2 \frac{MJ}{hr} = 1,46 MW$$

Como el rendimiento de la caldera es del 90%, el calor intercambiado es 1.3 MW.

Si ahora se supone que el agua sale a 550°C y que la caldera trabaja a una presión de 50 bar, se haya que la entalpía a la salida es de 3550 kJ/kg

A la salida de la caldera, ese vapor sobrecalentado que se acaba de comentar se hará pasar por la turbina de vapor. De esta forma, se logrará generar energía eléctrica en un proceso de expansión isentrópica, que podrá ser utilizada para los procesos internos en la planta de gasificación por plasma, buscando un aumento del rendimiento del proceso. En ella, el agua pasa de ser vapor sobrecalentado, a vapor saturado. Mediante tablas de propiedades se puede obtener el trabajo generado.

Punto	Temperatura	Presión (bar)	Entalpía (kJ/kg)
Entrada	550	50	3550
Salida	41,51	0,08	2576,2

Tabla 3. Condiciones a la entrada y salida de la turbina (Elaboración Propia)

El trabajo generado en la turbina se puede calcular así:

$$W = \dot{m} * (h_{entrada-1} - h_{salida-2}) = 1800 \frac{kg}{hr} * \left(3550 \frac{kJ}{kg} - 2576,2 \frac{kJ}{kg} \right) = 480kW$$

$$* 0.9 = 432kW$$

Para terminar, el rendimiento total del ciclo puede calcularse así:

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{aportado}} = \frac{W_{turbina} - W_{bomba}}{Q_{cedido_{caldera}}} = \frac{432 - 2,8}{1100} = 39\%$$

De esta forma, una vez concluido el proceso, se habrán conseguido los dos objetivos propuestos al principio, una reducción de temperatura del gas de síntesis y la generación de energía eléctrica mediante la turbina, además de una reducción de humedad de los residuos entrantes al sistema.

Por otro lado, la energía que se generaría en el ciclo cada año viene dada por la siguiente expresión:

$$E_{Rankine} = W_{neto} * n^{\circ}horas trabajadas = 429.5 kW * 335 días * \frac{24 hr}{1 día}$$

$$= 3453,2MWh$$

La reacción shift, conocida también como reacción de desplazamiento del gas de agua, describe la reacción del monóxido de carbono y el vapor de agua para generar dióxido de carbono e hidrógeno. El objetivo es aumentar la composición de hidrógeno en el gas de síntesis mediante la eliminación del monóxido de carbono. El hidrógeno producido en la reacción shift se puede calcular de la siguiente forma:

$$\dot{m}_{H_2_{shift}} = MM_{H_2} * \frac{\dot{m}_{CO}}{MM_{CO}} = \frac{77,6}{100} * 11635 * \frac{2}{28,01} = 644,7 kg/hr$$

El hidrógeno que se tenía inicialmente es el siguiente:

$$\dot{m}_{H_2_{inicial}} = \dot{m} * \%H_2_{inicial} = 11635 * 0,0446 = 518,9 kg/hr$$

Por lo que el hidrógeno que se tendrá en total tras la reacción Shift es:

$$\dot{m}_{H_2TOTAL} = \dot{m}_{H_2inicial} + \dot{m}_{H_2Shift} = 518,91 \frac{kg}{hr} + 644,7 \frac{kg}{hr} = 1163,6 \frac{kg}{hr}$$

Por lo tanto, el rendimiento de obtención de hidrógeno respecto a gas de síntesis producido es:

$$\frac{\dot{m}_{H_2TOTAL}}{\dot{m}_{gas_{sintesis}}} = \frac{1163,6}{11635} = 10\%$$

CAPÍTULO 5: Pilas de combustible y almacenamiento de hidrógeno

Introducción

Como se ha comentado a lo largo del proyecto, tras el proceso de gasificación por plasma se obtiene un gas de síntesis que, tras una serie de medidas para su limpieza y neutralización, tiene un alto contenido en hidrógeno. El hidrógeno tiene un gran número de aplicaciones posibles, pudiendo ser utilizado en industrias convencionales como por ejemplo refinerías, industria farmacéutica, fabricación de vidrio plano o, por otro lado, aplicaciones energéticas, pudiendo actuar de combustible alternativo, almacenamiento de energías renovables, etc.

En este trabajo cobra especial interés el estudio del hidrógeno para la producción de electricidad. Para ello, será necesario transformar el hidrógeno contenido en el gas de síntesis en energía eléctrica. Para llevar esto a cabo, aparecen distintas posibilidades como son los motores de combustión interna o las turbinas. Sin embargo, si lo que se busca es hacer un uso inmediato de la energía del hidrógeno, las pilas de combustible se presentan como una de las mejores opciones.

Además de permitir una rápida conversión en electricidad, las pilas de combustible tienen muchas otras ventajas. Por un lado, no produce emisiones nocivas. Durante el proceso en la pila se produce electricidad y, más tarde, vapor de agua, resultando en una emisión totalmente inofensiva para la atmósfera. Por otro lado, su eficiencia es mayor comparada con la de los motores de combustión interna comentados anteriormente. Esto ocurre ya que los motores en vez de convertir directamente la energía química en eléctrica como hace la pila, deben convertir la energía química del hidrógeno en vapor, para luego convertir este en energía mecánica. Además, la producción de hidrógeno, como se ha estudiado anteriormente en este proyecto, es mucho más limpia y ecológicamente amigable que los combustibles fósiles. Y finalmente, las pilas de combustible presentan una gran capacidad de adaptación al rango de trabajo, pudiendo utilizarse tanto para pequeñas instalaciones como para otras más grandes.

Por tanto, gracias a su capacidad para generar energía de forma limpia y con tan alta eficiencia, las pilas de combustible se han colocado en la vanguardia a nivel mundial en la búsqueda de la descarbonización.

Principio de funcionamiento

Se conoce por pila de combustible a un dispositivo capaz de transformar la energía química en energía eléctrica, mediante un proceso catalítico electroquímico.

Se produce una reacción química controlada en el interior de la pila, empleando un combustible como reactivo y un agente oxidante, que comúnmente es el oxígeno. Como producto se obtiene corriente eléctrica, agua y calor.

El combustible, uno de los reactivos de la pila, se encuentra almacenada de forma exterior a la pila. Desde el recipiente en el que se encuentra se produce el suministro a la pila, de forma que siempre que haya combustible suficiente para que el suministro sea correcto, la pila funcionará y podrá suministrar corriente eléctrica de forma continua. Como combustible, generalmente se utiliza el hidrógeno, uno de los puntos de especial interés de este proyecto.

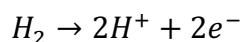
Por otro lado, y como se ha mencionado anteriormente, el otro reactivo es el oxígeno, que se utiliza como elemento oxidante en el cátodo, y que debido a su presencia en el aire, no suele ser necesario su almacenamiento, pudiendo ser utilizado directamente desde el exterior.

Las pilas de combustible constan de tres componentes principales:

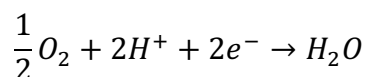
- Dos electrodos. Uno de ellos es negativo y el otro es positivo, ánodo y cátodo respectivamente. Es aquí en los electrodos donde por un lado se producirá la reducción del hidrógeno en protones H^+ y donde se producirá la reacción de esos protones H^+ con las moléculas de oxígeno.
- Electrolito. Sirve como unión entre los dos electrodos y también actúa como catalizador, es decir, que facilita el desarrollo de las reacciones químicas deseadas dentro de la pila. Cobra un papel importante al ser el encargado de separar los

pases, debiendo permitir exclusivamente el paso de los iones requeridos, como es el caso de los iones H^+ al cátodo.

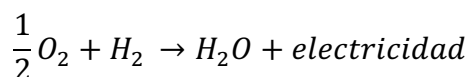
Por un lado, en el ánodo se produce la extracción de los electrones al hidrógeno, mediante la siguiente reacción química:



Es decir, los átomos de hidrógeno ceden sus electrones en el ánodo y quedan ionizados con carga positiva. A su vez, los electrones que quedan libres son los encargados de generar corriente eléctrica. Los iones de hidrógeno generados viajarán a través del electrolito hasta reaccionar con las moléculas de oxígeno que vienen del cátodo mediante la siguiente reacción:



El conjunto de las dos reacciones producidas en cátodo y ánodo dan lugar a una nueva reacción química:



Rendimiento

Respecto al rendimiento de la pila de combustible, este se puede obtener mediante la ecuación de Nernst expresada a continuación:

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln(Q)$$

En donde:

- E_0 es el potencial estándar de celda. $E_0 = 1,229$ V
- R es la constante de los gases ideales. $R = 8,314$ J/molK
- T es la temperatura absoluta expresada en grados Kelvin.
- n es el número de moles de la reacción.
- F es la constante de Faraday. $F = 96.480$ J/molV

- Q es el cociente de la reacción.

Cabe destacar que el rendimiento de las pilas de combustible, en contraste con lo que ocurre con los motores de combustión interna y externa, no está limitado por el ciclo de Carnot. Esto se debe a que las pilas no siguen un ciclo termodinámico. Por ello, y como se ha comentado anteriormente, su eficiencia es muy alta si la comparamos con los motores de combustión, ya que se produce la conversión de energía química en energía eléctrica de forma directa. No como en los motores de combustión, que deben convertir la energía química en vapor para luego convertirlo en energía mecánica.

De forma general, se puede decir que una pila de combustible suele convertir la energía química del hidrógeno en electricidad con alrededor de un 50% de rendimiento. No obstante, este rendimiento depende mayormente de la cantidad de corriente que está circulando a lo largo de la pila, ya que cuanto mayor sea esta, menor será el rendimiento final, y viceversa.

Comportamiento real

El parámetro E calculado anteriormente para el rendimiento, también es considerado como la fuerza electromotriz que se tiene cuando el circuito está abierto, es decir, en ausencia de corriente eléctrica. Sin embargo, cuando el circuito está cerrado y la corriente fluye, comienzan a aparecer una serie de pérdidas relacionadas con la circulación de la corriente eléctrica a lo largo del electrolito y con fenómenos de polarización. Por lo tanto, esa diferencia de potencial entre los electrodos va a ser realmente menor que la ideal calculada previamente.

Para observar con claridad el comportamiento de la diferencia de potencial entre ambos electrodos, se suele trabajar con la llamada curva de polarización. Esta representa la diferencia de potencial frente a la densidad de corriente. En la curva, se pueden diferenciar tres regiones, como podemos observar a continuación:

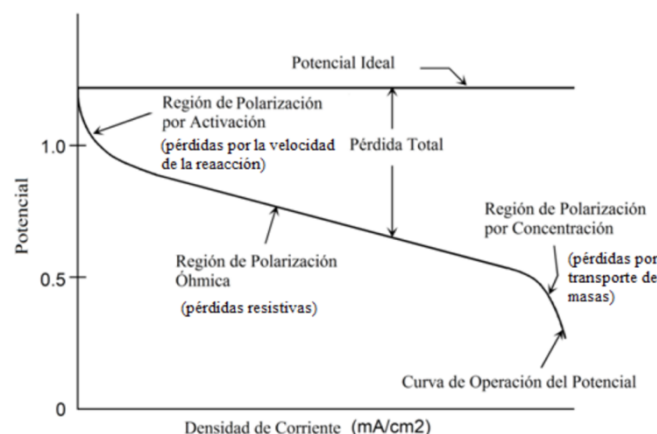


Ilustración 14. Curva de polarización. Fuente: Wikipedia

- Pérdidas por activación: estas se deben a que las reacciones químicas necesitan un tiempo para llevarse a cabo, ya que generalmente suelen ser lentas.
- Pérdidas resistivas: estas pérdidas están relacionadas con la circulación de los electrones tanto por el material de los electrodos, como por el electrolito, ya que ambos presentan una cierta resistencia.
- Pérdidas por concentración: debido al cambio de concentración del gas a lo largo del proceso.

Finalmente, la diferencia de potencial de las pilas de combustible depende de una serie de variables que hacen que este varíe considerablemente. Entre estas variables se encuentran las condiciones de operación, siendo de gran importancia la temperatura, presión, densidad de corriente, etc. Y por otro lado, el potencial también del diseño de la pila, así como otros factores como temas de impureza o durabilidad que pueden hacer que el valor final diste bastante del valor ideal calculado previamente con la ecuación de Nernst.

Tipos de pilas de combustible

A pesar de que todas las pilas siguen el mismo principio de funcionamiento detallado anteriormente, existen distintos tipos de pilas que varían en varios aspectos como el diseño, las características de operación y potencia que suministran.

Generalmente se clasifican en función del material del electrolito, debido a que este va a establecer ciertas características fundamentales de la pila, y por lo tanto, va a enfocar la pila a determinados campos de aplicación.

A continuación, se va a representar de forma resumida en una tabla los distintos tipos de pila de combustible que se utilizan actualmente:

Tipo	Electrolito	Ión	Temperatura Operación	Eficiencia	Usos
PEM	Polímero sólido	H ⁺	50-120 °C	60%	Cogeneración, automoción
AFC	Solución acuosa de KOH	OH ⁻	90-100 °C	60-70%	Industria militar, aeroespacial
PAFC	H ₃ PO ₄	H ⁺	160-200°C	40%	Cogeneración, portátiles
MFCF	Carbonatos líquidos	CO ₃ ²⁻	600-700°C	50%-60%	Centrales eléctricas alta potencia
SOFC	LiKCO ₃	O ²⁻	700-1000°C	60%-70%	Generación eléctrica gran escala

Tabla 4. Tipos de pilas de combustible (Elaboración propia)

Pila de combustible de Membrana de intercambio protónico (PEM)

Las pilas de combustible de tipo PEM tienen como electrolito una membrana de polímero sólido con presencia de ácidos sulfónicos perfluorados en su composición. La membrana debe mantenerse durante todo el proceso hidratada para que los protones pueden conducir de forma óptima. Esto limita la temperatura de trabajo a un máximo de 100°C, siendo imprescindible su cumplimiento para un óptimo funcionamiento.

Estas pilas pueden trabajar con oxígeno, hidrógeno y agua. Como combustible también aceptan metanol u otro tipo de combustibles reformados, pero para este proyecto sólo es de interés el uso de hidrógeno como combustible.

Por otro lado, como se puede observar en la tabla, con estas pilas se trabaja normalmente entre los 60°C y los 100°C, con una eficiencia de aproximadamente 40%. Esta baja temperatura a la que se trabaja provoca que los problemas de corrosión sean escasos cuando se utiliza este tipo de pilas, no siendo necesario el uso de fluidos corrosivos como sí que necesitan otras pilas. Además, de nuevo gracias a que operan con bajas temperaturas, estas pilas presentan una mayor durabilidad que otros tipos.

Además, las pilas de membrana de intercambio protónico son ideales para sistemas que requieran de una respuesta de funcionamiento rápida. Esto hace que sean muy usadas actualmente en gran variedad de equipos dentro del ámbito de las telecomunicaciones (tanto a nivel de industria como de casa), así como en vehículos de transporte de cargas.

Este tipo de pilas presentan también una alta densidad de potencia, además de un diseño ligero y de pequeñas dimensiones. Pueden ser utilizadas en una gran variedad de sistemas, ya que existen pilas PEM con potencias que varían desde pocos vatios hasta bastantes kilovatios. Tanto es así, que en 2013 la empresa japonesa Honda instaló la mayor planta de energía estacionaria tipo PEM, lográndose una potencia de 1 MW.

No obstante, las pilas tipo PEM presentan una serie de cuestiones a mejorar, como es el caso de la reducción del espesor de la capa de platino utilizada como catalizador, así como mejorar la dispersión de este, con el objetivo de reducir costes y mejorar la eficiencia. También se busca una mejora en las características de la membrana polimérica, ya que se desea un aumento de la conductividad iónica y una mayor capacidad de retención de agua.

Pila de combustible Alcalina (AFC)

Este tipo de pilas, también llamadas pilas de combustible Bacon, en honor a su inventor Francis Thomas Bacon, son una de las más desarrolladas en la actualidad. No obstante, llevan siendo usadas desde hace muchos años, siendo incluso utilizadas por la NASA desde la década de 1960, contando con gran importancia en misiones como la de la serie Apolo.

Los dos electrodos en estas pilas están separados por una disolución de hidróxido de potasio (KOH) en agua. Las soluciones alcalinas acuosas aceptan el dióxido de carbono (CO_2), por lo que la pila puede verse “envenenada” mediante la conversión del KOH en carbonato potásico (K_2CO_3), viéndose muy reducido el rendimiento del proceso. Es por ello que este tipo de pilas sólo trabajan con hidrógeno y oxígeno puro, o al menos aire purificado, e incluso a veces incorporan una especie de depurador encargado de eliminar todo el dióxido de carbono posible. Todo esto hace que los costes aumenten bastante. Es por ello que estas pilas son muy utilizadas en el ámbito aeroespacial y submarinista.

Existen dos variedades de pilas alcalinas: las que trabajan a alta temperatura, pudiendo operar entre los 100°C y los 250°C , y las de baja temperatura, que operan a temperaturas

inferiores a 100°C. Este cambio se debe a la composición del electrolito, siendo de 35-50% para las primeras, y de 85% para las segundas.

Este tipo de pilas cuentan con un alto rendimiento, siendo superior al de las pilas de combustible con electrolito ácido, como por ejemplo las PEM. Esto se debe a que gracias a la química alcalina, la velocidad a la que se produce la reacción del oxígeno en el cátodo es mucho mayor que en el caso en el que las células son ácidas.

Otra ventaja con la que cuentan las pilas AFC, es su bajo coste de fabricación en comparación con otro tipo de pilas. Esto se debe a que el catalizador que se requiere puede ser de varios elementos químicos con un bajo coste comparados con los que requieren otro tipo de pilas de combustible.

A día de hoy, las pilas AFC siguen en desarrollo. Un claro ejemplo de esto son las pilas alcalinas de estado sólido, que están siendo objeto de gran interés en la actualidad. Estas utilizan una membrana de intercambio aniónico sólido, en vez de un electrolito líquido como hacían las otras, solucionando así el problema del “envenenamiento” anteriormente comentado.

Pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC)

A nivel histórico, fueron las primeras pilas de combustible en ser comercializadas. Fueron desarrolladas desde la década de 1960. En la actualidad, cuentan con una gran mejora respecto aquella época en cuanto a rendimiento, estabilidad y coste de fabricación. Es por ello que las pilas PAFC se presentan hoy en día como una interesante opción para las distintas aplicaciones estacionarias.

Este tipo de pilas de combustible tienen como electrolito ácido fosfórico concentrado (H_3PO_4), el cual se encuentra atrapado en una matriz de carburo de silicio. Además, los electrodos están hechos de papel carbón, y cuentan con un recubrimiento de platino, que actúa como catalizador. Estos tienen mucha sensibilidad y pueden verse “envenenados” por el monóxido de carbono (CO). Por otro lado, las PAFC pueden usar como combustible tanto hidrocarburos como biogás, pero ya se sabe que para este proyecto siempre va a ser de mayor interés el uso del hidrógeno como combustible.

La temperatura de trabajo varía entre los 150°C y los 250°C. Las reacciones dadas en ambos electrodos son similares a las que se dan en las pilas de combustible PEM, pero al

trabajar con una temperatura más alta, las PAFC tienen una mayor tolerancia ante las impurezas del combustible. Esta tolerancia a impurezas es mucho mayor que la de cualquier otro tipo de pila de combustible, facilitando su instalación a corto plazo. En cuanto al rendimiento, este se encuentra alrededor del 40%, aunque si se implantan estas pilas en un sistema de cogeneración de energía eléctrica, este puede verse incrementado hasta un 85%.

Respecto a su campo de aplicación, las pilas de combustible PAFC son utilizadas frecuentemente en sistemas de cogeneración. En muchas ocasiones se utilizan para suministrar de energía eléctrica edificios con una gran demanda eléctrica. Además, también se están viendo utilizadas en vehículos de gran tamaño como los autobuses.

Pila de combustible de carbonatos fundidos (MFCF)

En este tipo de pilas, al trabajar a unas temperaturas muy altas, entre 600°C y 1000°C como se puede observar en la tabla anterior, haciendo su rendimiento mejore considerablemente cuando se trabaja a presión. Como electrolito utilizan una sal fundida de carbonatos alcalinos, formada por litio (Li), sodio (Na) y potasio (K), que se encuentran en una matriz de aluminato de litio.

Generalmente los electrodos suelen estar hechos de distintos materiales cada uno. Por un lado, el ánodo puede estar hecho de níquel dopado con cromo o aluminio. Y por otro lado, el cátodo puede estar hecho de óxido de níquel litiado. No obstante, está en desarrollo la utilización de otro tipo de materiales para resolver problemas de corrosión.

Estas pilas no son propensas a contaminarse por monóxido de carbono y dióxido de carbono, por lo que se tienen muchas opciones a utilizar como combustible, como por ejemplo gas natural, biogás, etc. No obstante, y como se ha comentado en varias ocasiones anteriormente, en este proyecto sólo se va a considerar la opción de utilizar el hidrógeno como combustible.

Las pilas MFCF llevan en desarrollo mucho tiempo. Como curiosidad, en 1966 la Armada de los Estados Unidos ya trabajaba con este tipo de pilas, llegando a formar un sistema de potencia de 100W basado en esta tecnología. Hoy en día, se encuentran muy avanzadas y están próximas a la comercialización. En cuanto a sus aplicaciones, destaca su

implantación en sistemas estacionarios y cogeneración, suministrando energía tanto a edificios públicos como privados.



Ilustración 15. Sistema de potencia de 100W basado en tecnología MFCF, diseñado por la Armada estadounidense en 1966. Fuente: Fuel Cell Project

Pila de combustible de óxidos sólidos (SOFC)

En las pilas de combustible SOFC se utiliza como electrolito un óxido metálico no poroso, con la condición de que sea buen conductor iónico. Generalmente se utiliza óxido de zirconio estabilizado con óxido de ytrio. Al igual que las pilas de tipo MFCF, las pilas SOFC trabajan a altas temperaturas, de entre 900°C y 1000°C, temperatura a la que conducen los iones de oxígeno. En cuanto a los electrodos, comúnmente el ánodo es una mezcla de un material cerámico y de metal, mientras que el cátodo está hecho de una manganita de lantano dopada con estroncio o selenio. Debido a que pueden trabajar a mayor densidad de corriente y no sufren problemas de corrosión, las pilas SOFC se convierten en una de las alternativas de mayor interés y con mayor futuro respecto a otras pilas de combustible de alta temperatura.

Actualmente esta tecnología sigue en desarrollo y una de las cuestiones que se desea llevar a cabo es la reducción de la temperatura de trabajo a un rango de entre 600°C y 800°C. Para ello se está estudiando una disminución del espesor de la capa de electrolito, además de buscar nuevos materiales que presenten una buena conductividad iónica a bajas temperaturas.

Elección de pila para el proceso de gasificación por plasma

A continuación, se va a estudiar cual podría ser la alternativa más interesante de todas las pilas de combustible estudiadas anteriormente para integrar a la salida de nuestro proceso de gasificación por plasma.

Como ya se sabe, como producto del proceso se obtiene un gas de síntesis. Debido a que la composición de monóxido de carbono es muy alta frente a la de hidrógeno y a que el dióxido de carbono que existe en él quiere ser eliminado, el gas se ve sometido a un proceso de limpieza y neutralización, en el que se dan lugar algunas reacciones como la shift. Con esta reacción se busca el aumento de la composición de hidrógeno mediante la eliminación del monóxido de carbono. No obstante, al final de todo el proceso pueden seguir apareciendo impurezas. Por lo tanto, se busca una pila que tenga cierta aceptación a estas pequeñas impurezas del hidrógeno. También se busca que sea útil para aplicaciones estacionarias en donde se produzca la generación de energía eléctrica cerca del punto de demanda. Además de todo esto, y como es obvio, también se preferirá que tanto el rendimiento de la pila como la durabilidad de esta sean lo mayor posible. Por el contrario, se buscará que el precio de la pila sea bajo. En función de todos estos requisitos y preferencias, se compararán todas las pilas para obtener la mejor opción.

De acuerdo con todo lo mencionado anteriormente, es la pila de combustible PEM la opción que se considera más apropiada con lo que se busca. Esto se debe a las características de la propia pila. Al tener una temperatura de operación baja, se ahorran los problemas de corrosión, evitando tener que aplicar fluidos corrosivos que harían aumentar el coste del proceso, así como una mayor durabilidad de la pila ya que esta no sufre tanto. No obstante, lo que hace decantarse por esta pila de combustible, es su rápida respuesta de funcionamiento. Su implementación sería de gran ayuda para solucionar problemas como los que se comentan al principio del proyecto sobre España, en el cual

se tiene un sistema eléctrico que basa gran parte de su capacidad de generación en energías no gestionables (eólica y fotovoltaica), por lo que una rápida respuesta de funcionamiento de los equipos de apoyo se convierte en fundamental. En la actualidad son muy usadas en gran variedad de equipos. Además, no hay que olvidarse de otra característica muy atractiva de las pilas PEM, y es su alta densidad de potencia, permitiendo que el diseño de la pila sea ligero y de pequeñas dimensiones. Como también se mencionó en el estudio en profundidad de este tipo de pilas, las pilas de combustible PEM tienen gran capacidad de adaptación, ya que existen pilas con potencias que van desde pocos vatios hasta otras con un gran número de kilovatios, por lo que estas pilas podrían ser muy útiles ya se esté trabajando con una pequeña instalación, o con otra más grande.

Es por todo esto por lo que se considera a las pilas de combustible PEM como una muy buena opción para trabajar con el hidrógeno obtenido al final del proceso de gasificación por plasma.

Almacenamiento de hidrógeno

Hoy en día, almacenar y distribuir el hidrógeno de una forma óptima son dos factores fundamentales para la economía del hidrógeno. El hecho de que se esté empezando a utilizar el hidrógeno de forma general y flexible hace que sean necesarios diferentes métodos para almacenar el exceso de producción para usarlo a *posteriori*, así como transportar el hidrógeno desde el punto de producción o almacenamiento hasta la zona de consumo.

Todas estas condiciones y formas de almacenamiento y transporte varían en función del uso final que se le quiere dar al hidrógeno. Por ejemplo, por un lado se tienen los sistemas estacionarios de almacenamiento, destinados a la generación de electricidad a nivel residencial, industrial, etc. En este caso no se tienen grandes limitaciones a nivel de peso, volumen o superficie que ocupa el sistema de almacenamiento. Y por otro lado, se tiene el caso en el que se quiere utilizar el hidrógeno para su uso en automoción. Esto conlleva grandes restricciones para los sistemas de almacenamiento a nivel de peso y volumen principalmente, además de las cantidades mínimas que deben ser capaces de suministrar al vehículo para otorgar la autonomía necesaria de este.

Cabe destacar que las características del hidrógeno, como el hecho de que sea altamente inflamable, que sea un gas combustible, no tóxico, incoloro e insípido entre otras, hacen que la seguridad sea un factor fundamental a la hora de elegir el sistema de almacenamiento.

A continuación, se van a estudiar las principales formas de almacenamiento.

Gas a presión

El almacenamiento de hidrógeno en estado gaseoso y a presión es el método más común y desarrollado hoy en día. A temperatura ambiente el hidrógeno se encuentra en forma de gas. Este tiene una baja densidad energética, concretamente 12MJ/m^3 , lo cual supone una desventaja. Es por ello que cuando se encuentra en estado gaseoso, el hidrógeno requiere su almacenamiento a grandes presiones, en un rango entre 200 y 700 bar. Además, es también importante que sea almacenado en grandes volúmenes.

Generalmente, los depósitos en los que se almacena el hidrógeno tienen forma de cilindro con casquetes esféricos en ambos extremos. Estos están fabricados con materiales de gran resistencia para asegurarse de que el depósito sea duradero. No obstante, el diseño no es del todo óptimo en cuanto a peso, volumen y seguridad. Uno de los puntos en los que más atención se ha de prestar es los problemas que implica la utilización de hidrógeno a altas temperaturas. Es por ello que los depósitos deben ser diseñados con unos criterios estrictos, asegurándose de que cuentan con las características adecuadas para su correcto funcionamiento.

Actualmente, los depósitos suelen estar diseñados de fibras de carbono, fibras de vidrio y aluminio, y son clasificados según su composición.

Una de las mayores preocupaciones respecto a los depósitos presurizados es la seguridad, sobre todo en regiones con gran número de habitantes. Se trata de una tecnología que sigue en desarrollo y para el futuro se espera que estos depósitos estén recubiertos en su interior por una capa de polímero con un compuesto de fibra de carbono, siendo este el componente encargado de soportar la tensión. Además, también se está estudiando la implantación de una capa en el exterior del depósito hecha de aramida. Así, esta sería capaz de soportar cargas mecánicas, además de daños por corrosión.

Almacenamiento en estado líquido

En el caso del hidrógeno en estado líquido, este presenta una densidad energética mucho mayor a la que se tenía en estado gaseoso. Además, en estado líquido se logra reducir el volumen del hidrógeno más que en la compresión, solucionándose así muchos problemas de peso y tamaño de los depósitos que se tenían anteriormente.

La forma más habitual de almacenar el hidrógeno en estado líquido es de forma criogénica, a -253°C en concreto. Como ventajas tiene que es posible la acumulación de energía con alta densidad, y que para una misma cantidad de energía contenida en hidrógeno presurizado, el peso del tanque que contiene el hidrógeno líquido es mucho menor. El proceso más simple mediante el que se produce la licuefacción del hidrógeno se conoce como ciclo de Joule-Thompson, o ciclo Linde. A continuación se tiene el esquema del ciclo Linde.

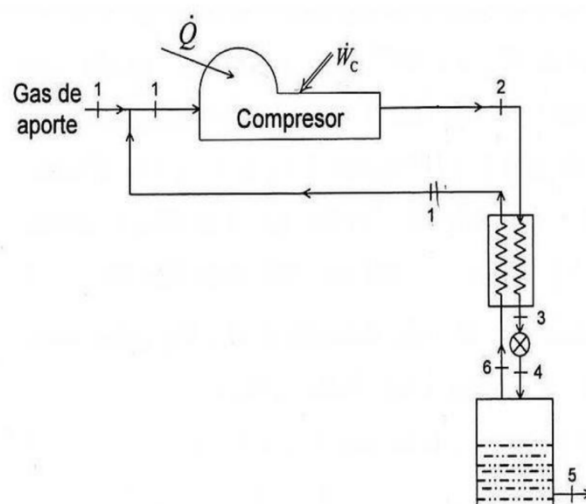


Ilustración 16. Ciclo Linde Fuente: ResearchGate

Siguiendo el proceso en el esquema anterior, el gas comienza siendo comprimido por la bomba a temperatura ambiente. Luego pasa al intercambiador de calor, donde es enfriado. Más tarde se produce en la válvula una expansión a entalpía constante. De esta forma, se genera hidrógeno líquido que se extrae del ciclo. Finalmente, se separa el gas refrigerado del líquido, para hacerlo llegar al compresor tras hacerlo pasar por el intercambiador de calor, y de esta forma comienza el ciclo de nuevo.

Para el almacenamiento del hidrógeno líquido se precisa de tanques de doble capa. Mediante esta doble capa se trata de reducir al mínimo el intercambio de calor entre el hidrógeno líquido y el entorno. Además, estos tanques contienen otro fluido criogénico intermedio, que normalmente suele ser nitrógeno líquido.

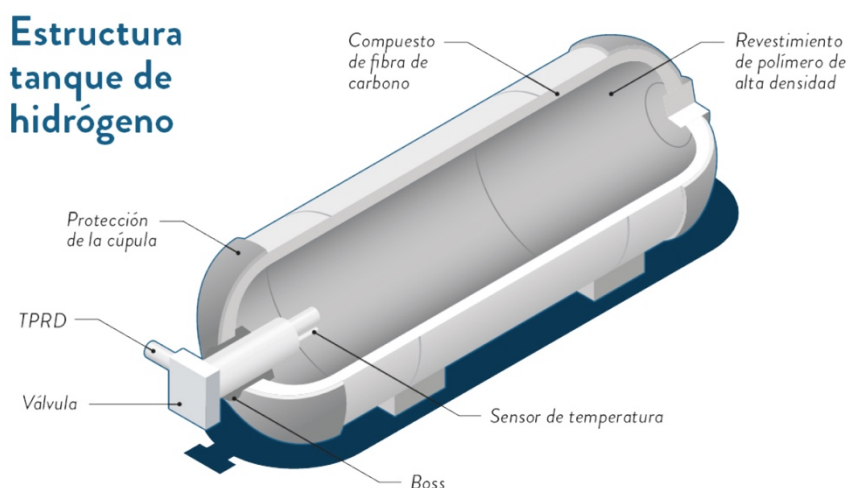


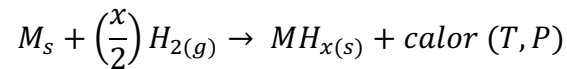
Ilustración 17. Estructura tanque de hidrógeno. Fuente: h2chile

Por lo tanto, se puede decir que al almacenar el hidrógeno de esta forma se solucionan los problemas de peso y tamaño que se tenían en el almacenamiento de forma comprimida, además de que se tiene una mayor densidad de energía. No obstante, al tener que almacenarlo en tanques criogénicos, se requiere de energía para condensar el hidrógeno. Todo esto hace que se trate de un método no muy práctico fuera de ámbitos industriales, además de costoso.

Almacenamiento en estado sólido

Ante los problemas que se plantean con las otras dos opciones, los hidruros metálicos se presentan como una prometedora opción de gran potencial. Como toma de contacto se puede decir que estos cuentan con una mejor seguridad y una densidad energética mayor.

El hidrógeno puede reaccionar con una gran variedad de elementos para formar hidruros. A continuación se tiene la reacción que se produce para la formación del hidruro:



Se tiene un metal en estado sólido que reacciona con el hidrógeno en estado gaseoso a determinadas condiciones de temperatura y presión, produciéndose el hidruro mediante una reacción exotérmica.

Como ventajas de este proceso se puede destacar en primer lugar las altas densidades a las que se consigue almacenar el hidrógeno, mucho mayores que en las otras opciones. Y segundo, aunque no menos importante, el alto nivel de seguridad que ofrecen. No obstante, también ofrecen problemas que están pendientes de desarrollo. Uno de ellos es el gran peso que presentan estos tanques, lo que hace que este no sea el método más apropiado para el ámbito automovilístico transporte. Y por otro lado, la velocidad de recarga de estos tanques es mucho más lenta que otros sistemas.

Capítulo 6: Diseño de la planta de Campanillas

Localización de la planta

A la hora de elegir donde localizar la planta, se ha elegido Campanillas, un distrito de Málaga por una serie de razones. En primer lugar, Andalucía se trata de una comunidad autónoma que cuenta con varios grandes núcleos urbanos. Concretamente, es la comunidad con mayor número de habitantes en España. Además, es una zona en la que la cantidad de biomasa que se dispone es muy alta. De hecho, del territorio total andaluz, un 51% es zona forestal. Además, aproximadamente el 47% del territorio está dedicado a actividades agrarias.

Por otro lado, y centrándonos más en Campanillas, hay varios factores por los que se ha elegido esta ubicación. En primer lugar, se encuentra muy próxima al centro de Málaga, a 15,3 km en concreto. Málaga se trata de un gran núcleo urbano. Esta cuenta con más de 577.405 habitantes. Esto es algo primordial ya que asegura un gran flujo de residuos urbanos. Así, el coste de transporte sería bastante bajo ya que la producción de los RSU se encontraría bastante cercana de la planta. Además, se trata de una zona en la que no hay ninguna instalación de valoración energética de residuos. Esto no es ninguna sorpresa ya que como se ha comentado anteriormente, el aprovechamiento energético de residuos en España es muy bajo, siendo incluso más bajo en España. Por otro lado, una razón fundamental es la presencia de una central termoeléctrica de ciclo combinado en Campanillas. El objetivo del proyecto es utilizar el hidrógeno producido en un ciclo combinado para producir electricidad. Por lo tanto, el hecho de que la planta a diseñar se encuentre muy próxima a la central de Campanillas sirve para aprovechar las centrales ya en funcionamiento.

Otro aspecto que ha sido muy importante para la elección de este vertedero es que Málaga se encuentra conectada a la red de gaseoductos de España. Como se ha mencionado anteriormente, en caso de que el hidrógeno producido exceda la cantidad aceptada por el ciclo combinado con el que se esté trabajando, el gas de síntesis sobrante será inyectado en la propia red española, por lo que situar la planta en Málaga facilitaría mucho lograrlo.

Territorio y residuos disponibles

Residuos sólidos urbanos

Málaga se encuentra a 6 metros de altitud sobre el nivel del mar y posee una extensión de 390,8 km². En 2012, último año del que se han encontrado datos sobre los residuos, se tenía una población de 568.479 habitantes. Es una ciudad en la que turismo, pesca, comercio e industria tienen un gran protagonismo.

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son la basura, deshechos o desperdicios producidos en las diferentes áreas de las ciudades, ya sea en el núcleo urbano o en sus zonas de influencia. Se conoce a los RSU por ser los generados durante las actividades domésticas. No obstante, se incluye también dentro de este grupo a los residuos generados en industrias. Por lo tanto, los RSU son los que se generan en las casas, que han debido ser clasificados como orgánicos, papel, cartón, plásticos, vidrios, envases, los residuos que se encuentran en los puntos limpios, etc.

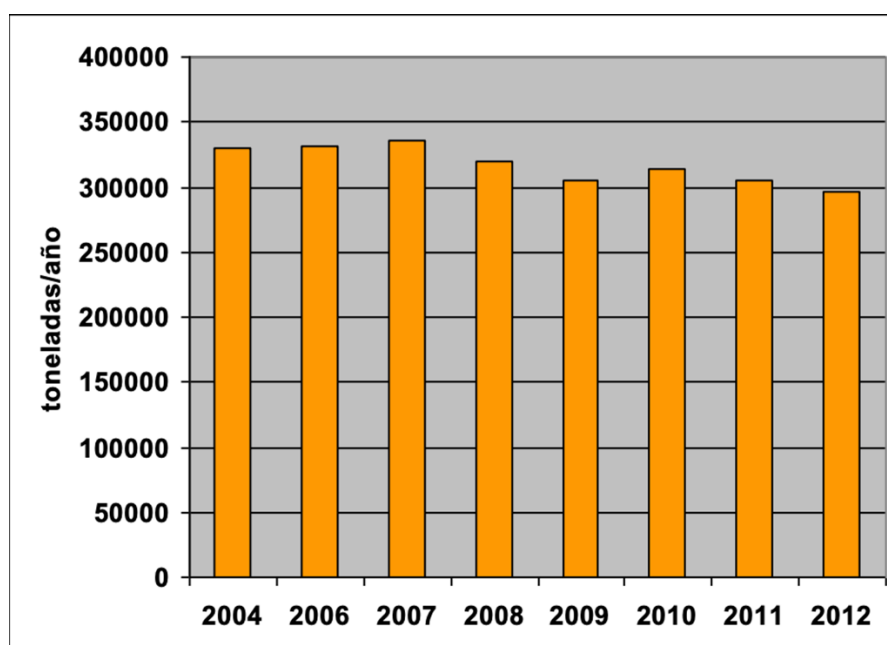


Ilustración 18. Toneladas de RSU generadas en Málaga (2004-2012). Fuente: Static.omaui-Malaga

En 2012, último año del que se han encontrado datos, se generaron alrededor de 297.000 toneladas de residuos urbanos. Es la cifra más baja que se recogía respecto a años

anteriores, en donde se alcanzó el máximo en 2007 con 330.000 toneladas. Desde 2007, esa generación de residuos empezó a disminuir suavemente, principalmente por las medidas impulsadas desde la Unión Europea

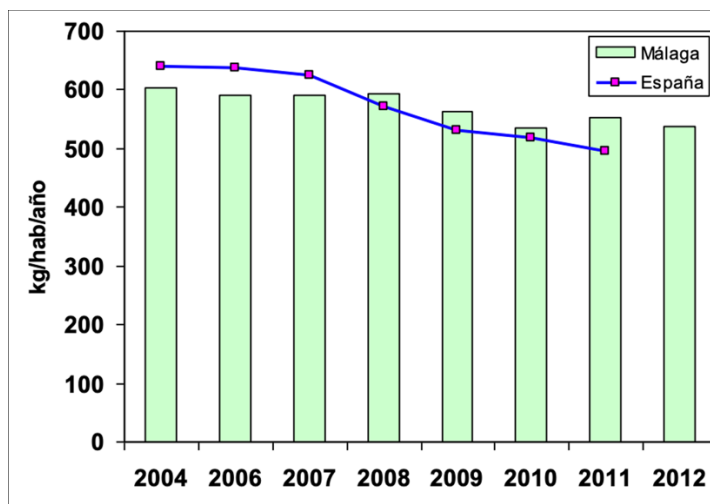


Ilustración 19. Generación de RSU por persona en España en 2012. Fuente: INE

En la anterior figura se puede apreciar la variación de generación de residuos urbanos por persona a lo largo de los años. Como se puede apreciar, en 2004 la media española se encontraba por debajo de la de Málaga. No obstante, a pesar de la que media malagueña fue disminuyendo poco a poco, la media española logró un mayor descenso, provocando que en 2012, la media de RSU generados en Málaga estuviese en 522.44 kg/persona al año, mientras que en España la media era de 484,8 kg/persona.

En Málaga capital, la gestión de los residuos sólidos urbanos es llevada exclusivamente por la empresa LIMASA III, en su respectiva planta de recuperación y compostaje conocida como Centro Ambiental Los Ruices. Este centro consta de distintas plantas para el tratamiento de los residuos, con la intención de reciclar y valorar energéticamente el mayor número de residuos posible. Se considerará que, al haber ya varias plantas de tratamiento de RSU en Málaga ciudad, sólo un 35% tratado por la central de Campanillas.

Cabe destacar que la gasificación por plasma es la fracción de materia orgánica que será aprovechada energéticamente para producir gas de síntesis, aunque se considerará el total de los residuos para el proceso.

Por último, para hacer una estimación de la energía que se puede extraer de los RSU de la ciudad de Málaga, se tiene que conocer el PCI. Este parámetro es fundamental y depende de la composición de los residuos y de su humedad. Este puede variar entre las 1200 y 1800 kcal/kg para los residuos sólidos urbanos brutos, mientras que se encuentra entre 1800 y 3500 kcal/kg para los rechazos de otros tratamientos. Por lo tanto, se va a asumir que el PCI en general es de 2500 kcal/kg. Como se ha comentado anteriormente, se va a considerar que el volumen de residuos que serán tratados en la central de Campanillas será el 30% del total generado en la ciudad de Málaga, lo que equivale a 74250 ton/año, que es el que se tenía en 2012. La energía que se obtendría sería:

$$89100 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{ton}} \times 2500 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = 185625 \frac{\text{Gcal}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ año}}{8760 \text{ horas}} = 25,43 \frac{\text{Gcal}}{\text{h}}$$

Lo cual equivale a una energía generada de 29,6 MW. Nótese que no se están teniendo en cuenta rendimientos de los equipos.

Residuos forestales

Andalucía es una comunidad autónoma que cuenta con grandes extensiones forestales, alcanzando los 4,6 millones de hectáreas. Todo el desarrollo e innovación a nivel de economía y empresa en relación a los montes andaluces tiene una gran importancia a la hora de cumplir objetivos como el desarrollo sostenible. El gran territorio forestal andaluz integra grandes parques naturales como el de Cabo de Gata (Almería), el de Cazorla y Segura (Jaén), Sierra Morena (Jaén) o Sierra de las Nieves (Málaga). El hecho de que hasta un 51% del total del territorio andaluz sea zona forestal, hace que sea una gran fuente de residuos, y los podemos encontrar en forma de corcho, cortezas, pastos, hongos, madera, biomasa para producir energía, etc. Por otro lado, la limpieza de los montes para evitar que se produzcan incendios, de los cuales ya se tienen ejemplos y pueden traer consecuencias nefastas, hace que se produzcan también muchos residuos que pueden ser utilizados.

Según datos extraídos de Consejería de Medio Ambiente (2006), en Andalucía hay disponible para recoger un total de 2,1 millones de toneladas. Un dato que choca bastante con el recogido en Consejería de Agricultura y Pesca, que dice que sólo alrededor de 390.000 toneladas de biomasa forestal fueron recogidas de media entre los años 2006 y 2010. Esto se traduce en que sólo un 18,5% del total de la biomasa forestal es recogida. Esta es una cifra bastante baja, y por lo tanto, un aumento en la recogida de este tipo de residuos puede ser de gran importancia para un desarrollo sostenible.

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

Tabla 5. Biomasa forestal disponible en cada provincia de Andalucía. Fuente: Consejería Medio Ambiente, Junta de Andalucía, 2006

No obstante, Málaga se encuentra junto a Almería y Cádiz como las provincias con menor volumen de biomasa forestal a extraer, teniendo disponible alrededor de 119.000 toneladas por año. La mayor fuente de estos residuos es la anteriormente mencionada Sierra de las Nieves. Consecuentemente, los residuos biomásicos forestales no serán los más importantes a tratar en nuestra planta, pero sí que representan un gran margen de mejora a aprovechar en nuestro proyecto. Además, debido a que la distancia entre el Parque Natural Sierra de las Nieves y la planta de Campanillas es la misma que desde el Parque hasta la planta de los Ruices, se va a considerar que un 50% de los residuos forestales van a llegar a cada planta.

A continuación, se va a calcular la energía que se obtendría a partir de la biomasa forestal. Para ello, se va a suponer, que se va a producir un incremento en el porcentaje de recogida de estos residuos, de un 3%, que es un número que se puede considerar realista. Es decir, el 21,5% de los residuos serán recogidos, lo que equivale a 25.650 toneladas aproximadamente. De estas, el 50% serán tratadas en la planta de Campanillas, lo que

equivale a 12.825 toneladas. En cuanto al PCI, debido a que hay especies con una alta densidad forestal que tienen un PCI entre 3500 y 5000 kcal/kg, se va a considerar 4000 kcal/kg, en base a la información proporcionada por la Junta de Andalucía. La energía generada sería la siguiente:

$$12.825 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{ton}} \times 4000 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = 51300 \frac{\text{Gcal}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ año}}{8760 \text{ horas}} = 5,85 \frac{\text{Gcal}}{\text{h}}$$

Lo cual equivale a aproximadamente 7 MW generados. De nuevo, hay que recalcar que no se están considerando pérdidas durante el proceso.

Residuos agrícolas

Andalucía se trata de una zona en la que las actividades primarias tienen un papel fundamental. Cuentan con las mayores superficies de España dedicadas al olivo, llegando a producirse en Andalucía más del 70% del aceite español. Otros muchos alimentos también son cultivados ocupando grandes terrenos, como es el caso del arroz, las hortalizas, frutas de temprana recogida, etc. Los cereales son cultivados principalmente en el valle Guadalquivir, mientras que los viñedos se encuentran en Almería, Córdoba y Huelva.

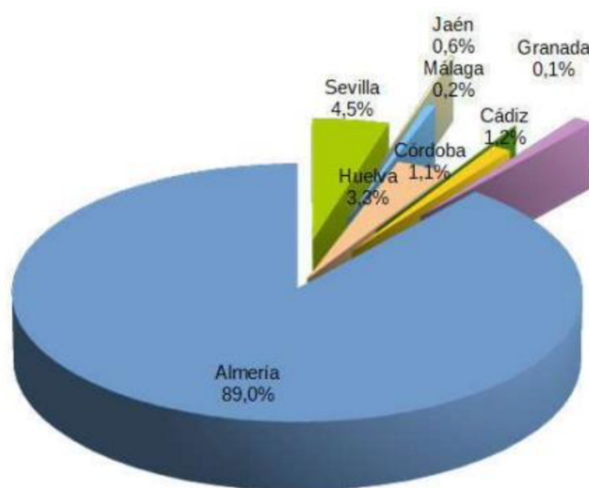


Ilustración 20. Residuos agrícolas generados en cada provincia de Andalucía. Fuente: FAG y MAG

En Andalucía se generaron en 2018 alrededor de 464.000 toneladas de residuos relacionados con las actividades primarias. Observando el gráfico anterior, se puede ver que la provincia que más residuos de este tipo genera, y por amplia diferencia, es Almería, acaparando un 89% del total. Le siguen Sevilla y Huelva, pero a una amplísima diferencia, con 4,5% y 3,3% respectivamente. Por otro lado, Málaga generó solamente un 0,2% de los residuos agrícolas. Esto equivale a 928 toneladas. Se trata de un número muy pequeño en comparación con las 297.000 toneladas de RSU y las 25650 toneladas de residuos forestales, sin considerar que el total debería ser dividido también con la planta de los Ruices. Por lo tanto, la aportación energética a nuestra planta va a ser mucho menor que la de las otras fuentes de residuos, por lo tanto, aunque podrían ser tratados y aportar un beneficio energético a la planta, en general simplemente traería pérdidas económicas, al no ser rentable su recogida y transporte. Es por ello, que estos residuos no van a ser tratados en la planta.

Recapitulación de residuos

Como se podido comprobar anteriormente, los residuos sólidos urbanos serán los grandes protagonistas de nuestra planta y los que proporcionarán la gestionabilidad del sistema, aportando 89.100 toneladas en un año. Esto se debe no sólo hace su volumen, sino que además se encuentran disponibles durante todo el año y se recogen con cierta facilidad. En una escala de importancia, los residuos forestales se encuentran en segundo lugar, ya que aunque la diferencia en volumen con los RSU es grande, sigue siendo una cantidad considerable a aportar, 12.825 toneladas en concreto. Y por último, la pequeña cantidad de residuos agrícolas disponibles en la ciudad de Málaga hace que, como se ha comentado, no sea rentable su recogida, y por lo tanto, no sean considerados y tratados en nuestra planta. Es decir, se va a considerar un volumen total de residuos de 101.925 toneladas.

Dimensionamiento de la planta

A continuación, se va a estudiar la capacidad que debe tener la planta. Por un lado, se tienen los residuos urbanos, que aportan 244 toneladas diarias. Por otro lado, por parte de los residuos forestales, llegan a la planta de Campanillas 35,2 toneladas al día. Esto hace

un total de 279,2 toneladas de residuos cada día. No obstante, debido a que la cantidad de residuos recibida no va a ser la misma cada día y sufrirá variaciones, hay que dejar cierto margen. Por lo tanto, una capacidad de 300 toneladas diarias sería apropiada para la planta. Además, es necesario de un almacén donde reservar los residuos cuando en meses como los de verano, en los que se van a recibir más de los residuos que se pueden tratar en planta, puedan ser almacenados. A continuación, se realiza una tabla con los residuos que se tratarían mensualmente en Campanillas, considerando valores estimados basados en información otorgada por la Junta de Andalucía para 2017:

Los ciclos combinados en España

Las centrales de ciclos combinados fueron construidas en España de una forma desmesurada. Entre 2002 y 2011 se construyeron hasta 67 ciclos, albergando una potencia total instalada de 25.353 MW, siendo la tecnología con más capacidad a nivel nacional. Para ello, se tuvo que afrontar una gran inversión, en concreto, de más de 13 millones de euros.

En el año 2008, antes de la crisis económica en España, todas las centrales de ciclo combinado generaron más de 91.000 GWh. Por otro lado, en 2013 se generaron alrededor de 25.000 GWh, lo que significa que la producción se redujo en más de un 72,5%. No obstante, esto no queda ahí sino que 2014, en los meses entre Enero y Julio se generó un 16% de la energía producida en el mismo periodo de tiempo en 2013, año en el que la generación ya estaba bastante baja. Un dato representativo de lo poco que están siendo aprovechadas estas centrales, es que funcionan su grado de utilidad es menor al 10%, al igual que las turbinas, que trabajan a un 10% de su capacidad.

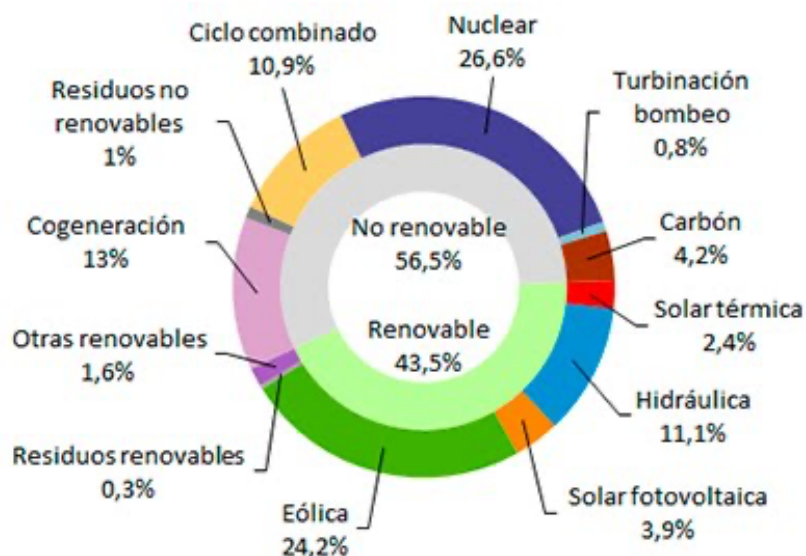


Ilustración 21. Estructura de la generación eléctrica en España. Fuente: DiarioRenovables

A día de hoy, en España representan el 23% de la potencia total, es decir entre un 15% y un 20% de la generación eléctrica. Su importancia recae en ser capaces de generar electricidad en momentos en los que las energías renovables no puedan ser utilizadas, debido a su aleatoriedad y baja gestionabilidad, ajustando así la demanda. No obstante, presentan una gran desventaja, ya que las emisiones de CO₂ en este tipo de plantas es bastante grande.

Responsables de emisiones de CO₂ - 2019

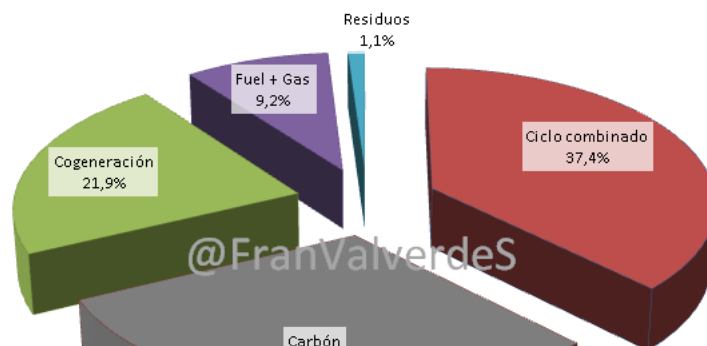


Ilustración 22. Responsables emisiones de dióxido de carbono (2019).
Fuente: El Periódico de la Energía, 2014

Como se puede observar en la figura, los ciclos combinados representan el 37,4% de las emisiones de CO₂ en España en 2019, llegando a superar a las emisiones producidas durante el consumo de carbón. Esto tiene una explicación, y es que, durante los últimos años, el uso del carbón como fuente de energía eléctrica se ha visto prácticamente sustituido por completo por otras fuentes de energía de carácter renovable.

La central de ciclo combinado de Campanillas

Se trata de una central termoeléctrica de ciclo combinado, situada en Campanillas. La central comenzó a funcionar en el año 2011, tras un periodo de prueba de dos años, por lo que se puede decir que es relativamente nueva. Originalmente, pertenecía a la empresa Fenosa, pero fue traspasada a Naturgy, que es la propietaria a día de hoy.

La inversión que se tuvo que realizar para instalar esta central fue de 250.000.000 euros. Como combustible se utiliza el gas natural para todas sus aplicaciones y cuenta con una potencia instalada de 421MW, mediante un sólo grupo y una eficiencia del 60%. Cuentan con 39 empleados y operan 1556 horas al año (PRTR España).

A nivel de producción, la central ha protagonizado un crecimiento en los últimos años. En 2014, fueron generados 1248 GWh, con un coeficiente de utilización del 34,3%. 4 años más tarde, en 2018, se produjo un gran aumento en la generación, llegando a producir un total de 2185 GWh, lo cual supone un coeficiente de utilización del 61%, valor ampliamente superior al de la media española, que es del 20%.

CAPÍTULO 7: Estudio económico

Se va a realizar un estudio económico sobre la instalación de la planta de gasificación por plasma en Campanillas. Por un lado, van a ser calculados los costes de instalación y explotación de la planta. Para ello, se va a considerar una vida útil de 30 años y que la inversión a realizar se produce en el primer año en su totalidad. Por otro lado, también se va a obtener la cantidad de gas de síntesis que va a ser generado y vendido. Además, se le tendrá que dar un precio de venta, ajustándolo al mercado actual.

Es importante recordar que va a ser considerado un volumen total de residuos entrantes a la planta de 101.925 toneladas/año.

Inversión inicial

En primer lugar, hay que empezar a analizar el coste total de la inversión inicial. Aquí se van a incluir todo el equipamiento necesario en la parte de gasificación por plasma, como es el caso de la antorcha de plasma, vasija, sistema de refrigeración, sistema de almacenamiento, etc. También se incluirá el coste de la implantación del ciclo Rankine para aprovechar el calor del gas de síntesis, así como el coste de almacenamiento del hidrógeno que no es utilizado en el ciclo Rankine. Para calcular los costes del proceso de gasificación por plasma, así como los del ciclo Rankine, se han sido utilizados los datos del proyecto de Rafael Bravo, dimensionándolos a este proyecto. Los resultados, quedan recogidos en la siguiente tabla:

INVERSIÓN	CAPEX €
Gasificación por plasma y almacenamiento de residuos	82.746.396
Almacenamiento de hidrógeno	20.225.575
Ciclo Rankine	8.923.948
TOTAL	111.895.919

Tabla 6. Inversión inicial realizada en la planta (Elaboración propia)

Como se puede observar, se tiene un coste total de 111.895.919 euros, a ser devuelto en 30 años. En la amortización de cada año tendrá que ser considerado el interés de inversión, que se prevé que será del 6,75%. La amortización puede calcularse de la siguiente forma:

$$f_a = 0,00675 * \frac{(1 + 0,00675)^{30}}{(1 + 0,00675)^{30} - 1} = 0,0786$$

$$A = 0,0786 * 111.895.919 = 8.795.019 \text{ €}$$

Costes de operación (OPEX)

Ahora se van a proceder a calcular los costes de operación u OPEX (Operational Expenditure) que se tendrán en la planta debido a su funcionamiento. Al igual que en las inversiones iniciales, van a ser considerados el proceso de gasificación por plasma, el almacenamiento del hidrógeno y el ciclo Rankine.

En primer lugar, los costes de operación del sistema de gasificación por plasma, se utilizarán los valores ofrecidos por Almudena Valenciano, 2015. Estos quedan recogidos a continuación:

- Electroodos → 7,5 €/Tonelada
- Productos químicos → 10 €/Tonelada
- Antorchas y mantenimiento refractario → 7,5 €/Tonelada
- Mantenimiento → 6 €/Tonelada

Respecto a los costes de operación del ciclo Rankine, van a ser calculados en función de la energía que genere el ciclo, al igual que ocurre con el almacenamiento del hidrógeno.

Finalmente, en cuanto al personal de la planta, se ha decidido que se van a contratar 20 empleados, siendo 15 de ellos operarios y 5 jefes de planta. Trabajarán 8 horas al día, resultando en un salario neto de 17.000€ para los operarios y 27000€ para los jefes de planta.

OPEX / Año	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Recepción de residuos (Tn)	101925	101925	101925	101925	101925
Producción de energía del ciclo Rankine (MWh)	3453,2	3453,2	3453,2	3453,2	3453,2
Producción de hidrógeno (MWh)	96095,2	96095,2	96095,2	96095,2	96095,2
FTE nº de operarios	20	20	20	20	20
FTE nº de jefes de planta	5	5	5	5	5
Factor de rotura del equipamiento	35%	35%	35%	35%	35%
Factor de Op. Y mantenm.	80%	80%	80%	80%	80%
Mantenimiento equipos de gasificación (€)					
Productos químicos	356737,5	356737,5	356737,5	356737,5	356737,5
Electrodos	267553,125	267553,125	267553,125	267553,125	267553,125
Antorchas	267553,125	267553,125	267553,125	267553,125	267553,125
Costes Op. Y mantenm. Ciclo Rankine (€)	207192	207192	207192	207192	207192
Nóminas de los operarios (€)	340000	340000	340000	340000	340000
Nóminas de los jefes de planta (€)	135000	135000	135000	135000	135000
TOTAL (€)	1574035,75	1574035,75	1574035,75	1574035,75	1574035,75

Tabla 7. Costes de operación OPEX (1) (Elaboración propia)

OPEX / Año	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
Recepción de residuos (Tn)	101925	101925	101925	101925	101925
Producción de energía del ciclo Rankine (MWh)	3453,2	3453,2	3453,2	3453,2	3453,2
Producción de hidrógeno (MWh)	96095,2	96095,2	96095,2	96095,2	96095,2
FTE nº de operarios	20	20	20	20	20
FTE nº de jefes de planta	5	5	5	5	5
Factor de rotura del equipamiento	35%	35%	35%	35%	35%
Factor de Op. Y mantenm.	80%	80%	80%	80%	80%
Mantenimiento equipos de gasificación (€)					
Productos químicos	356737,5	356737,5	356737,5	356737,5	356737,5
Electrodos	267553,125	267553,125	267553,125	267553,125	267553,125
Antorchas	267553,125	267553,125	267553,125	267553,125	267553,125
Costes Op. Y mantenm. Ciclo Rankine (€)	207192	207192	207192	207192	207192
Nóminas de los operarios (€)	340000	340000	340000	340000	340000
Nóminas de los jefes de planta (€)	135000	135000	135000	135000	135000
TOTAL (€)	1574035,75	1574035,75	1574035,75	1574035,75	1574035,75

Tabla 8. Costes de operación OPEX (2) (Elaboración propia)

OPEX / Año	AÑO 11	AÑO 12	AÑO 13	AÑO 14	AÑO 15
Recepción de residuos (Tn)	101925	101925	101925	101925	101925
Producción de energía del ciclo Rankine (MWh)	3453,2	3453,2	3453,2	3453,2	3453,2
Producción de hidrógeno (MWh)	96095,2	96095,2	96095,2	96095,2	96095,2
FTE nº de operarios	20	20	20	20	20
FTE nº de jefes de planta	5	5	5	5	5
Factor de rotura del equipamiento	70%	70%	70%	70%	70%
Factor de Op. Y mantenm.	90%	90%	90%	90%	90%
Mantenimiento equipos de gasificación (€)					
Productos químicos	713475	713475	713475	713475	713475
Electrodos	535106,25	535106,25	535106,25	535106,25	535106,25
Antorchas	535106,25	535106,25	535106,25	535106,25	535106,25
Costes Op. Y mantenm. Ciclo Rankine (€)	233091	233091	233091	233091	233091
Nóminas de los operarios (€)	340000	340000	340000	340000	340000
Nóminas de los jefes de planta (€)	135000	135000	135000	135000	135000
TOTAL (€)	2491778,5	2491778,5	2491778,5	2491778,5	2491778,5

Tabla 9. Costes de operación OPEX (3) (Elaboración propia)

OPEX / Año	AÑO 16	AÑO 17	AÑO 18	AÑO 19	AÑO 20
Recepción de residuos (Tn)	101925	101925	101925	101925	101925
Producción de energía del ciclo Rankine (MWh)	3453,2	3453,2	3453,2	3453,2	3453,2
Producción de hidrógeno (MWh)	96095,2	96095,2	96095,2	96095,2	96095,2
FTE nº de operarios	20	20	20	20	20
FTE nº de jefes de planta	5	5	5	5	5
Factor de rotura del equipamiento	70%	70%	70%	70%	70%
Factor de Op. Y mantenm.	90%	90%	90%	90%	90%
Mantenimiento equipos de gasificación (€)					
Productos químicos	713475	713475	713475	713475	713475
Electrodos	535106,25	535106,25	535106,25	535106,25	535106,25
Antorchas	535106,25	535106,25	535106,25	535106,25	535106,25
Costes Op. Y mantenm. Ciclo Rankine (€)	233091	233091	233091	233091	233091
Nóminas de los operarios (€)	340000	340000	340000	340000	340000
Nóminas de los jefes de planta (€)	135000	135000	135000	135000	135000
TOTAL (€)	2491778,5	2491778,5	2491778,5	2491778,5	2491778,5

Tabla 10. Costes de operación OPEX (4) (Elaboración propia)

OPEX / Año	AÑO 21	AÑO 22	AÑO 23	AÑO 24	AÑO 25
Recepción de residuos (Tn)	101925	101925	101925	101925	101925
Producción de energía del ciclo Rankine (MWh)	3453,2	3453,2	3453,2	3453,2	3453,2
Producción de hidrógeno (MWh)	96095,2	96095,2	96095,2	96095,2	96095,2
FTE nº de operarios	20	20	20	20	20
FTE nº de jefes de planta	5	5	5	5	5
Factor de rotura del equipamiento	100%	100%	100%	100%	100%
Factor de Op. Y mantenm.	100%	100%	100%	100%	100%
Mantenimiento equipos de gasificación (€)					
Productos químicos	1019250	1019250	1019250	1019250	1019250
Electrodos	764437,5	764437,5	764437,5	764437,5	764437,5
Antorchas	764437,5	764437,5	764437,5	764437,5	764437,5
Costes Op. Y mantenm. Ciclo Rankine (€)	258990	258990	258990	258990	258990
Nóminas de los operarios (€)	340000	340000	340000	340000	340000
Nóminas de los jefes de planta (€)	135000	135000	135000	135000	135000
TOTAL (€)	3282115	3282115	3282115	3282115	3282115

Tabla 11. Costes de operación OPEX (5) (Elaboración propia)

OPEX / Año	AÑO 26	AÑO 27	AÑO 28	AÑO 29	AÑO 30
Recepción de residuos (Tn)	101925	101925	101925	101925	101925
Producción de energía del ciclo Rankine (MWh)	3453,2	3453,2	3453,2	3453,2	3453,2
Producción de hidrógeno (MWh)	96095,2	96095,2	96095,2	96095,2	96095,2
FTE nº de operarios	20	20	20	20	20
FTE nº de jefes de planta	5	5	5	5	5
Factor de rotura del equipamiento	100%	100%	100%	100%	100%
Factor de Op. Y mantenm.	100%	100%	100%	100%	100%
Mantenimiento equipos de gasificación (€)					
Productos químicos	1019250	1019250	1019250	1019250	1019250
Electrodos	764437,5	764437,5	764437,5	764437,5	764437,5
Antorchas	764437,5	764437,5	764437,5	764437,5	764437,5
Costes Op. Y mantenm. Ciclo Rankine (€)	258990	258990	258990	258990	258990
Nóminas de los operarios (€)	340000	340000	340000	340000	340000
Nóminas de los jefes de planta (€)	135000	135000	135000	135000	135000
TOTAL (€)	3282115	3282115	3282115	3282115	3282115

Tabla 12. Costes de operación OPEX (6) (Elaboración propia)

Flujo de caja

A continuación, se va a realizar el flujo de caja. Se trata de recoger toda la información acerca de los recursos generados por la planta, incluyendo tanto los flujos de entrada como los de salida. Es decir, se analizan el balance anual de ingresos y gastos, considerando otros factores como impuestos, amortizaciones, etc. Se trata de uno de los indicadores más importantes de una empresa. Los resultados obtenidos quedan recogidos en dos tablas, por un lado se obtendrá el flujo de caja anual, y por otro el flujo de caja a lo largo del periodo de operación de la planta:

FLUJO DE CAJA			
	Ton/año	€/Ton	€/año
RSU	89.100	51	4.581.522
Biomasa forestal	12.825	52	666.900
Venta syngas			29.606.154
Ingresos totales			34.854.576
OPEX medio			2.449.310
EBITDA			32.405.266
Amortización anual			8.795.019
EBIT			23.610.247
Intereses			8.263.586
EBT			15.346.661
Impuesto sobre beneficios			3.836.665
Beneficio neto anual			11.509.995

Tabla 13. Flujo de caja anual medio (Elaboración propia)

FLUJO DE CAJA	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4
RSU		4.581.522	4.581.522	4.581.522	4.581.522
Biomasa forestal		666.900	666.900	666.900	666.900
Venta syngas		29.606.154	29.606.154	29.606.154	29.606.154
Ingresos totales		34.854.576	34.854.576	34.854.576	34.854.576
OPEX		1.574.036	1.574.036	1.574.036	1.574.036
EBITDA		33.280.540	33.280.540	33.280.540	33.280.540
Amortización anual		8.795.019	8.795.019	8.795.019	8.795.019
EBIT		24.485.521	24.485.521	24.485.521	24.485.521
Intereses		8.569.932	8.569.932	8.569.932	8.569.932
EBT		15.915.589	15.915.589	15.915.589	15.915.589
Impuesto sobre beneficios		4.297.209	4.297.209	4.297.209	4.297.209
Beneficio neto anual		11.618.380	11.618.380	11.618.380	11.618.380
Inversión	-	111.895.919			
Flujo de Caja OPERATIVO	-	111.895.919	11.618.380	11.618.380	11.618.380
Flujo de Caja ACUMULADO	-	111.895.919	100.277.539	88.659.160	77.040.780
				77.040.780	65.422.400

Tabla 14. Flujo de caja cada año (1) (Elaboración propia)

FLUJO DE CAJA	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9
RSU	4.581.522	4.581.522	4.581.522	4.581.522	4.581.522
Biomasa forestal	666.900	666.900	666.900	666.900	666.900
Venta syngas	29.606.154	29.606.154	29.606.154	29.606.154	29.606.154
Ingresos totales	34.854.576	34.854.576	34.854.576	34.854.576	34.854.576
OPEX	1.574.036	1.574.036	1.574.036	1.574.036	1.574.036
EBITDA	33.280.540	33.280.540	33.280.540	33.280.540	33.280.540
Amortización anual	8.795.019	8.795.019	8.795.019	8.795.019	8.795.019
EBIT	24.485.521	24.485.521	24.485.521	24.485.521	24.485.521
Intereses	8.569.932	8.569.932	8.569.932	8.569.932	8.569.932
EBT	15.915.589	15.915.589	15.915.589	15.915.589	15.915.589
Impuesto sobre beneficios	4.297.209	4.297.209	4.297.209	4.297.209	4.297.209
Beneficio neto anual	11.618.380	11.618.380	11.618.380	11.618.380	11.618.380
Inversión					
Flujo de Caja OPERATIVO	11.618.380	11.618.380	11.618.380	11.618.380	11.618.380
Flujo de Caja ACUMULADO	53.804.020	- 42.185.641	- 30.567.261	- 18.948.881	- 7.330.502

Tabla 15. Flujo de caja cada año (2) (Elaboración propia)

FLUJO DE CAJA	AÑO 10	AÑO 11	AÑO 12	AÑO 13	AÑO 14
RSU	4.581.522	4.581.522	4.581.522	4.581.522	4.581.522
Biomasa forestal	666.900	666.900	666.900	666.900	666.900
Venta syngas	29.606.154	29.606.154	29.606.154	29.606.154	29.606.154
Ingresos totales	34.854.576	34.854.576	34.854.576	34.854.576	34.854.576
OPEX	1.574.036	2.449.310	2.449.310	2.449.310	2.449.310
EBITDA	33.280.540	32.405.266	32.405.266	32.405.266	32.405.266
Amortización anual	8.795.019	8.795.019	8.795.019	8.795.019	8.795.019
EBIT	24.485.521	23.610.247	23.610.247	23.610.247	23.610.247
Intereses	8.569.932	8.263.586	8.263.586	8.263.586	8.263.586
EBT	15.915.589	15.346.661	15.346.661	15.346.661	15.346.661
Impuesto sobre beneficios	4.297.209	4.143.598	4.143.598	4.143.598	4.143.598
Beneficio neto anual	11.618.380	11.203.062	11.203.062	11.203.062	11.203.062
Inversión					
Flujo de Caja OPERATIVO	11.618.380	11.203.062	11.203.062	11.203.062	11.203.062
Flujo de Caja ACUMULADO	4.287.878	15.490.940	26.694.003	37.897.065	49.100.127

Tabla 16. Flujo de caja cada año (3) (Elaboración propia)

FLUJO DE CAJA	AÑO 15	AÑO 16	AÑO 17	AÑO 18	AÑO 19
RSU	4.581.522	4.581.522	4.581.522	4.581.522	4.581.522
Biomasa forestal	666.900	666.900	666.900	666.900	666.900
Venta syngas	29.606.154	29.606.154	29.606.154	29.606.154	29.606.154
Ingresos totales	34.854.576	34.854.576	34.854.576	34.854.576	34.854.576
OPEX	2.449.310	2.449.310	2.449.310	2.449.310	2.449.310
EBITDA	32.405.266	32.405.266	32.405.266	32.405.266	32.405.266
Amortización anual	8.795.019	8.795.019	8.795.019	8.795.019	8.795.019
EBIT	23.610.247	23.610.247	23.610.247	23.610.247	23.610.247
Intereses	8.263.586	8.263.586	8.263.586	8.263.586	8.263.586
EBT	15.346.661	15.346.661	15.346.661	15.346.661	15.346.661
Impuesto sobre beneficios	4.143.598	4.143.598	4.143.598	4.143.598	4.143.598
Beneficio neto anual	11.203.062	11.203.062	11.203.062	11.203.062	11.203.062
Inversión					
Flujo de Caja OPERATIVO	11.203.062	11.203.062	11.203.062	11.203.062	11.203.062
Flujo de Caja ACUMULADO	60.303.189	71.506.251	82.709.314	93.912.376	105.115.438

Tabla 17. Flujo de caja cada año (4) (Elaboración propia)

FLUJO DE CAJA	AÑO 20	AÑO 21	AÑO 22	AÑO 23	AÑO 24
RSU	4.581.522	4.581.522	4.581.522	4.581.522	4.581.522
Biomasa forestal	666.900	666.900	666.900	666.900	666.900
Venta syngas	29.606.154	29.606.154	29.606.154	29.606.154	29.606.154
Ingresos totales	34.854.576	34.854.576	34.854.576	34.854.576	34.854.576
OPEX	2.449.310	3.282.115	3.282.115	3.282.115	3.282.115
EBITDA	32.405.266	31.572.461	31.572.461	31.572.461	31.572.461
Amortización anual	8.795.019	8.795.019	8.795.019	8.795.019	8.795.019
EBIT	23.610.247	22.777.442	22.777.442	22.777.442	22.777.442
Intereses	8.263.586	7.972.105	7.972.105	7.972.105	7.972.105
EBT	15.346.661	14.805.337	14.805.337	14.805.337	14.805.337
Impuesto sobre beneficios	4.143.598	3.997.441	3.997.441	3.997.441	3.997.441
Beneficio neto anual	11.203.062	10.807.896	10.807.896	10.807.896	10.807.896
Inversión					
Flujo de Caja OPERATIVO	11.203.062	10.807.896	10.807.896	10.807.896	10.807.896
Flujo de Caja ACUMULADO	116.318.500	127.126.396	137.934.293	148.742.189	159.550.085

Tabla 18. Flujo de caja cada año (5) (Elaboración propia)

FLUJO DE CAJA	AÑO 25	AÑO 26	AÑO 27	AÑO 28	AÑO 29	AÑO 30
RSU	4.581.522	4.581.522	4.581.522	4.581.522	4.581.522	4.581.522
Biomasa forestal	666.900	666.900	666.900	666.900	666.900	666.900
Venta syngas	29.606.154	29.606.154	29.606.154	29.606.154	29.606.154	29.606.154
Ingresos totales	34.854.576	34.854.576	34.854.576	34.854.576	34.854.576	34.854.576
OPEX	3.282.115	3.282.115	3.282.115	3.282.115	3.282.115	3.282.115
EBITDA	31.572.461	31.572.461	31.572.461	31.572.461	31.572.461	31.572.461
Amortización anual	8.795.019	8.795.019	8.795.019	8.795.019	8.795.019	8.795.019
EBIT	22.777.442	22.777.442	22.777.442	22.777.442	22.777.442	22.777.442
Intereses	7.972.105	7.972.105	7.972.105	7.972.105	7.972.105	7.972.105
EBT	14.805.337	14.805.337	14.805.337	14.805.337	14.805.337	14.805.337
Impuesto sobre beneficios	3.997.441	3.997.441	3.997.441	3.997.441	3.997.441	3.997.441
Beneficio neto anual	10.807.896	10.807.896	10.807.896	10.807.896	10.807.896	10.807.896
Inversión						
Flujo de Caja OPERATIVO	10.807.896	10.807.896	10.807.896	10.807.896	10.807.896	10.807.896
Flujo de Caja ACUMULADO	170.357.981	181.165.878	191.973.774	202.781.670	213.589.566	224.397.462,45

Tabla 19. Flujo de caja cada año (6) (Elaboración propia)

Más tarde tendrá que analizarse si la puesta en marcha de la planta es rentable o los resultados que se han obtenido en el proyecto, no son suficientes para que éste sea viable. Ahora van a ser estudiadas las fuentes de ingresos de la planta:

Gestión de recogida de residuos

En primer lugar, hay que asegurar el abastecimiento de la planta mediante un flujo de residuos urbanos continuo, ya que como se ha comentado anteriormente, estos van a ser la principal fuente de residuos. Para ello, se deberá gestionar un contrato con el ayuntamiento de Málaga para llegar a un acuerdo respecto a los residuos que deben tratarse en la planta de Campanillas, y el precio al que hacerlo.

Según el Consorcio Provincial de Residuos Sólidos Urbanos de Málaga, el precio establecido en 2021 para los RSU en la provincia es de 46,20 €/tonelada. Para llegar a un acuerdo, será ofrecida una cifra de 51,42 €/tonelada. Con todo esto, los ingresos por la gestión de los residuos sólidos urbanos para el abastecimiento de la planta serían:

$$\text{€RSU} = 89.100 \text{ toneladas RSU} * 51,42 \frac{\text{€}}{\text{tonelada}} = 4.581.522\text{€}$$

Después, se debe pasar a la gestión de los residuos forestales. Como ya se sabe, se ha considerado que a la planta van a llegar 12.825 toneladas de biomasa forestal. En cuanto a su precio, este se desconoce. No obstante, a modo de estimación, se va a considerar que el precio de la tonelada de los residuos forestales es de 52€. Así, se obtendría:

$$\text{€Biomasa Forestal} = 12.825 \text{ toneladas RSU} * 52 \frac{\text{€}}{\text{tonelada}} = 666.900\text{€}$$

Venta del gas de síntesis

Como ya se sabe, esta será la principal fuente de ingresos de la planta. El gas será vendido a la central de ciclo combinado de Campanillas, y lo que se exceda será vendido a la red de gas de España. Para asignar un precio de venta al gas de síntesis, primero deberá ser

estudiado el precio con sus principales competidores: gas natural y petróleo. Una vez analizado, se le establecerá un precio de venta.

En la planta se prevé que se sean tratados 101.925 toneladas de residuos anualmente, lo que se traduce en 11.635 kg/hr. Según los datos ofrecidos por la empresa Open Ms (Antonio García, 2021), de 550 kg/hr de residuos se obtiene 1MW de energía (PCBGET). Por lo tanto, mediante el tratamiento de esos 11.635 kg/hr se producirían 21,1 MW. No obstante, para tener una estimación más conservadora se va a considerar que se generan 17,5MW. Por otro lado, y considerando que el rendimiento de nuestro ciclo Rankine calculado anteriormente es de 39%, el gas de síntesis generado será 40 MWh, lo cual equivale a 144.000 MJ/hr.

A continuación, se debe calcular el volumen de gas de síntesis que se produce en la planta. Esto se logrará conociendo la energía que se obtendría de la planta, y el PCI del syngas. Este último, se calcula de la siguiente forma (Adi Sesotyo):

$$PCI_{syngas} = 22,32\% PCI_{CO} + 38,84\% PCI_{H_2} + 2,44\% PCI_{CO_2} + 35,3\% PCI_{H_2O} + 0,47\% PCI_{N_2}$$

$$PCI_{syngas} = 0,2232 * 11,51 \frac{MJ}{Nm^3} + 0,3884 * 10,78 \frac{MJ}{Nm^3} + 0,0244 * PCI_{CO_2} + 0,353 * 9,64 \frac{MJ}{Nm^3} + 0,0047 * 0 \frac{MJ}{Nm^3} = 10,41 \frac{MJ}{Nm^3}$$

Por lo tanto, una vez sabiendo que $PCI_{syngas} = 10,41 \frac{MJ}{Nm^3}$, ya se puede calcular el volumen de gas de síntesis producido:

$$Volumen Syngas = \frac{Energía_{prod}}{PCI_{syngas}} = \frac{144.000 \frac{MJ}{hr}}{10,41 \frac{MJ}{Nm^3}} = 13.832 Nm^3/hr$$

A partir de aquí ya se pueden obtener otros datos como la relación de volúmenes entre gas de síntesis producido y tonelada de residuos tratada:

$$\frac{Volumen syngas}{Toneladas residuos} = \frac{13.832 \frac{Nm^3}{hr}}{11,5 \frac{ton}{hr}} = 1202 \frac{Nm^3}{ton}$$

Por último, queda proponer tanto a la central de ciclo combinado de Campanillas, como a la red de gas de España, la oferta acerca del gas de síntesis producido. Para ello, se toma la hipótesis de que 2/3 del gas producido son vendidos a la central y el otro 1/3 a la red de gas. Es decir $801 \frac{Nm^3}{ton}$ pasarían a ser vendidos a la planta, lo que equivale a $9370 \frac{kWh}{ton}$

Se debe realizar un estudio sobre el precio al que va a ser vendido el gas. Este ha sufrido un encarecimiento muy grande en los últimos tiempos debido a una serie de factores como la reducción de reservas para el gas, la existencia de una gran competencia con Asia y la dependencia que se tiene en España con otros países. Además, la guerra entre Rusia y Ucrania ha hecho que el problema sea más grave, provocando que el precio del gas se disparase en el mes de marzo de 2022. En enero de 2021 el gas natural tenía un precio de 0.048 €/kWh, mientras que en abril de 2022 ascendió hasta los 0,0497 €/kWh. Se ha considerado que, para mantener cierto grado de prudencia, el gas de síntesis será valorado en 0,031 €/kWh.

$$\begin{aligned} \text{Ingresos por Venta de Syngas (€)} &= 101.925 \text{ Ton} * 9370 \frac{KWh}{ton} * 0,031 \frac{€}{kWh} \\ &= 29.606.154 \text{ €} \end{aligned}$$

Recuperación de la inversión

Por último, para determinar si se trata de una operación rentable o no, se van a analizar dos parámetros, el payback y el ROI (Return on investment). Mediante ellos, se podrá conocer el momento exacto en el que se recuperará la inversión inicial y comprobar la rentabilidad que puede llegar a tener la inversión.

En primer lugar, se va a empezar a tratar el payback. Se trata de un criterio mediante el cual, las inversiones financieras son analizadas para conocer el tiempo necesario en recuperar ese dinero invertido, algo que es sumamente importante a la hora de decidir si realizar la inversión o no.

Volviendo a la anterior tabla 29 del flujo de caja, se puede apreciar que el proyecto comienza a ser rentable a partir del año 5. No obstante, no sabemos en qué momento

exacto ocurre esto. Para ello se va a utilizar el payback. La fórmula para obtener este dato es la siguiente:

$$\text{Payback} = a + \frac{\text{inversión}_{\text{inicial}} - b}{\text{Flujo de caja}}$$

Siendo a el periodo previo a la recuperación de la inversión y b la suma de todos los flujos anteriores a ese periodo a . Como flujo de caja se debe utilizar el correspondiente al año en el que la inversión es recuperada. Así:

$$\text{Payback} = 10 + \frac{111.895.919 - 104.565.417}{11.618.380} = 10,63 \text{ años}$$

Por otro lado, el parámetro ROI es uno de los indicadores más interesantes a la hora de realizar una inversión. Mediante él, se podrá apreciar la rentabilidad a la que puede aspirar una inversión. Puede resultar en un valor positivo o negativo, dependiendo de si la empresa gana dinero o lo pierde. Se calcula de la siguiente forma:

$$\text{ROI} = \frac{\text{beneficio antes de impuestos}}{\text{inversión realizada}} = \frac{15.346.661}{111.895.919} = 13,7\%$$

Como se puede comprobar, la inversión resulta rentable.

BIBLIOGRAFIA:

A. Atkins and M. Escudier, A dictionary of mechanical engineering. Oxford: Oxford University Press, 2013.

Berbel Vecino , Julio. Fundación Pública Andaluza Centro De Estudios Andaluces.

(s.f)http://www.centrodeestudiosandaluces.es/datos/paginas/factoria/programas/a2020/2020_prospectivatecnologica.pdf.

Bravo, Rafael. Aprovechamiento De Los Residuos Biomásicos Urbanos Para La Generación De Energía En Forma De Hidrógeno. 2022.

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

de Aragón , Ester. Microrredes Inteligentes: Una Forma De Mejorar La Eficiencia, El Medio Ambiente y De Evitar Las Interrupciones De Energía. 2020.

Delgado Taberner, Rafael. “Producción Limpia De Electricidad Mediante La Gasificación Del Carbón I. Introducción.” (s.f) PDF Descargar Libre, <https://docplayer.es/58297785-Produccion-limpia-de-electricidad-mediante-la-gasificacion-del-carbon-i-introduccion.html>.

“El Sector Forestal En Andalucía.” Junta De Andalucía (s.f)
<https://www.juntadeandalucia.es/temas/sectores/forestal/sector-forestal.html>

“España Circular 2030, Estrategia Española De Economía Circular.” (s.f)
Miteco.gob.es, 2018, https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/espanacircular2030_def1_tcm30-509532_mod_tcm30-509532.pdf.

Fernández García, Mario. Proyecto Fin De Carrera Ingeniería Química - US.
https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/20491/fichero/PFC_150901_rev2.pdf. 2019

Frías Romero , Laura. “Recuperación Energética De Los Residuos Urbanos Con Tecnología Por Plasma.” Recuperación Energética De Los Residuos Urbanos Con Gasificación Por Plasma, 2008, https://docplayer.es/44092287-Recuperacion-energetica-de-los-residuos-urbanos-con-tecnologia-por-plasma.html#show_full_text.

García , Antonio. Recuperación Energética Sostenible De Residuos Biomásicos Urbanos, Agrícolas y Forestales. 2019.

García Herruzo, Francisco, and José María Rodríguez Maroto. (s.f)
Www.oma-malaga.com. https://www.oma-malaga.com/agendaurbana/subidas/archivos/arc_268.pdf.

Guamán Sánchez, Cristian Fernando. Diseño De Una Microrred Basada En Renovables Para Suministrar ... 2017,

https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83964/P030153316_TFM_14867660672271275997430684805011.pdf?sequence=2.

Guerra Rosales, Nicolás Alonso. *GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE GASIFICACIÓN POR PLASMA DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES*. 2016,

[https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/143598/Generaci%
-el%
s%
-el%
s%](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/143598/Generaci%c3%b3n-el%c3%a9ctrica-mediante-gasificaci%c3%b3n-por-plasma-de-residuos-s%c3%b3lidos-municipales.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Hidalgo, J. *El Proceso De Gasificación y Vitricación De Residuos Por Plasma Con Optimización De La Producción Eléctrica*. 2006,
<http://www.fundacionenergia.es/PDFs/Biomada%2006/J.Hidalgo.pdf>.

Munguía, Sergio Fernández. “Generación Eléctrica En España: MARZO DE 2019.” *DiarioRenovables*,
<https://www.diariorenovables.com/2019/04/generacion-electrica-en-espana-marzo-de-2019.html>.

“Parques Naturales De Andalucía: Disfruta De Los Paisajes Sureños.” *Ruralidays.com* - Blog, 20 Jan. 2020,
<https://www.ruralidays.com/viajar/naturaleza/parques-naturales-de-andalucia/>.

Plasma Corporation , Westinghouse. “Gasificación Por Plasma De Westinghouse.” PDF Descargar Libre, <https://docplayer.es/44093875-Gasificacion-por-plasma-de-westinghouse.html>.

Roca, Ramón, et al. “Ciclos Combinados En España O Cómo Desperdiciar 13.100 Millones.” *El Periódico De La Energía*, 24 Sept. 2014, <https://elperiodicodelaenergia.com/ciclos-combinados-en-espana-o-como-desperdiciar-13-100-millones/>.

Roca, Ramón, et al. “Ciclos Combinados En España O Cómo Desperdiciar 13.100 Millones.” *El Periódico De La Energía*, 24 Sept. 2014, <https://elperiodicodelaenergia.com/ciclos-combinados-en-espana-o-como-desperdiciar-13-100-millones/>.

Santiago, por Oscar, et al. “Tipos De Pilas De Combustible y Su Clasificación.” *Apilados*, 16 Aug. 2018, <https://apilados.com/blog/tipos-de-pilas-de-combustible-su-clasificacion/>.

Sesotyo, Adi. *Plasma Gasification Modeling of Municipal Solid Waste from Jatibarang Landfill in Semarang, Indonesia*. 2019, https://www.researchgate.net/publication/336849590_Plasma_gasification_modeling_of_municipal_solid_waste_from_Jatibarang_Landfill_in_Semarang_Indonesia_analyzing_its_performance_parameters_for_energy_potential.

Strickland, Jonathan. *How Plasma Converters Work-Plasma Gasification Facilities*. 2007.

Valenciano , Almudena. *Estudio De Una Microrred Inteligente En La Ciudad De Huesca*. 2015.